

TESIS DOCTORAL

Autor: Miguel Angel Callejas Ortego

Director: Dr. José Ignacio Pérez Calero

ANÁLISIS Y ESTUDIO METODOLÓGICO DE LAS APLICACIONES DE LOS MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA Y SUPERELASTICIDAD EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE LA EDIFICACIÓN E INGENIERÍA DEL TERRENO
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Septiembre 2015



AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a las siguientes personas, la ayuda que han prestado para la elaboración de esta Tesis:

Dr. Arquitecto José I. P. Calero. Profesor de Estructuras de la E.T.S. de Arquitectura de Sevilla. A mi maestro, Director de Tesis y amigo, que con su apoyo incondicional durante la carrera primero y en el transcurso de este trabajo después, ha impulsado y mantenido viva la ilusión por la investigación.

Dr. Ingeniero Burkhard Maas. Inguls GmbH. Alemania. Quien ha creído en estas ideas y que tanto me ha ayudado.

Dr. Francesco Butera, Dr. Luca Fumagalli y Dr. Marco Citro. SAES Getters S.p.A. Italia. Gracias a los tres por vuestra ayuda.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Jesús Mínguez Algarra. Profesor Asociado de la Universidad de Burgos. Gracias por tu colaboración.

Pero, sobre todo, esta Tesis está dedicada a mi familia. Por su amor y paciencia sin los que no hubiera sido posible.



INDICE

i	RESUMEN.....	5
ii	ABSTRACT.....	6
1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	ANTECEDENTES.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	METODOLOGÍA.....	20
2	ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1	MATERIALES INTELIGENTES.....	23
2.2	POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA (SMP).....	26
2.3	POLÍMEROS ELECTROACTIVOS (EAP).....	27
2.4	MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA MAGNÉTICA (MSMA-FSMA).....	30
2.5	MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.....	31
2.6	CERÁMICAS CON MEMORIA DE FORMA (SMC).....	35
2.7	ALEACIONES METÁLICAS CON MEMORIA DE FORMA (SMA).....	35
2.8	COMPOSITES DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMAHC).....	36
2.9	MEDICINA.....	38
2.10	AEROESPACIAL.....	39
2.11	INDUSTRIA.....	42
2.12	ARQUITECTURA Y URBANISMO.....	50



3	ANÁLISIS y ESTUDIO METODOLÓGICO de las APLICACIONES de las SMA en ARQUITECTURA y URBANISMO.....	67
3.1	ALEACIONES DE NICKEL-TITANIO: NiTiNOL.....	69
3.2	DISEÑO DE DISPOSITIVO ACTUADOR.....	96
3.3	CÁLCULO DE DISPOSITIVO ACTUADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	103
3.4	APLICACIONES.....	132
	3.4.1 TOLDO DE VENTANA.....	133
	3.4.2 PROTECCIÓN DE FACHADAS.....	146
	3.4.3 TOLDO DE PATIO, CALLE O PLAZA.....	149
	3.4.4 PARASOL INTELIGENTE.....	159
	3.4.5 DISPOSITIVOS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA.....	164
4	CONCLUSIONES.....	166
5	BIBLIOGRAFÍA.....	170
6	LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS.....	182
7	ANEXOS.....	195



i RESUMEN

Las aleaciones con memoria de forma y superelasticidad, así como su aplicación en Arquitectura y Urbanismo, son el objeto central de esta Tesis.

Se investiga los llamados materiales inteligentes y sus diferentes respuestas ante un estímulo externo. Dentro de ellos, las aleaciones de Nickel y Titanio se analizan con detalle. Estos materiales, nos pueden ayudar a transformar la envolvente de nuestros edificios, para hacerlas dinámicas y sensibles a los cambios del exterior. Materiales inteligentes que, combinados con los tradicionales, mejoran su funcionamiento, actuando cuando son necesarios o cuando se les solicita, de manera silenciosa, sin más energía que la que toma del sol, con casi nulo mantenimiento, alta fiabilidad y óptima durabilidad.

Se analiza el Estado del Arte en el uso de materiales inteligentes en general y de las aleaciones con memoria de forma en particular, en diversos campos de la Industria, Tecnología Aeroespacial y Medicina, donde se han logrado grandes avances. Así mismo, se estudian las escasas muestras de aplicación en Arquitectura y Urbanismo, además de los ejemplos en los que su utilización, podría mejorar la realidad construida.

Un dispositivo de actuación o actuador basado en aleaciones con memoria de forma y dependiente de la temperatura, es diseñado, construido y probado a escala real. Además, se realiza un cálculo mediante el Método de Elementos Finitos, de este actuador. Los resultados son analizados.

Por último, se realizan varias pruebas con dicho dispositivo, en dos casos principales de aplicación en elementos ligeros y generadores de sombra, además de otros casos de gran interés. Se incluye descripción detallada, así como las conclusiones sobre las mismas.



ii ABSTRACT

Shape Memory-Superelastic Alloys, as well as their applications in Architecture are the central subject of this Thesis.

Different responses under an external stimuli of the so called Smart Materials are investigated. Among them, Nickel-Titanium alloys are studied in detail. These materials can help us to transform our buildings envelope in order to make them dynamic and sensitive to the outside changes. Combining traditional and new smart materials, we can enhance their performance in a passive or active way, noiseless, with the only energy of the sun, very low maintenance and high reliability and service life.

The State of the Art in the use of Smart materials in general and the Shape Memory Alloys in particular is analyzed in different fields of Industry, Aerospace Technology and Medicine, where big achievements have been made. The few examples from usage of SMA in Architecture are studied, as well as several potential cases in which SMA would improve what it's already built.

A shape memory alloy based actuator, temperature dependent is designed, made and tested in real scale. Also an analysis by Finite Elements Method is run. Results are analyzed.

Finally, several tests are made on two main case studies on the application of the actuator on light, shadow-generator elements, as well as some others. Detailed description and conclusions are included.

*“¡Levántate espléndido, oh Atón viviente, señor eterno!
Eres radiante, bello, poderoso,
Tu amor es grande, inmenso.
Tus rayos iluminan a todos los rostros,
Tu brillo da vida a los corazones,
Cuando llenas las Dos Tierras con tu amor.
Cuando te pones en la región occidental del cielo,
(los seres) se duermen como si murieran,
Sus cabezas se cubren, sus narices se paran,
Hasta que amaneces en la región oriental del cielo...”*



1

INTRODUCCIÓN



M. Lichtheim, *Ancient Egyptian Literature: Volume II: The New Kingdom*, vol. II, Los Angeles: University of California Press, 1973, p. 91.

1 INTRODUCCIÓN

Es conocido que la Vía Láctea se encuentra en un cúmulo de galaxias llamado Grupo Local. Dentro de esta galaxia, se encuentra nuestro sistema solar, donde la Tierra es el tercer planeta más cercano al sol. Nos encontramos en la zona “habitable”. Más lejos, congelaríamos. Más cerca, nos abrasaríamos.

Sabemos que la estrella de nuestro sistema, proporciona la energía necesaria para la vida en la Tierra. Esta fuente de calor, está a mitad de camino de su vida útil. Cuando llegue a su fin, el Sol quemará el resto de su combustible, aumentará de volumen y destruirá a los planetas cercanos, incluido el nuestro. Después, se convertirá en una gigante roja, que finalmente colapsará hasta formar una enana blanca.

El Sol, nos protege de la radiación cósmica, que es repelida por la Heliosfera. Sin ella, esta radiación sería fatal. A su vez, la Tierra posee protección contra la radiación de nuestra propia estrella. La atmósfera, con su capa de ozono y el campo magnético, creado por el núcleo metálico del interior, son los encargados de protegernos.

Para que el Sol muera, queda aún muchísimo tiempo. En torno a los 5000 millones de años. Por lo tanto, podemos considerar que su energía es un recurso infinito y además gratuito. No hay un solo día, en el que el sol no salga por el horizonte, para proporcionarnos su luz y su calor. Se estima que el suministro de petróleo mundial, se habrá agotado en el 2025, si seguimos al ritmo de consumo actual. (TVE, 2015) Por otro lado, la Dra. Gwak Ji-Hye¹, del Instituto de Investigación de la Energía de Corea, nos da el siguiente dato: “La cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol cada minuto, es suficiente como para que todo el mundo la pueda utilizar durante un año.” Y añade: “La cantidad de energía almacenada en forma fósil, en todo el mundo, es la misma que la que recibe la Tierra del Sol en tres días.” Esto significa, que la Tierra recibe una cantidad extraordinaria de energía del Sol. A pesar de todo, sólo el 45% llega a la superficie del planeta. Aun así, es más que suficiente.

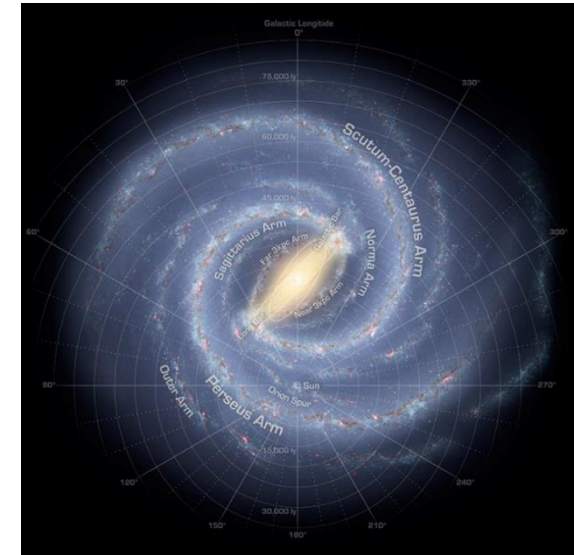


Fig. 1. Vista idealizada de la Vía Láctea. Vista superior

¹ TVE (Dirección). (2015). *Las cinco claves. Quinta parte: El Sol* [Película]. España. Recuperado el 2015, de <http://www.rtve.es/alcarta/videos/documenta2/documenta2-cinco-claves-5-parte-sol/3250320/>

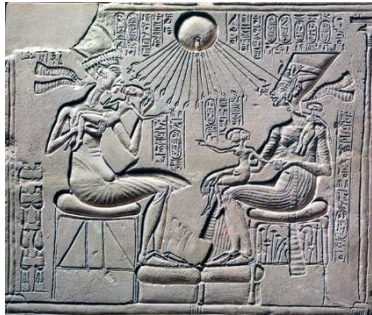


Fig. 2. El Faraón y la familia real bajo los rayos de Atón

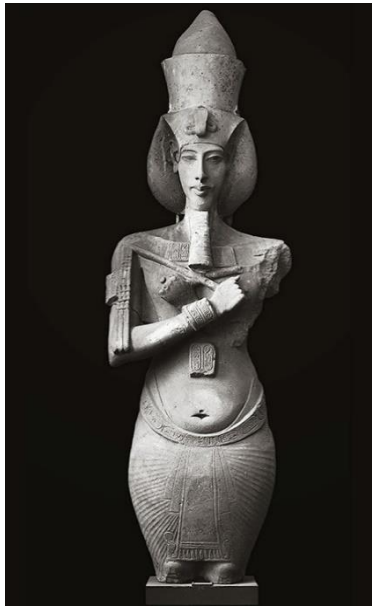


Fig. 3. El Faraón Akenatón

Recordemos cómo la importancia de la estrella de nuestro sistema solar, era bien apreciada por los antiguos. Su posición y movimiento eran conocidos. No en vano, se construyeron edificios que marcaban con gran exactitud los solsticios, como en Stonehenge (UK), donde en ese preciso momento del año, el Sol salía por el punto del eje central del monumento.

También, en el antiguo Egipto, se edificaron grandes templos, a partir de la dinastía V, dedicados al astro rey. El Libro de los Muertos² egipcio relata el viaje que realiza el Faraón tras su muerte. Este viaje culmina con la vuelta a la vida, escenificada cada día con la salida del Sol.

Pero quizá el máximo culto a nuestra estrella llegó de la mano del Faraón Akenatón, décimo rey de la dinastía XVIII. Él transformó la sociedad que hasta entonces rendía culto sobre todo a Amón, entre otras deidades. Declaró que solo había un dios: Atón, el disco solar que alentaba la vida en la Tierra y trasladó la capital desde Tebas, a una nueva ciudad en el desierto: Aketatón (actual Amarna) para consolidar lo que ha sido, la primera sociedad monoteísta conocida.

Akenatón, el llamado “Faraón Hereje”, construyó esta ciudad para rendir culto a Atón, el Rey Sol. En ella, todo estaba dispuesto para que los rayos solares llegaran a todos los espacios. Los amplios patios, permitían el soleamiento y las representaciones de Atón estaban a la vista de todos. En las estelas del Faraón con la Gran Esposa Real Nefertiti y su familia, aparece el disco solar con sus rayos terminados en forma de manos con el signo “anj” o “vida”. Con estas representaciones, se quería dar a entender que Atón, era quien proveía de vida a toda la Tierra.

En general, en la mayoría de culturas antiguas, se tenía un conocimiento profundo del Sol. En América del Sur, los incas desarrollaron un calendario, mediante la observación del Sol y la Luna. Los hindúes entendían el universo como una noche de sueño de Brahma, protegida por el dios Shiva. Podemos encontrar referencias desde el año 2000 A.C. Los griegos pensaban que el Sol era el dios Helios, que salía todos los días con su carro, de Este a Oeste. Los egipcios, calcularon el año en 365 días y un cuarto y los romanos, con el emperador Julio César, introdujeron el año bisiesto.

² M. Lichtheim, Ancient Egyptian Literature: Volume II: The New Kingdom, vol. II, Los Angeles: University of California Press, 1973, p. 91

Es sabido, que el gran científico Nikola Tesla, afirmaba que la energía que proviene del Sol, está presente en todas las cosas de nuestro planeta. Transformándola en electricidad, podía ser transmitida inalámbricamente a todas las partes del mundo. Energía inagotable y gratuita para todos, gracias al Sol. Solo tenemos que capturarla y convertirla en electricidad. Sin embargo, la historia no prestó atención a este inventor y hemos abusado de combustibles como la madera, carbón y el petróleo. La contaminación de la atmósfera, el incremento de la temperatura global o el aumento de ciertas enfermedades, son las consecuencias.

“Preguntémonos primero: ¿De dónde viene toda la fuerza motriz? ¿Cuál es el resorte que lo impulsa todo?”...Y todo este movimiento, desde el surgir del poderoso océano, hasta el sutil movimiento de nuestro pensamiento, no tienen más que una causa común. Toda esa energía proviene de un único origen, una sola fuente, el Sol. El sol es el resorte que lo impulsa todo.” (Tesla, 1900)³

En la actualidad, utilizamos tecnología directamente heredada de sus ideas. Su objetivo fue el de intentar mejorar la vida humana, por medio de sus inventos. Desgraciadamente, esta tecnología también ha servido para el desarrollo armamentístico o ha sido vetada por motivos comerciales, como sabemos.

Sir Martin Rees⁴, el famoso cosmólogo británico, nos advierte que nuestra era es “especial”: *“Es la primera vez en la historia de este planeta (que sepamos) que una especie que habita en él, el ser humano, tiene la capacidad de destruirlo.” (Rees, 2005)*

Todo nuevo gran descubrimiento científico, conlleva importantes beneficios, pero también grandes peligros si se emplea inadecuadamente. La energía nuclear, por ejemplo, nos proporciona una fuente enorme de energía. A cambio, los desastres ocasionales son una realidad, como lo demuestran los casos de Chernóbil (1986) o Fukushima (2011) en donde

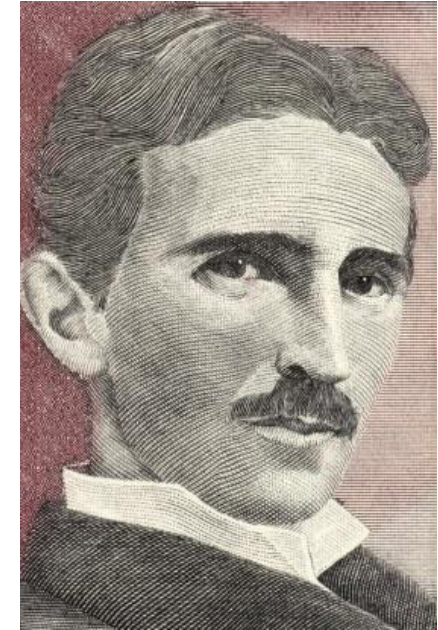


Fig. 4. Nikola Tesla

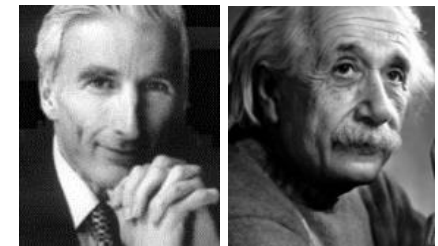


Fig. 5. Sir Martin Rees y A. Einstein

³ Tesla, N. (Junio de 1900). The Problem of Increasing Human Energy. *Century Illustrated Magazine*.

⁴ Rees, S. M. (Dirección). (2005). *Es este nuestro último siglo?* [Película]. UK. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de https://www.ted.com/talks/martin_rees_asks_is_this_our_final_century?language=es#t-834364



Fig. 6. Robert Oppenheimer y explosión nuclear

cuatro años después, todavía no se puede acceder a la zona contaminada con radiación. El profesor Albert Einstein, escribió al presidente Roosevelt avisando sobre la posibilidad de poder fabricar grandes bombas a partir del uranio y ante el miedo de que los nazis tuvieran también esta tecnología, se inició el proyecto Manhattan para el desarrollo de dos bombas, una de uranio y otra de plutonio.

El proyecto estuvo dirigido por el norteamericano Robert Oppenheimer y contó, entre otros, con el italiano Fermi o el danés Niels Bhor, teniendo como punto final, el lanzamiento de las dos bombas de Hiroshima y Nagasaki.

La primera prueba nuclear en nuestro planeta se realizó en el estado de New Mexico (USA), el 16 de julio de 1945. Algunos opinan que esta no fue la primera y que, en la antigüedad, ya se conocían estas armas, descritas en textos como el hindú Mahabharata. No en vano, el propio Oppenheimer confesó haber recordado unos versos del texto sagrado mientras presenciaba la prueba:


“Una columna de humo incandescente y llama tan brillante, como miles de soles en todo su esplendor. Una explosión perpendicular generando una enorme columna de humo, que generaba círculos concéntricos de ondas, que se extendían como parasoles gigantes”.



Fig. 7. W. J. Buehler, descubridor del Nitinol

Anecdóticamente, dos años más tarde y en el mismo sitio, (New Mexico) se sitúa el relato conocido como “Incidente Roswell”, de 1947, en el que varios objetos voladores no identificados, supuestamente habrían impactado en el suelo. Algunos años después, en 1961, el investigador **William J. Buehler** del **Naval Ordnance Laboratory**⁵, investigaba cómo mejorar el comportamiento de las cabezas de los misiles subacuáticos, que debían ser resistentes, pero también tener gran flexibilidad. Buehler descubrió un material aparentemente con las mismas características que el encontrado en Roswell. Probando con varias aleaciones, accidentalmente cayó una muestra al suelo y al científico le resultó extraño el sonido que produjo. Este sonido, diferente al esperado, le hizo sospechar que aquella muestra tenía algo particular. Fabricó varias tiras y observó un comportamiento muy especial, a pesar de deformarlo, el metal volvía a su forma original, mostrando una elasticidad inusual.

⁵ Naval Ordnance Laboratory (NOL) fue el laboratorio de la Marina estadounidense, donde se desarrolló la aleación conocida como NITINOL



El recién descubierto NiTiNOL, debe sus siglas a los dos metales que lo componen (Nickel y Titanio) y al lugar donde fue descubierto. Aleaciones que tienen la propiedad de recordar una forma prediseñada. En frío se deforman plásticamente, pero cuando se calientan tienen un comportamiento elástico, muy por encima del resto de materiales, junto con una alta resistencia a los esfuerzos más comunes de tracción, compresión, corte, flexión, etc.

La combinación de metales seleccionados, en unas proporciones determinadas, junto con un tratamiento térmico específico, generan estas propiedades en la aleación. Los átomos que la forman, cambian su disposición cristalina y por tanto las características del material. En concreto las aleaciones de Níquel y Titanio al 50% (Nitinol o NiTi), entre otras, producen las propiedades de superelasticidad y memoria de forma.

Estos materiales responden a los cambios de temperatura, de manera que por debajo de un determinado valor, la estructura cristalina permite deformarlos pero por encima de él se vuelven más resistentes y elásticos. Además, durante este cambio de forma se ejerce una fuerza considerable.

Los cambios de temperatura, que activan el efecto de cambio o memoria de forma, pueden ser, en Arquitectura, dependientes del Sol. El Sol y sus efectos es uno de los principales condicionantes a la hora de proyectar edificios y espacios urbanos. Relacionándolo con las aleaciones con memoria de forma, podemos hacer una Arquitectura cambiante en su forma, para satisfacer necesidades térmicas, acústicas, estéticas, funcionales, etc.

Durante las últimas décadas, hemos tomado conciencia, de la importancia de reducir el consumo de energía en la edificación. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE)⁶, somos usuarios de muchos edificios a lo largo de nuestra vida. No solo nuestro hogar o lugar de trabajo, sino los que nos prestan servicios como las administraciones, hospitales, juzgados, etc. Alrededor del 20% de toda la energía que producimos se consume en el interior de los mismos. Además, este porcentaje va en aumento. Las necesidades de energía incluyen: calefacción, refrigeración, iluminación, producción de agua caliente sanitaria, domótica, ofimática, etc.

Este porcentaje llega hasta el 40% para el caso de la Unión Europea. Según la directiva 2010/31/UE, relativa a la eficiencia energética: *“El 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios. El sector se encuentra en fase de expansión, lo que hará aumentar el consumo de energía. Por ello, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes*

⁶ Ministerio de Industria, E. y. (s.f.). IDAE. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de IDAE: <http://www.idae.es/index.php/idpag.23/re/menu.344/mod.pags/mem.detalle>



renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero.” (UE, 2010)

Una de las aplicaciones de estudio en la presente Tesis, es la de mover elementos ligeros textiles, para generar sombras e intentar reducir así, el consumo de energía eléctrica en aparatos de aire acondicionado. La directiva europea⁷ señala: *“En los últimos años se ha observado un aumento de instalaciones de aire acondicionado en los países europeos. Esto da lugar a problemas importantes en las horas de máxima carga, aumentando el coste de la electricidad y perturbando el balance energético de esos países. Debe darse prioridad a las estrategias que mejoren el comportamiento térmico de los edificios en el verano. Con esta finalidad deben propiciarse medidas que eviten el sobrecalentamiento, tales como el sombreado y la suficiente inercia térmica en la construcción de edificios, así como perfeccionar y aplicar técnicas de enfriamiento pasivo, en particular, aquellas que mejoren las condiciones ambientales interiores y creen microclimas en el entorno de los edificios.”*

Por lo tanto, queda claro que el consumo de energía en los edificios, es un problema que los países miembros de la UE y de todo el mundo, deben afrontar. En España, actualmente existen medidas como el Certificado de Eficiencia Energética. Es obligatorio para toda obra de nueva construcción, así como para los inmuebles en alquiler o venta. En él, se certifica el consumo del edificio y se califica el mismo según unas letras que van desde la A, para aquellos que consumen menos hasta la letra G, para los que consumen más. Además, existen ayudas económicas para la rehabilitación o mejora energética.

También es interesante que ya se estén construyendo edificios con nulo o casi nulo consumo energético. En este sentido hay que decir que son muy buenas iniciativas, pero debemos ir más allá. Debemos hacer edificios que, no solo consuman poca o ninguna energía, sino que la produzcan (balance positivo). La superficie desarrollada de una construcción es muy grande. Sus cubiertas-fachadas son el futuro espacio de captación de energía. Ya lo son algunas de las cubiertas de muchos de ellos, donde se instalan placas fotovoltaicas, termo-solares o algún dispositivo eólico.

Pero podemos hacer más. Podemos hacer trabajar a nuestras fachadas, donde hay mucha superficie. Evidentemente, para sistemas de generación de energía, las orientaciones útiles solo serán algunas de ellas, como las orientaciones Este por las mañanas, Sur durante la parte central del día y las Oeste por las tardes, en el hemisferio norte y a la inversa en el Sur. Para evitar el excesivo soleamiento en climas calurosos o aumentarlo en climas fríos, existen numerosos recursos que la Arquitectura ha venido utilizando. Durante el llamado Movimiento Moderno o Estilo Internacional, el arquitecto suizo Le Corbusier, desarrolló el “brise soleil” o disposición de

⁷ UE. (19 de 05 de 2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 153/13-L.

elementos horizontales en fachadas sur y verticales e inclinados en fachadas este y oeste para controlar el soleamiento. El arquitecto aplicó estos sistemas pasivos de protección solar, que permitían la entrada de sol durante las estaciones frías del año e impedía el excesivo soleamiento en las estaciones calurosas (Fig. 8).

Esta simple pero efectiva medida ayuda a regular la temperatura del espacio interior de forma pasiva, esto es, no es necesario que los habitantes de ese espacio actúen sobre el sistema. Obtuvo resultados satisfactorios en edificios como la Unidad de Habitación de Marsella en 1945, un edificio residencial en el que el brise soleil de hormigón armado, se integra en las fachadas para combatir el soleamiento (Ruiz, 2011). Otro de sus edificios, en este caso la Torre de las Sombras en Chandigarh (1957-65) constituye una verdadera demostración de las teorías del arquitecto. La disposición de los elementos de cada fachada, corresponde a la mayor garantía de protección solar del interior (Siret & Harzallah, 2006).

Estos sistemas pasivos, mejoran la eficiencia energética de los edificios, en el sentido de que reducen el consumo pero, como hemos dicho, podemos y debemos ir más lejos. Con el uso de los nuevos materiales podemos generar energía y hacer que el balance sea positivo.

1.1 ANTECEDENTES

El uso de aleaciones con memoria de forma en Arquitectura, no está muy extendido. Los pocos ejemplos, sin embargo, son de gran interés, como se verá más adelante. En otros ámbitos, en especial el de la Medicina, tiene grandes casos de aplicación con éxito. Dispositivos vasculares, stents o aparatos dentales, son comunes hoy día. También en la tecnología Aeroespacial, donde estos materiales sustituyen motores, actuadores o dispositivos pirotécnicos de accionamiento, entre otros. Incluso los vehículos que utilizamos cada día para desplazarnos, tienen en su interior piezas fabricadas con estas aleaciones.

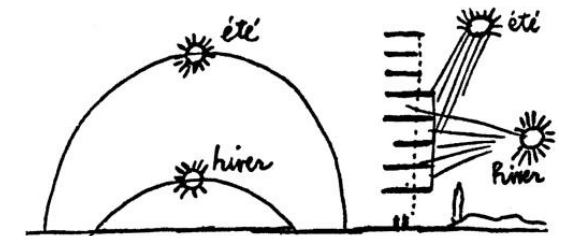


Fig. 8. Le Corbusier. Torre de las Sombras En Chandigarh, India y Unidad de Habitación en Marsella, Francia



Pero, como se ha dicho, en Arquitectura no ha habido tal progresión. Existen algunos sistemas de protección solar y de control de climatización, que son muestras del aprovechamiento de la propiedad de memoria de forma de este material. En otros casos, se aprovecha la otra propiedad, la alta elasticidad o superelasticidad, para mejorar el comportamiento de las estructuras de los edificios ante un movimiento sísmico, entre otros ejemplos.

En el pasado y hasta la actualidad, los sistemas de protección solar pasivos, tienen una geometría invariable, mientras que los activos, funcionan accionados manualmente o mediante motores. Desde este punto de partida y como condicionante de investigación, se plantea la modificación de esas geometrías, para hacerlas variables y dinámicas, así como la unificación de las funciones de sentir y actuar, de los sistemas activos, en un mismo elemento. El propio material mide la temperatura, cambia la forma y actúa. La propia Arquitectura siente los cambios de temperatura y modifica su geometría, sin motores, mecanismos o elementos externos. La envolvente “inteligente” y multicapa, es un todo indivisible y dinámico, que reacciona sin consumir energía. Lo hace solo cuando es necesario, de manera natural.

El aumento de la demanda de estas aleaciones, ha repercutido en la progresiva mejora de los procesos de fabricación y provocado, además, el progresivo descenso del precio de venta. Esto, unido al gran e inexplorado potencial de aplicación en Arquitectura, constituye una de las principales motivaciones para esta investigación.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de esta Tesis es estudiar las posibles aplicaciones de los llamados materiales con memoria de forma y superelasticidad en Arquitectura. Se pretende demostrar que son válidos para diversos fines, entre ellos, el más importante es el de mover superficies y elementos ligeros tales como textiles, laminados de fibra, etc. para generar sombra y así intentar reducir el consumo de energía eléctrica derivado del uso de aparatos de aire acondicionado, además de mejorar el confort.

Sin duda, es objetivo también la “especialización”. Aparentemente, estos materiales son bastante desconocidos, más allá del ámbito profesional y de investigación. Por ello, es importante profundizar en el estudio de los mismos, para buscar la especialización y poder dar soluciones técnicas óptimas, en su aplicación al uso cotidiano.

Parece indudable, tras el éxito de estas aleaciones en otros campos y la casi nula experiencia en Arquitectura, que se abre un gran nicho de aplicaciones, en las que la utilización de los materiales inteligentes requerirá de un conocimiento más profundo de los mismos y de los edificios o el espacio donde se utilicen.

El principal caso de estudio en esta investigación, se concentrará principalmente en los “toldos inteligentes”. Estos toldos, se espera generen sombra durante el día y se oculten durante la noche, para intentar no distorsionar la imagen de la ciudad nocturna, que en la actualidad y en época calurosa, son elementos extraños a la vista. No permiten la visión del cielo y tampoco la correcta disipación del calor generado por el sol durante el día y acumulado en las calles y plazas entoldadas.

Será por lo tanto, uno de los objetivos de este trabajo, estudiar, construir y hacer un prototipo o prueba suficiente para demostrar la viabilidad real de este proyecto.

Otro objetivo más, es el desarrollo de un actuador basado en Nitinol. Un dispositivo que, fijado a otro elemento, punto fijo o móvil, palanca, barra, etc. permita desplazar dos puntos, con una fuerza determinada, mediante la activación del material de memoria de forma que se ha utilizado.

Este y otros dispositivos como este, podrían servir para generar o hacernos ahorrar energía en los edificios. Otro de los objetivos, por lo tanto, es estudiar si sería posible aprovechar el calor acumulado en los mismos o en sus instalaciones, para que sirva de energía activadora de las aleaciones inteligentes y generar movimiento y posterior electricidad, efectos funcionales o estéticos. Pero sobre todo, para crear sombras y combatir el soleamiento directo, en países de clima caluroso. En los edificios y en los espacios abiertos como calles y plazas, donde podrían funcionar mediante el calor del sol, de manera pasiva o activados por la electricidad generada por paneles fotovoltaicos, de manera activa, por ejemplo.

El fin buscado es dotar a la Arquitectura, de sistemas autónomos que la mejoren, no solo en términos energéticos, sino también de confort. Sistemas que pueden ser controlados manualmente, si se desea, pero que pueden funcionar automáticamente, sin que el usuario tenga que recordar su activación o su mantenimiento. Los actuales sistemas de gestión de estos sistemas, controlados por tablets y teléfonos móviles, son solo el primer paso al futuro que, será y debe ser sin duda, que la Arquitectura sirva a las personas y no al revés.



Fig. 9. Toldos en terrazas de restaurantes



Fig. 10. Control doméstico desde tlf. móvil y aparato de A.A.



Fig. 11. Edificios con fachadas expuestas al sol

Es preciso insistir, en que nuestros edificios de hoy en día, deben cambiar. No podemos tener la misma envolvente rígida y estática durante todo el año. Las condiciones climatológicas exteriores cambian continuamente, en un ciclo completo anual. Sin embargo, nuestras fachadas, cubiertas y huecos no lo hacen, permanecen estáticos ante una situación dinámica. Es un error. Ante situaciones cambiantes, Arquitectura cambiante. La piel de nuestros edificios, puede cambiar dinámicamente ante los estímulos del exterior de manera inteligente, sin mecanismos complicados y sin más aporte de energía para su funcionamiento, que la propia variación de la temperatura del exterior. Los mecanismos, sensores y actuadores, serán los propios materiales y sus cualidades de cambio de forma y superelasticidad. La piel del edificio cambiará con la variación de temperatura o por cantidad de iluminación, de una manera natural, como lo hacen el ojo o la piel humanos. Esta investigación, pretende contribuir a la búsqueda de una nueva Arquitectura, inteligente, natural, dinámica y generadora de energía.

OBJETIVOS:

- **Adquirir un conocimiento específico, de estos materiales, suficiente para poder desarrollar aplicaciones en Arquitectura.**

La mejor forma de estudiar el uso de los nuevos materiales en Arquitectura es conociendo en profundidad la naturaleza de los mismos. Solo entonces se estará en condiciones óptimas para realizar ese estudio.

Para llegar a ese conocimiento, se analizarán las diversas publicaciones sobre el mismo. Se realizarán pruebas del material para ver su comportamiento ante diversas situaciones. La adquisición necesaria de cantidades de material en diferentes formas, tipos de aleación, de diversos países y fabricantes llevará también al conocimiento, además de sus valores de calidad de fabricación, precios, etc. Asimismo, durante la duración de esta investigación, se observará el comportamiento a través del tiempo y en condiciones de funcionamiento reales, tanto en exterior, como en interior, considerando como un ciclo completo, un año con sus cuatro estaciones. De esta manera se conocerá como afectan los factores ambientales y de servicio a lo largo del tiempo para poder analizar la viabilidad de su utilización en los edificios y espacios de la ciudad.



- **Demostrar que son posibles esas aplicaciones.**

Es importante demostrar, que es posible la aplicación de estos materiales en Arquitectura. Para ello, se realizarán pruebas y se construirán maquetas, que muestren el funcionamiento de los mismos en elementos arquitectónicos, especialmente los de protección solar. Estas maquetas o pruebas de concepto servirán además para mostrar las posibilidades de esta tecnología, en ferias, congresos y entornos académicos o de investigación. Deben ser también los primeros pasos, para el desarrollo de futuras aplicaciones de mayor complejidad.

- **Establecer una metodología de trabajo que permita avanzar en futuras investigaciones.**

La dinámica de trabajo de esta investigación servirá para establecer una metodología para el futuro. Una forma de investigación que con el paso del tiempo se irá perfeccionando para sentar las bases de los próximos proyectos. Este modo de trabajo nace del verdadero interés por profundizar en el conocimiento de estos materiales, para poder desarrollar productos y aplicarlos posteriormente.

- **Contacto con profesionales y empresas especializados.**

Establecer contacto con otros investigadores, profesionales y empresas del sector, es fundamental, porque ellos tienen el conocimiento y la tecnología necesarios para impulsar esta investigación. Desgraciadamente, en España hay pocas personas, empresas o instituciones a las que acudir. Sin embargo, en el resto del mundo y en especial en otros países de la UE, sí que las hay. A través de medios informáticos, es posible intercambiar resultados, opiniones o plantear dudas con otros investigadores. También participando en congresos y contactando con empresas dedicadas a la fabricación e investigación.

El feedback o retroalimentación entre investigadores y empresas, es un camino necesario, que lleva a actualizar continuamente el estado del arte.

- **Diseño y Cálculo de dispositivo actuador.**

Se estudiará, construirá, probará y llegado el caso, se protegerá legalmente el dispositivo actuador basado Nitinol, mediante solicitud de patente. Incluso, se hará una publicación de un artículo en un congreso científico especializado en estos dispositivos. Se caracterizará en la medida de lo posible para conocer sus cualidades de fuerza, desplazamiento, velocidad, tiempo, etc.



1.3 METODOLOGÍA

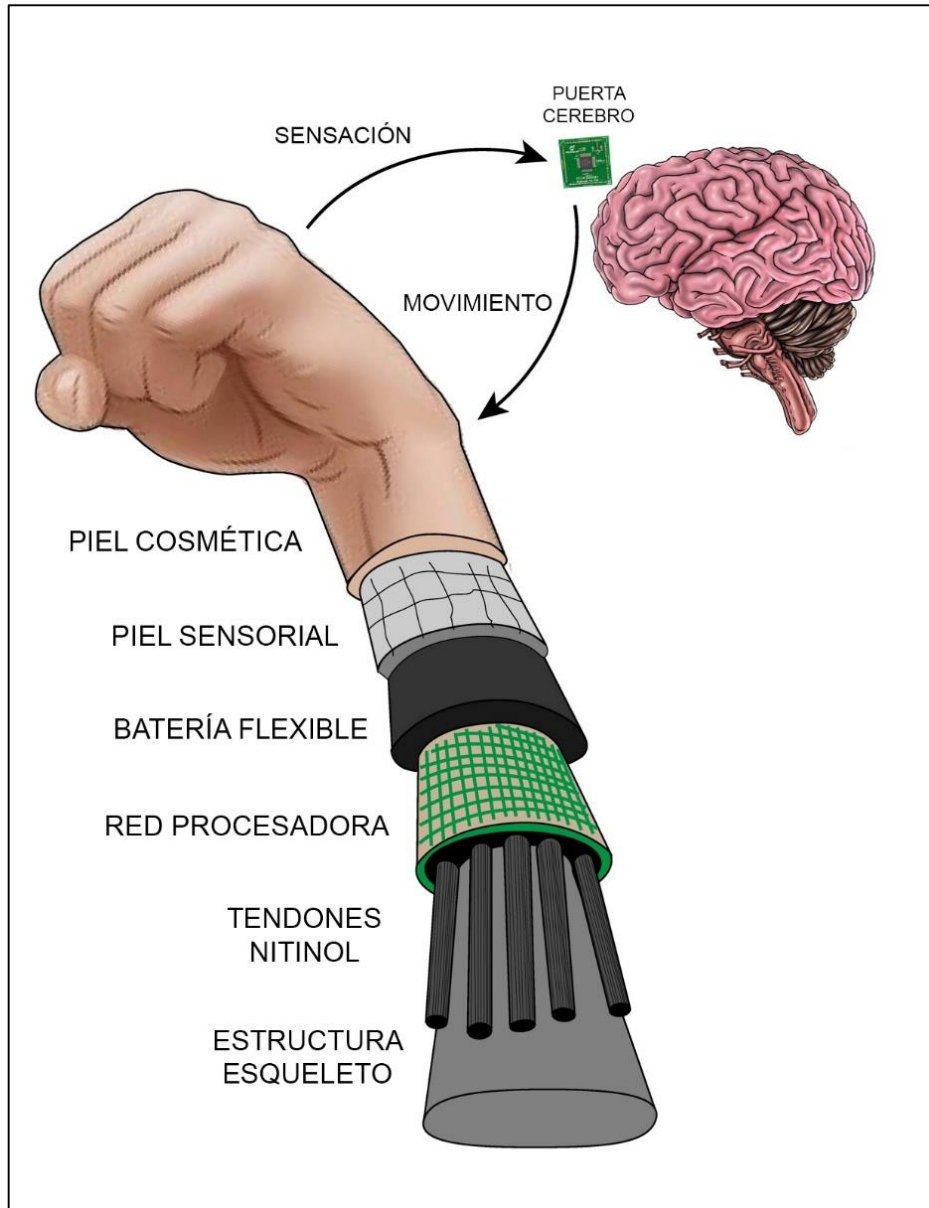
Para conseguir estos objetivos, se plantea una metodología mixta de trabajo, basada rigurosamente en el Método científico empírico, con una doble vertiente teórica y experimental. Por ello, se han planteado las bases teóricas que dan fundamento a esta Tesis por lo que se realizarán cálculos informáticos, (por el Método de Elementos Finitos) y se compararán los resultados con los prototipos construidos. Se adoptará el Sistema Internacional de Unidades (S.I.).

Por otro lado, el autor deberá llegar a conocer, las cualidades y propiedades de estas aleaciones, con un nivel y rigor suficientes, como para poder dimensionar y calcular el tipo, geometría y caracterización de cada una de ellas, así como aplicarlos a los diferentes casos estudiados. Además, es importante conectar con los especialistas internacionales en este campo y poder adquirir el tipo de producto deseado, conociendo el material, especificaciones y diferentes formas de terminación.

Para a su aplicación en Arquitectura y Urbanismo, se estudiarán sus parámetros (propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, estéticas y de acabado, etc). Y en general, como se ha dicho, las que interesan, a la hora de crear o actuar sobre un edificio o espacio. Sus propiedades atómicas y cristalográficas, se analizarán por la importancia que tienen en su comportamiento de cambio de forma y superelasticidad, con lo que se comprenderán y entenderán sus cualidades y se estudiará sus aplicaciones en el campo de la Arquitectura y Urbanismo, que es donde queremos obtener éxito en los objetivos propuestos.

Se construirán diversos prototipos para el análisis de las diferentes aplicaciones propuestas. Se probarán y analizarán en condiciones reales de servicio.

En el caso de los toldos, se probarán al exterior, en la cubierta de un edificio y también en el patio de una vivienda. A lo largo de todo el año, se realizarán diferentes pruebas para conocer su comportamiento, en un ciclo completo de cuatro estaciones. Todas estas pruebas se harán en las condiciones climatológicas de la ciudad de Sevilla, aunque la metodología utilizada se puede implementar, con total rigurosidad, para otras variables climáticas de nuestro interés.



D: *Hola HAL. Abre las puertas.*

H: *Lo siento Dave. Me temo que no puedo hacer eso.*

2

ESTADO DEL ARTE



(Kubrick, 1968) S. Kubrick, Dirección, *2001: Una odisea del espacio*. [Película]. UK-USA: MGM-Kubrick Productions, 1968.

2.1 MATERIALES INTELIGENTES

Denominamos “materiales inteligentes”, término derivado del inglés “smart materials”, a aquellos que, ante un estímulo externo, muestran una respuesta, como consecuencia de las propiedades particulares de los mismos. Estas respuestas pueden ser un cambio de forma, generación de electricidad, cambio de color, volumen, opacidad, campo magnético, etc. El término “inteligente” se usa aquí como la propiedad de esos materiales de responder o de mostrar una respuesta, que otros materiales convencionales no proporcionarían.

Los avances tecnológicos de las últimas décadas, nos permiten crear estos materiales y diseñarlos para fines específicos. Aplicaciones concretas que se pueden realizar, solo y exclusivamente gracias a ellos. Como sabemos, la tecnología se desarrolla o se ha desarrollado en gran parte a intereses bélicos, médicos o aeroespaciales, pero esos avances también llegan con el tiempo a otros campos. Podemos observar lo que se hace en estas disciplinas y aplicarlo en Arquitectura.

Como creadores de edificios tenemos que aprovechar estos avances y aplicarlos en nuestros proyectos. Con ellos podemos hacer mejores edificios, con mejor funcionamiento y confort para los usuarios de los mismos.

Por ello, se analizan algunos ejemplos interesantes a este respecto, como por ejemplo el “vidrio inteligente”, que ha creado una empresa española⁸, (Levy, 2015) que cambia su transmisión óptica, dependiendo de su exposición al aire húmedo o seco (Fig. 12.)

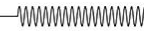
Existen vidrios que hacen esto, pero su coste de fabricación es de varios miles de euros por metro cuadrado, mientras que los españoles proponen hacerlo por solo varios céntimos, adhiriendo finas películas de un material altamente poroso. Dotando a una vivienda con estos vidrios y según los autores, se ahorra en calefacción y aire acondicionado.

Se trata de un sistema pasivo en el que el usuario de la vivienda no puede intervenir en su control, pero aun así es interesante ya que, verdaderamente, solo será necesaria esta intervención, para momentos muy puntuales.



Fig. 12. Vivienda con vidrio inteligente

⁸ Levy, D. (11 de 02 de 2015). *www.diariodesevilla.com*. Recuperado el 12 de 02 de 2015, de <http://www.diariodesevilla.es/article/tecnologia/1960342/vidrio/inteligente/con/sello/espanol.html>



Otro ejemplo de materiales inteligentes, son aquellos que cambian de color ante un estímulo externo. Pueden hacerlo ante la exposición a la luz, ante cambios de temperatura, presión o impulsos eléctricos. Quizá en Arquitectura resultan interesantes aquellos que cambian de color, ante un cambio de temperatura (termocrómicos⁹).

El propio calor humano puede ser el estímulo que lo activa y estos materiales “delatarían” a los usuarios de que, ese sillón o ese espacio, han sido utilizados recientemente. Su marca quedaría reflejada en los materiales, mediante un cambio de color. Incluso la intensidad en ese cambio, podría darnos una estimación del tiempo que ha pasado desde que ha sido utilizado ese espacio.

Es el caso de Shi Yuan, que utiliza papel decorativo para las paredes, que cambia de color ante los cambios de temperatura (Fig. 13). (Yuan, 2014)

Con respecto al color, hay que decir que ya existen, desde hace tiempo, los materiales fotoluminiscentes que captan la energía de la luz que les llega y la devuelve cuando hay oscuridad. Estos se han venido utilizando con éxito en muchas aplicaciones como prendas reflectantes para seguridad vial o en artículos de juguetería, por ejemplo.

Un ejemplo del uso de materiales fotoluminiscentes¹⁰ en Arquitectura es el edificio creado por el arquitecto catalán Enric Ruiz-Geli. El Media-ICT (Fig. 14), construido en el distrito 22@ de Barcelona en 2010, fue premiado como mejor edificio del mundo en 2010 por la WAF. En este edificio, se ha pintado la estructura metálica con pintura fotoluminiscente verde. Ello permite ahorrar en



Fig. 13. Papel de pared termocrómico decorativo

⁹ La Termocromía se entiende como la capacidad de un material de cambiar de color ante un cambio de temperatura.

¹⁰ La Fotoluminiscencia es la emisión de luz, por parte de un material, como consecuencia de la absorción previa de una radiación



Fig. 14. Edificio inteligente Media-TIC. Arq. Ruiz-Geli



Fig. 15. Lavabo termocrómico y piscina con dibujo para saber la temperatura del agua

energía eléctrica, ya que parte del nivel de iluminación requerido es aportado por la propia propiedad de este material. (Ruiz-Geli, 2010)

Este edificio además, cuenta con varios sistemas de ahorro energético y ha obtenido la máxima calificación energética (letra A). Su fachada con cojines de ETFE (Etil-Tetra-Flúor-Etileno) permite gran aislamiento térmico y acústico. Además, numerosos sensores detectan los niveles de iluminación natural, para corregir la artificial.

Pero volviendo a los materiales termocrómicos, otra aplicación es su uso en aparatos sanitarios como lavabos, duchas o incluso piscinas. El calor del agua caliente, hace que el material reaccione cambiando de color. La extensión y la intensidad del cambio de color, muestran la cantidad y duración del uso. En el caso de la piscina, es útil para conocer visualmente, antes de entrar, a qué temperatura está el agua. (Ritter, 2007)

No podemos olvidar, la tecnología fotovoltaica, como una muestra más de material que reacciona ante la luz. En este caso, transformándola en energía eléctrica. Los cristales fotovoltaicos, están avanzando y ganando en eficiencia, con un pronóstico para el futuro todavía mejor. Con el tiempo, estas celdas serán cada vez más pequeñas y eficientes y nuestros edificios no solo serán autosuficientes, sino que su producción de energía eléctrica será mayor que su demanda. Los edificios serán o deberán ser verdaderos centros de generación energética. Los avances en la tecnología del grafeno, prometen baterías delgadas, flexibles y ligeras, así como rápidos ciclos de carga y descarga, que ayudarán a almacenar la energía para consumirla por la noche.

Existen muchos más materiales de los llamados “inteligentes”. Estos son solo algunos de ellos. Pero, los que se van a estudiar en profundidad, son los llamados materiales con memoria de forma o su término en inglés: “Shape Memory Alloys” SMA, (aleaciones con memoria de forma).

Veamos, en detalle, algunos tipos de materiales inteligentes, con propiedad de memoria de forma.



2.2 POLIMEROS CON MEMORIA DE FORMA (SMP)

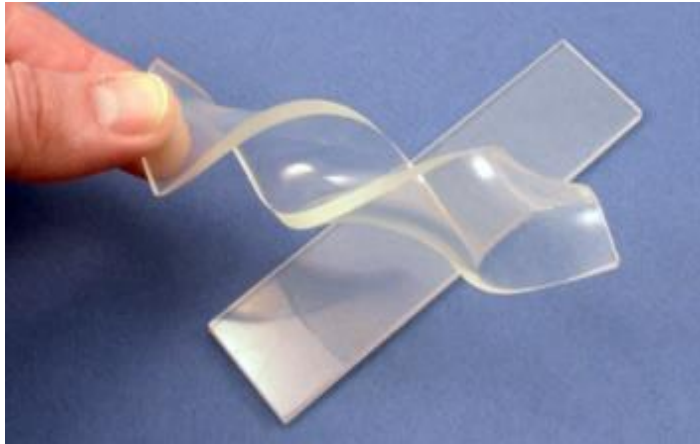


Fig. 16. Polímero con memoria de forma en sus dos estados.

Un polímero con memoria de forma (SMP), es un material que tiene una forma temporal y otra permanente. La forma permanente es la forma “recordada” y esta se fija durante el proceso de fabricación y el efecto es determinado por las diferentes clases de estructuras de polímeros utilizados (Fig. 16).

La fuente de energía usada para activar el SMP¹¹ es normalmente térmica, aunque también se puede activar mediante electromagnetismo. (Anson, 1999)

Este es otro campo de desarrollo que tiene mucho potencial. Recientemente, se está estudiando el comportamiento de polímeros como el Poliuretano y sus efectos de memoria de forma. Se somete el polímero a deformaciones de hasta el 100%. Las deformaciones se recuperan con temperaturas que varían de los 30°C a los 60°C y aunque las muestras

que recuperan la deformación no recuperan las propiedades iniciales, los resultados son muy prometedores. (Farzaneh, Fitoussi, Lucas, Bocquet, & Tcharkhtchi, 2013)

También existen estudios, sobre la combinación de polímeros y aleaciones metálicas, en concreto cables de Nitinol y polímero de base acrilato. Se ha analizado el comportamiento de una muestra de este polímero, con cables de Nitinol embebidos en él, para ver la relación entre actuación-tiempo y desplazamiento-tiempo, para diseñar polímeros, mediante elementos finitos, reforzados para su uso en actuadores térmicamente activados, para fuerzas predeterminadas. Se ha comprobado que la fuerza del polímero, se puede incrementar hasta diez veces, de los 0,4N hasta los 4N, mediante la inserción de estos cables de Nitinol. (Di Leo, 2009)

Una diferencia importante, con respecto a las aleaciones con memoria de forma es que los polímeros se programan en el momento de su fabricación, no siendo posible la reprogramación posterior. Esto es una desventaja con las aleaciones SMA, que sí permiten “grabar” la forma que se desee, tantas veces como se quiera. Se están estudiando polímeros basados o inspirados en materiales naturales

¹¹ SMP Shape Memory Polymer

(Huang, Hu, & Zhu, 2015). Recientemente, investigadores de la Universidad Politécnica de Hong Kong, han publicado un estudio en el que proponen un modelo de polímero, con memoria de forma, que surge a partir de la observación de las telas de araña.

Aparte de las excelentes propiedades mecánicas, éstas han demostrado tener este comportamiento de memoria, ya que pueden contraerse hasta el 50% y volver a su forma inicial. El catalizador de este efecto es la humedad. El agua, puede romper los enlaces de carbono, pero no las estructuras de hojas cristalinas β -sheets, que permanecen intactas. Estas estructuras, en los puntos de unión de la red, son las responsables de la estabilidad de la forma (Fig. 17).

El resultado es un modelo de polímero sintético, con memoria de forma, en el que se forman puntos de red fuertes, se mejora la capacidad de recuperación de la forma y se consigue gran estabilidad térmica. Se están estudiando también, las propiedades mecánicas, biocompatibles y biodegradables de estos nuevos polímeros sintéticos, inspirados en las telas de araña.

2.3 POLÍMEROS ELECTROACTIVOS (EAP)

Los llamados Polímeros Electro-activos (EAP)¹², son otro de los tipos de materiales inteligentes. En este caso, comparten otra denominación con las aleaciones con memoria de forma (SMA): “músculos artificiales”.

En los últimos 20 años, los nuevos materiales EAP que han ido surgiendo, muestran un gran desplazamiento en respuesta a la estimulación eléctrica (Bar-Cohen J. , 2002). Los procesos de sintetizado, fabricación, forma y manufactura se están mejorando considerablemente. Estos materiales se utilizan sobre todo en robótica, para crear músculos artificiales en robots biológicamente inspirados. Esta actitud de imitación de la naturaleza en estos aspectos, se conoce en lengua inglesa como “biomimetics” y se espera

¹² EAP Electro Active Polymer

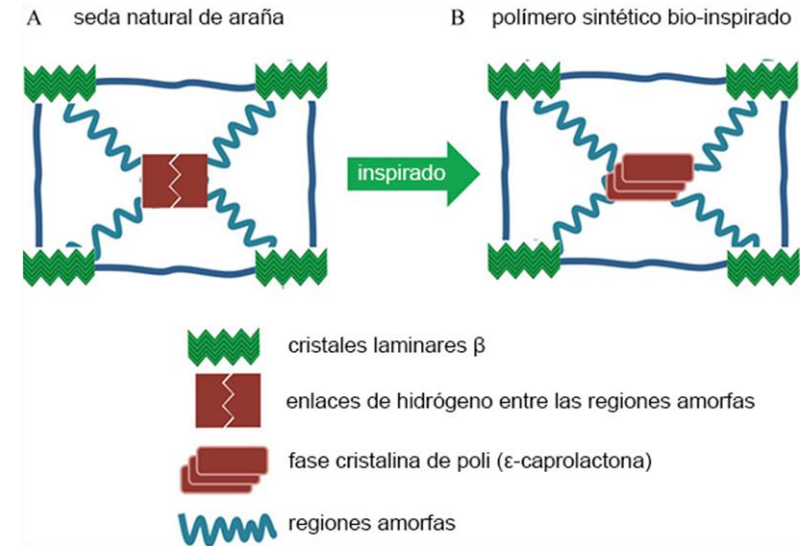


Fig. 17. Esquema de modelo para polímero con memoria de forma basado en las talas de araña



Fig. 18. Imagen del concurso para desarrollar un músculo artificial basado en EAP capaz de batir a un brazo humano

que también pueda ayudar a personas con miembros amputados, a proporcionarles nuevas extremidades artificiales, actuadas por estos polímeros.

El Doctor Yoseph Bar-Cohen, del Jet Propulsion Laboratory de la NASA, lleva años trabajando en estos músculos artificiales. Para demostrar el potencial de estos materiales, lanzó un reto a la comunidad científica, para desarrollar un brazo robótico actuado por EAP, que fuera capaz de batir en un pulso, a un brazo humano (Fig. 18). (Bar-Cohen D. Y., 1999)

Los EAP, se pueden dividir en dos grandes grupos: los activados electrónicamente y los que lo hacen iónicamente (Tabla 1). Estos últimos, requieren menos voltaje para funcionar que los primeros, mientras que los segundos, se pueden activar con solo 1 o 2 Voltios. En la siguiente tabla, podemos ver los tipos principalmente utilizados, de polímeros electro-activos:

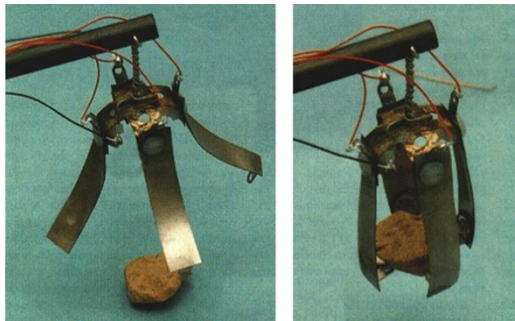


Fig. 19. Pinza de 4 dedos con actuadores basados en polímeros electro-activos (EAP)

EAP electrónicos	EAP iónicos
EAP Dieléctricos	Nanotubos de carbono
Injertos de elastómeros electroactivos	Polímeros conductores (CP)
Papel electroactivo	Fluidos electroreológicos (ERF)
Elastómeros electro-viscoelásticos	Polímeros iónicos en gel (IPG)
Polímeros ferroeléctricos	Composites metálicos de polímero iónico (IPMC)
Elastómeros de cristal líquido (LCE)	Nanotubos de carbono

Tabla 1. Principales EAP utilizados (electrónicos e iónicos)

Algunas de las aplicaciones ensayadas incluyen actuadores EAP, pinzas EAP para levantamiento de objetos (Fig. 19), manos robóticas o robots que interactúan con humanos.

El profesor Bar-Cohen, nos habla además de la posibilidad de lo que llama “presencia remota”, gracias a las capacidades de estos materiales de “sentir” ambientes remotos. De esta manera, los usuarios de estos actuadores y mediante tecnología táctil y háptica, pueden actuar sobre los sistemas a distancia. Especialmente indicado, para aplicaciones espaciales que puedan ser tele-controladas.

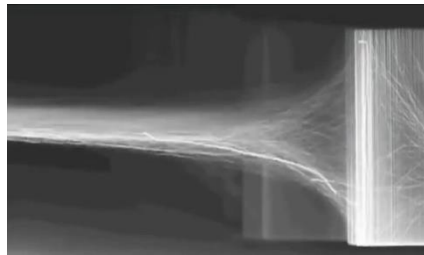
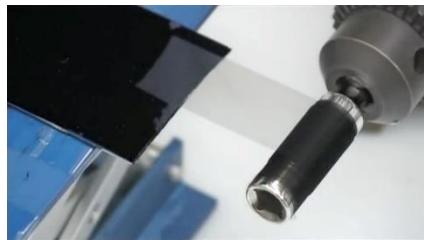
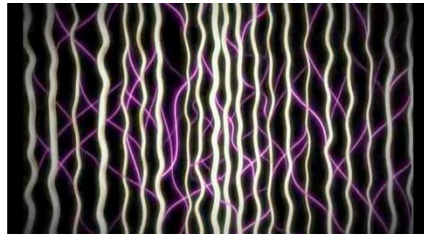


Fig. 20. Músculos artificiales a base de lámina de carbono

Otra aplicación muy interesante, es la que están desarrollando en el Instituto de Nanotecnología de la Universidad de Texas, en Dallas, USA. El profesor Ray Baughman, nos da datos sobre los músculos artificiales que están investigando. Pueden trabajar en rangos de temperatura desde los 1600°C hasta los -273°C (cercano al cero absoluto).

Los músculos naturales, pueden contraerse hasta el 20%-40% de su longitud, mientras que los artificiales, pueden llegar hasta el 220% de alargamiento. Además, pueden actuar extremadamente rápido. Si los naturales lo hacen en torno al 20% por segundo, los artificiales pueden llegar a hacerlo, hasta unos impresionantes 30.000% por segundo.

Funcionan también con electricidad. Una “inyección de carga eléctrica”, activa los pequeños filamentos perpendiculares a las fibras principales, causando repulsión entre ellas. Eso provoca que las fibras principales, adquieran movimiento y tensión. Están fabricados en carbono. A partir de una muestra de nano-tubos, se tira de un extremo para obtener una lámina ultradelgada (Fig. 20). Esta lámina, es ya el músculo artificial y es alrededor de 10 veces más ligera que el aire. El coeficiente de Poisson para este material en su contracción lateral es de 15, lo que da una idea de las increíbles propiedades que tiene. Estas láminas tienen una resistencia altísima, mayor que materiales como el Mylar¹³ o el Kapton¹⁴, que se usan para vehículos ultraligeros. Pueden desarrollar, hasta 30 veces la fuerza de un músculo natural de las mismas dimensiones y se está estudiando su implementación en células fotovoltaicas, para incrementar su eficiencia. (Baughman, 2011)

Otra curiosa aplicación, de esta misma universidad, es la creación de músculos artificiales a partir de hilo de Nylon. Se trata de producirlos de manera barata y simple, con herramientas y materiales comunes. Los investigadores, han conseguido polímeros baratos, con gran fuerza, rápidos, escalables, sin histéresis y con larga vida útil. Pueden contraerse hasta el 49% y levantar cargas 100 veces más pesadas, que las que puede levantar los músculos humanos, de la misma longitud y peso. Además, pueden generar 5,3kW de trabajo mecánico, por kilogramo

¹³ Mylar: Polietilentereftalato o PET

¹⁴ Kapton: Poliamida heterocíclica fabricada (DuPont)

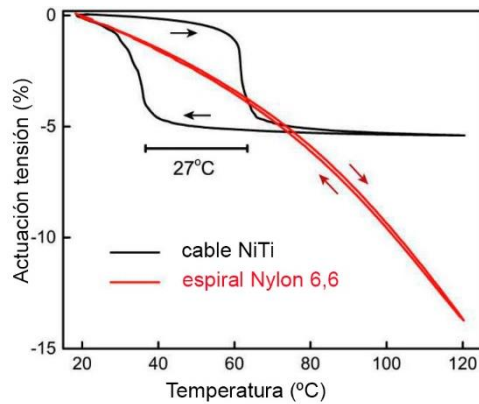


Fig. 21. Histéresis para NiTi y Nylon

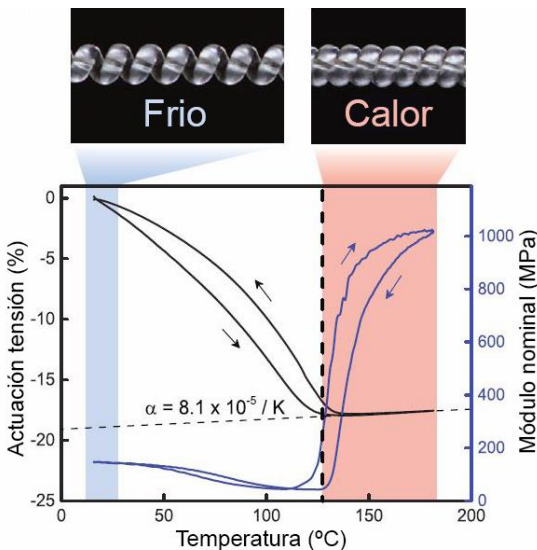


Fig. 22. Temperatura de activación, tensión nominal y % de actuación

de peso muscular, similar al producido por una turbina de un avión comercial (Haines, y otros, 2014). Investigan su aplicación, en textiles que cambien de porosidad en respuesta a los cambios de temperatura, que podría ayudar a conservar la energía en los edificios. Es interesante el proceso de fabricación: se toma hilo de Nylon y se fija una carga en un extremo, para mantenerlo en tensión. El otro extremo, se acopla a un taladro eléctrico. Al hacer girar al hilo sobre sí mismo, comienza a formar una espiral. Después de haberse formado esta espiral, se fija su forma, mediante calor, con una simple pistola térmica.

El resultado son estos músculos “caseros”, con increíbles propiedades y sobre todo, coste bajísimo (Fig. 21 y Fig. 22).

2.4 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA MAGNÉTICA (MSMA-FSMA)

Los Materiales con Memoria de Forma Magnética (MSMA¹⁵ o FSMA¹⁶), son materiales que pueden presentar grandes deformaciones, bajo un campo magnético. Al aplicar este campo a estos materiales, se provoca la transformación del estado martensítico, al austenítico (Fig. 23).

Este tipo de aleaciones, prometen grandes ciclos de operación en actuadores, sin fatiga aunque, de momento, existen problemas a resolver, como los efectos de la fricción o los de la inadecuada excitación eléctrica del MSMA, que provoca el mal funcionamiento de los mismos. (Schiepp, Maier, Pagounis, & Laufenberg, 2014).

En Francia, los investigadores están estudiando estos materiales, para realizar dispositivos de micro-posicionamiento inteligentes (Hubert, Calchand, Le Gorrec, &

¹⁵ MSMA: Magnetic Shape Memory Alloys

¹⁶ FSMA: Ferromagnetic Shape Memory Alloys

Gauthier, 2012). Esta característica de estos materiales proporciona una gran precisión, al igual que ocurre en los dispositivos piezoeléctricos.

En este tipo de aplicaciones, se usa sobre todo, el Terfenol-D¹⁷, ya que este material ha mostrado un gran progreso desde su primer uso en los años 50, por el Naval Ordnance Laboratory, en los Estados Unidos (el mismo laboratorio que desarrollara las aleaciones basadas en Nickel-Titanio)

Si comparamos las MSMA, activadas por campo magnético, con las SMA activadas por temperatura, las primeras muestran una frecuencia de funcionamiento mayor que las segundas, lo que las hacen idóneas para el diseño de actuadores, aunque existen pocos estudios sobre el tema.

Se pueden obtener deformaciones recuperables de estos materiales, en torno al 6%-10%, con un tiempo de respuesta de milisegundos, lo cual las hace incluso más rápidas que las SMA dependientes de temperatura, donde los tiempos de respuesta son ligeramente mayores.

2.5 MATERIALES PIEZOELECTRICOS

Los materiales piezoeléctricos, se pueden considerar como un tipo de materiales con cambio de forma. En este caso, el cambio no viene provocado por un aumento de la temperatura, sino por la aplicación de un campo eléctrico, aunque la deformación provocada es muy pequeña (menos del 0,01%). Este efecto, también ocurre a la inversa, si aplicamos una fuerza al material y lo deformamos, estaremos generando electricidad (Fig. 25).

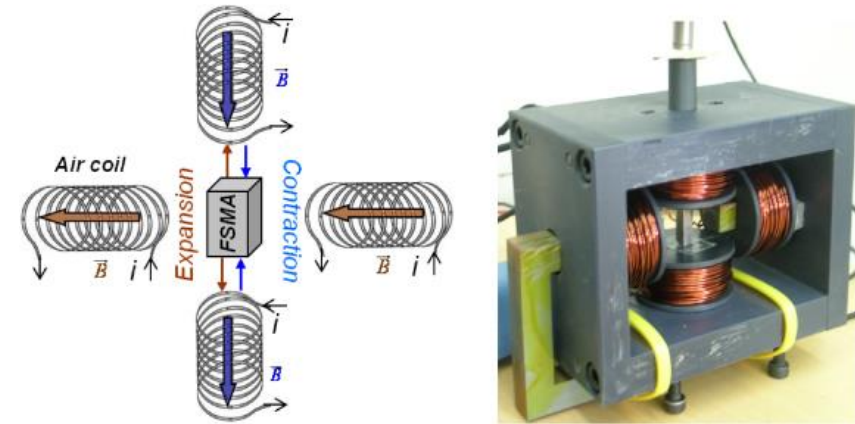


Fig. 23. Dispositivo de actuación de material con memoria de forma magnético.



Fig. 24. Pavimentos con dispositivos piezoeléctricos

¹⁷ Terfenol-D: $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ con $x=0,3$ aprox.

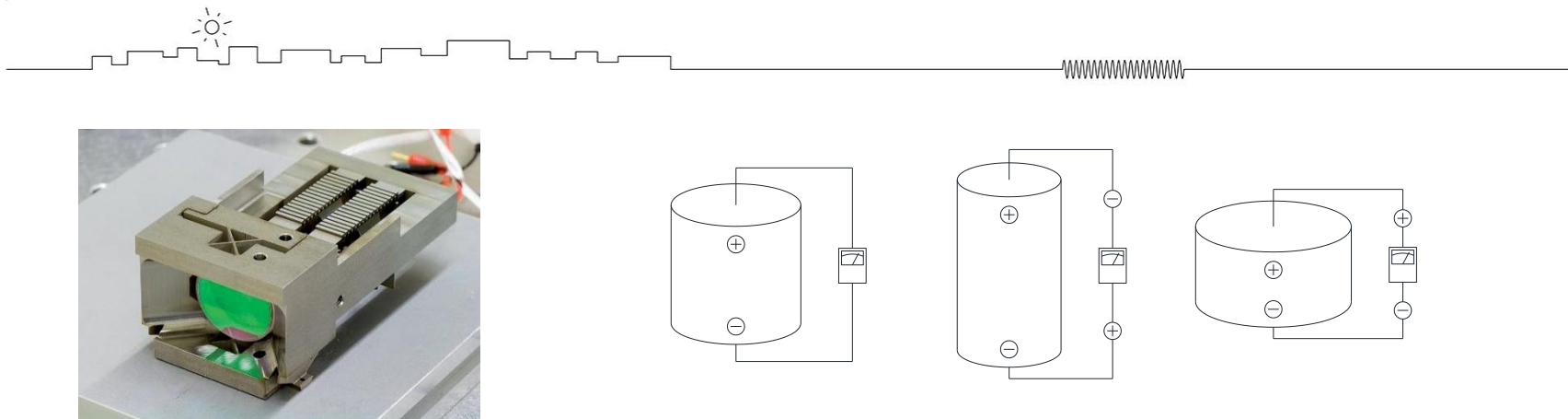


Fig. 25. Actuador piezoeléctrico (izquierda) y esquema de funcionamiento material piezoeléctrico ante la aplicación de corriente eléctrica (derecha)

Se caracterizan por su extrema precisión. Tienen un comportamiento casi lineal y un alto ancho de banda dinámico. Por eso, se utilizan en aplicaciones que necesiten de esta gran precisión.

Se están usando ya, con resultados interesantes, en pavimentos colocados en lugares de mucha afluencia de público, como acerados, estaciones de bus, tren, metro y aeropuertos o discotecas, de manera que la presión continuada sobre los mismos genera electricidad (Fig. 24).

El problema de los materiales piezoeléctricos y en concreto el del más utilizado habitualmente, PZT¹⁸, es el alto potencial contaminante. Por eso, su uso está estrictamente limitado en el mundo y debido a ello se están estudiando alternativas, para conseguir este efecto eléctrico de cambio de forma, por medio de otras combinaciones de materiales, como las cerámicas basadas en BaTiO₃. (Liu, y otros, 2006)

Actuadores piezoeléctricos, se han utilizado para aplicaciones en mecanismos y estructuras espaciales (Allegranza, y otros, 2014). Por ejemplo, mecanismos de seguimiento, en las misiones Arthemis, Pharao, Earthcare y Soho. Mecanismos de control de ángulo, en la misión Lisa, control de láser, en Aeolus, Pharao, Earthcare y Swarm, Línea de retraso óptico en Lisa-Pf, supresión de microvibración en Picard y Solar Orbiter. Instrumentos para Rosetta, Misse7 y Curiosity. Propulsión para Gaia y mecanismos de escaneo, para la Solar Orbiter también.

¹⁸ PZT (Pb(Zr,Ti)O₃)

Efecto Peltier y efecto Seebeck

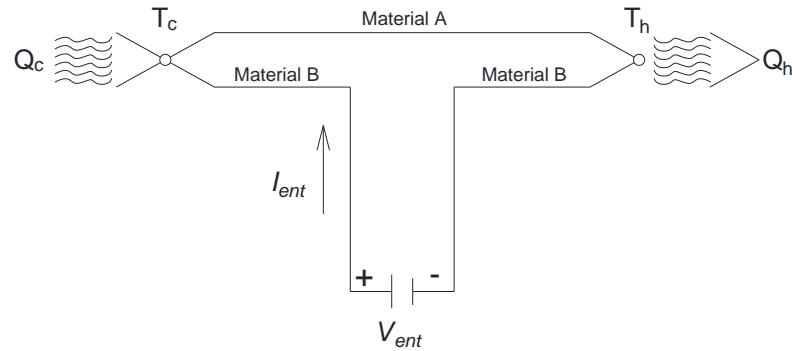


Fig. 26. Esquema de funcionamiento efecto Peltier

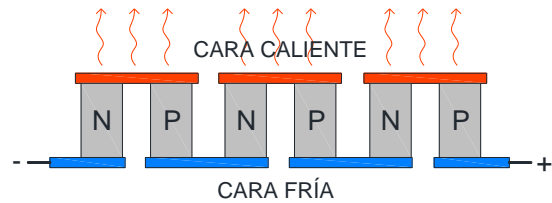
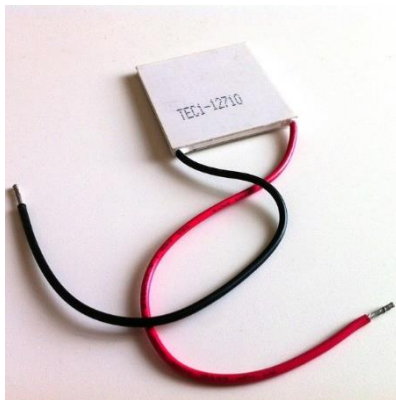


Fig. 27. Célula Peltier

Sin ser dispositivos piezoeléctricos, los dispositivos Peltier, tienen en común, que generan electricidad. En este caso, a partir de una diferencia de temperatura.

El efecto Peltier, consiste en el enfriamiento o calentamiento de una unión, entre dos conductores distintos, al pasar una corriente eléctrica por ella y que depende exclusivamente de la composición y temperatura de la unión. El francés Peltier, descubrió este efecto termoeléctrico en 1834, a partir del trabajo del alemán Seebeck, que en 1821 descubrió que, en un circuito formado por dos conductores distintos y cuyas uniones están a diferentes temperaturas, ocurre una diferencia de potencial eléctrico entre ambos.

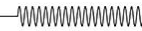
Estos dos efectos termoeléctricos, se consideran contrarios. El esquema de funcionamiento de una célula Peltier puede observarse en la (Fig. 26). El calor Q en la unión AB se define como:

$$\dot{Q} = J\pi_{AB} = J\Delta T_{\alpha AB} \text{ (Galperin, 2001)}$$

Donde π_{AB} es el coeficiente de Peltier definido como el calor intercambiado en la unión AB, por unidad de corriente que circula por la misma y por unidad de tiempo, J es el flujo de electricidad, ΔT es la diferencia de temperatura total entre los puntos A y B y α_{AB} es el coeficiente Seebeck. En realidad, cuando se conecta una célula Peltier a una fuente de alimentación continua, la potencia total corresponde en parte al efecto Joule y al Peltier. De manera que la potencia absorbida queda así:

$$P_{ent} = I^2R + I\Delta T_{\alpha AB} \text{ (Melcor, 2000)}$$

Donde P_{ent} es la potencia eléctrica proporcionada por la fuente y el primer término (I^2R) es debido al efecto Joule.



En la (Fig. 27), podemos ver uno de estos dispositivos. Los conductores metálicos se encuentran encerrados entre dos placas cerámicas, una es la cara caliente y la otra la fría. Suministrando electricidad conseguimos el efecto termoeléctrico.

Podemos crear efecto termoeléctrico, simplemente uniendo dos materiales conductores diferentes y aplicando calor. Si utilizamos una barra de cobre y otra de Nitinol, por ejemplo, los unimos en uno de los extremos y los otros extremos los conectamos para extraer la energía, calentando la unión, con un simple encendedor, generaremos electricidad.

Podemos conectar múltiples barras en serie y paralelo hasta alcanzar el nivel de energía deseado (Teslonian M. , 2013)¹⁹.



Fig. 28. Efecto termoeléctrico al calentar la unión de dos barras conductoras, una de Nitinol y la otra de Cobre (izquierda). Conexión en serie de múltiples cables de Cobre y Aluminio (derecha)

Con esta idea, se pueden convertir algunos elementos arquitectónicos, en generadores de electricidad. Si por ejemplo pensamos en la barandilla de la terraza de un edificio, podemos ejecutar los montantes verticales con barras de diferentes metales. Si los unimos en serie, como en la Fig. 28 dejando las uniones verticales expuestas al sol, éstas se calentarán para producir electricidad. Obviamente, la cantidad de energía eléctrica generada será muy poca, pero quizás suficiente para alimentar una pequeña luminaria o algún automatismo de la terraza. Esta idea sirve para comprender que podemos actuar sobre los edificios, para dotarlos de elementos generadores de energía gratuita, limpia y segura.

¹⁹ Teslonian, M. (2013). *How to make a thermoelectric generator from nitinol wire and copper*. Recuperado el 15 de 07 de 2014, de [www.youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=bnQpl-5cca8](https://www.youtube.com/watch?v=bnQpl-5cca8)

2.6 CERAMICAS CON MEMORIA DE FORMA (SMC)

Las Cerámicas con Memoria de Forma o SMC²⁰, normalmente presentan problemas en la transformación del estado martensítico al austenítico (más adelante veremos en qué consisten estos dos estados). Se agrietan y rompen con poca tensión, después de pocos ciclos. Los investigadores están incluyendo en las cerámicas, estructuras oligocristalinas, a modo de pequeños granos, que reducen el estrés sufrido en la transformación martensítica y generan cerámicas robustas con memoria de forma, que son capaces de desarrollar mayor número de ciclos y soportar mayor tensión. Se han conseguido muestras de hasta 50 ciclos y deformaciones recuperables por encima del 7%. (Lai, Du, Gan, & Schuh, 2013)

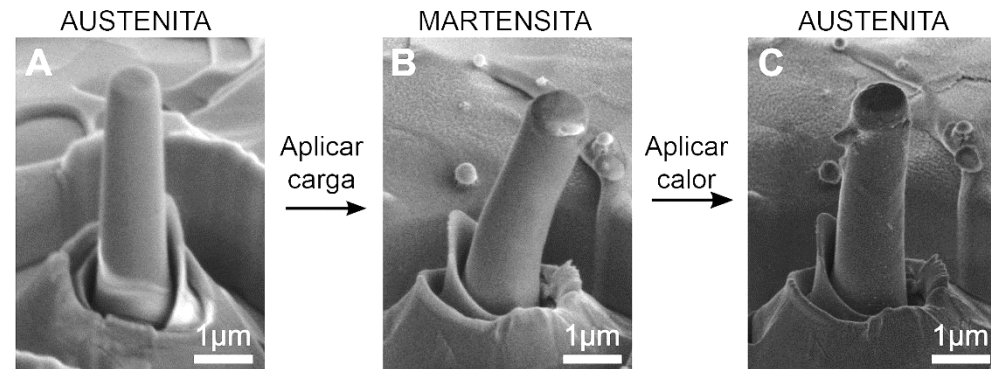


Fig. 29. Muestra al microscopio de cerámica con memoria de forma (SMC). Martensita al aplicar carga y austenita al aplicar calor

En todo caso, estos resultados son a pequeña escala, donde los materiales son más resistentes a las fracturas, aunque se espera conseguir en el futuro lo mismo para tamaños mayores de estas cerámicas (Fig. 29).

2.7 ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMA)

Las Aleaciones con Memoria de Forma o SMA²¹, son combinaciones de dos o más metales que, en determinadas proporciones y con el tratamiento térmico adecuado, muestran la propiedad de recordar una forma predeterminada, al aplicarles calor, además de una alta



Fig. 30. Lámina de aleación con memoria de forma (SMA)

²⁰ SMC: Shape Memory Ceramic

²¹ SMA: Shape Memory Alloy



elasticidad, muy superior a la mayoría de materiales. Comparadas con el acero, éste tiene un 0,5% de recuperación elástica de deformaciones, mientras que las SMA llegan hasta el 8%.

Dentro de los SMA, hay varios tipos de aleaciones binarias, ternarias y cuaternarias, aunque la más usada comercialmente es la de Nickel y Titanio, llamada comúnmente Nitinol o NiTi. En todo caso, la producción mundial de este material es pequeña comparada con el resto de la producción metalúrgica (200Tm se produjeron en 1998) debido a los problemas en el proceso de fundición y forja del mismo (Anson, 1999). Por ello, el precio es elevado, aunque para aplicaciones con necesidades pequeñas de material, sí es viable. Además, los precios están bajando sustancialmente a medida que la producción se incrementa. Es posible fabricar cables, tiras, barras, tubos, láminas, espumas y polvo de alta pureza.

Estas aleaciones reaccionan al cambio de temperatura mediante un cambio de fase de sólido a sólido. Su estructura cristalina cambia. Este cambio microscópico, se refleja macroscópicamente, manifestando efectos de memoria de forma y superelasticidad. Variando ligeramente la cantidad de Nickel de la aleación, variamos su temperatura de cambio de fase o temperatura de transformación. En su estado frío, son maleables y ante acciones mecánicas se deforman fácilmente, manteniendo estas deformaciones. Pero, cuando se calientan por encima de su temperatura de transformación, recuperan esas deformaciones, volviendo a su forma inicial.

Por otro lado, si su temperatura de activación está por debajo de la temperatura ambiente, éstas se encuentran ya permanentemente en su estado “activo” y muestran comportamiento superelástico, con deformaciones recuperables elásticamente de hasta el 8%, como se ha comentado, además de la capacidad de realizar un elevado número de ciclos de carga y descarga sin mostrar signos de fatiga en el material. Esta cualidad, quedó demostrada en las primeras máquinas o motores de calor fabricadas con estas aleaciones, en los años 70, donde se llegaron a realizar millones de ciclos y donde las máquinas, no sólo no se fatigaban sino que, aparentemente, su comportamiento con el tiempo llegaba incluso a mejorar.

Por último, tienen otra particularidad: cuando se calientan, al contrario que la mayoría de los materiales, disminuyen de longitud entre un 5% y 10%. Todas estas propiedades se estudian más adelante.

2.8 COMPOSITES HÍBRIDOS DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Las aleaciones con memoria de forma, se pueden combinar con otros materiales para formar compuestos con propiedades interesantes.

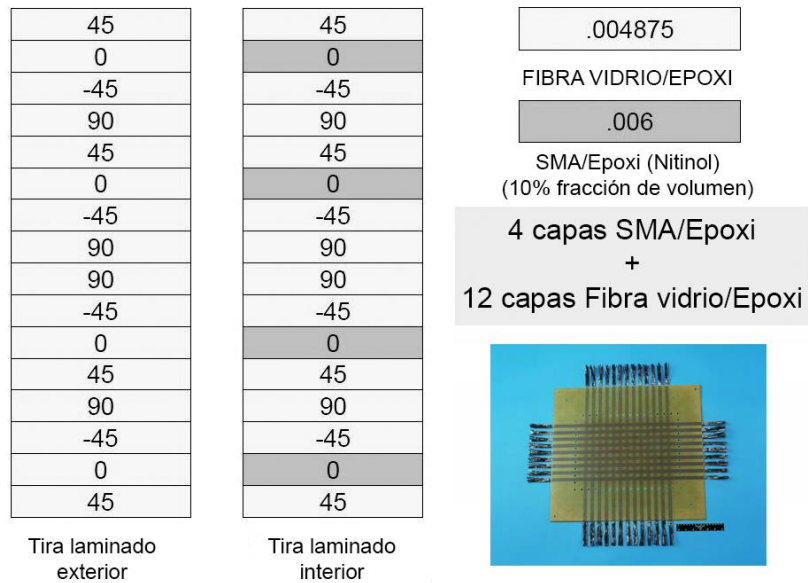


Fig. 31. Configuración de laminado de resina epoxi-fibra de vidrio (en gris claro) v cables de Nitinol v epoxi (en gris oscuro)

La NASA está probando lo que llaman SMAHC²² o Composites Híbridos de Aleaciones con Memoria de Forma (Fig. 31). Algunas de sus ventajas son la excelente relación peso-eficiencia o su posibilidad de funcionar de manera autónoma. Además, se pueden activar por estímulos o por el ambiente externo. (Patel & Turner, 2003) Algunas de las aplicaciones para las que la agencia espacial americana los está probando son: Resistencia térmica al pandeo, control de vibración y ruido en estructuras o control de las estructuras.

En un ejemplo de laminado híbrido SMAHC, las capas de fibra de vidrio y resina epoxi, se van disponiendo en diferentes ángulos, unas respecto de las otras, para mejorar la resistencia (Fig. 31). Las capas de SMA y resina epoxi, también se intercalan en las capas interiores. La fracción de fibra, en este caso hilos de Nitinol, es del 10% respecto de la matriz de epoxi. El resultado es una lámina ultra delgada, con gran resistencia y capaz de cambiar de forma, con la fuerza que le da los filamentos de NiTi.

Otro ejemplo es el llevado a cabo por un equipo japonés. En este caso el material compuesto está formado por polímeros con memoria de forma (SMP) y aleaciones con memoria de forma y superelásticas (SMASE). Las SMASE se utilizan en tiras delgadas, que se sitúan en el centro de un sandwich, formado por hojas de polímero con memoria de forma SMP. La programación previa de las tiras de nitinol en forma curva junto con las láminas de SMP, hace que el conjunto se curve hasta los 56°, en un sistema controlado por la temperatura (Fig. 33).

Desde una posición inicial curva, el laminado se calienta y adquiere forma plana. Cuando se enfría vuelve a la forma original curvada. (Tobushi, Hayashi, Sugimoto, & Date, 2009)

²² SMAHC: Shape Memory Alloy Hybrid Composite

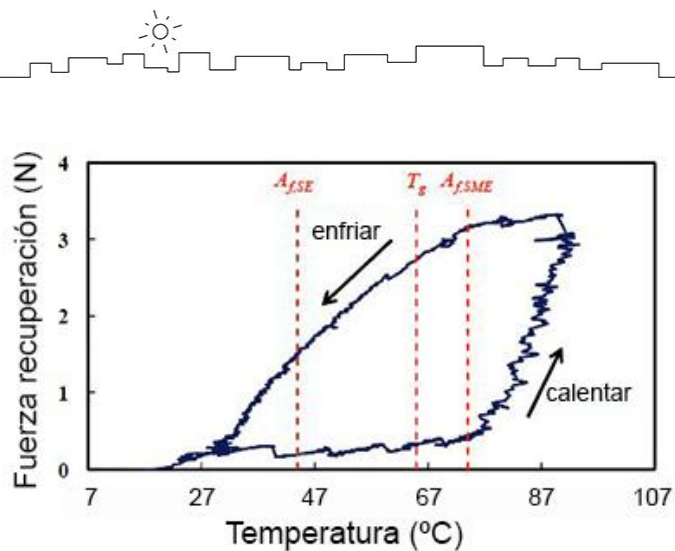


Fig. 32. Fuerza de recuperación en función de la temperatura al calentar y al enfriar

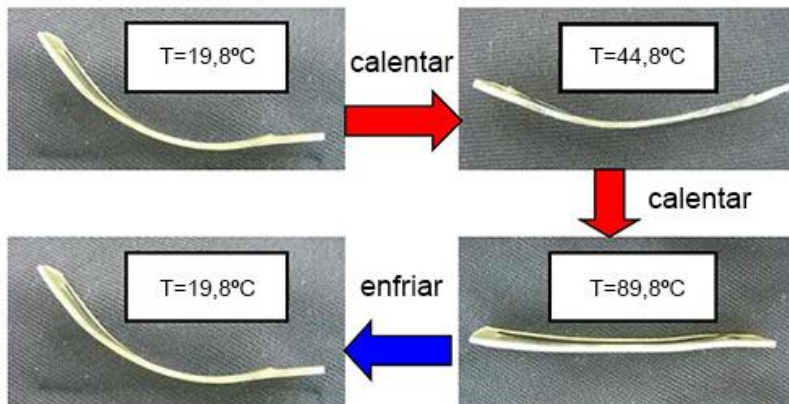


Fig. 33. Laminado en diferentes formas según la temperatura

La fuerza desarrollada no es muy grande (algo más de 3N) (Fig. 32) pero hay que tener en cuenta que la muestra mide 60mm por 10mm y tiene un espesor inferior al milímetro (0,75mm).

2.9 MEDICINA

Uno de los principales campos de aplicación de los SMAs es la Medicina. Se utilizan stents fabricados de Nitinol para combatir las obstrucciones vasculares. Tradicionalmente, éstos eran dispositivos neumáticos que se inflaban una vez colocados en su sitio. Ahora se hacen con Nitinol superelástico, que se inserta a través del sistema circulatorio hasta su posición. Se coloca con una funda rígida, que mantiene el Nitinol contraído. Cuando se retira esta funda, la malla superelástica se expande sobre las paredes del vaso sanguíneo, ejerciendo presión sobre la obstrucción y terminando por deshacerla. (Fig. 34)

El cuerpo humano no rechaza el stent, ya que el Nitinol es biocompatible²³ (Duerig & Wholey, 2002).

También se fabrican válvulas para el corazón, piezas de fijación de huesos y aparatos para los dientes. (Fig. 35) Estos últimos tenían que ser reajustados frecuentemente por los dentistas, ya que al estar fabricados con acero iban perdiendo su fuerza y forma. Con Nitinol superelástico el material no se fatiga y no cede, manteniendo una presión constante hacia los dientes, para forzarlos a tomar la forma deseada. (Camelia & Fleser, 2010) En rehabilitación, se están ensayando sistemas para facilitar la

²³ Biocompatible: Compatible con la vida. Las SMA no son rechazadas por el cuerpo humano. Esto significa que también tienen una alta resistencia a la corrosión y los agentes atmosféricos del exterior.

movilidad en extremidades, como es el caso de la rodilla, donde se utilizan actuadores rotatorios basados en SMA, los cuales, junto con los actuadores neumáticos, están sustituyendo a los actuales motores eléctricos, especialmente cuando éstos interfieren, en el momento de hacer resonancias magnéticas, por sus componentes metálicos. Este problema no se tiene con estos actuadores de SMA. (Pott & Schlaak, 2014)

En este mismo campo de rehabilitación y acercándonos al campo de la robótica, se están ensayando exoesqueletos para humanos, actuados por aleaciones de NiTi. Tanto para cuerpo entero, como para partes del mismo, la aleación puede actuar tanto como amortiguador, como actuador y provocador del movimiento.

Así mismo, para las personas que han sufrido la amputación de algún miembro, como por ejemplo la mano, ya existen prótesis robóticas, actuadas por Nitinol. Su funcionamiento es muy similar al de la mano humana. Existen partes rígidas, que hacen el papel de huesos y partes de NiTi que realizan la labor de los músculos humanos. Cuando estos se calientan, acortan su longitud, ejerciendo la fuerza necesaria para articular los dedos.

2.10 AEROESPACIAL

En el Centro Espacial Langley de la NASA, están desarrollando tecnología para aplicarla a las naves del futuro, que viajarán por la atmósfera y por el espacio, utilizando materiales inteligentes, como el Nitinol.

El Morphing Aerospace Vehicle (Fig. 36) es un vehículo que cambia de forma en tiempo real, para adaptarse a las condiciones de vuelo más idóneas en cada momento. Con sensores que actúan

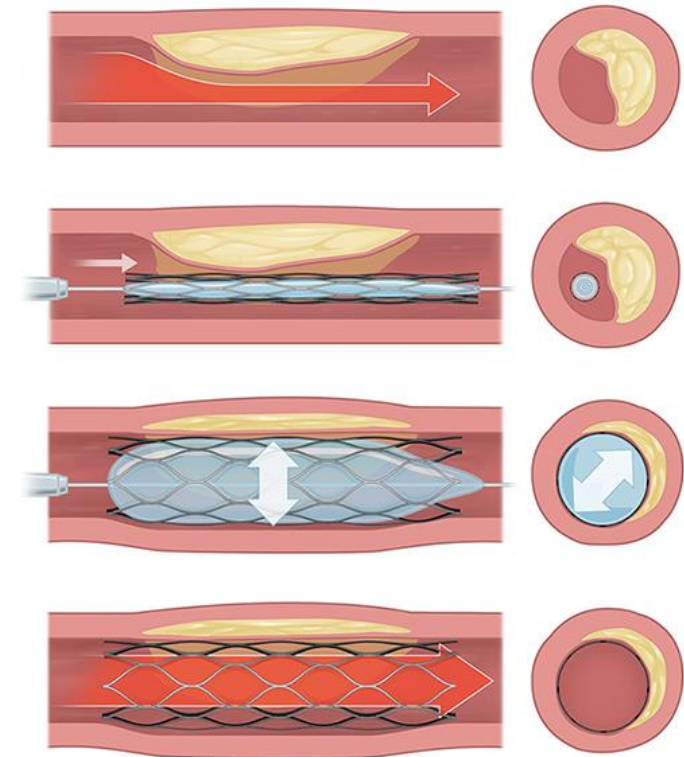


Fig. 34. Esquema funcionamiento Stent neumático en vena obstruida.



Fig. 35. Llaves de NiTi para dientes sueltos (izquierda) y aparato superelástico para corrección dental.



Fig. 36. NASA Morphing Aerospace Vehicle



Fig. 37. Boeing 747 Dreamliner, con chevron modificado con SMA para reducción de ruido. Funcionamiento autónomo y dependiente de la temperatura

como nervios en el ala de un pájaro, es capaz de conocer continuamente la presión que hay en toda la superficie del ala. Con estas mediciones, una CPU le dice a los actuadores de Nitinol que se activen, para cambiar la forma del ala y optimizar así las condiciones de vuelo. (NASA, 2007). Con estos nervios, actuadores, sensores y controles de adaptación, la nave dispone de algo parecido a nuestro sistema nervioso central, capaz de provocar una respuesta física en la aeronave que hace que, por ejemplo, se reduzca el ruido del fuselaje y por lo tanto se mejore el confort de la tripulación y el pasaje.

Además, son posibles los aterrizajes a baja velocidad, lo cual repercute en un aumento de la seguridad, así como la adaptación a pistas más cortas que las actuales y una mejora en la eficiencia del consumo de combustible. (Pline, 2007). Este vehículo de forma cambiante, es un estudio a nivel teórico pero desde hace algunos años, se está probando esta tecnología en aviones comerciales, ya que la creciente demanda de aeronaves de bajo consumo de combustible, para el comercio mundial, impulsa la industria aeronáutica en este sentido.

En aviones modernos, como el Boeing 787 Dreamliner, las alas tienen mayor elasticidad que en modelos más antiguos, lo que significa que los nuevos aviones del futuro, permiten la incorporación de tecnología de SMAs. (Nhan Nguyen, 2010)

Recientemente, se han realizado pruebas de vuelo con gran éxito. En junio de 2015, en las afueras de París, un 787 modificado con elementos SMA, demostró una maniobrabilidad excelente, realizando un despegue casi vertical y giros cerrados, propios de aviones de combate.

Se modifican también las toberas de las turbinas, para reducir el ruido provocado por las mismas. Ello se consigue con la forma dentada o en “chevron” de estos elementos, actuados también con aleaciones SMA. (Bargsten & Gibson, 2011) (Fig. 37)

También, se están ensayando prototipos de traje espacial, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA) (Holschuh, Obropta, & Newman, 2014). Estos nuevos trajes están basados en alambres de SMA, en vez de los

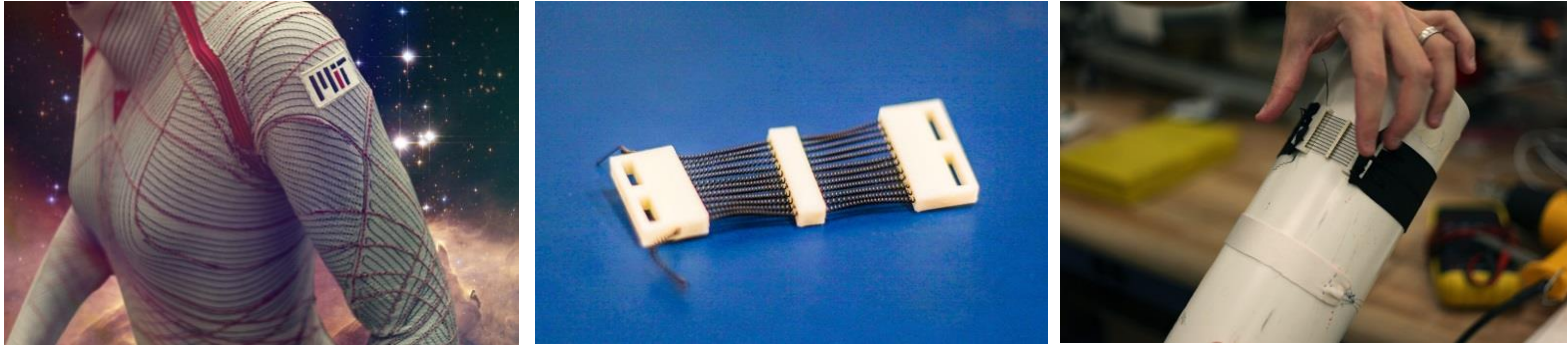


Fig. 38. Prototipo de traje espacial desarrollado por el MIT (izquierda). Actuador-faja con micromuelles de NiTi (centro) y actuador aplicado alrededor de un cilindro (derecha).

tradicionales, que están presurizados con gas y son muy voluminosos. Los astronautas se enfundan el traje y con la energía de la nave espacial, se activarán los pequeños muelles de Nitinol que están embebidos en el mismo, haciendo que estos se contraigan y se ciñan al cuerpo (Fig. 38). Esto permite trajes más cómodos, lo que redonda en una mayor manejabilidad del astronauta en el espacio. Para quitárselo, simplemente se anula el aporte de energía, para que el SMA se relaje a su estado martensítico. El traje entonces pierde la fuerza y se quita fácilmente. El sistema se basa en la idea de una faja o material, que envuelve al cuerpo en forma plana y se conecta mediante estos muelles. Cuando se calientan, los muelles recuperan la forma programada y se contraen ajustando la faja al cuerpo.



Fig. 39. Dispositivo “pin-puller”.

Una empresa española, ha desarrollado un dispositivo basado en SMA, para sistemas de accionamiento y liberación, para utilizarlo en el espacio. Estos dispositivos, pretenden sustituir a los actuadores pirotécnicos, en los que una explosión acciona el mecanismo de liberación.

En el caso propuesto, este trabajo recae sobre el SMA, por sus ventajas sobre los pirotécnicos: reducen peso, mayores medidas de seguridad y pueden funcionar durante muchos ciclos. Los “pin-puller”²⁴ (Fig. 39) son capaces de llegar hasta los 500N de precarga y representan un salto adelante en cuanto a su mayor fiabilidad y su menor peso, dos factores muy importantes, cuando se habla de tecnología espacial. (Nava Rodríguez, Collado, & Cabás, 2014)

²⁴ Pin-puller o extractor de perno o pasador. Dispositivo SMA para aplicaciones espaciales.



Fig. 40. Dispositivo actuador basado en NiTi (derecha) en misión GAIA (izquierda)

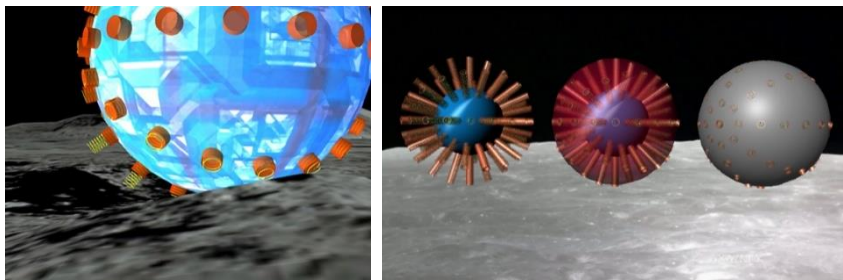


Fig. 41. Propuesta brasileña de vehículo rover para el concurso Lunar Xprize. Sistema de movilidad mediante resortes de muelles superelásticos de Nitinol precomprimidos en la Tierra.

Diversos actuadores de SMA, se están utilizando en dispositivos para aplicaciones espaciales (Fig. 40), donde, hasta ahora, está muy extendido el uso de motores de corriente eléctrica directa (Allegranza, y otros, 2014). Por ejemplo, en la misión GAIA, que se encargará de hacer un mapa 3D de nuestra galaxia, un actuador desarrollado por otra empresa española con soporte de la E.S.A., desplegó en órbita y con éxito el escudo de 10,2m de diámetro de protección contra el sol.

Como curiosidad, la compañía Google, ha convocado un concurso con un premio de 30 millones de dólares, para llevar un robot a la Luna, con fondos privados. El aparato, debe moverse un mínimo de 500m y transmitir vídeo de alta definición para todo el mundo. Uno de los condicionantes impuestos por los convocantes del concurso, es que el movimiento del robot, en la superficie del satélite terráqueo, debe hacerse sin usar combustibles convencionales. La propuesta del equipo brasileño, consiste en una esfera con múltiples resortes en su superficie (Fig. 41). Estos muelles, están hechos de Nitinol superelástico y son pre-comprimidos en la Tierra. Una vez en la Luna, se libera el seguro que los mantiene retenidos y el robot puede moverse rodando y rebotando. Por tanto, la energía que utiliza, es la almacenada

previamente. Una vez liberada esta energía potencial, los muelles de NiTi la transforman en cinética, la reutilizan y mantienen. El sistema está pensado para trabajar con el gradiente térmico de la superficie lunar.

2.11 INDUSTRIA

En la Industria en general y en la del automóvil en particular, el Nitinol ha entrado progresivamente, aunque al principio quizá no con la fuerza que debería, debido probablemente al desconocimiento inicial del material.

Pero en la actualidad, ya existen numerosas piezas o partes de vehículos, fabricados con esta aleación. (Stoeckel, Shape Memory Actuators for Automotive Applications, 1990)

Se utiliza, por ejemplo, para hacer válvulas que se abren o cierran, dependiendo de la temperatura. En el ejemplo de la (Fig. 43), cuando el fluido o gas, que pasa por la válvula, está lo suficientemente caliente como para activar el Nitinol, el muelle recupera la forma y cierra el paso. Por el contrario, cuando la temperatura desciende, el muelle de Nitinol se enfría y el acero ejerce mayor fuerza, abriendo el paso de nuevo.

En el interior de un vehículo, existen diversos usos de las SMAs y otros son potencialmente viables. Mecanismos que no producen ruido, ni vibraciones, que tienen bajo consumo eléctrico o que se activan por temperatura y que poseen alta fiabilidad de funcionamiento. (Stoeckel, Shape Memory Actuators Improve Car Performance, 1992)

Pero hay más aplicaciones. Veamos cuales son:

1) Cubre faros antiniebla. 2) Pestillo del capó. 3) Faros retráctiles. 4) control de combustible. 5) control del motor. 6) control de transmisión. 7) control del climatizador. 8) control por presión de los limpiaparabrisas. 9) ajuste del espejo retrovisor. 10) ajuste de cinturones de seguridad. 11) sistema de cierre centralizado. 12) ajuste de juntas en suspensiones. 13) pestillo de la tapa del depósito de combustible. 14) pestillo del maletero.

Las partes móviles de los súper-coches de última generación, como alerones, faldones, spoilers, etc. ya disponen de sistemas activados por aleaciones SMA. Esto repercute en un mejor comportamiento aerodinámico y por lo tanto, en un menor consumo de combustible, así como menor ruido y mayor confort.

En la alta competición, el peso es muy importante y en estos casos, los sistemas con NiTi, ahorran el peso de motores eléctricos, además de ocupar menos volumen. Por otro lado, son más fiables y duraderos que aquellos.

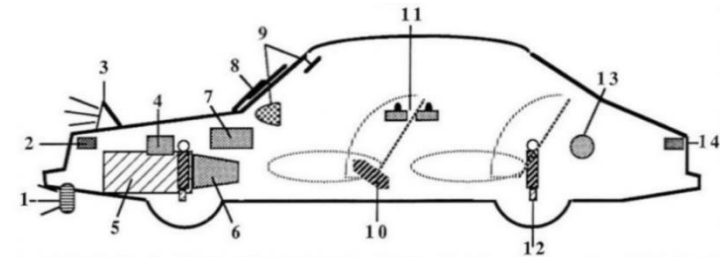


Fig. 42. Diversos dispositivos de NiTi en un automóvil.

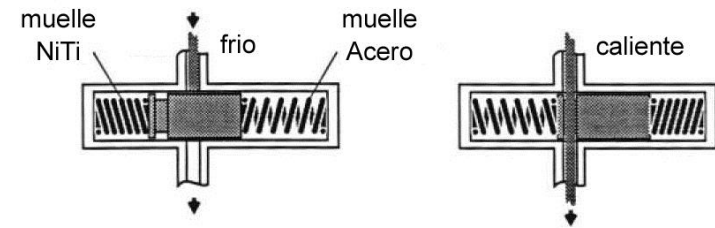


Fig. 43. Válvula accionada por muelle de Nitinol (izquierda) y de acero (derecha)
Estados frío (válvula cerrada) y caliente (válvula abierta)

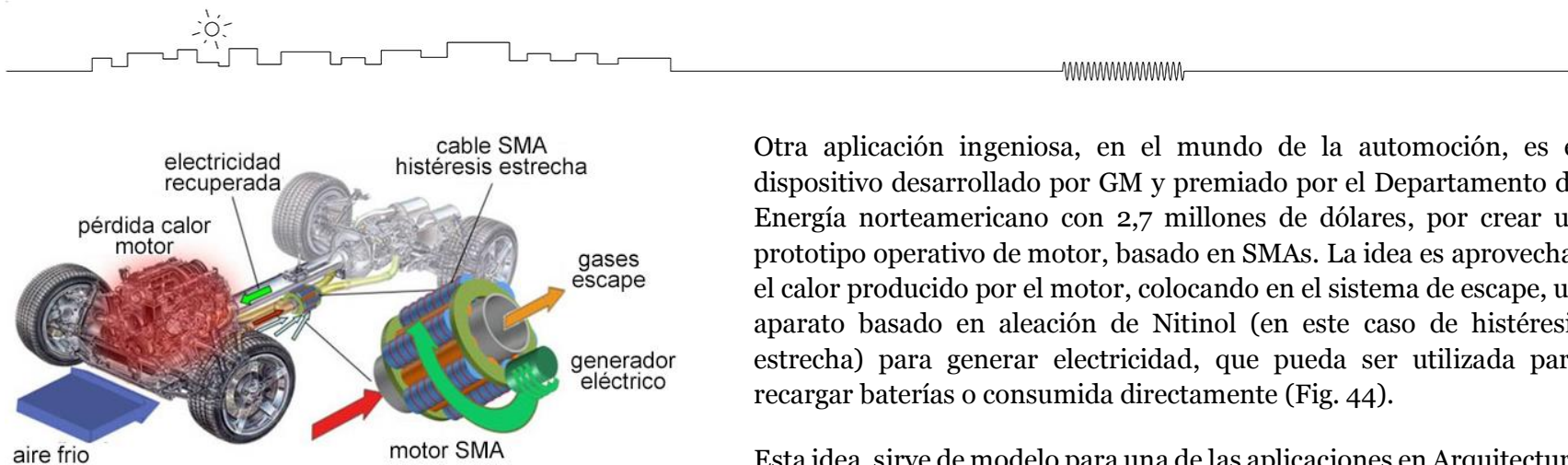


Fig. 44. Pequeño generador eléctrico basado en Nitinol acoplado al sistema de escape de un turismo

Otra aplicación ingeniosa, en el mundo de la automoción, es el dispositivo desarrollado por GM y premiado por el Departamento de Energía norteamericano con 2,7 millones de dólares, por crear un prototipo operativo de motor, basado en SMAs. La idea es aprovechar el calor producido por el motor, colocando en el sistema de escape, un aparato basado en aleación de Nitinol (en este caso de histéresis estrecha) para generar electricidad, que pueda ser utilizada para recargar baterías o consumida directamente (Fig. 44).

Esta idea, sirve de modelo para una de las aplicaciones en Arquitectura propuestas y explicadas posteriormente. En ese caso, el calor no proviene del tubo de escape de un motor, sino de las tuberías de agua caliente de un edificio. El calor de la tubería, sirve para generar electricidad en sistemas donde la producción se hace mediante placas termo-solares.

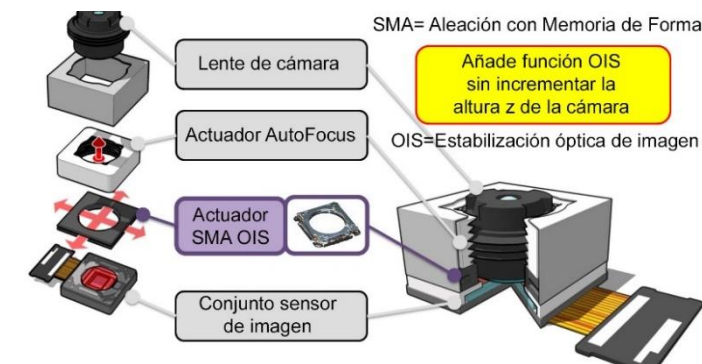


Fig. 45. Esquema funcionamiento SMA en cámara fotográfica.

ÓPTICA

Varias compañías están fabricando gafas con montura de Nitinol superelástico (Fig. 47). Las ventajas son evidentes: se pueden deformar momentáneamente y volverán a su forma original, una vez haya cesado la fuerza de deformación. No hay peligro de rotura. El límite elástico del material, es 10 veces superior, al de la mayoría de los materiales comúnmente usados en la fabricación de gafas.



Fig. 47. Gafas con montura superelástica

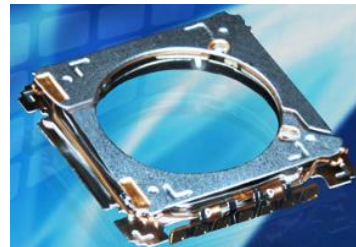


Fig. 46. Lente equipada con SMA

En el campo de la fotografía y especialmente en las cámaras de los dispositivos móviles que usamos hoy en día, se están utilizando ya estabilizadores de imagen y auto-focus, basados en SMA (Fig. 46). El proceso es sencillo, el SMA cambia de longitud y de diámetro, según la cantidad de energía eléctrica suministrada. Si se aplica la cantidad deseada, se puede obtener una longitud y volumen precisos. De esta

manera, la resistencia eléctrica puede ser calculada para posicionar el actuador exactamente donde se desea, obteniendo la estabilización y el auto-focus requeridos (Fig. 45). (Hutchinson, 2014)

Sin utilizar Nitinol, es interesante mencionar que la Ortoqueratología nocturna (Fig. 49), aprovecha la cualidad de memoria de forma, que tiene la córnea humana, para eliminar temporalmente la miopía y el astigmatismo, mediante lentes de geometría inversa. Como la córnea es un material visco-elástico y con memoria de forma, estas lentes, la moldean durante la noche, consiguiendo un efecto similar al de la cirugía. (Orthokeratology, 2014)

Las lentes no comprimen ni deforman la córnea, sino que modifican su curvatura, para aplanar de forma controlada la superficie de la misma. La córnea se adapta a la nueva forma y por la mañana la visión es mejor y el efecto dura todo el día.

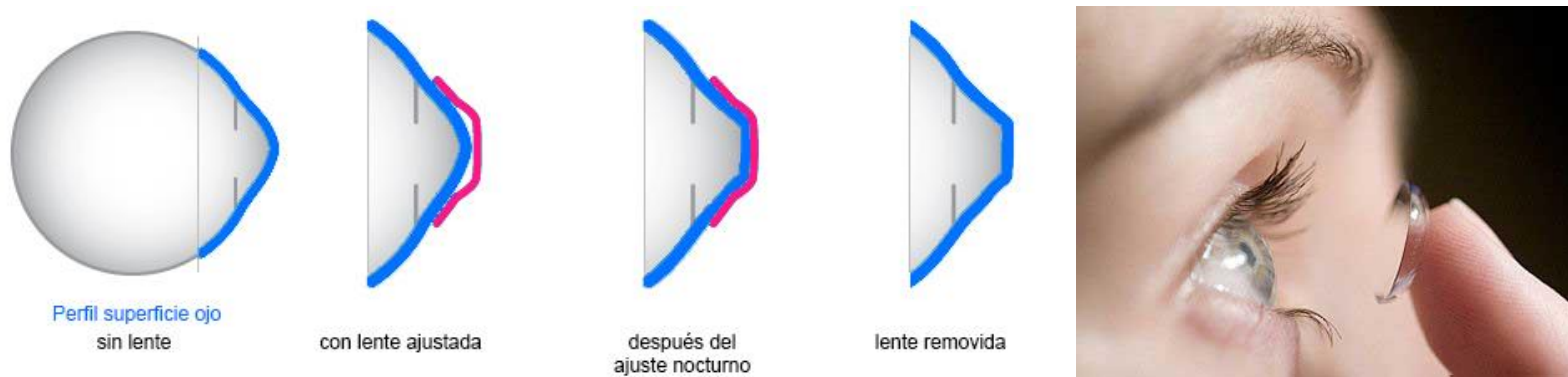


Fig. 49. Ortoqueratología. Lentes aplicadas a la córnea para cambiar su forma durante la noche

TEXTIL

Se están fabricando prendas de vestir, que reaccionan a la temperatura, para cambiar de forma. Las prendas se hacen de alambres de Nitinol embebidos en textiles. (Díaz & Orjuela, 2012)

A pesar de que en un principio, se ha considerado a estas prendas como meros artefactos esculturales de moda, podrían llegar a ser considerados como dispositivos que, potencialmente pueden conectarse a un sistema interactivo. Dispositivos que, en una interacción física con el cuerpo humano, son capaces de comunicar datos específicos y responder a una petición. (Berzowska & Coelho, 2005).



Fig. 48. Camisa de hilo de Nitinol



Fig. 51. El textil arrugado, recupera su forma inicial, al aplicarle calor

También se hacen prendas completamente de Nitinol, como el caso de esta camisa, que se puede arrugar completamente y con aplicación de calor, recupera la forma original. Se está trabajando también



Fig. 50. Hilos de NiTi intercalados en la fibra textil

con materiales con memoria de forma en la industria del calzado. El elevado tanto por ciento de la población, que tiene problemas en los pies, ha provocado que la industria haya tomado la decisión de ofrecer calzado personalizado. (Fig. 48 y Fig. 51)

Cuando un cliente se prueba un calzado, el material de éste se adapta a su pie y toma su forma única, para mejorar la pisada y el confort. Pero, si el cliente finalmente no compra ese calzado, y aquí viene la particularidad del sistema, éste volverá a tomar la forma original, gracias a los textiles con SMA. De esta manera, el siguiente comprador puede experimentar, con el mismo calzado, la oportunidad de personalizarlos con su forma, sin que el material acuse la prueba del cliente anterior (Fig. 50). Esto es gracias al tejido textil utilizado, en el que se intercalan hilos de SMA con las fibras textiles.

ROBÓTICA Y ELECTRÓNICA

En robótica, se utilizan alambres de Nitinol a modo de músculos artificiales. Un pequeño procesador controla qué alambres se activan. Envía un impulso eléctrico a cada músculo, para calentarlo por efecto Joule y hacer que el alambre disminuya de longitud, consiguiendo así el movimiento de esa articulación o parte del robot.

Un ejemplo simple es el “Stiquito” (Fig. 52). Un pequeño robot parecido al insecto palo, que se mueve gracias a sus alambres de memoria de forma y al microprocesador integrado en una placa, que hace también de cuerpo o chasis del insecto-robot. (Conrad, 2005). En general, las partes móviles de los robots suelen ser pesadas, grandes, complejas y caras. Con aleaciones con memoria de

forma podemos hacerlas más ligeras, simples y baratas. Además, esta aleación permite su uso durante millones de ciclos sin mostrar fatiga de material. (Mills, 1993).

Como sabemos, los SMA se activan al calentarse, por ejemplo por efecto Joule, esto es, cuando se hace pasar, por un conductor, energía eléctrica. Por lo tanto, podemos tener una CPU, que controle la cantidad de electricidad suministrada o qué SMAs se activarán y cuáles no. Si a este hardware, le añadimos un software con una interfaz gráfica, en el que se represente en pantalla cada hilo de NiTi, podemos asignar sliders o botones de desplazamiento de 0% a 100%, para controlarlo visualmente.

En un ejemplo de instalación, cada alambre de SMA, se conecta en una celda de una placa de conexiones. Cada posición es conocida por el software utilizado. Así, la CPU puede activar o desactivar, mandando impulsos eléctricos, los SMAs, con la coordinación que deseemos, para crear movimientos controlados por la interfaz.

Existe en el mercado, hardware que podemos utilizar. También software de código abierto, que los usuarios crean y comparten. Mediante esta tecnología, es posible realizar múltiples aplicaciones con NiTi y añadir funciones extra o de apoyo, tales como luces LED de aviso de activación, emisores sonoros, moduladores de ancho de pulso (PWM), sensores de viento, etc. etc. (Fig. 53)

Pero volviendo al campo industrial en general, otro caso de aplicación, de materiales con memoria de forma, son los sistemas de ventosas por vacío, para elevación de cargas. Aunque a pequeña escala, se ha demostrado la viabilidad y utilidad de estos dispositivos. Los investigadores, han desarrollado una ventosa, basada en SMA, de manera que cuando ésta se activa, la forma cambia y se produce el vacío y la fuerza de elevación necesaria (Fig. 54). Se han obtenido resultados satisfactorios en este sentido, desarrollándose un prototipo operativo que es capaz de hacer esta función.

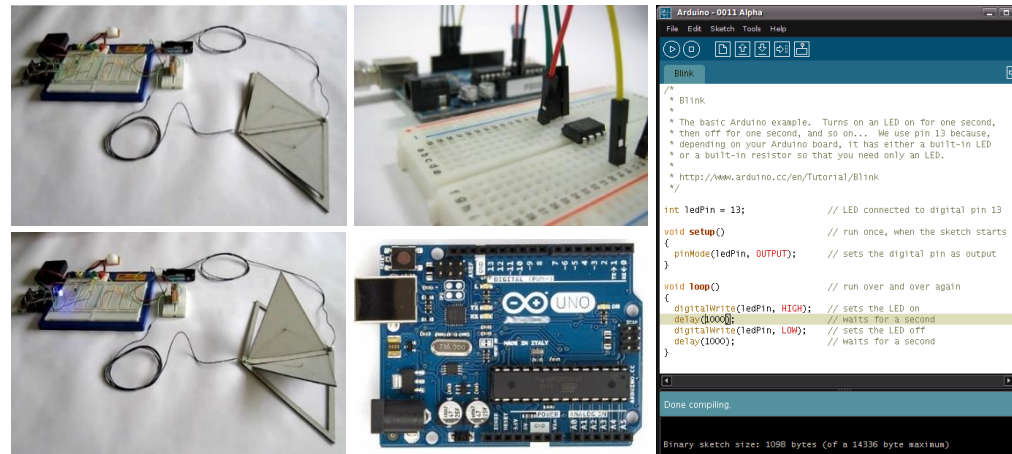


Fig. 53 Instalación electrónica con hilos de NiTi controlados por hardware y software

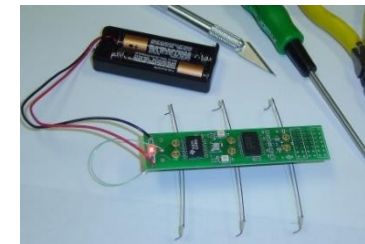


Fig. 52. "Stiquito" robot-insecto con músculos de alambre de Nitinol. Alimentado por dos pequeñas baterías y controlado por un microprocesador

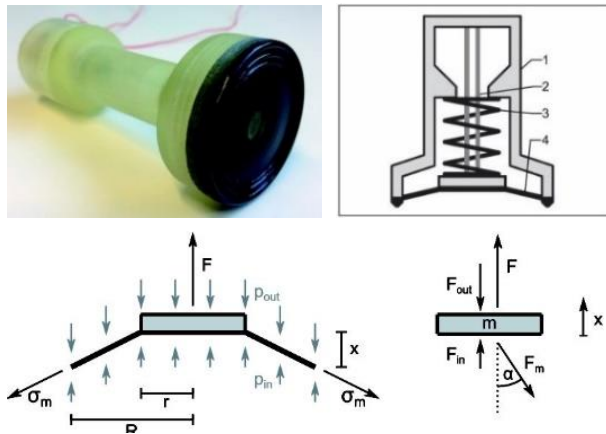


Fig. 54. Prototipo, partes componentes y equilibrio de fuerzas (abajo centro)

El esquema es muy simple: unos cables de SMA, sustentan una membrana de succión que, a su vez, está conectada a un resorte metálico. Cuando los cables con memoria de forma se activan con energía eléctrica, estos se calientan y reducen su longitud. Esto provoca que, el espacio entre la membrana y la superficie del objeto a elevar, aumente y aumente también la presión de succión. Una vez elevada la carga, el suministro eléctrico se suprime, los cables de Nitinol se enfrían volviendo a su estado martensítico y recuperando su longitud inicial. Es ahora cuando el resorte metálico, es más fuerte que los cables de NiTi y éste devuelve la membrana a su posición de inicio, liberando el objeto elevado. (Kunze, Motzki, Holz, York, & Seelecke, 2014)

Por otro lado, y similar a las aplicaciones aeroespaciales que utilizan materiales compuestos, los investigadores del IVW²⁵ de Kaiserslautern de Alemania, están estudiando y ensayando soluciones de estructuras activas híbridas, hechas de



Fig. 55. Polímeros con fibra de vidrio y cables de NiTi embebidos y activados eléctricamente.

polímeros reforzados con fibra (FRP) y SMA, para diferentes propósitos. En estos casos, la transferencia efectiva de carga de los cables SMA al material compuesto, es muy importante. Para ello, se han estudiado muestras de GFRP²⁶ (Polímeros Reforzados con Fibra de Vidrio) con cables de Nitinol embebidos en las mismas. En uno de estos ejemplos, se dispone una tira plana y rectangular de 145x30mm de material FRP. Dentro de ella y

²⁵ IVW: Institut für Verbundwerkstoffe. Instituto de Materiales Compuestos. Kaiserslautern, Alemania.

²⁶ GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer

en paralelo, se colocan los cables de SMA, cuyos extremos se conectan entre sí y éstos a una línea eléctrica, que suministrará la corriente necesaria para su activación, mediante efecto Joule (Fig. 55). También hacen la función de anclaje de estos cables. La muestra se activa con el calor de la electricidad y ésta cambia de forma por los cables de Nitinol. (Hübler, Nissle, Gurka, & Breuer, 2014)

TRANSPORTE

En Japón, los trenes de alta velocidad Shinkansen²⁷ (Fig. 56) utilizan muelles SMA, en las cajas de cambio de marchas. La misión de estos muelles, es la de impedir que la temperatura del aceite lubricante, se eleve tanto, como para dañar el mecanismo, cuando el tren va a máxima velocidad. Es un sistema automático de ajuste de la válvula, que controla el lubricante. Cuando el tren está en marcha, el aceite es bombeado por la corona giratoria, para evitar que se pegue, pero ésta provoca que el lubricante suba de temperatura gradualmente. Cuando sube de los 40°C, el muelle de Nitinol se estira y empuja un pequeño pistón, que cierra el orificio del by-pass. El resultado es que el aceite, se acumula en la pequeña cámara anexa. Por lo tanto, el resto del lubricante disminuye de volumen y de temperatura (Fig. 57).



Fig. 56. Tren de alta velocidad japonés Shinkansen, con sistema de cambio de marchas asistido por SMA

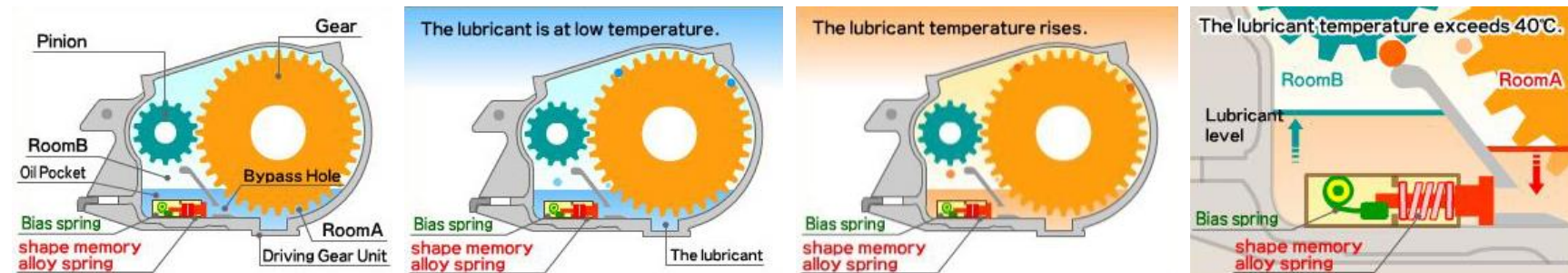
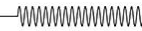


Fig. 57. Funcionamiento del sistema de cambio de marchas con muelle de aleación con memoria de forma (SMA)

²⁷ Shinkansen: Literalmente, “nueva línea troncal”.



2.12 ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESTRUCTURAS y SISMO

Analicemos ahora, los casos de uso de SMA en Arquitectura. Las aleaciones con memoria de forma basadas en hierro, FeSMA²⁸ y en especial las de Hierro-Manganeso-Silicio, se están estudiando en la actualidad, como parte de sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón armado. (Cladera, y otros, 2014)

Las estructuras de hormigón armado, a menudo se deben reforzar. Las técnicas de refuerzo, usualmente incluyen aumento de hormigón en las zonas comprimidas y de acero en las traccionadas. Para las zonas traccionadas, se usan también barras de fibra de vidrio, que requieren de menor recubrimiento, al no ser afectadas por la corrosión, como le ocurre a las barras de acero corrugado convencionales. Esto permite intervenciones superficiales, entre los 2 y 3cm de profundidad en el elemento, en lo que se conoce como NSMR²⁹ o refuerzo superficial y en el que se practican acanaladuras, para alojar las barras de fibra de vidrio.

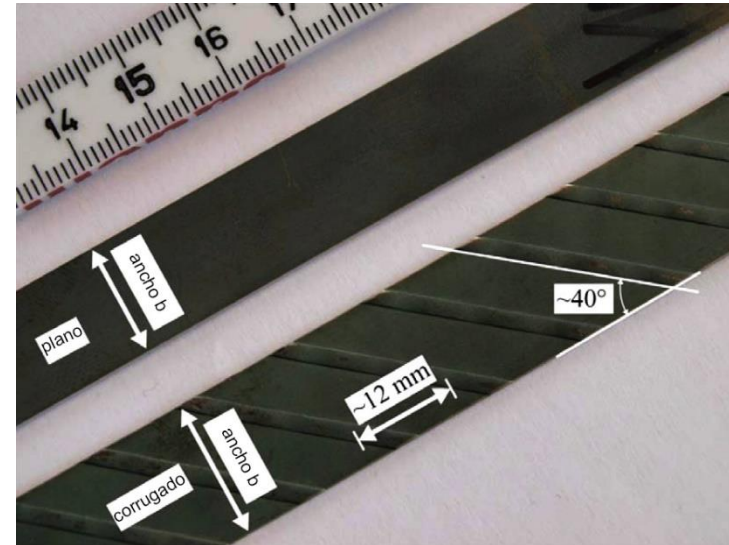


Fig. 58. Tiras de FeSMA con resaltos diagonales para mejorar la adherencia con el hormigón

Estas aleaciones, permiten refuerzos aún más superficiales, situados en el último cm del elemento, ya que, al igual que la fibra de vidrio, no se corroen con la humedad ambiental y por lo tanto, los espesores de protección se reducen considerablemente.

En el proceso convencional, de pretensado de un elemento de hormigón armado, se aplica a unos cables de acero, una fuerza de tracción determinada. A continuación, se vierte el hormigón que, una vez curado, mantiene la tensión de los cables, proporcionando a ese elemento mayor resistencia mecánica.

²⁸ FeSMA: Ferro Shape Memory Alloy. Aleación con memoria de forma basada en Hierro.

²⁹ NSMR: Near-Surface Mounted Reinforcement. Refuerzo superficial.

Pero, este sistema requiere de espacio y maquinaria, a ambos extremos de los cables de acero. Un espacio que muchas veces es escaso. Sobre todo en Rehabilitación.

Estos investigadores, proponen utilizar tiras planas de FeSMA, en lugar de los cables de acero. Estas tiras ultradelgadas y con resaltes diagonales, para aumentar la adherencia con el hormigón (Fig. 58), no necesitan de anclaje en los extremos, ni de ninguna máquina para aplicar la tensión, ya que esta se consigue por medios eléctricos. Simplemente aplicando electricidad, se consigue que las tiras de FeSMA, pasen del estado martensítico al austenítico, consiguiendo el efecto del pretensado. Además, las perforaciones en el hormigón del elemento a reforzar, son significativamente menores. (C., Shahverdi, Brönnimann, Leinenbach, & Motavalli, 2014).

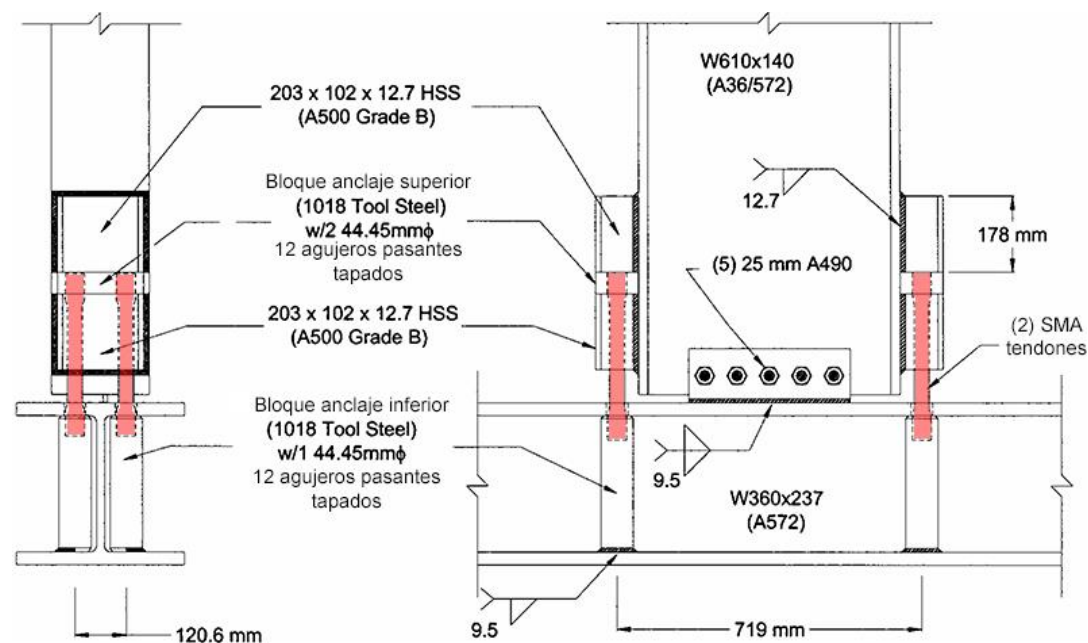


Fig. 59. Conexión entre soporte y viga metálicos mediante tendones SMA.

Otros investigadores, también utilizan las propiedades de las SMA, para reforzar las estructuras, ante las acciones sísmicas. Las uniones entre vigas y columnas, se realizan mediante grupos de cuatro barras de NiTi, de 35mm de diámetro. (Fig. 59). La propiedad de este material, de adquirir grandes deformaciones, en su estado frío o martensítico, recuperables mediante la aplicación de calor, se ha estudiado en dos modelos a escala real. Se pretende, que estos cuatro tendones SMA, sean el mecanismo primario, de la transferencia de esfuerzos. En las pruebas realizadas, las conexiones de tendones mostraron un alto nivel de disipación de energía, gran capacidad de ductilidad y ausencia de fatiga en la fuerza desarrollada, después de repetidos ciclos de carga, de hasta el 4%. Después de la deformación, ante el movimiento sísmico simulado, los tendones SMA se calentaron para recuperar las deformaciones (Fig. 60). Se hicieron pruebas con y sin carga.

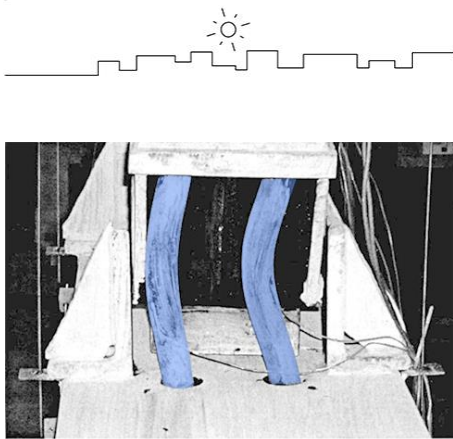


Fig. 60. Tendones SMA de conexión entre elementos metálicos. Arriba los tendones deformados en estado martensítico. Abajo después de calentarse y recuperar la forma



Fig. 61. Iglesia de San Francisco de Asís. Italia. Sistema de disipación de energía y control de deformaciones mediante mecanismos de aleaciones SMA

Aunque ambas pruebas, resultaron fallidas en el intento de recuperar totalmente la forma, en el ensayo sin carga se llegó hasta un 76% de recuperación y en el caso de carga aplicada se llegó hasta el 54%. Sin embargo, una vez iniciado el proceso de memoria de forma, los resultados mostraron, que las conexiones pueden resetearse repetidas veces, de manera estable, lo cual implica que podrían seguir funcionando en la estructura de un edificio, después de haber sufrido un movimiento sísmico (Ocel, y otros, 2004).

Los autores inciden, en la importancia del correcto diseño de la conexión, entre los tendones y la estructura. Punto clave para la transferencia efectiva de esfuerzos.

Sin duda, las particulares propiedades de las SMA, las hacen especialmente idóneas para mejorar el comportamiento de las estructuras ante las acciones sísmicas. En la actualidad, se utilizan dos mecanismos principales: limitación de la energía inducida en la estructura, mediante elementos de separación de la misma y su cimentación o con disipadores o amortiguadores de masa. Pero las SMA, nos permiten disipar aún más esa energía, además de la posibilidad de recuperar deformaciones permanentes, por medio de la utilización de elementos introducidos en la estructura.

Encontramos ejemplos de aplicación, en la Basílica de San Francisco de Asís, o en la escuela de la localidad de Potenza, ambos en Italia (Braz Fernandes & Dragos Moldovan, 2010) (Fig. 61).

INSTALACIONES

El primer actuador con memoria de forma, utilizado en un edificio, funcionaba con un muelle de CuZnAl. En este caso, se usa el actuador para abrir o cerrar las ventanas de un invernadero (Fig. 62). Cuando la temperatura del interior es demasiado alta, respecto al nivel óptimo para las plantas, la ventana se abre, para permitir la salida del calor acumulado y cuando la temperatura vuelve a caer, se cierra. (Duerig T. , Applications of Shape Memory, 1990). De nuevo, es un proceso autónomo y dinámico, que no necesita de supervisión alguna y que, además, tiene muy baja probabilidad de fallo.

Se hicieron en esa época otras aplicaciones, como el dispositivo anti-quemaduras para el agua de las duchas. Una empresa alemana, diseñó y fabricó este pequeño aparato, que está formado también, por un resorte de CuZnAl, dependiente de la temperatura (Fig. 62). Otra empresa japonesa, tiene también otro dispositivo mezclador. En realidad, es una válvula, que permite mezclar el agua de forma más eficiente y evita que, cuando por ejemplo, se está usando una ducha y se abre otro grifo de la instalación, el usuario sufra quemaduras.

Un muelle de NiTi, trabaja en contra de otro muelle de acero (Fig. 63). El funcionamiento es el siguiente:

El agua caliente y el agua fría, entran en la válvula. Girando un mando, se puede regular la tensión del muelle de acero (a la derecha de la imagen). En este caso a 40°C. El agua entra y como la temperatura está, por debajo de la activación del muelle SMA (a la izquierda), éste se mantiene extendido. Cuando se abre otro grifo, en la misma instalación, el flujo de agua caliente es menor y por tanto la temperatura de la mezcla es menor, que la deseada por el usuario. En ese instante, el muelle de acero comprime el muelle SMA, permitiendo mayor entrada de agua caliente. Esto provoca que el muelle de Nitinol se active, recuperando la forma pre-programada, para mantener la temperatura final del agua, en el valor deseado.

La misma empresa, tiene dispositivos de ventilación dependientes de la temperatura y actuados por SMAs. Se trata de unas rejillas con lamas móviles (Fig. 65). Para forjados sanitarios, en los que se desee ventilar la cámara de forma más eficiente, las lamas permanecen cerradas durante el invierno, cuando hace mucho frío o al menos mientras la temperatura no suba de la temperatura de activación, del tipo de SMA elegido. Cuando se supera este valor, las lamas de las rejillas se abren permitiendo la ventilación, hasta que de nuevo se cierran, al llegar el frío.

Sin aporte de energía, mantenimiento, ruido, vibraciones, etc. además de un largo periodo de funcionamiento, gracias a la poca fatiga de estas aleaciones y la fiabilidad que da el hecho de que no tiene mecanismos complejos que se puedan estropear. Solamente unos hilos de Nitinol, controlan el movimiento de las lamas, de manera simple, efectiva y duradera.

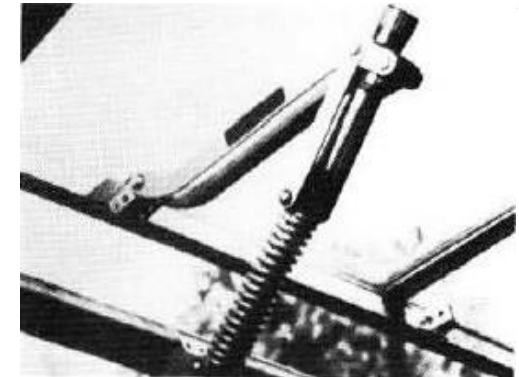


Fig. 62. Muelle de CuZnAl en actuador de ventana de invernadero

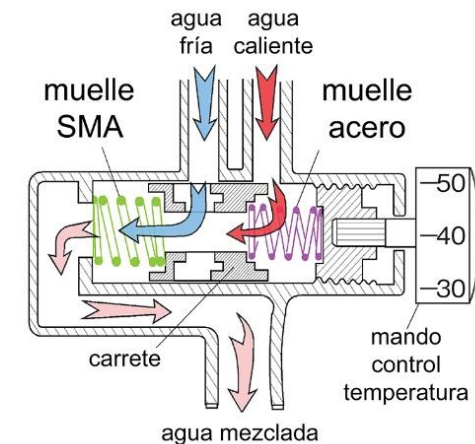


Fig. 63. Sistema de control de la temperatura del agua mediante resortes de NiTi y acero

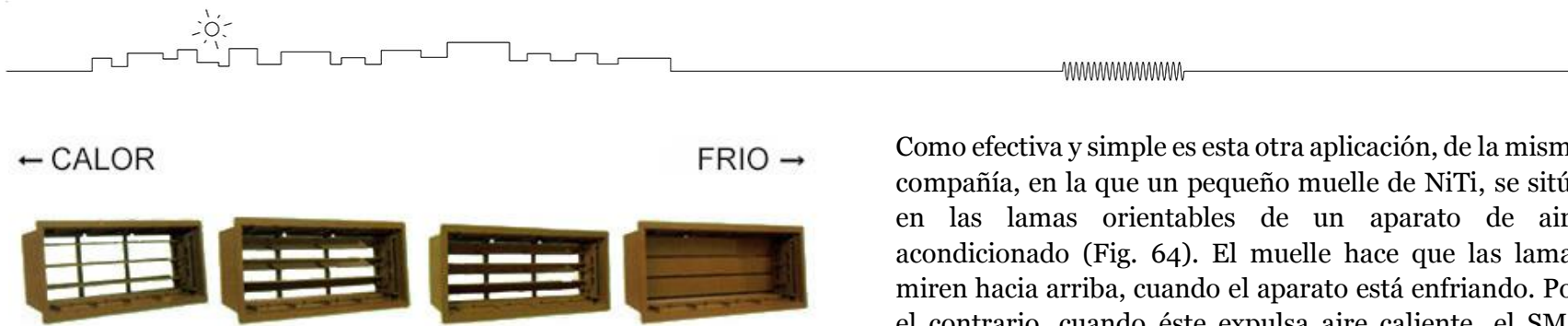


Fig. 65. Rejillas de ventilación dependientes de la temperatura exterior y controladas por SMA, para ventilación de forjados sanitarios

Como efectiva y simple es esta otra aplicación, de la misma compañía, en la que un pequeño muelle de NiTi, se sitúa en las lamas orientables de un aparato de aire acondicionado (Fig. 64). El muelle hace que las lamas miren hacia arriba, cuando el aparato está enfriando. Por el contrario, cuando éste expulsa aire caliente, el SMA dirige las lamas hacia abajo. De nuevo sin energía extra. La energía necesaria para el cambio de orientación de las lamas, proviene del calor propio producido por el aparato



Fig. 64. Sistema de actuación en lama pivotante de A.A. basado en muelles de acero y SMA

de aire acondicionado que, cuando expulsa calor activa el Nitinol, que convierte este calor en energía mecánica y movimiento. Movimiento que se invierte cuando el calor cesa, mediante un resorte de acero, en un esquema de funcionamiento similar al comentado para las válvulas anti-quemaduras de las duchas.

También se utilizan actuadores SMA, en la protección contra incendios. Una empresa americana, ha desarrollado sprinklers³⁰, que incorporan un pequeño actuador que, cuando detecta el calor del incendio, se activa y abre la válvula para que salga el agua. Algunos rociadores actuales, utilizan un elemento sensor del calor, que está formado por una pequeña cápsula de vidrio, llamada bulbo, llena de sustancias químicas. Pero hay algunos problemas con este sistema como fallos prematuros o los costes asociados a la no actuación de estos productos.

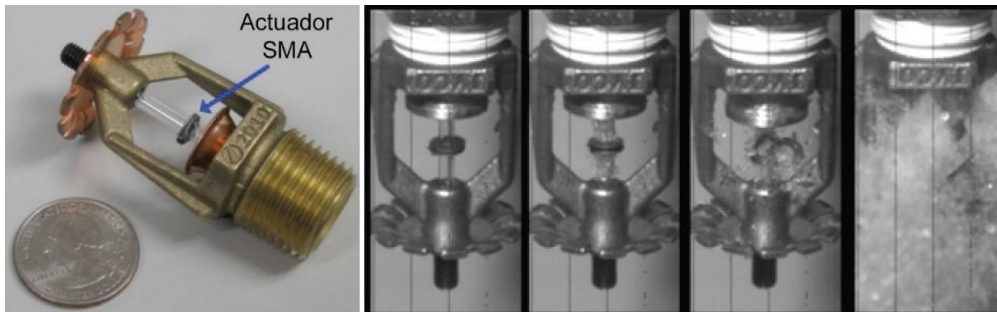


Fig. 66. Rociador para protección contra incendios con actuador SMA.

La idea es, sustituirlos por un tubo simple de vidrio o cerámica de alta resistencia y una arandela de aleación de Nickel-Titanio, con forma pre-deformada. En la fase de transformación de esta aleación, la cual se activa mediante temperatura, el SMA es capaz de desarrollar una fuerza de destrucción significativa. De esta

³⁰ Sprinkler: rociador de protección contra incendios.

manera, la arandela de NiTi, solo romperá el tubo de vidrio o cerámica y permitirá al agua fluir por el rociador (Midé, 2014). Una vez más, hay que insistir en la fiabilidad de este sistema. Cuando el calor del incendio llega a la aleación, los átomos que la forman, inevitablemente cambiarán su posición y por tanto su estructura cristalina. Es un cambio a nivel atómico...no hay posibilidad de fallo.

MOBILIARIO Y DECORACIÓN

Las cualidades de las aleaciones con memoria de forma y superelasticidad, se pueden aprovechar para diseñar mobiliario “inteligente”. Este mobiliario, podría responder a estímulos externos, con una respuesta determinada. En general, para este tipo de muebles, se pueden usar cables y muelles superelásticos ya que tienen un alto número de ciclos de utilización, sin merma en su elasticidad. Los dispositivos, que ahora usamos, para que las puertas vuelvan a cerrarse solas, después de abrirlas, tienen muelles de acero que, con el tiempo van cediendo y perdiendo fuerza.

Se pueden realizar luminarias, que incorporen estos materiales. La energía eléctrica de la propia luminaria, sirve para activar el SMA o con el propio calor desprendido de la lámpara. Así lo propone, el investigador alemán Jurgen Westerhoff, en su “Nitinol Kinetic Lamp”, (Fig. 67), en la que una lámpara halógena, sirve para dar calor y activar dos muelles de Nitinol que actúan sobre las “hojas” de la luminaria, para abrirlas cuando estos están activos (calientes) o cerrarlas cuando están desactivados (fríos). Las lámparas halógenas son más eficientes que las incandescentes, pero aún desprenden mucho calor. Calor que es aprovechado por el investigador, para dar energía al sistema de actuación (Westerhoff, 2015). Otro ejemplo de luminaria, que utiliza Nitinol en su funcionamiento, es la propuesta de Romolo Stanco y su V/agra Lamp (Fig. 68) que cambia de forma cuando se enciende o se apaga. (Stanco, 2015)



Fig. 67. “Nitinol Kinetic Lamp”. Dos muelles de Nitinol se activan con el calor generado por la lámpara



Fig. 68. V/agra Lamp



ARQUITECTURA y URBANISMO: Ejemplos

Jean Nouvel (París, Francia, 1987)

Ganador del premio Pritzker en 2008, el arquitecto francés Jean Nouvel también se preocupó por el tema del control de la luz, en el interior de los edificios.

En el Instituto del Mundo Árabe de París, conjuga motivos geométricos inspirados en la Alhambra, para crear en una de las fachadas, una retícula de 240 paneles cuadrados y 30.000 diafragmas mecánicos, que se abren y se cierran, para permitir la entrada de más o menos luz. Estos diafragmas están conectados a sensores fotosensibles para que siempre exista un nivel óptimo de iluminación (Fig. 69).

Las propias cuchillas de los diafragmas (similares a las de las cámaras fotográficas) generan formas poligonales que recuerdan a las celosías árabes, creando y consiguiendo, además del aspecto buscado, un edificio que reduce el consumo de electricidad en iluminación, en una obra arquitectónica de gran calidad. (Fig. 70)

Aunque el sistema ahorra energía porque optimiza la iluminación y por tanto, su consumo, se desconoce si su origen es renovable o no. Hay que señalar que, si se utilizaran placas fotovoltaicas o cualquier otra forma de obtener energía gratuita y renovable, el sistema mejoraría en cuanto a su balance global de demanda energética. (Nouvel, 1987).

Hay que decir también que estos diafragmas se mueven mediante motores eléctricos. Estos motores son susceptibles de fallo y necesitan mantenimiento. Esto no ocurriría en el caso de usar aleaciones SMA.

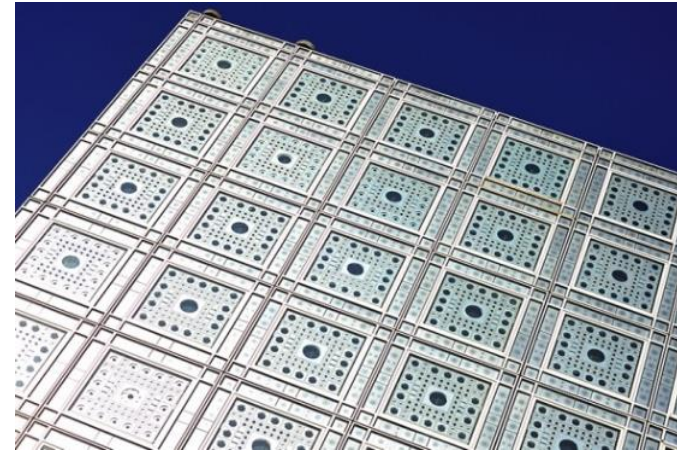


Fig. 69. Fachada Instituto Mundo Árabe de Jean Nouvel. París 1987



Fig. 70 Detalle del interior con la luz natural entrando por los diafragmas robotizados

DeCOI Architects (USA 2001)

Mark Goulthorpe y el estudio de Arquitectura deCOI, han diseñado la “Hyposurface”, una superficie triangulada que responde a estímulos como el movimiento, sonido o luz. (Fig. 71), para crear cambios en su morfología, en tiempo real.

La “Hipersuperficie”, está accionada en este caso por actuadores neumáticos controlados por un ordenador, que les dice cuales deben actuar y cuánto, de manera que los vértices de los triángulos, toman diferentes elevaciones, respecto al plano base de la pantalla.

Este medio digital, de 10m de largo por 1,5m de ancho y 4m de altura, puede mostrar cualquier mensaje o logotipo, con mayor impacto que una superficie plana. Su representación en tres dimensiones, resulta atractiva para el espectador. Se puede usar en eventos de comercio, conciertos de música, soporte publicitario o como juego interactivo para la ciudad. (Goulthorpe & Architects, 2003)

Se están sustituyendo los problemáticos actuadores neumáticos iniciales, por otros electro-magnéticos. No es un caso de utilización de aleaciones SMA, pero si es un ejemplo de superficie inteligente y en el que, los problemas que han tenido con los actuadores neumáticos, probablemente no hubieran ocurrido con SMAs. Además, el gasto de energía eléctrica, de los nuevos actuadores electro-magnéticos, es superior a sus análogos basados en aleaciones con memoria de forma.

Ernst Giselbrecht and Partners Architekturbüro (Austria, 2006)

Este estudio de arquitectura austríaco, construyó en 2006, este edificio con fachada completamente de vidrio. Tiene la particularidad de que, por delante del vidrio, se desarrolla otra fachada de paneles que, se pliegan deslizándose por unos perfiles guía verticales.

Los paneles, una vez plegados, forman un elemento horizontal de protección solar y permiten la visión del exterior (Fig. 72). Pueden hacerlo individualmente hasta la posición que se desee y de esta manera, el edificio puede tomar diferentes configuraciones, de luces y vistas.

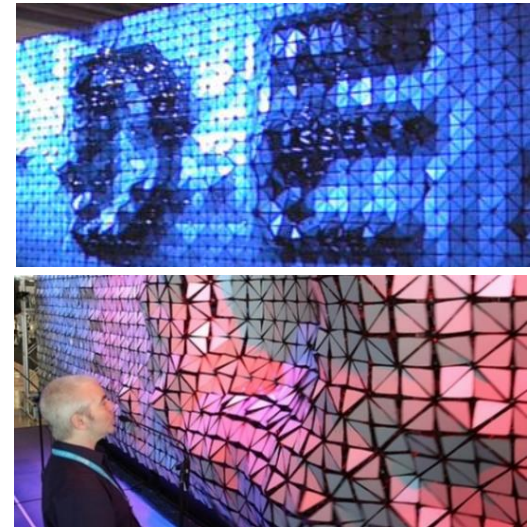


Fig. 71. Pantalla inteligente “Hyposurface” que responde a estímulos externos cambiando de forma



Fig. 72 Showroom Kiefer Technic.
Sistema de fachada de paneles
móviles

Se utilizan motores eléctricos para accionar el movimiento de estas placas de fachada y es un claro ejemplo en donde, los actuadores basados en materiales SMA, podrían funcionar muy bien. Estos podrían ser activados eléctricamente por efecto Joule y esa electricidad podría provenir de paneles fotovoltaicos. De esta forma, el sistema ni siquiera consumiría energía eléctrica de la red, con lo que se suprimiría el consumo de los actuales motores eléctricos. (Architekturburo, 2007)

Muchos de los casos que se han analizado, utilizan aleaciones SMA para generar dinamismo y respuestas a los cambios. En otros casos, no utilizan estos materiales, pero se han analizado como sistemas en los que se podría implementar.

Además, como se ha puesto de manifiesto, muchos de estos sistemas utilizan energía eléctrica tomada directamente de la red general de suministro. Pero desde hace ya varias décadas, ha ido incrementándose nuestra preocupación por el agotamiento de los recursos energéticos. Recordemos que, a día de hoy, seguimos produciendo electricidad en un tanto por ciento elevado, mediante la transformación de los combustibles fósiles. Esto, como sabemos, conlleva altos niveles de contaminación, así como la posibilidad real, ya comentada y estimada para 2025, del fin de las existencias del petróleo que queda en nuestro planeta.

Decker & Yeadon (Nueva York, USA, 2008)

Otros arquitectos, que están haciendo cosas interesantes, son los también norteamericanos Decker&Yeadon, de Nueva York. Sus propuestas, utilizan aleaciones con memoria de forma, como material clave para realizar una Arquitectura dinámica y sensible a los cambios del exterior.

Han desarrollado varios sistemas de protección solar para edificios. Uno de ellos, es el “Sistema de Fachada Homeostática³¹”. Láminas de NiTi, se curvan o aplanan, para permitir la mayor o menor

³¹ Homeostasis: capacidad de un organismo, de mantener una condición interna estable, mediante el intercambio de materia y energía con el exterior, como por ejemplo, el sistema de autorregulación de la temperatura, en los seres vivos.

entrada de sol, en el interior del edificio y poder controlar así la temperatura interior (Fig. 74). El sistema, se integra en la envolvente, entre las dos láminas de vidrio que conforman la fachada. (Minner, 2011)

Otra solución que plantean, es la “Smart Screen” o pantalla inteligente. Se trata de un sistema de oscurecimiento, dependiente de la temperatura, que utiliza muelles SMA, para el camino de ida de la actuación y muelles de acero para la vuelta. Esta Smart Screen (Fig. 73), en sus tres versiones, también está integrada en el cerramiento de vidrio de la fachada y su grado de oscurecimiento, varía desde un 50% aproximadamente, hasta el 100%.

Un ejemplo de esta pantalla, se compone de tres láminas paralelas, con idénticas perforaciones circulares en todos ellos. Cuando el muelle de Nitinol se activa, al elevarse la temperatura, las láminas se desplazan unas respecto de las otras, provocando que las perforaciones por las que entraba el sol se cierren, para proporcionar sombra.

Cuando la temperatura vuelve a descender, las tres láminas vuelven a su posición inicial de apertura al 50%. Aquí el concepto “smart” o “inteligente” viene de la capacidad de este elemento, de actuar de forma autónoma y reaccionar a estímulos externos, en este ejemplo, la temperatura.

En este caso, la distancia que se desplazan las láminas, es la misma del dispositivo de actuación que las hace mover o lo que es lo mismo, el diámetro de la perforación coincide con el incremento de longitud que experimenta el muelle de Nitinol al calentarse.

Joshua G. Stein y Rob Ley (Nueva York, USA, 2009)

Algo parecido, proponen los arquitectos Rob Ley y Joshua G. Stein en su instalación “Reef”, en la que investigan con superficies ligeras que se pliegan y vuelven a su estado original, gracias al Nitinol. Unos hilos de

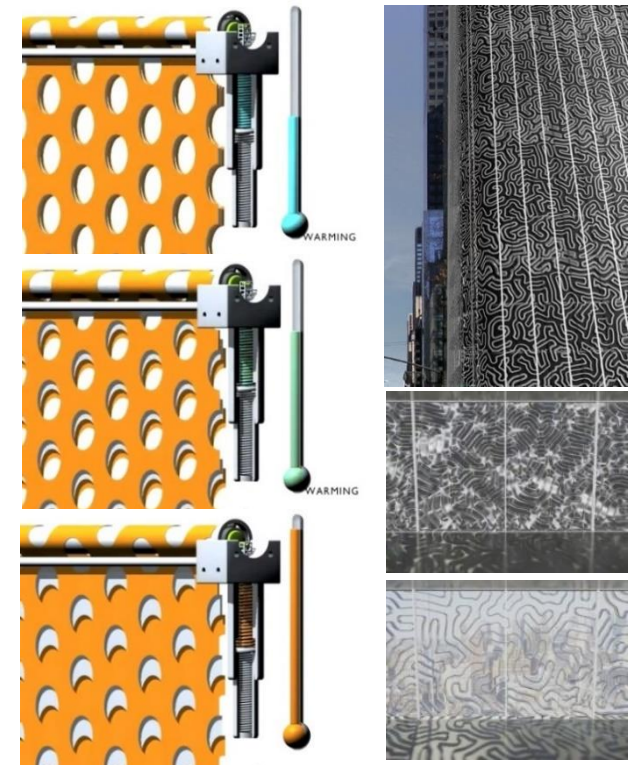


Fig. 73. Sistema de control lumínico mediante SMA

Fig. 74. Fachada homeostática

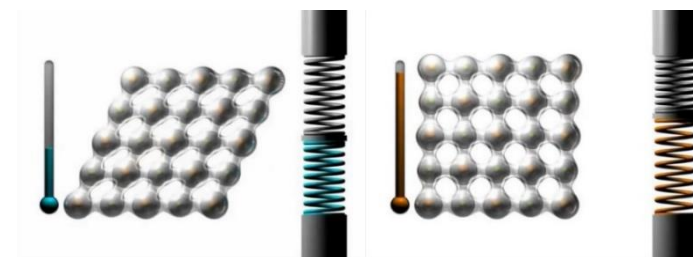


Fig. 75. Muelle SMA frío a la izquierda (martensita) y caliente a la derecha (austenita)

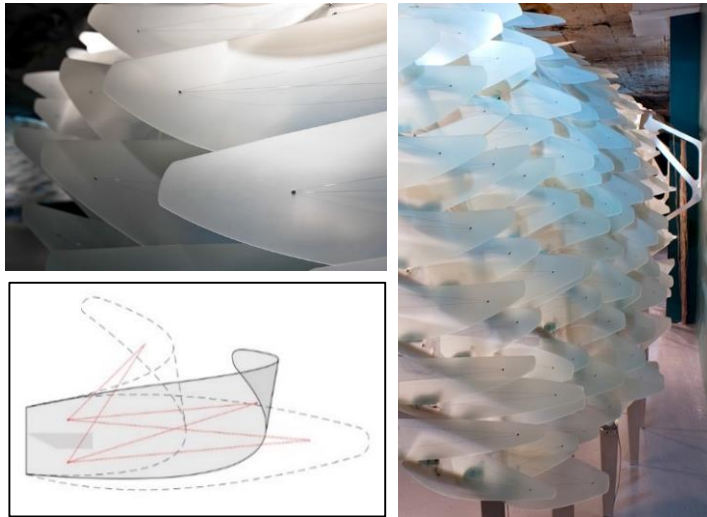


Fig. 76. Láminas flexibles actuadas por hilos de Nitinol

esta aleación (en rojo), recorren en forma de V el anverso de unas hojas artificiales. Cuando estos hilos se calientan, reducen su longitud y hacen que la hoja se curve. Una vez enfriados, ésta vuelve a su forma inicial (Fig. 76). (Ley & G. Stein, 2009)

A pesar de ser una instalación, esta prueba de concepto demuestra, que la aplicación de los SMA en Arquitectura, es posible. Estas hojas o escamas se podrían instalar en fachadas de edificios para que, con el calor del sol, se activen y cambien de forma para proporcionar sombra.

En esta otra instalación, los arquitectos proponen una estructura ligera y dinámica también actuada por Nitinol. En este caso, unas lamas inicialmente planas, se van curvando, según se activa el actuador de NiTi, que llevan incorporadas. En el ejemplo de la (Fig. 77), la forma plana se curva al activarse un primer actuador, provocando que ésta se pliegue. Al cesar la activación, la estructura vuelve a la posición original. Si se activa el segundo actuador, se consigue otro tipo de movimiento y si se activan los dos simultáneamente, se alcanza el máximo movimiento.

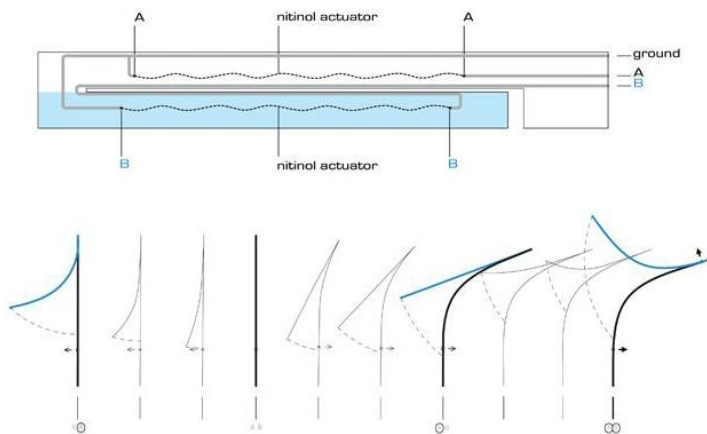


Fig. 77. Lamas actuadas con Nitinol y activadas eléctricamente

Los autores, redefinen así, el papel que desempeñan las envolventes en Arquitectura, mediante el uso de materiales emergentes, como los SMA, que ofrecen la posibilidad de un movimiento fluido y eficiente, sin los mecanismos de otras tecnologías, ya que operan a nivel atómico. *“La membrana sensible “Reef” crea un rango diverso de cerramientos dinámicos y porosos capaces de producir sofisticadas y flexibles respuestas, a un programa existente.”* (Stein & Ley, 2010)

Achim Menges (Alemania, 2010)

El arquitecto alemán Achim Menges, investiga con superficies de madera ligera, que reaccionan a estímulos del entorno, para ofrecer una respuesta en forma de movimiento. Sus mallas, están formadas de elementos de

contrachapado flexible, que se mueven mediante actuadores (Fig. 78). Las mallas, se abren o cierran dependiendo, por ejemplo, de las condiciones de humedad. Si el nivel es demasiado alto, la malla se abre, permitiendo la ventilación del espacio (Menges, 2010).

La madera, aporta un grado excepcional de calidad y calidez. Este material además, fabricado en delgadas láminas, permite el paso de la luz a través de ellos. El aspecto es el de una estructura natural parecida, de nuevo, a las escamas de los peces. Los actuadores, fuerzan la deformación de las escamas, desde la posición plana o cerrada, hasta la posición curva o abierta. La estructura de soporte auxiliar de las piezas, queda oculta en lo que es sin duda, una elegante solución.

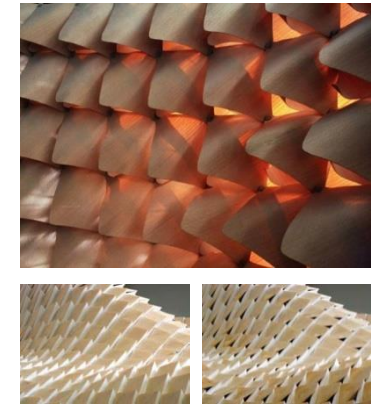


Fig. 78. Malla de escamas de contrachapado de madera

Koi, Burry y Burry (Melbourne, Australia, 2011)

Los arquitectos Chin Koi Khoo, Jane Burry y Mark Burry, de la Universidad RMIT, investigan sobre las pieles de los edificios y como se podría sustituir los, a menudo complejos sistemas mecánicos de actuación y control, por otros más “suaves”, basados en materiales con memoria de forma y superelasticidad, que minimizan el uso de juntas complicadas y ofrecen una respuesta dinámica o kinética³². (Khoo, Burry, & Burry, 2011)

Las estructuras transformables pueden ser más simples, más orgánicas y mostrar un comportamiento más natural. Los mecanismos se anulan y ahora forman parte del material de la piel. No hay sistemas de control y la respuesta viene directamente del material ante el estímulo externo.

Han diseñado un prototipo llamado “Cortina”, que actúa como una segunda piel en un edificio existente, con buen comportamiento ante los cambios climáticos, manteniendo la permeabilidad visual y sirviendo a dos propósitos fundamentales: Confort y Cosmética, para mejorar las condiciones espaciales existentes exteriores e interiores. Dos de estos

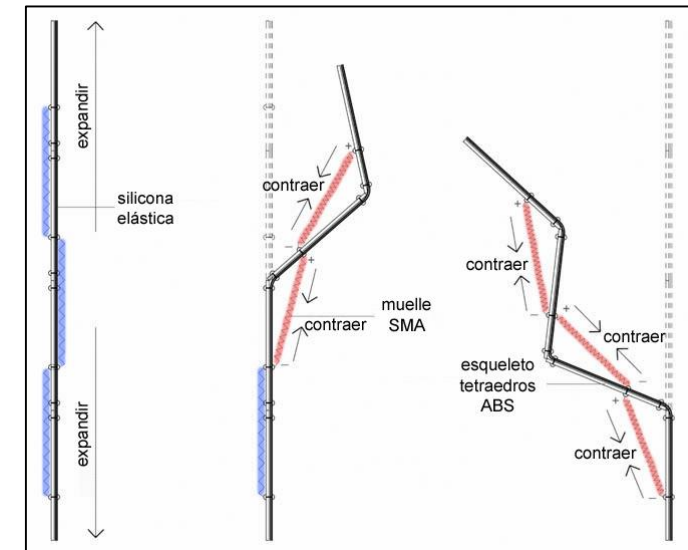


Fig. 79. Estructura móvil con muelles SMA y goma de silicona

³² Kinética: del término inglés Kinetics: del griego, “movimiento” o cinética.



Fig. 80. Sombrillas en la Medina del Santo Profeta en Arabia Saudí. Estructura metálica y móvil mediante motores eléctricos. Membrana de cobertura de PTFE

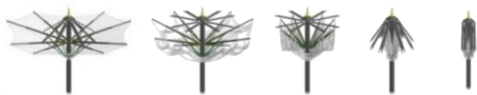


Fig. 81. Secuencia de apertura y cierre de sombrillas

arquitectos (Khoo, C.K. y Burry) junto a Salim, F., han desarrollado una estructura móvil y actuada por Nitinol, parecida a la propuesta de Stein y Ley.

Se trata de un sistema móvil de placas con resortes de SMA y goma de silicona, para contraerse y expandirse. Los muelles se sitúan en puntos estratégicos y al activarse pliegan estas placas. Una vez desactivados, la goma de silicona devuelve el sistema a la posición inicial (Fig. 79). (Khoo, Salim, & Burry, 2012)

SL Rasch (Alemania 2011)

El estudio SL Rasch – Insitute for Scientific Architecture de Alemania, ha proyectado y construido unos gigantescos parasoles o sombrillas, para la Medina del Santo Profeta, en Arabia Saudí (Fig. 80 y Fig. 81). Se trata de unos elementos, que dan sombra durante el día y por la noche, se repliegan sobre sí mismos, para liberar el espacio, permitir la mejor ventilación y permitir una visión clara y libre del cielo nocturno. Además, los soportes funcionan también, como puntos de iluminación por la noche.

Las grandísimas sombrillas, tienen una altura cerradas, de casi 22m y 15m abiertas. De planta cuadrada, tienen un lado de 25m, cubriendo cada una un área de 610m². Se han colocado en la Medina 250 unidades, lo que da un total de unos impresionantes 145.000m². Tienen un peso de 20tm, estructura metálica de acero y la cobertura está hecha de membrana de PTFE. El sistema está conectado a unos sensores de luz y en el momento preciso, mediante un potente motor eléctrico, se pueden desplegar o replegar en 180 segundos. (Rasch, 2011) Es una velocidad aceptable, teniendo en cuenta que hablamos de Arquitectura. Si pretendemos desplegar estos elementos tan grandes, a una velocidad mayor, podríamos causar alarma en los visitantes de la Medina o también podríamos correr el riesgo de que estos parasoles, tomen más protagonismo del necesario.

Por otra parte, de nuevo hay que insistir en términos energéticos. Esos motores eléctricos, sin duda tienen mayor consumo que en el caso de que fueran actuadores SMA, por no hablar del origen de esa energía, que

no es renovable. Ha sido una ocasión única para dotar a estas grandísimas superficies de captación solar fotovoltaica. Aunque siempre se puede implementar en el futuro. La solución arquitectónica, en general, ha sido un gran acierto.

Tristan D’estrée Sterk (Chicago, USA, 2011)

Este arquitecto desarrolla arquitectura sensible a estímulos externos. Sus propuestas, forman un todo de estructuras de “tensegridad” (tensegrity), término inglés acuñado por Buckminster Fuller, para referirse al sistema estructural que está formado por barras a compresión, separadas entre sí, pero unidas por elementos traccionados (cables). Se basa en tres principios: a) Entrada de datos por parte del usuario, que permite controlar las respuestas a lo largo de todo el edificio. b) la estructura de un edificio con la habilidad de responder directamente a las cargas del exterior. c) respuestas espaciales para subdividir el espacio interior (Orambra, 2011).

Sterk señala que, la premisa para la arquitectura futura sería que las necesidades y requerimientos del usuario, deben ser consideradas como siempre cambiantes. Estas estructuras están accionadas por materiales con memoria de forma o actuadores neumáticos y se han propuesto como envolventes de edificios, como la Prairie House (Fig. 82), que usa sistemas de actuación de tensegridad³³, en conjunto con nuevos sistemas de revestimiento, para producir una vivienda, que emitirá la mitad de carbón que una vivienda típica de Illinois, mientras permite que la envolvente paramétrica, fluya en el espacio interior, vía respuestas físicas de cambio de forma o color. Con el simple hecho de cambiar de un color oscuro en invierno, a un color claro en verano, el ahorro energético se puede fijar en un 45%, para la zona del medio-oeste americano. Este simple cambio, se ve incrementado por la capacidad de las estructuras de cambiar de forma, lo que implica un cambio de volumen interior, que se traduce en mejorar aún más las condiciones térmicas.



Fig. 82. Prairie House con estructura de barras, muelles y cables en tensegridad

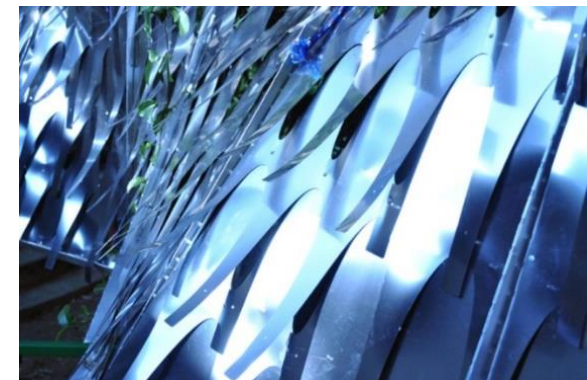


Fig. 83. Láminas de bimetalo que cambian de forma con la temperatura

³³ Tensegridad: sistema estructural compuesto de elementos comprimidos, unidos entre sí por elementos traccionados (cables).

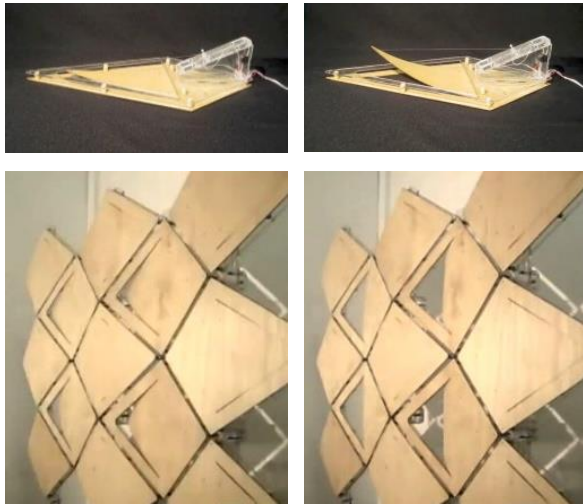


Fig. 84. Prototipo de fachada actuada por SMA

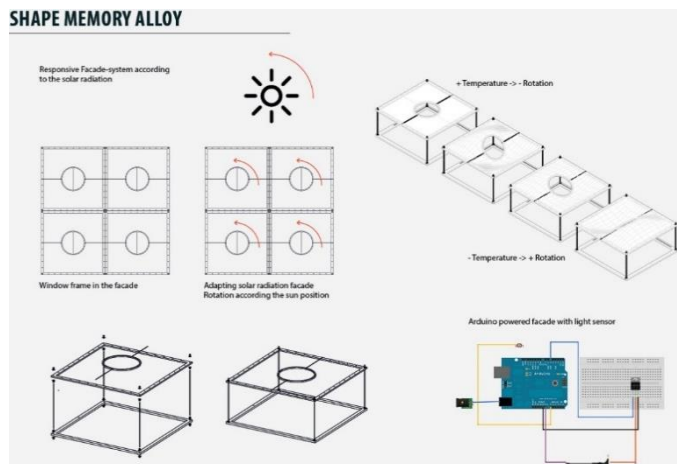


Fig. 85. Estructura textil basada en SMA para fachadas

Doris Kim Sung (Los Angeles, USA, 2012)

La arquitecta Doris Kim Sung, propone estructuras dinámicas y cambiantes en respuesta a los estímulos del exterior (Fig. 83). No utiliza Nitinol sino una combinación de dos metales con diferentes coeficientes de dilatación, de manera que, al incrementarse la temperatura, uno de ellos se expande mucho más que el otro, provocando que el conjunto se curve hacia el lado de menor expansión y consiguiendo así el movimiento. Los “termometales”³⁴ que utiliza, funcionan en el rango de -18°C a 49°C. El material de menor expansión es una aleación de hierro al 64% y níquel al 36% con un pequeño porcentaje de carbono y cromo. La aleación de mayor coeficiente de expansión está formada por 72% de manganeso, 18% de cobre y 10% de níquel. Este bi-metal también se conoce como 36-10 ó TM2 según la ASTM³⁵ (Sung, 2009). El resultado es un efecto dinámico, orgánico y natural, en el que las escamas metálicas, se curvan cuando se calientan y lo hacen sólo en la zona que se calientan, no en todo el conjunto. Las planchas metálicas, se mantienen abiertas la mayor parte del día, permitiendo la ventilación. Por las noches o cuando la temperatura es baja, permanecen cerradas.

Javier Sandoval (UK, 2012)

Una alternativa a este tipo de fachadas, sería haciéndolas moverse o cambiar de forma mediante aleaciones SMA, como propone el arquitecto Javier Sandoval. Sus fachadas poseen numerosas aberturas en forma triangular inspiradas en las branquias de los peces. Estas aberturas se abren y se cierran para permitir el paso de la luz natural y de la ventilación (Fig. 84). (Sandoval, 2012)

³⁴ Termometal o Bimetal: conjunto formado por dos láminas de metales con coeficientes de dilatación térmica muy diferentes.

³⁵ ASTM: American Society for Testing Materials: Sociedad Americana para Ensayos de Materiales.

Estudiantes IAAC (España, 2015)

Estudiantes del Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña, proponen un sistema de fachada inteligente (Fig. 85) que, controlado electrónicamente por un procesador y un sensor de luz, es capaz de mover aberturas circulares en las ventanas de acuerdo al movimiento del Sol. La estructura textil es actuada por muelles de NiTi conectados a una fuente eléctrica. (Ardila, H.D., Luna, & Begle, 2013)

Fraunhofer Institute IWU (Alemania, 2015)

Muy similar a la propuesta norteamericana, los investigadores del Instituto Fraunhofer de Dresde, en colaboración con el departamento de diseño textil de la Escuela de Arte Weissensee de Berlín, están probando un sistema de fachada inteligente, sensible a los cambios de temperatura exterior (Fig. 86)

Sobre la fachada se instala un matriz de elementos textiles, en este caso en forma de flor. Estas flores se abren o cierran gracias a unos actuadores de cable de Nitinol de 80mm de longitud. Los actuadores se activan con el calor del sol, haciendo que las flores se abran y proporcionen sombra al interior, aunque de esta manera se suprime la visión del exterior.

Cuando la temperatura desciende, los actuadores se enfrían y las flores se cierran, permitiendo nuevamente la entrada de luz.

En la actualidad, están trabajando para obtener textiles estables ante cualquier clima y esperan tener versiones listas para el mercado en 2017. El sistema, se ha presentado en la Hannover Messe 2015 de Alemania (IWU, 2015)

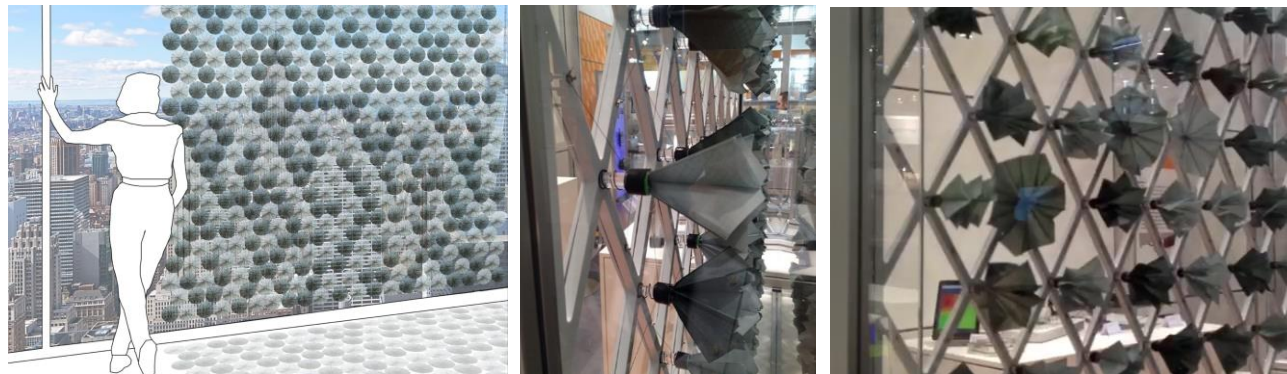
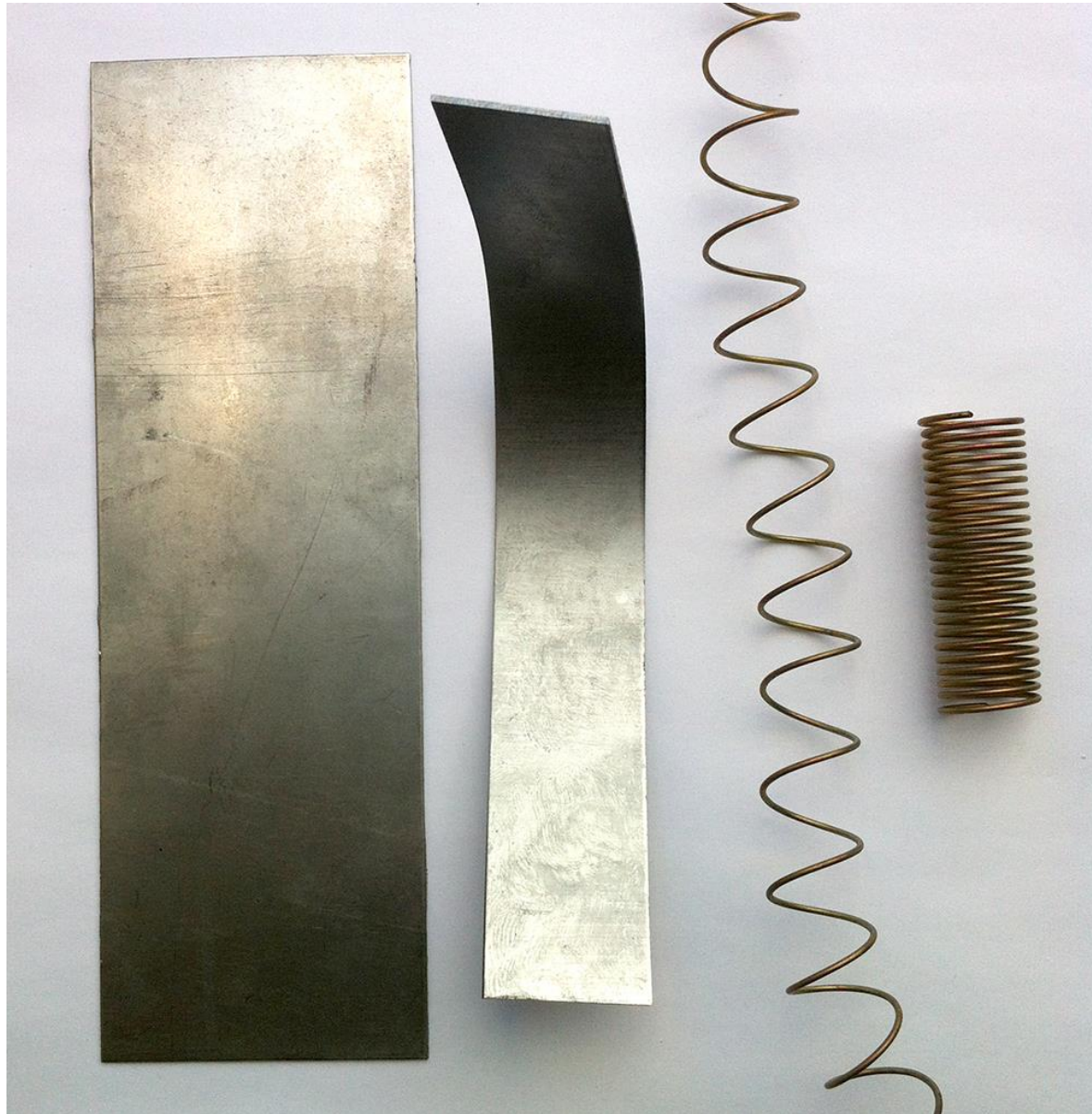


Fig. 86. Membrana de fachada sensible actuada por cables de Nitinol. Detalle de flores textiles SMA





"No te preguntes de dónde viene. Es un regalo de Dios! Simplemente acéptalo, úsalo y no te preocupes de nada más."

3

**ANÁLISIS y ESTUDIO
METODOLÓGICO de las
APLICACIONES de las
SMA en ARQUITECTURA
y URBANISMO**



(Ridgway Banks, inventor del primer motor de calor con Nitinol en 1973).

3 ANÁLISIS y ESTUDIO METODOLÓGICO de las APLICACIONES de las ALEACIONES con MEMORIA DE FORMA y SUPERELASTICIDAD en ARQUITECTURA y URBANISMO

Estudiemos ahora, en profundidad, todo lo relativo a estas aleaciones y sus aplicaciones en Arquitectura y Urbanismo.

3.1 ALEACIONES DE NICKEL-TITANIO: NITINOL

El material conocido como “Nitinol”, fue desarrollado por el investigador William J. Buehler, en el Naval Ordnance Laboratory, situado en White Oak, Maryland, US, junto al Doctor Frederick E. Wang (Fig. 87).

En 1961, Buehler estaba buscando un material, que fuera resistente al calor y la fatiga, para instalarlo en la punta de un misil de la US Navy. Una de las aleaciones que probó y que estaba formada por dos metales: 50% de Nickel y 50% de Titanio, mostraba las propiedades que el investigador buscaba. La llamó Nitinol o NiTi (George B. Kauffman, 1996)

La palabra, responde al nombre de los dos metales usados: **N**ickel (Ni) y **T**itanio (Ti) y a las siglas del **N**aval **O**rdnance **L**aboratory (NOL). Buehler fabricó algunas tiras largas y finas de este material, para demostrar a sus superiores que no se rompía, a pesar de ser deformado y plegado en forma de zig-zag repetidas veces. En una reunión rutinaria en 1961, una muestra de nitinol, una pequeña tira plegada a modo de pequeño acordeón, se pasó a los asistentes para comprobar sus cualidades.

El Dr. David S. Muzzey, calentó la muestra con su mechero y para asombro de los allí presentes, el material volvió a su forma original...se había descubierto, accidentalmente, el efecto conocido como “memoria de forma”.

Además, se observó que cuando se calentaba, mostraba un comportamiento elástico excelente, muy por encima del resto de aleaciones. Llamó a esta cualidad: “pseudo-elasticidad” o “súper-elasticidad”. Un año después, en 1962, el Doctor Frederick E. Wang se unió al grupo de Buehler, ya que su experiencia en la física de las estructuras cristalinas de los materiales, era de especial utilidad. Las aplicaciones de hoy en día de este material, no serían posibles sin el trabajo de Wang. El clarificó las condiciones que debe tener una aleación, para que muestre esas propiedades.

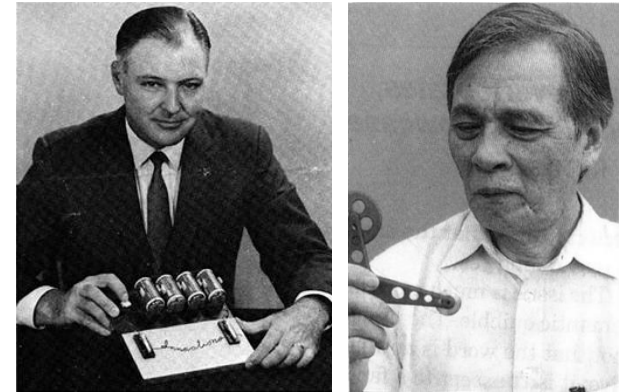


Fig. 87. William Buehler y Frederick E. Wang



Motores de Calor y primeras aplicaciones

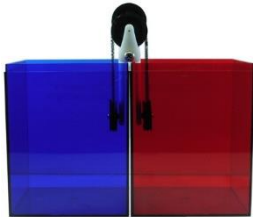


Fig. 88. Motor de calor con muelle de Nitinol, agua caliente y fría

Los llamados Heat Engines o “Motores de Calor”, son una demostración de la transformación directa de energía térmica, en energía mecánica, mediante el uso de SMAs. (Johnson, 1978)

Según la idea del doctor Alfred Johnson y su patente del año 1977, dos recipientes, uno de agua caliente y otro de agua fría, están situados uno junto al otro. Entre ellos, se coloca una polea por la que se hace girar un pequeño muelle continuo de Nitinol. Otras dos poleas forman el sistema. Una de ellas, se introduce en el agua caliente y la otra en la fría. Así, el muelle de nitinol estirado, entra en el agua caliente y recupera su forma original y al hacerlo genera una fuerza de tracción que hace girar la polea. Al mismo tiempo y en el otro recipiente, el de agua fría, el muelle se enfría para cerrar el ciclo. El resultado es, que la polea central no para de girar, siempre que en el sistema se mantenga el diferencial de temperatura.

Si colocamos, por ejemplo, una pequeña hélice en el eje de la polea central, ésta girará constantemente, porque el sistema transforma la energía térmica, directamente en energía mecánica. Este ejemplo, nos sirve para poder imaginar las posibilidades que se abren. (Fig. 88)

Hay otros tipos de variantes, como el “heat mobile”, que solo necesitan agua fría. Un extremo se enfría con el agua y el otro se calienta con la temperatura del aire. Esto es debido a que el tipo de aleación utilizado, tiene la temperatura de activación igual a la temperatura ambiente, como veremos más adelante. Cuando el muelle se enfría con el agua, se alarga y cuando se calienta con el aire, recupera la forma y se contrae, haciendo girar la hélice, fijada al eje de la polea superior. (Fig. 89)



Fig. 89. Heatmobile

Pero la primera vez que se consiguió transformar el calor en energía mecánica, fue con la máquina desarrollada por el investigador Ridgway Banks, en 1973 (Banks, 2012). Una rueda con múltiples cables de Nitinol, se coloca sobre dos recipientes de agua fría y caliente. Los cables se van calentando y enfriando, impulsando el giro de la rueda con los continuos cambios de forma. Se probó en la cubierta de un edificio, conectando el recipiente de agua caliente a una placa termo-solar, para mantener la temperatura y se dejó funcionando para ver si aparecía algún signo de fatiga en el material. Después de 23 millones de revoluciones, descubrieron que el sistema incluso funcionaba con más eficiencia. Aparentemente, el sistema es casi una máquina de movimiento perpetuo, según los autores (Fig. 90).



Fig. 90. Motor de calor con cables de Nitinol. R. Banks (1973)

Esta máquina o motor de calor, ideada por el profesor Banks (Fig. 91), nos da pistas sobre posibles aplicaciones en Arquitectura. Funciona con diferencias de temperatura, en este caso con agua caliente y fría, que el investigador deposita en dos recipientes.

En los edificios, tenemos estas dos temperaturas en el suministro de agua y en la producción de agua caliente sanitaria. Por lo tanto, podemos utilizar ese diferencial térmico, para generar movimiento o energía. Solo debemos concretar la forma de hacerlo. Esto se puede hacer, en los puntos de consumo de los locales húmedos o también se podría hacer en la cubierta, tal y como hicieron en el año 73. En la cubierta de los edificios, tenemos la superficie de exposición al Sol necesaria, como para sacar el máximo rendimiento. Incluso, pueden estar integradas en las placas termo-solares, que utilizamos para generar A.C.S. De ellas, tomaríamos el calor y el frío directamente de la red de suministro. Si pensamos que una placa solar puede llegar a calentar el agua hasta los 60 o 70°C y la temperatura del agua de la red está a unos 10°C o 15°C, disponemos de un diferencial térmico más que suficiente, para mover nuestras máquinas de calor o dispositivos basados en Nitinol.

La primera aplicación comercial exitosa del Nitinol, fue realizada por la compañía Raychem Corporation, en 1969. Se trata de un sistema de unión de tubos a tope, llamado "Cryofit". Se usó para unir las tuberías del sistema hidráulico de un jet F-14. La empresa de fabricación de aviones Grumman Aerospace, estaba buscando una alternativa, para la difícil tarea de unión de tuberías cerca del fuselaje de aluminio.



Fig. 91. Ridgway Banks

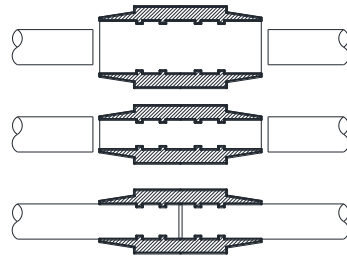


Fig. 92. Sistema de unión de tubos metálicos "Cryofit"

Para este problema, se propuso con éxito un sistema de acoplamiento, consistente en una pieza cilíndrica de Nitinol, en estado austenítico a temperatura ambiente (superelástico) que se fabrica con las dimensiones finales deseadas.

La pieza, se coloca montando en ambos extremos de los tubos y en todo momento se mantiene, mediante un baño de nitrógeno líquido, en estado martensítico. En este estado, el material es fácilmente deformable. Se introduce un mandril, para deformarla radialmente y aumentar su diámetro. Una vez colocado en su lugar, introducidos los dos extremos de los tubos y retirado el nitrógeno, la pieza comienza a calentarse, para igualarse a la temperatura exterior y a recuperar su forma pre-programada. Al hacerlo, genera un empuje radial, que se traduce en una fuerza constante de compresión. Fuerza generada a nivel atómico y de gran intensidad. De esta manera, se obtiene una unión muy fuerte, sin necesidad de soldaduras.

En la (Fig. 92) se puede apreciar: 1) la pieza con sus dimensiones "en frío" (martensita). 2) dimensiones "en caliente" y 3) pieza colocada in-situ y comprimiendo ambos tubos. Los resaltes en la cara interior de la pieza, ayudan a impedir además, el deslizamiento.

El primer requisito, para que ocurra el efecto de memoria de forma, es que exista una estructura atómica ordenada, en una fase de estado sólido y en régimen de alta temperatura. Este estado de la materia, se conoce como **Austenita**, en honor del metalúrgico inglés Sir William Chandler Roberts-Austen. Se caracteriza porque sus átomos presentan una estructura ortogonal, cúbica y centrada, las distancias entre átomos así como los ángulos que forman, son iguales. Es una estructura fuerte, con un módulo elástico alto y variable entre los 41GPa y 81GPa.

Además, a baja temperatura, los átomos ordenados de la fase austenítica, deben poder ser capaces de cambiar a otro tipo de organización cristalina muy compleja, a la cual se le dio el nombre de **Martensita**, en honor al alemán Adolf Martens (Fig. 93). Esta estructura presenta, en uno de sus planos, un ángulo entre átomos de $96,8^\circ$.

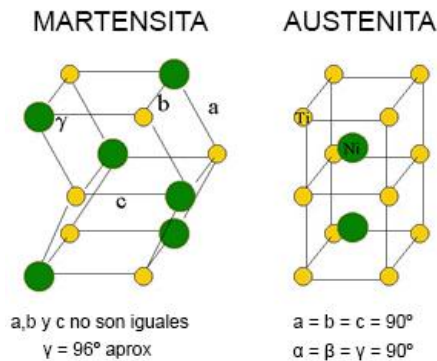


Fig. 93 Estructura cristalina Martensita y Austenita

Las distancias entre sus átomos no son iguales. Es una estructura más débil que la anterior y su módulo de Young varía entre los 28GPa y 41GPa.

Nickel-Titanio (Nitinol)	Nickel-Titanio-Zirconio
Nickel-Titanio-Cobre	Nickel-Titanio-Hierro
Nickel-Titanio-Cobalto	Nickel-Titanio-Paladio
Nickel-Titanio -Hafnio	Hierro-Manganeso-Silicio
Oro-Cadmio	Nickel-Hierro-Zinc-Aluminio
Hierro-Niobio-Aluminio	Cobre-Aluminio-Hierro
Titanio-Niobio-Aluminio	Titanio-Niobio
Uranio-Niobio	Zirconio-Cobre-Zinc

Tabla 2. Principales aleaciones con memoria de forma conocidas

En la (Fig. 94), vemos la porción central del diagrama de fases, para una aleación típica de Nickel y Titanio. Como se puede apreciar, las aleaciones TiNi se encuentran entre el rango de 50% y 55% de Nickel aproximadamente. Para porcentajes de Nickel mayores, la aleación forma moléculas de TiNi y también de TiNi₃. Por debajo de estos porcentajes se forman además moléculas de Ti₂Ni.

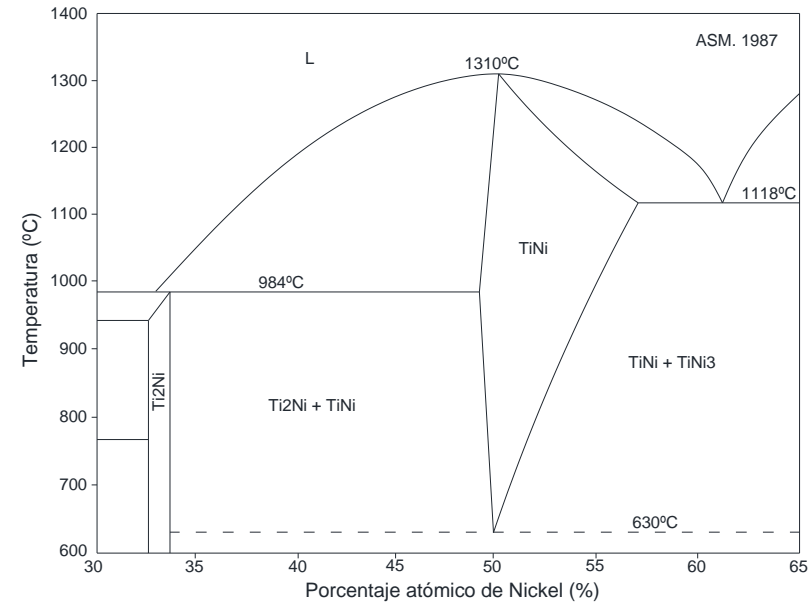


Fig. 94. Porción central diagrama de fases aleaciones TiNi

Estudiemos ahora en detalle, las dos principales propiedades de estas aleaciones.

SUPERELASTICIDAD

El término pseudo-elasticidad o “superelasticidad”, se utiliza para describir la propiedad de ciertas aleaciones, de volver a su forma inicial, después de una deformación sustancial. Las aleaciones superelásticas, son capaces de ser deformadas 10 veces más que la mayoría de los materiales ordinarios, sin mostrar comportamiento plástico (Stoeckel & Yu, Superelastic Ni-Ti Wire, 1990).

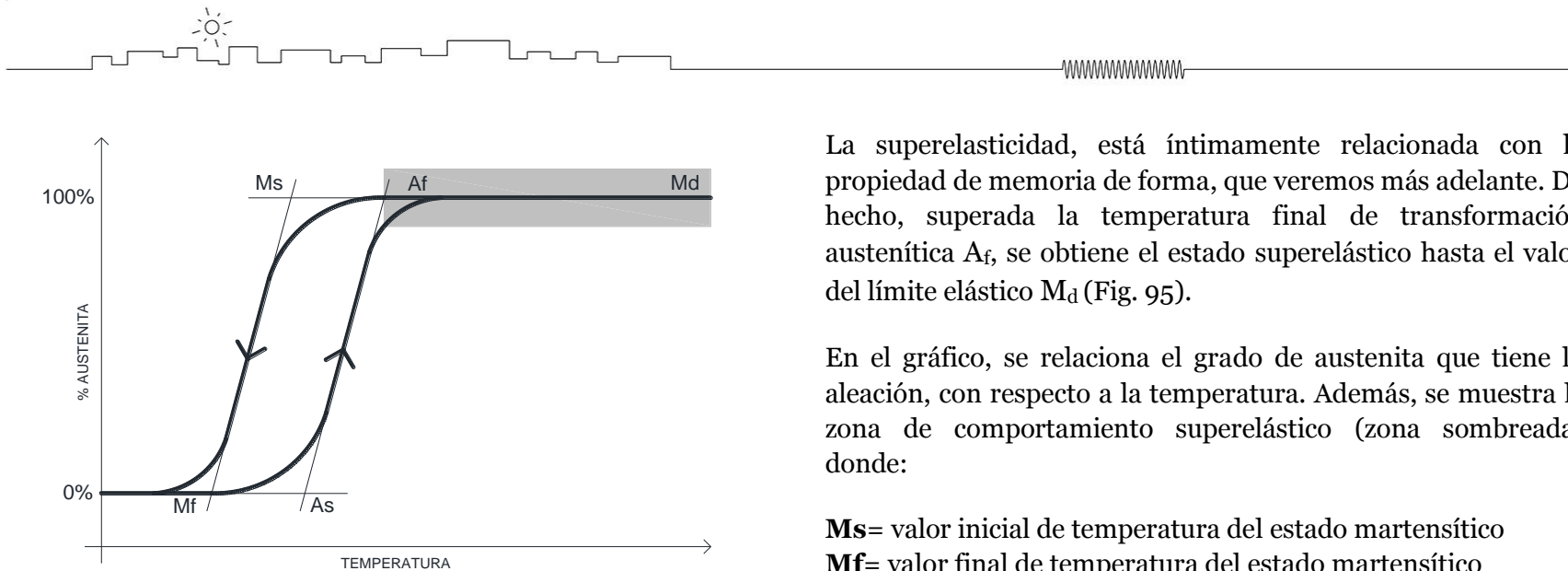


Fig. 95. Grado de transformación austenítica y temperatura con tramo de comportamiento superelástico.

La superelasticidad, está íntimamente relacionada con la propiedad de memoria de forma, que veremos más adelante. De hecho, superada la temperatura final de transformación austenítica A_f , se obtiene el estado superelástico hasta el valor del límite elástico M_d (Fig. 95).

En el gráfico, se relaciona el grado de austenita que tiene la aleación, con respecto a la temperatura. Además, se muestra la zona de comportamiento superelástico (zona sombreada) donde:

Ms= valor inicial de temperatura del estado martensítico

Mf= valor final de temperatura del estado martensítico

As= valor inicial de temperatura del estado austenítico

Af= valor final de temperatura del estado austenítico.

Md= valor de límite elástico o valor de no inducción de Martensita.

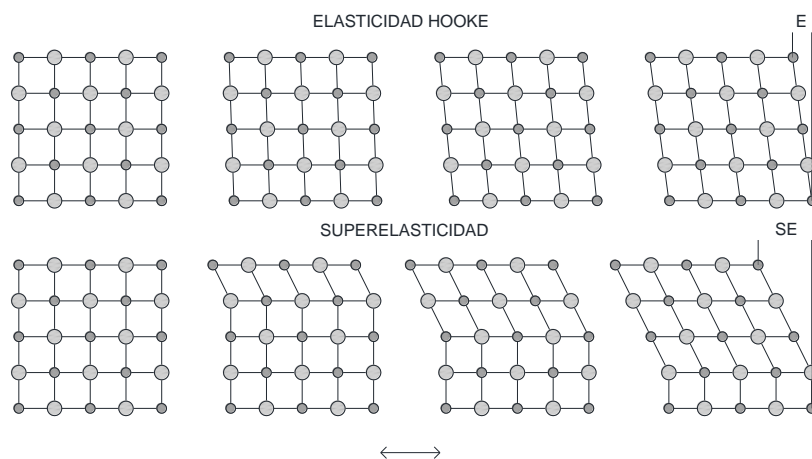


Fig. 96. Elasticidad clásica de Hooke y superelasticidad.

En realidad, este fenómeno se puede entender como un verdadero sistema de almacenamiento de energía. Cuando se ejerce una fuerza sobre un elemento superelástico, éste se deforma momentáneamente y cuando la fuerza cesa, el elemento retorna a la posición o forma inicial. Pero, si impedimos este retorno, estamos reteniendo esa energía acumulada y la podremos liberar cuando deseemos.

En el siguiente gráfico, se puede comparar la elasticidad clásica, que sigue la Ley de Hooke, junto al concepto de superelasticidad de este tipo de aleaciones (Fig. 96). El desplazamiento de los átomos en estos materiales es mucho mayor.

Es necesario destacar, que la superelasticidad, solamente se puede observar en un rango de temperatura estrecho. Por debajo de la temperatura de inicio de transformación austenita (A_s), el material es martensítico. En esta zona y como veremos, las deformaciones de hasta el 8% se pueden recuperar, no elásticamente, sino térmicamente.

Esto significa que, aunque el material se deforme, se puede recuperar la forma mediante la aplicación de calor. Pero, en el régimen superelástico, por encima de la temperatura final de austenita (A_f), las deformaciones de hasta el 8% se recuperan elásticamente. Superando ese valor, el material entra en régimen plástico.

En la curva característica de tensión-deformación (Fig. 98), para una aleación superelástica, vemos como, al aplicar una carga, el módulo elástico es alto y hay una primera zona donde con mucha tensión, se obtiene poca deformación, para llegar a una parte de la curva, en donde ésta toma tangente horizontal.

Esto significa que con muy poca tensión, las deformaciones son muy grandes. Por último, la curva vuelve a tomar un valor de módulo elástico grande, antes de llegar a la zona plástica, en la que las deformaciones son permanentes.

Esto ocurre en el camino de ida, cuando se carga la muestra. En el camino de vuelta o de descarga, el material recupera elásticamente pero desarrollando menores tensiones.

Esta cualidad altamente histerética, es característica de este tipo de aleaciones. Recordemos además, que las transformaciones ocurren desde el estado austenítico (estructura cristalina cúbica y centrada) al estado martensítico no pareado (estructura cristalina inclinada sin pares). (Fig. 97)

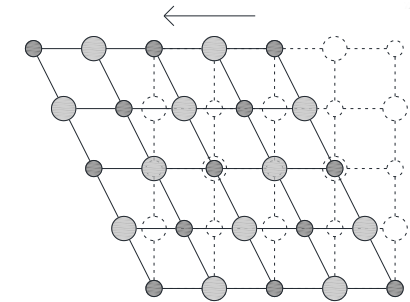


Fig. 97 Deformación superelástica de la estructura cristalina austenítica

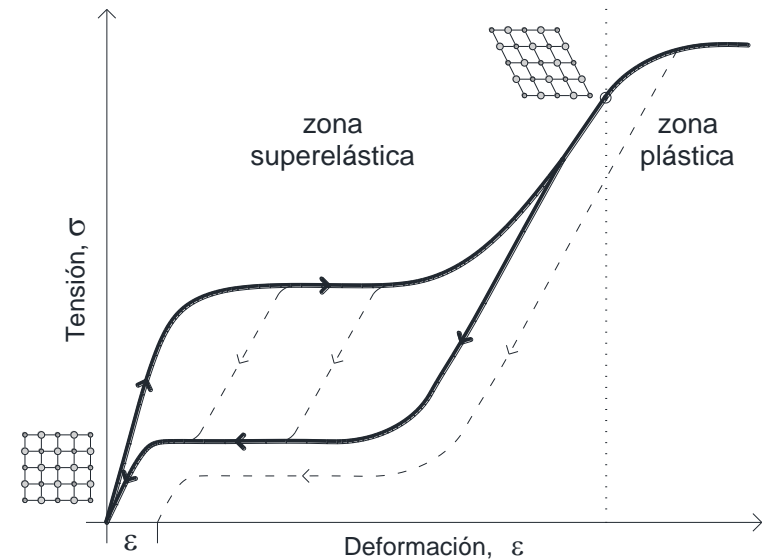


Fig. 98 Curva característica de Tensión-Deformación para una aleación superelástica

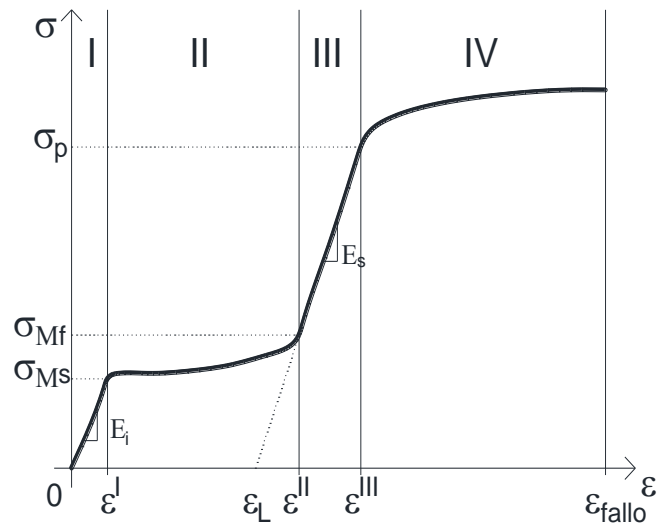


Fig. 99 Regiones de comportamiento en la curva típica de tensión-deformación para una aleación 55Ni45Ti

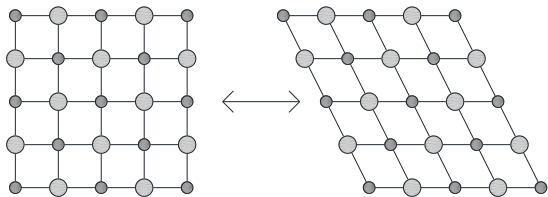


Fig. 100 Cambio de estructura cristalina austenítica a martensita no paralela, bajo carga

Región I: La estructura inicial muestra respuesta elástica lineal

Región II: En esta región se produce la transformación de la estructura inicial a la martensita inducida por tensión (martensita no paralela).

Región III: Respuesta lineal y elástica de la martensita inducida por tensión.

Región IV: Zona de comportamiento plástico y rotura final.

La respuesta del Nitinol es dependiente de la carga aplicada y la temperatura. En la región I, ocurre una deformación elástica, con un “módulo inicial” E_i . Para mayor tensión, la región II se inicia con la tensión crítica de la martensita inicial. En esta zona se produce el cambio de martensita paralela a la no paralela. Este punto se alcanza al comienzo de la región III, con el valor de martensita final. Se observa como la curva toma casi tangente horizontal. La región III, consiste en la deformación elástica de la austenita. El módulo de esta región es conocido como “módulo secundario” E_s . Mayores deformaciones, causan una segunda zona de tangente casi horizontal o “plateau”, asociada con un movimiento de dislocación y deslizamiento, con deformaciones plásticas como resultado. La tensión a la que ocurre esto, es conocida como tensión de flujo plástico σ_p . (Ford & White, 1995).

Si tenemos en cuenta que el acero, por ejemplo, tiene entre un 0,5% y un 0,8% de límite elástico, podemos concluir que el Nitinol (8%) es, al menos, 10 veces más elástico.

Este es un dato de gran importancia y una de las claves de este material. Sin embargo, hay que decir que, dependiendo de la temperatura exterior y el número elevado de ciclos de carga y descarga, en torno al 0,5% de ligeras deformaciones plásticas, permanecen. Mayores cuanto mayores son las temperaturas, como vemos en la Fig. 102, para una aleación trabajando a 12°C, 26°C y 36°C, en régimen superelástico.

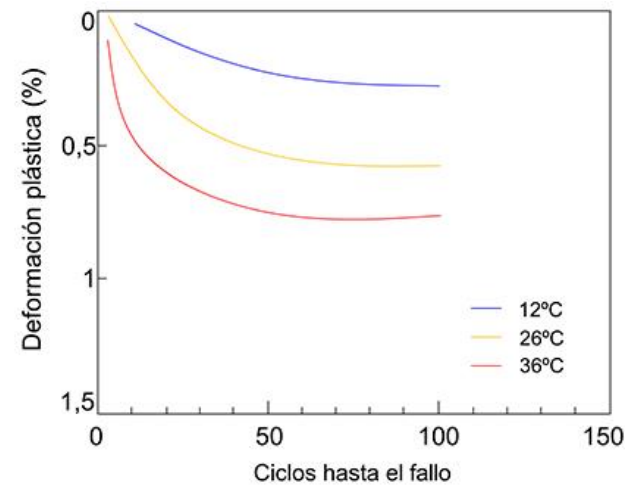
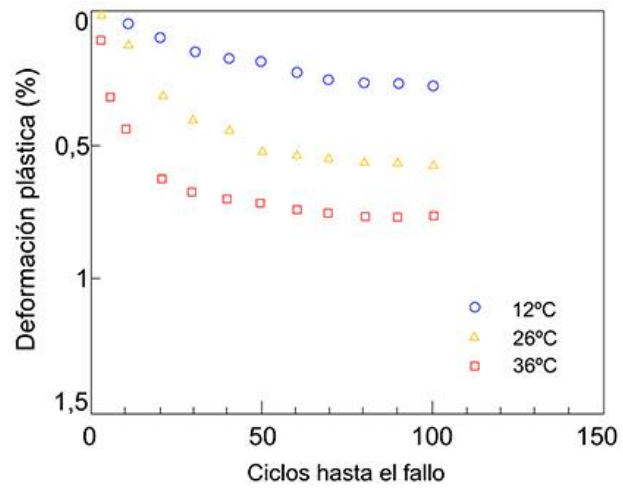


Fig. 102 Influencia de la temperatura exterior en el régimen de trabajo de una aleación superelástica

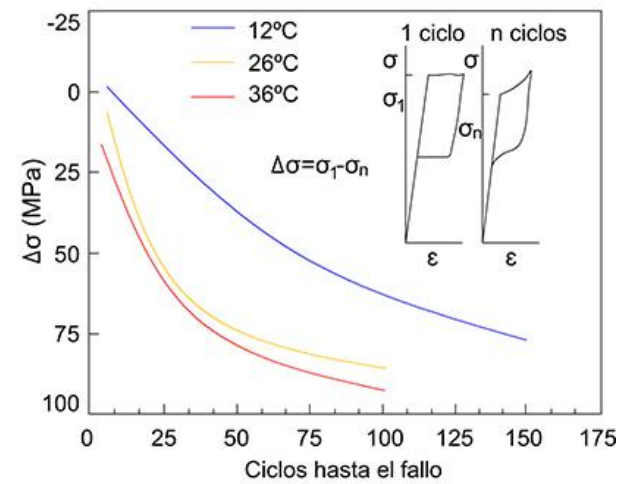
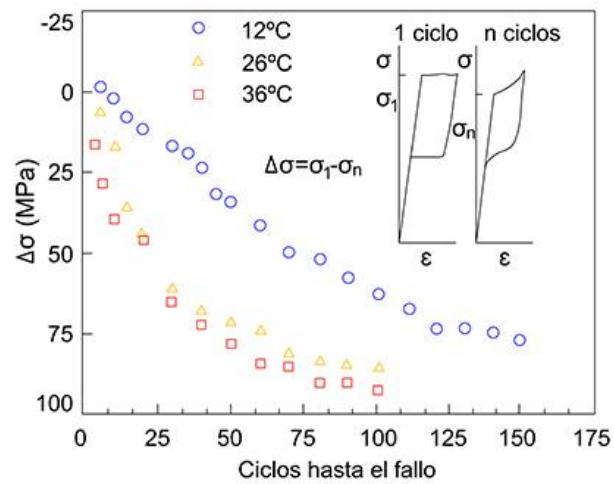


Fig. 101 Variación del límite elástico en función de la temperatura y del número de ciclos de trabajo

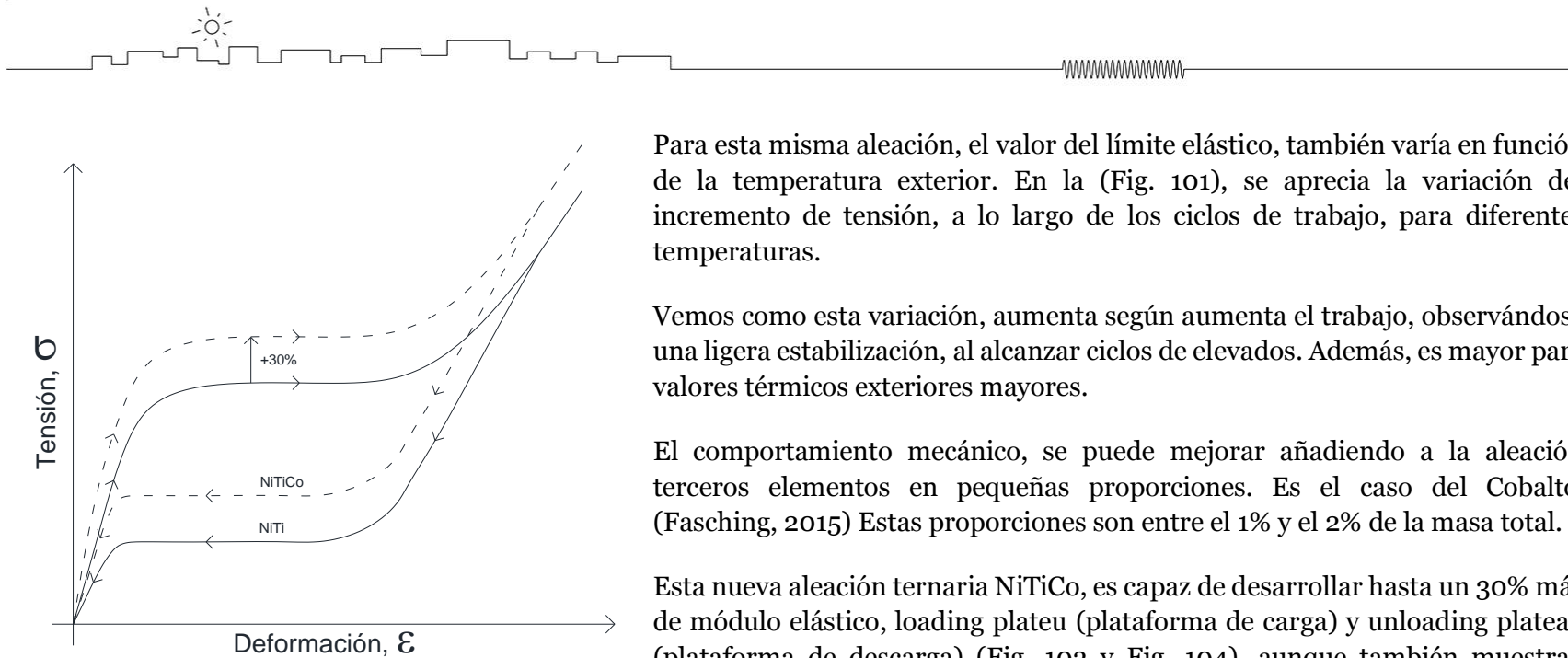


Fig. 103 Modificación de la curva Tensión-Deformación de una aleación superelástica, mediante la adición de pequeños porcentajes de Cobalto

Para esta misma aleación, el valor del límite elástico, también varía en función de la temperatura exterior. En la (Fig. 101), se aprecia la variación del incremento de tensión, a lo largo de los ciclos de trabajo, para diferentes temperaturas.

Vemos como esta variación, aumenta según aumenta el trabajo, observándose una ligera estabilización, al alcanzar ciclos de elevados. Además, es mayor para valores térmicos exteriores mayores.

El comportamiento mecánico, se puede mejorar añadiendo a la aleación terceros elementos en pequeñas proporciones. Es el caso del Cobalto. (Fasching, 2015) Estas proporciones son entre el 1% y el 2% de la masa total.

Esta nueva aleación ternaria NiTiCo, es capaz de desarrollar hasta un 30% más de módulo elástico, loading plateau (plataforma de carga) y unloading plateau (plataforma de descarga) (Fig. 103 y Fig. 104), aunque también muestran elongaciones residuales algo mayores que las binarias NiTi, después de deformaciones de hasta el 6% en austenita. Un 0,1% para las de NiTi y un 0,3% para las NiTiCo.

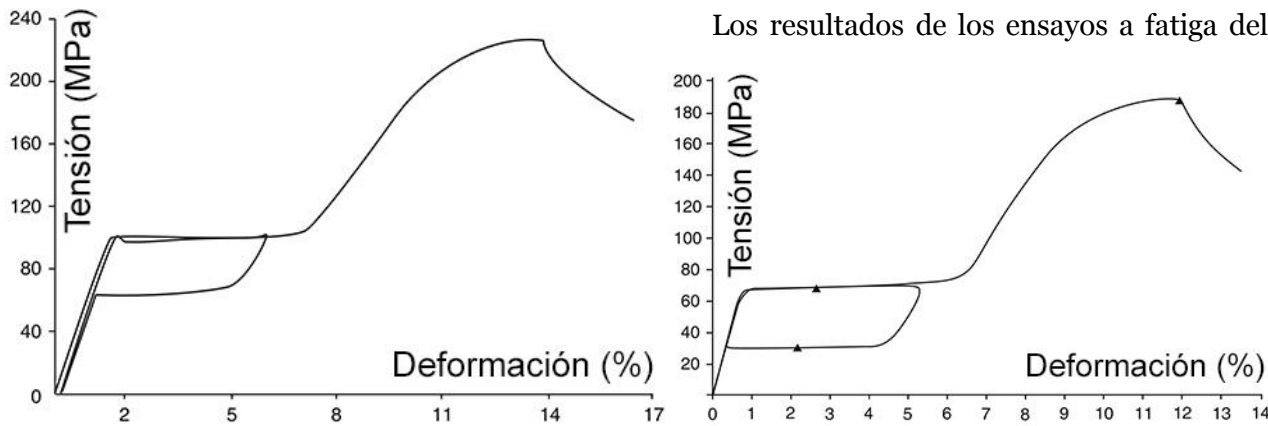


Fig. 104 Comparación curvas tensión-deformación para una aleación NiTi (derecha) y NiTiCo (izquierda)

Los resultados de los ensayos a fatiga del material ante elevado número de ciclos de carga y descarga, muestran curvas similares para ambas aleaciones. Su carácter biocompatible tampoco muestra diferencias en la aleación con Cobalto.

También se pueden añadir otros elementos químicos a la aleación, tales como: Cobre, Aluminio Zirconio, Vanadio, Niobio o Hierro, además del ya comentado Cobalto.

En el cuadro comparativo, (Tabla 3) vemos cuáles son los efectos de la inclusión de los mismos y las diferencias entre las aleaciones resultantes (Barbero Bernal, 2004)

Las aleaciones que más se utilizan, son las binarias de NiTi. Son las que presentan mejores propiedades en cuanto a recuperación de deformaciones, resistencia a la corrosión e histéresis. Sin embargo, todavía son caras en su proceso de manufactura, aunque, a medida que la demanda (sobre todo en Medicina) se ha incrementado en los últimos años, los precios han ido cayendo. Además, son difíciles de trabajar, como veremos más adelante.

Pero, podemos aprovechar las variantes que ofrecen la adición de otros elementos químicos, si nuestra aplicación así lo requiere. Por ejemplo, las aleaciones NiTiCu, tienen la cualidad de presentar una histéresis más estrecha. Esto significa que las ramas de la curva de tensión-deformación, en la carga y descarga, se encuentran más próximas y, por lo tanto, la tensión desarrollada en ambos caminos es más parecida, que en el caso de las aleaciones NiTi.

ACERO y SMAs.

En la (Fig. 105) se pueden observar, las curvas características de tensión-deformación, para el acero y una aleación SMA típicas. Como sabemos, el acero tiene una zona elástica primera en la que tensión y deformación tienen un comportamiento lineal y elástico, esto es, si se aplica una carga, se producirá una deformación

Aleación	Ventajas	desventajas
NiTi	Gran capacidad de recuperación de deformaciones, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad, gran histéresis	Alto coste de manufactura, dificultad para trabajar el material
NiTiCu	Trabajabilidad incrementada, temperaturas de transformación estables, reducido efecto de envejecimiento, histéresis más estrecha	Disminución del módulo de Young (E)
NiTiAl	Reducción de deformaciones permanentes, prevención de formación de precipitantes	El efecto de memoria de forma se reduce gradualmente en muestras sobre-envejecidas
NiTiCoV	Superelasticidad a temperatura ambiente, buena trabajabilidad y menor temperatura de transformación	N/A
NiTiZr	Mejora de las propiedades mecánicas y de memoria de forma con contenido de Zr entre el 1-2%	Demasiado frágil para la forja en caliente y el proceso de laminación
NiTiNb	Aumento de los picos de transformación histerética	N/A
NiTiFe	Deformación de memoria de forma aumentada, tasa de recuperación, fuerza de deslizamiento. Reducción de la temperatura de transformación	Reducción de ductilidad

Tabla 3 Comparativa entre aleaciones NiTi ternarias

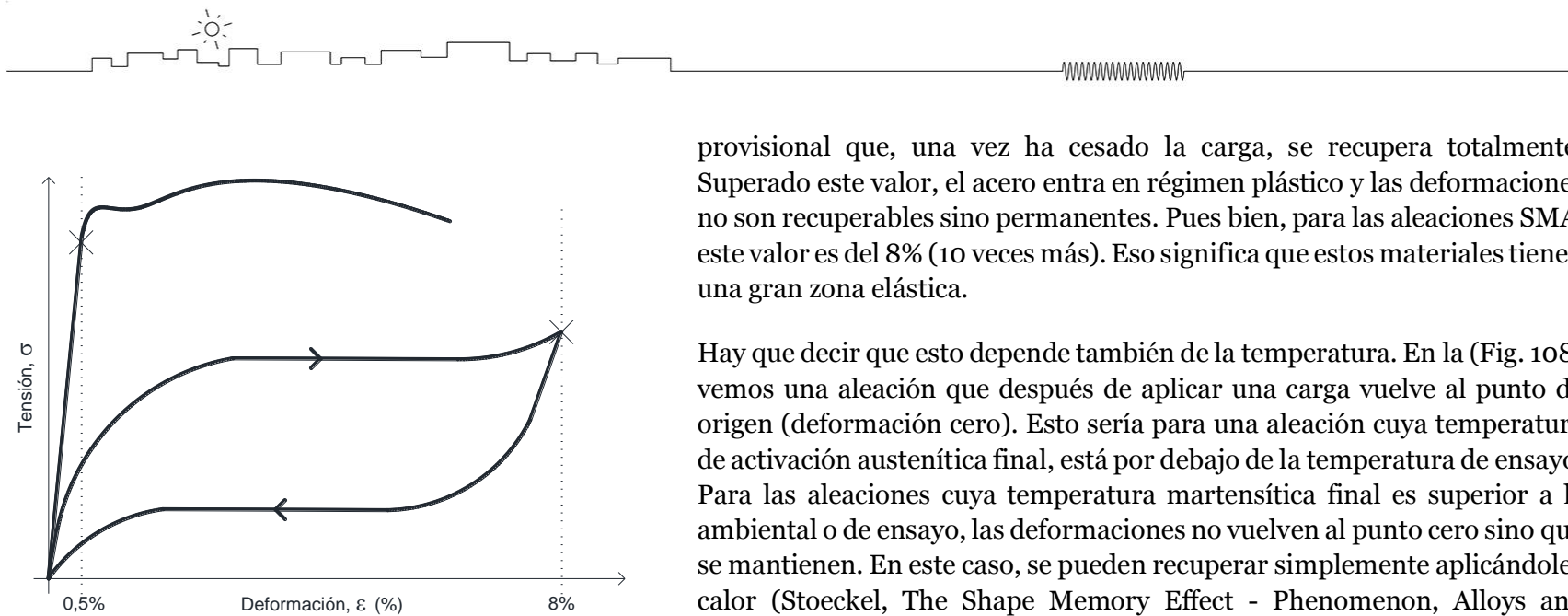


Fig. 105. Límite elástico en curvas características de Tensión-Deformación de acero y SMA

provisional que, una vez ha cesado la carga, se recupera totalmente. Superado este valor, el acero entra en régimen plástico y las deformaciones no son recuperables sino permanentes. Pues bien, para las aleaciones SMA, este valor es del 8% (10 veces más). Eso significa que estos materiales tienen una gran zona elástica.

Hay que decir que esto depende también de la temperatura. En la (Fig. 108) vemos una aleación que después de aplicar una carga vuelve al punto de origen (deformación cero). Esto sería para una aleación cuya temperatura de activación austenítica final, está por debajo de la temperatura de ensayo. Para las aleaciones cuya temperatura martensítica final es superior a la ambiental o de ensayo, las deformaciones no vuelven al punto cero sino que se mantienen. En este caso, se pueden recuperar simplemente aplicándoles calor (Stoeckel, *The Shape Memory Effect - Phenomenon, Alloys and Applications*, 1995).

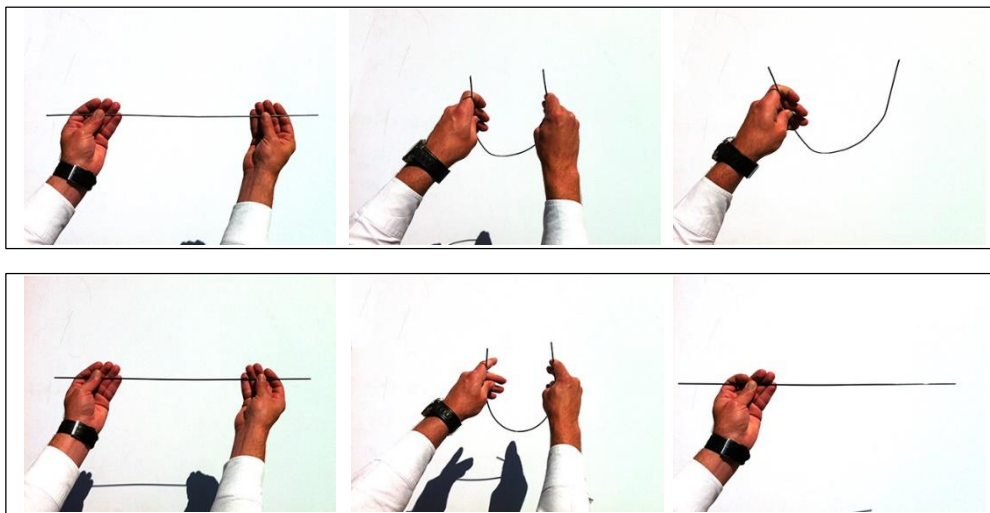


Fig. 106. Doblado a 180° de barra de acero (arriba) y barra de NiTi superelástico (abajo)

Si tenemos una barra de acero de 500mm de longitud, con sección circular de 2,5mm de diámetro y otra barra de NiTi de idénticas dimensiones, podemos hacer una sencilla prueba, para comparar la elasticidad de un material y otro. La prueba consiste en doblar la barra hasta formar un ángulo de 180° y una vez cesada la fuerza, ver qué deformación adquiere. En el caso del acero, después de doblar la barra 180°, ésta adquiere una ligera deformación elástica y grandes deformaciones plásticas. La barra vuelve a una posición de unos 120° y mantiene esa forma. Sin embargo, la barra de Nitinol se deforma y cuando cesa la fuerza, ésta vuelve a la forma inicial recta, sin mostrar ningún signo de deformación

permanente, en un comportamiento extremadamente elástico (superelasticidad).

Las aleaciones de Nickel y Titanio presentan un comportamiento mucho más elástico que rígido (Duerig, Pelton, & Stoeckel, The Use of Superelasticity in Medicine). Más cercano a los materiales naturales como el cabello humano, huesos o tendones (Fig. 107). Este comportamiento más natural del Nitinol, es idóneo para desarrollar aplicaciones basadas en estructuras naturales, como el propio cuerpo humano. Estructuras que soporten grandes tensiones pero con elasticidad. En las curvas de tensión-deformación de estos materiales se puede apreciar estas diferencias.

Propiedad	NiTi	Acero Inox
Recuperación elástica	8%	0,8%
Biocompatibilidad	Excelente	Buena
Módulo de Young	81GPa aprox. (Austenita)	193GPa
Densidad	6,45 g/cm ³	8,03 g/cm ³
Magnetismo	No	Si
Tensión de rotura	895-1900 MPa aprox.	520-840 MPa aprox.
Coef. Exp. Térmica	De 6,6 a 11cm/cm°C	17,3 x 10-6 cm/cm°C
Resistencia Eléctrica	80-100 micro-ohm*cm	72 micro-ohm*cm

Tabla 4 Comparación NiTi y acero inoxidable

MEMORIA DE FORMA

La otra cualidad que tienen estas aleaciones, es la Memoria de Forma. El efecto, fue descubierto en los años 50 en aleaciones basadas en cobre. En los años 60, los investigadores del Naval Ordnance Laboratory, descubrieron accidentalmente la memoria de forma en aleaciones de Nickel y Titanio.

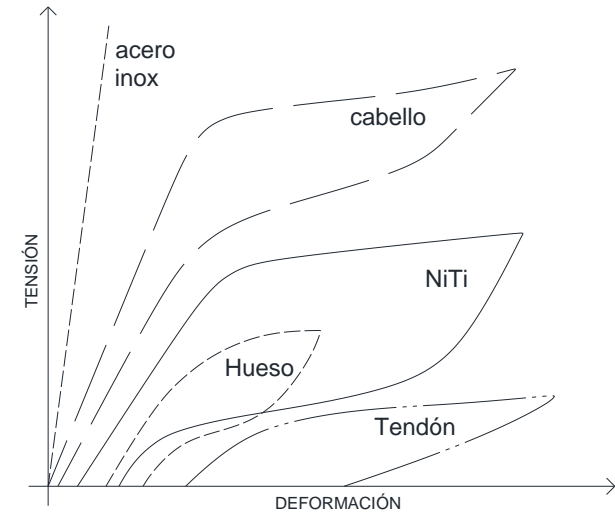


Fig. 107. Comparativa NiTi y otros materiales

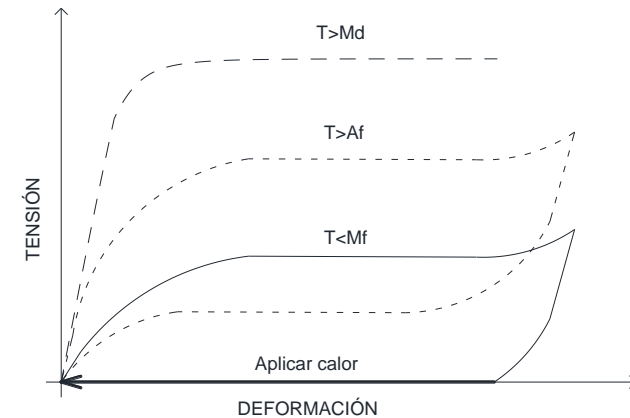


Fig. 108. Deformaciones recuperables mediante aplicación de calor

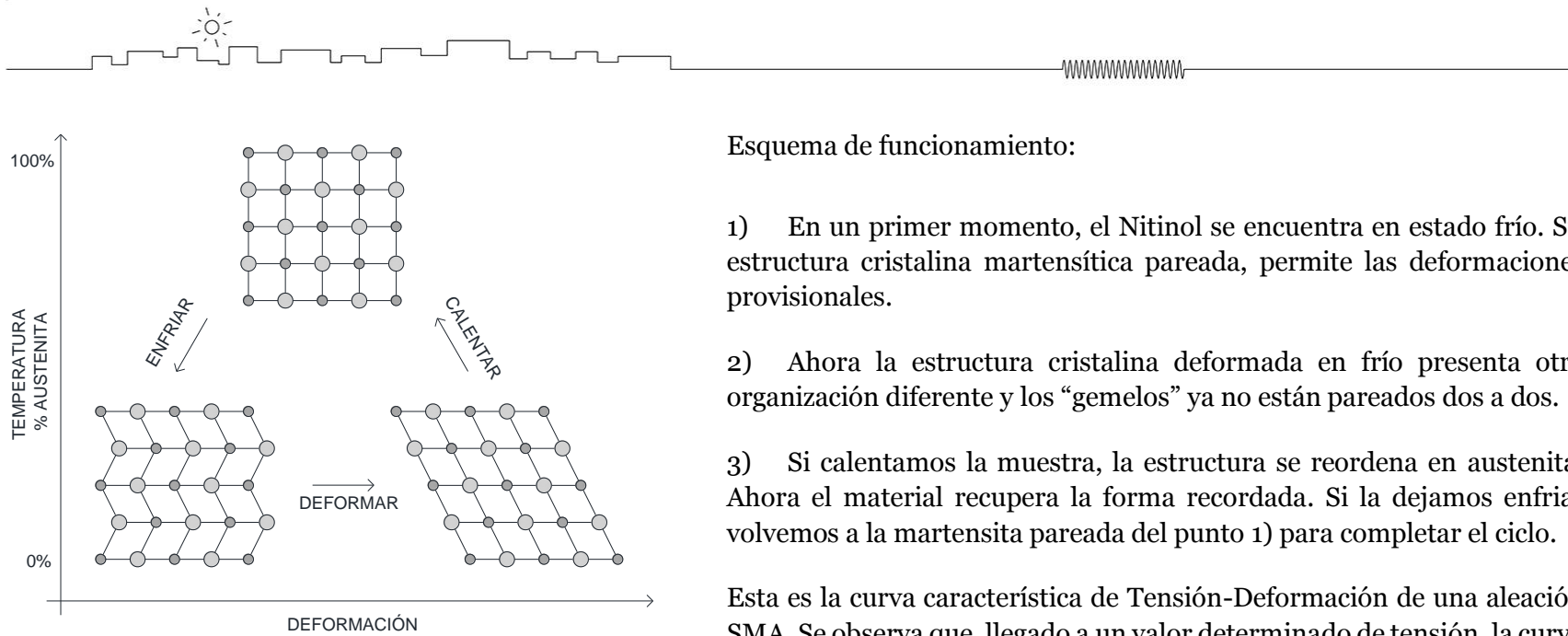


Fig. 110. Esquema funcionamiento memoria de forma.

Esquema de funcionamiento:

- 1) En un primer momento, el Nitinol se encuentra en estado frío. Su estructura cristalina martensítica pareada, permite las deformaciones provisionales.
- 2) Ahora la estructura cristalina deformada en frío presenta otra organización diferente y los “gemelos” ya no están pareados dos a dos.
- 3) Si calentamos la muestra, la estructura se reordena en austenita. Ahora el material recupera la forma recordada. Si la dejamos enfriar volvemos a la martensita pareada del punto 1) para completar el ciclo.

Esta es la curva característica de Tensión-Deformación de una aleación SMA. Se observa que, llegado a un valor determinado de tensión, la curva entra en una zona llamada “plateau”. Esta zona, implica que, con muy apenas tensión, el material es muy deformable. (Fig. 109 y Fig. 111).

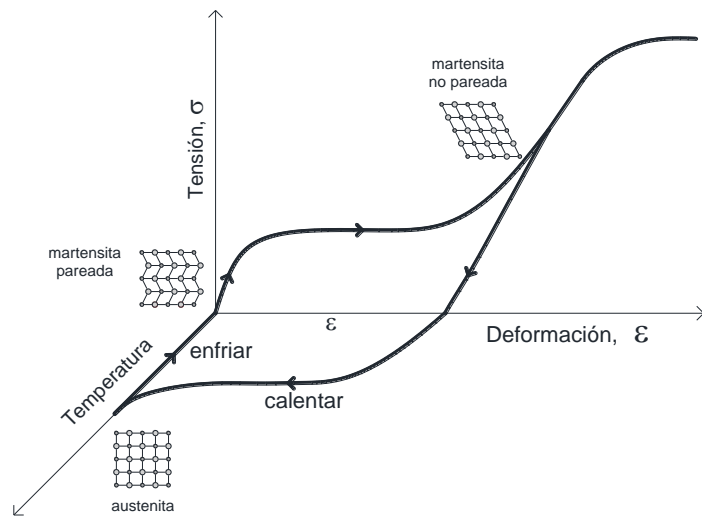


Fig. 109 Transformación de la estructura cristalina en una aleación SMA, en función de la tensión y la temperatura

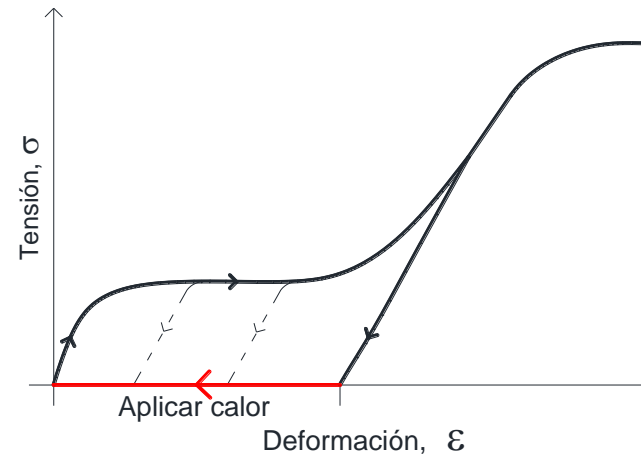


Fig. 111 Curva de Tensión-Deformación característica de una SMA



Una vez ha cesado la carga, la aleación adquiere una deformación, recuperable mediante la aplicación de calor.

Esta propiedad consiste en que, después de la deformación plástica de un elemento, éste vuelve a recobrar la forma que tenía inicialmente cuando se calienta (Fig. 110). Este efecto está muy relacionado con la superelasticidad comentada anteriormente. De hecho, cuando se calienta el Nitinol por encima de su temperatura de activación austenítica final (A_f) el material muestra comportamiento superelástico.

Este fenómeno resulta del cambio de fase de la estructura cristalina, conocida como “transformación martensítica termoelástica”. (Stoeckel, *The Shape Memory Effect - Phenomenon, Alloys and Applications*, 1995)

Por debajo de la temperatura de activación, las aleaciones con memoria de forma son martensíticas. En este estado, la estructura cristalina se caracteriza porque sus átomos se auto-acomodan, formando pares o parejas de filas de átomos en lo que en inglés se conoce como “self-accommodating twins”. El estado martensítico “gemelo” no muestra apenas resistencia a la deformación, “desacomodando” estos átomos en lo que se llama “de-twinning”. Aplicando fuerza, la estructura gemela se rompe y se forma una estructura conocida como “de-twinning martensite” o martensita “des-gemelada” o no pareada. Ahora los átomos ya no presentan esas líneas de pares o simetría.

Si calentamos la aleación por encima de la temperatura de transformación, recupera la forma original y el material cambia a su estado austenítico de máxima resistencia.

La transformación de austenita a martensita y el proceso inverso, no ocurren a las mismas temperaturas (Fig. 95). El ciclo completo lo forman los siguientes valores comentados en el apartado anterior de superelasticidad: **M_s** , **M_f** , **A_s** y **A_f** correspondientes a las temperaturas inicial y final de los estados martensítico y austenítico.

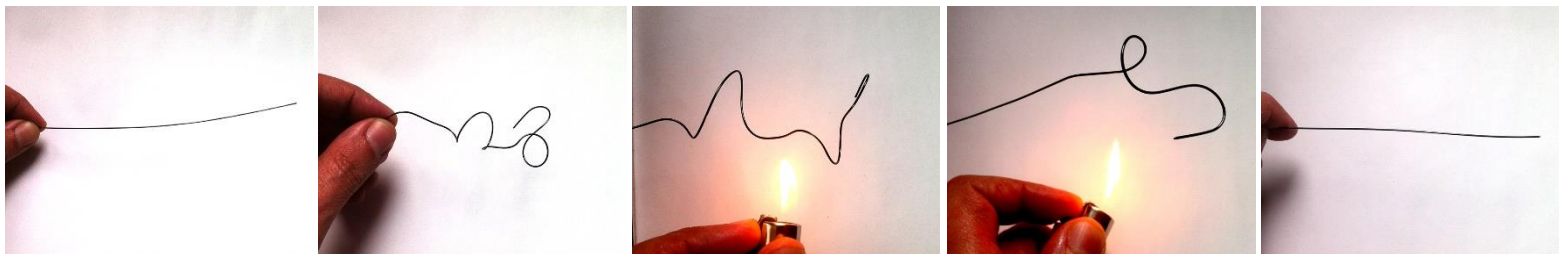


Fig. 112. Efecto de memoria de forma. El cable de NiTi se deforma en frío, mantiene la deformación y mediante la aplicación de calor recupera la forma inicial.

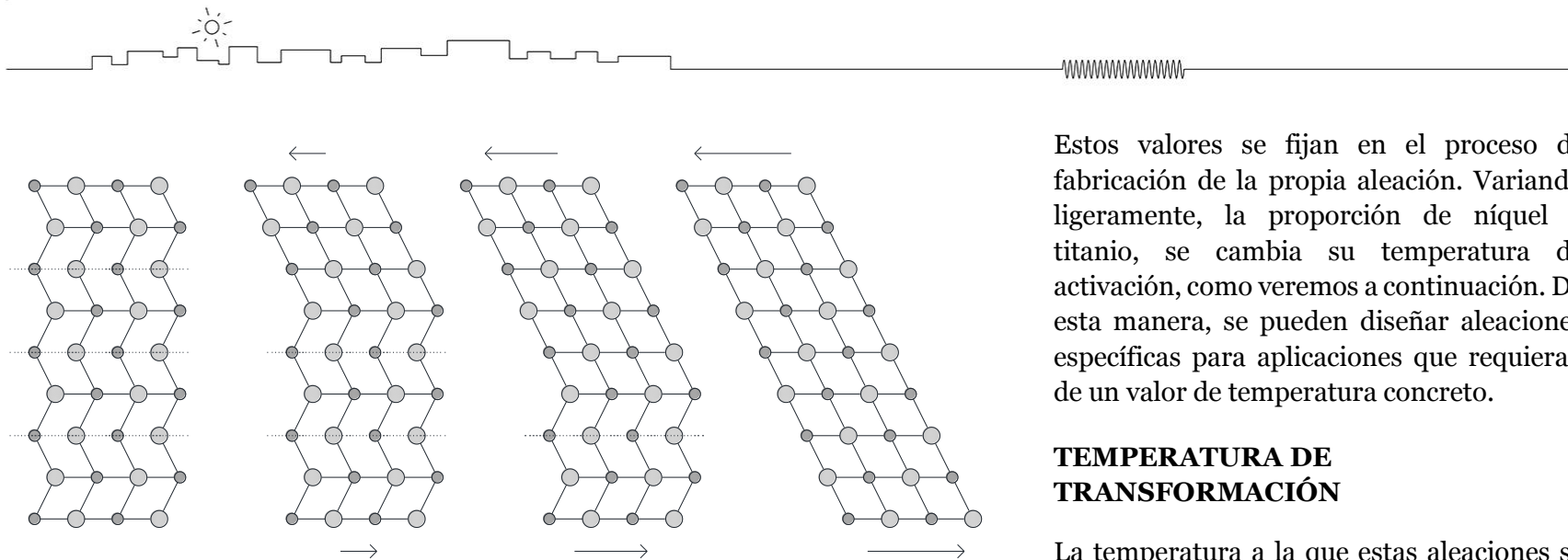


Fig. 113. Deformación de la estructura atómica desde el estado twinned martensite o martensita pareada (sin carga) al de-twinned martensite o martensita no pareada (con carga)

Estos valores se fijan en el proceso de fabricación de la propia aleación. Variando ligeramente, la proporción de níquel y titanio, se cambia su temperatura de activación, como veremos a continuación. De esta manera, se pueden diseñar aleaciones específicas para aplicaciones que requieran de un valor de temperatura concreto.

TEMPERATURA DE TRANSFORMACIÓN

La temperatura a la que estas aleaciones se transforman, del estado martensítico al austenítico, depende directamente de la cantidad de átomos de Nickel (Tabla 5).

Las aleaciones de NiTi, son casi al 50% de Nickel y Titanio pero, si observamos la gráfica, vemos que una variación de tan sólo un 1% en la cantidad de aquel, supone una diferencia de temperatura de transformación de unos ochenta grados centígrados para el rango de aleaciones entre -30°C y 50°C . (Duerig, Melton, Stoeckel, & Wayman, 1990)

Esta información nos resulta muy útil a la hora de elegir el tipo de aleación que necesitamos para nuestro proyecto, ya que podemos pedir una temperatura concreta. En realidad, todas las aleaciones son similares salvo esas ligeras variaciones de Níquel. Esto se traduce en que unas estarán en estado austenítico o superelástico a temperatura ambiente y otras estarán en estado martensítico. Algunos fabricantes nombran a sus aleaciones con denominaciones como High Temp (alta temperatura) para las de 80°C , Standard Temp (temperatura estándar) las de 45°C , Body Temp (temperatura corporal), 35°C , Air Temp (temperatura del aire) 20°C y Superelastic (superelásticas) para las de 0°C hasta -15°C . (Kelloggs, 2013)

A continuación se muestra la (Tabla 6) de un fabricante de SMA a modo de ejemplo, para ver las distintas aleaciones que se pueden obtener:

En el caso de aplicaciones en Arquitectura queremos que se activen o actúen a partir de un valor de temperatura en el que comenzamos a tener la sensación de calor. Este valor podría establecerse alrededor de los 25°C. Para este caso, podemos utilizar aleaciones de 35°C o superior y activarlas eléctricamente (modo activo) o con el calor del sol amplificado como hemos visto con anterioridad (modo pasivo). De esta manera disminuiríamos el efecto de la histéresis que hace que la aleación comience a transformarse mucho antes de esos 25°C. También podemos utilizar aleaciones de histéresis más pequeña como las de NiTiCu. Tienen esta ventaja, aunque también aportan algo más de rigidez al material y no se consigue tanto “stroke” o desplazamiento como con los SMA de NiTi.

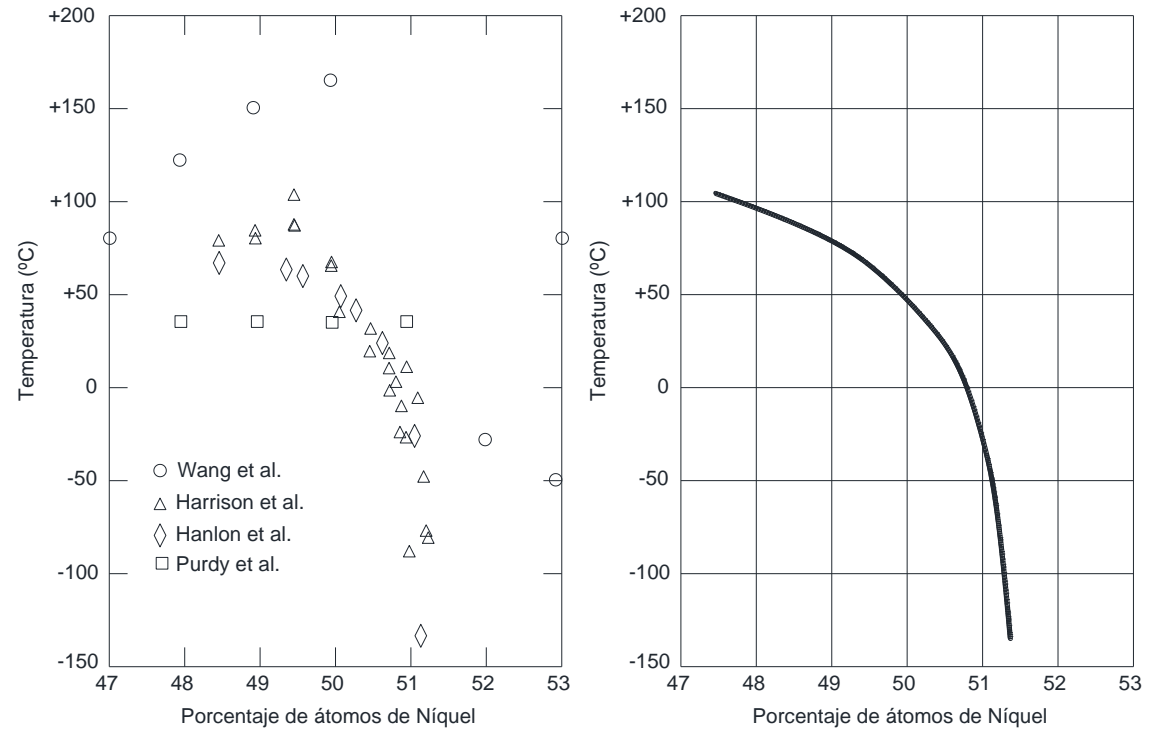


Tabla 5. Dependencia de la temperatura de transformación de aleaciones SMA en función del %Níquel

PROPIEDADES MECÁNICAS

Estas aleaciones tienen distinto comportamiento mecánico según estén en estado martensítico o austenítico. En el primero, el material es fácilmente deformable y tiene comportamiento plástico. Su módulo de elasticidad (E) varía entre los 28 y 41GPa. En el estado austenítico aumenta su resistencia y elasticidad y su módulo elástico varía entre 41 y 81GPa, aunque en la práctica se utilizan 41GPa y 81GPa para cada una de las fases martensita y austenita.

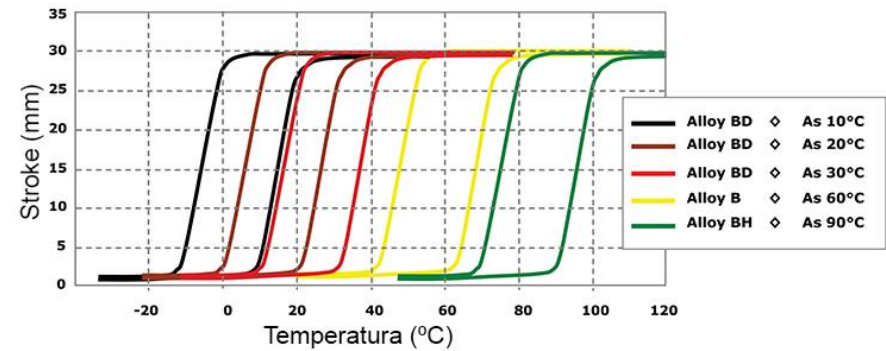


Tabla 6. Diferentes tipos de aleación para diferentes temperaturas de activación

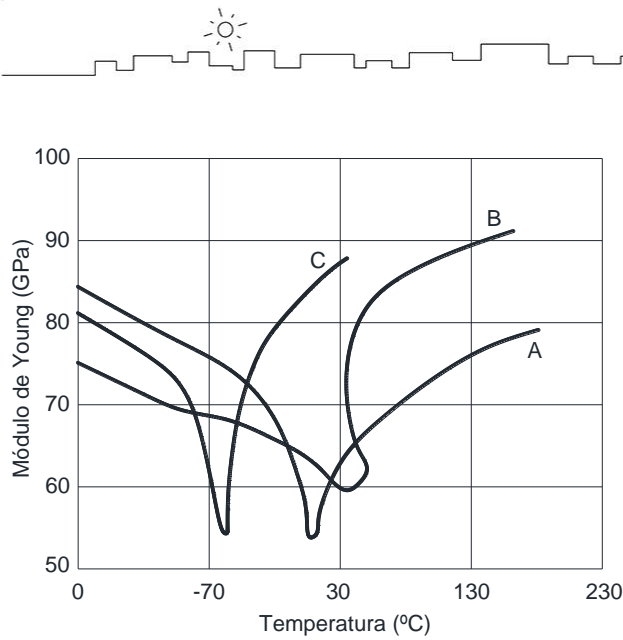


Fig. 114. Módulo de Young dinámico en función de la temperatura

En la gráfica (Fig. 114) vemos 3 tipos diferentes de aleaciones NiTi (Mercier, Melton, Gotthardt, & Kulik, 1982):

Aleación A: Ti-55Ni

Aleación B: 44,7Ti-29,3Ni-26Cu

Aleación C: 44,9Ti-51,7Ni-3,4Fe

Como se puede observar, la inclusión de pequeñas cantidades de Cobre y Hierro afecta a las características mecánicas del material. De todas maneras, el módulo de elasticidad es de poca utilidad en estos materiales, ya que la elasticidad, está controlada por la transformación mecánica de los gemelos de la estructura martensítica.

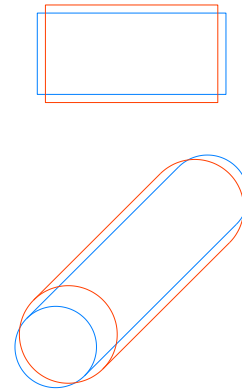


Fig. 115. Al calentar el SMA disminuye de longitud

Su coeficiente de Poisson es de 0,33 y otra característica importante de estas aleaciones es que, al contrario que la gran mayoría de los materiales, cuando se calientan, disminuyen de longitud (Fig. 115).

PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS

Los valores de resistencia eléctrica varían según la temperatura, aunque se pueden tomar estos valores, según se encuentre la aleación en estado martensítico o austenítico (Duerig & Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, 1994):

$$\begin{aligned} \rho(\text{martensita}) &= 76 \times 10^{-10} \Omega \text{cm} \\ \rho(\text{austenita}) &= 82 \times 10^{-10} \Omega \text{cm} \end{aligned}$$

En la (Fig. 116) vemos tres aleaciones de NiTi con diferentes tratamientos térmicos (Miyazaki & Otsuka, 1986):

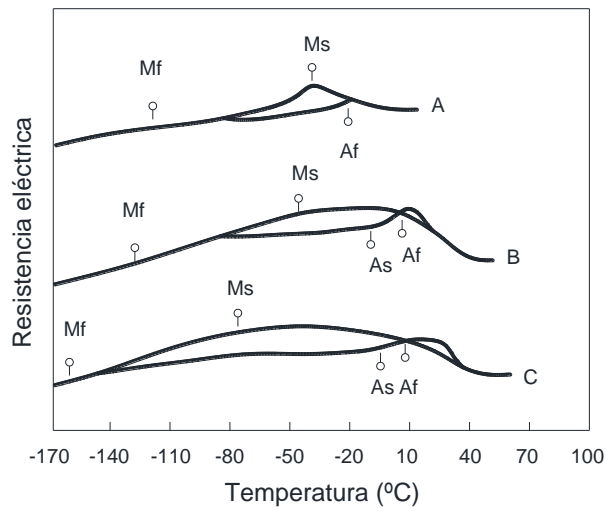


Fig. 116. Resistencia eléctrica en función de la temperatura

Aleación A: templada desde los 1000°C

Aleación B: templada desde los 1000°C y tratamiento térmico de 400°C

Aleación C: directamente con tratamiento térmico de 400°C

En cuanto a sus propiedades magnéticas:

$$\begin{aligned} \chi (\text{martensita}) &= 2,4 \times 10^{-6} \text{ emu/g} \\ \chi (\text{austenita}) &= 3,7 \times 10^{-6} \text{ emu/g} \end{aligned}$$

En estos materiales, la susceptibilidad magnética también sufre una discontinuidad durante la transición de fase, pero estos son los valores típicos que se utilizan.

CAPACIDAD DE TRABAJO

Estos materiales desarrollan mucha energía de trabajo cuando están bajo tensión por carga aplicada. En la (Fig. 117) vemos una aleación de NiTi con 50%Ni y 3%Fe (NiTiFe) probada en ensayo de tensión uniaxial (Duerig & Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, 1994).

RECUPERACIÓN DE DEFORMACIONES

En cuanto a los efectos de la tensión en la capacidad de recuperación de las deformaciones, en la Fig. 118 podemos observarlos, (Duerig & Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, 1994).

Estos son un datos importantes, si estamos diseñando un sistema basado en aleaciones de Nickel-Titanio, debemos tener en cuenta, la tensión a la que se va a ver sometida la aleación en nuestra aplicación, si queremos obtener buenos resultados de

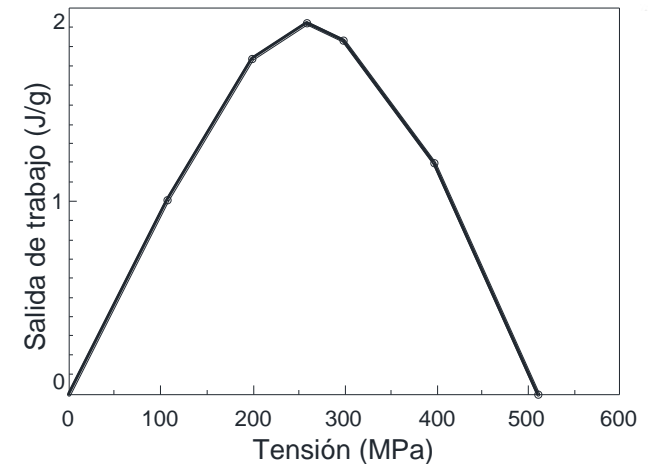


Fig. 117. Capacidad de salida de trabajo de una aleación NiTi ante una carga

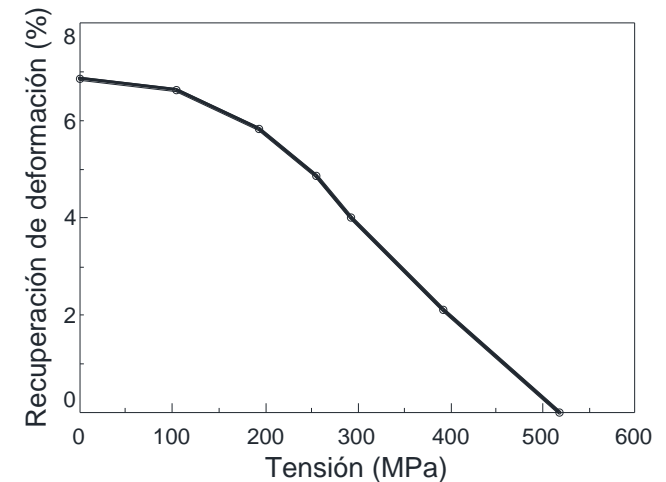


Fig. 118. Deformaciones recuperables en función de la tensión



PROPIEDADES NITINOL		
Estado	MARTENSITA	AUSTENITA
Módulo elástico	E=28-41GPa	E=41-81GPa
Resistividad	$\rho=76\mu\Omega\text{cm}$	$\rho=82\mu\Omega\text{cm}$
Magnéticas	$\chi=2,4\times 10^{-6}\text{emu/g}$	$\chi=3,7\times 10^{-6}\text{emu/g}$
Coef. Expansión térmica	$\alpha=6,6\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha=11\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica	0,086 W/cm ² C	0,18 W/cm ² C
Calor específico	0,20 cal/g ^o C	
Temperatura de fusión	T _m =1310 ^o C	
Temp. de transformación	-200 ^o C a 110 ^o C	
Histéresis	7 ^o C - 50 ^o C	
Densidad	6,5g/cm ³	
Estructura cristalina	Monoclínica $\gamma=96,8^{\circ}$	cúbica centrada $\beta=90^{\circ}$
Límite elástico	70-140MPa	195-690MPa
Tensión de rotura	895MPa (recocido)-1900MPa (endurecido)	
Coef. de Poisson	$\mu=0,33$	
Elongación hasta rotura	5-10% (recocido)-25-50% (endurecido)	
Resistencia corrosión	Excelente, similar a inox serie 300 (AISI)	

Tabla 7. Propiedades Nitinol

Diámetro (mm)	Resistencia (ohms/m)	Fuerza austenita (g)	Fuerza martensita (g)	Intensidad corriente para 1s (mA)	Tiempo enfriamiento 70 ^o C (s)	Tiempo enfriamiento 90 ^o C (s)
0,025	1425	8,9	3,6	45	0,18	0,15
0,038	890	20	8	55	0,24	0,20
0,050	500	36	14	85	0,4	0,3
0,076	232	80	32	150	0,8	0,7
0,10	126	143	57	200	1,1	0,9
0,13	75	223	89	320	1,6	1,4
0,15	55	321	128	410	2,0	1,7
0,20	29	570	228	660	3,2	2,7
0,25	18,5	891	356	1050	5,4	4,5
0,31	12,2	1280	521	1500	8,1	6,8
0,38	8,3	2250	900	2250	10,5	8,8
0,51	4,3	3560	1424	4000	16,8	14,0

Tabla 8 Comparativa Nitinol de 70^oC y 90^oC para diferentes diámetros

recuperación de la deformación.

Se indican las principales propiedades de las aleaciones de Nitinol (Tabla 7). Como se puede ver, el módulo elástico varía según el material se encuentre en estado martensítico o en estado austenítico donde este valor aumenta considerablemente. En cuanto a la resistencia eléctrica, coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica, los valores varían y son mayores en el estado austenítico que en el martensítico.

Los valores de histéresis son muy variables dependiendo del tipo de aleación utilizada. Las de NiTi tienen mayor histéresis mientras que las de NiTiCu y NiTiFe tienen menos. Por último el límite elástico así como la organización de la estructura cristalina difieren bastante en los dos estados, como hemos visto. A continuación, se indican las propiedades para muestras de Nitinol de 70^oC y 90^oC en diferentes diámetros (Tabla 8).

Según esta tabla y como se ha comentado anteriormente, cuanto menor es el diámetro de la sección de cable mayor es la resistencia eléctrica. Esto implica que se calienta más rápidamente y que el tiempo de enfriamiento es menor así como la fuerza ejercida. Dependiendo de las necesidades de cada proyecto elegiremos el cable y aleación adecuados. Si no necesitamos mucha fuerza, los diámetros pequeños ofrecen muy poco tiempo de enfriamiento, lo que es útil para ciclos rápidos. Si por el contrario necesitamos fuerza, diámetros como 0,5mm pueden llegar a los 3560g.



CORROSIÓN Y DURABILIDAD

El Nitinol es un material con un excelente comportamiento ante la corrosión, igual o incluso superior al del acero inoxidable 316L. En la superficie del material se forma una delgada, suave e inerte capa de Dióxido de Titanio (TiO_2) que protege al interior. Esto hace que, como vimos anteriormente, su uso sea apropiado en aplicaciones médicas (biocompatibilidad). Se han realizado pruebas para simular las condiciones de la boca y del cuerpo humano y en general, no se han apreciado signos de corrosión. Por ejemplo, en pruebas donde muestras de NiTi fueron selladas a 37°C durante 72h, la masa de corrosión estuvo en 10^{-5} mm/año, para medios como saliva sintética, sudor sintético, 1% de solución salina de NaCl, 1% de ácido láctico y un 0,1% de HNaSO_4 .

La bajada de protección es significativa a partir de espesores de entre $0,01\mu\text{m}$ a $0,1\mu\text{m}$. Sin embargo, en espesores por encima de los $10\mu\text{m}$, el óxido forma una barrera protectora más resistente y la protección queda asegurada.

El agua marina en movimiento no le afecta, no así la estancada, que puede provocar la rotura de la capa protectora de óxido y la posterior corrosión por picadura (Duerig & Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, 1994).

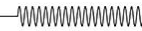
No le afectan los cambios de humedad y se considera que es un material con vida útil infinita. Como se conoce solo desde los años 60, ha transcurrido poco tiempo para ver su comportamiento en el tiempo pero bajo circunstancias normales, su durabilidad se puede considerar muy elevada.

Ácido acético (CH_3COOH): ataca al NiTi a unos bajos $2,5 \times 10^{-2}$ a $7,6 \times 10^{-2}$ mm/año, en un rango de temperaturas que van desde los 30°C hasta el punto de ebullición y en concentraciones desde el 50% hasta el 99,5%.

Metanol (CH_3OH): ataca a las aleaciones Nickel-Titanio, solo cuando están diluidas con bajas concentraciones de agua y haluros. Esta solución impura de metanol, provoca corrosión por picadura y “tunneling” similar a las encontradas en las aleaciones de titanio.

Cloruro de Cobre II (CuCl_2): a 70°C ataca al Nickel-Titanio a 5,5 mm/año

Cloruro de Hierro III (FeCl_3): a 70°C y 8% de concentración, ataca al NiTi a 8,9 mm/año. El NiTi es atacado también a 2,8 mm/año en una solución de 1,5% de FeCl_3 con 2,5% de HCl.



Ácido clorhídrico (HCl): Su ataque afecta de manera diferente según la temperatura, concentración de ácido y la composición específica de la aleación. Con 3% de HCl a 100°C y un amplio rango de composición de aleaciones, el ataque puede ser tan bajo como 0,36 mm/año o tan alto como 3,3 mm/año. A 25°C y una solución 7M, las aleaciones de NiTi pueden perder hasta los 457 mm/año.

Ácido nítrico (HNO₃): A 30°C, un 10% de HNO₃ ataca a $2,5 \times 10^{-2}$ mm/año. 60% de solución ataca a 0,25 mm/año y con 5% de HNO₃ en su punto de ebullición ataca hasta los 2 mm/año.

OTRAS PROPIEDADES³⁶

Mecanizado.

Este material es muy difícil de trabajar y además causa mucho desgaste en las herramientas. Pero se pueden usar técnicas convencionales como fresado, torneado y taladrado. El cizallamiento y el troquelado son bastante efectivos con las herramientas adecuadas, las cuales se recomienda que sean de carburo y que se usen con lubricante clorado. Se pueden usar también técnicas abrasivas como lijado, amolado, aserrado y corte por chorro de agua con partículas abrasivas con éxito. (Wu, 2001). Para fabricar stents y filtros se usa la técnica EDM³⁷ o mecanizado por electro descarga, el mecanizado por láser y procesos fotomecánicos con aguafuerte. También se corta utilizando un láser Nd:YAG equipado con sistema de control de movimiento (CNC) a alta velocidad.

Unión.

Soldar Nitinol a si mismo se ha realizado exitosamente usando un láser CO₂, láser Nd:YAG, gas inerte tungsteno (TIG) y soldadura de resistencia bajo atmósfera protectora de Argón o Helio. Soldar Nitinol a otros materiales es mucho más complicado. En especial al acero inoxidable donde se

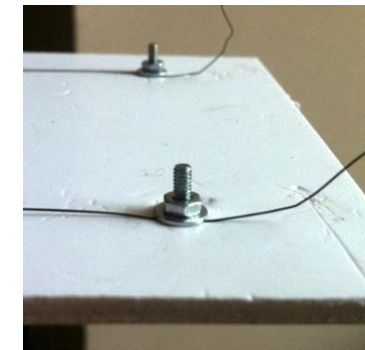
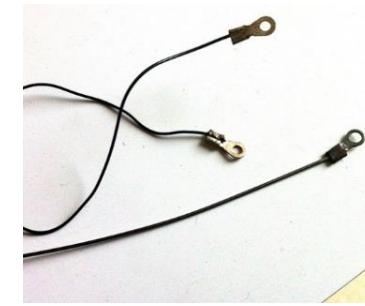



Fig. 119. Terminales de conexión para cables y microtornillos para hilo de Nitinol de 0,3mm de diámetro

³⁶ Fuente: NDC - www.nitinol.com

³⁷ EDM: Electrical Discharge Machining: Mecanizado de Descarga Eléctrica



forman frágiles compuestos intermetálicos como TiFe y TiFe₂. Se puede lograr sin embargo usando una capa intermedia de Tántalo (Ta) mediante la técnica de soldadura de arco de percusión.

Para la unión de los SMAs con otros materiales se pueden utilizar fijaciones mecánicas como los utilizados para los cables eléctricos. Para pequeños diámetros también se puede simplemente atar el NiTi a otro cable o elemento.

Para el caso del actuador diseñado y presentado en esta Tesis, se ha usado un tipo de unión mecánica en la que un hilo de NiTi de diámetro 0,75mm se introduce a través de un orificio de 0,8mm practicado en otro cable de Nitinol de 2,7mm de diámetro. Como la forma programada del primero es curva, al introducirlo por el orificio y activarlo, queda asegurado el anclaje.

También se pueden utilizar microtornillos con microtuercas y microarandelas de entre 1 y 2mm de para los cables de diámetro pequeño (Fig. 119).

Acabado.

El tratamiento térmico le da al Nitinol un acabado de óxido con colores que van desde el tono claro como la paja al azul. El color negro ocurre cuando no se elimina el óxido formado durante la fabricación. Estas capas de óxido se pueden eliminar físicamente con granallado y pulido o químicamente, produciendo una superficie de aspecto plateado. Para producir un acabado de alta suavidad se puede utilizar la técnica del electro-pulido. Evidentemente, todos estos tratamientos de la superficie del material afectan a su capacidad de soportar la corrosión, cuya protección se basa en la existencia de esta capa protectora de Dióxido de Titanio.

Revestimiento.

Mediante procesos electrolíticos se puede encapsular el Nitinol con otros metales, como por ejemplo el Oro (Au), aunque hay riesgos en este proceso que necesitan ser controlados, para garantizar una buena adhesión y ductilidad. El daño en este encapsulado puede llevar a corrosión galvánica. El encapsulado con polímeros como el PTFE³⁸ es posible mediante co-extrusión, aplicación en spray u otras técnicas de deposición. También es posible el uso de poliuretano con buenos resultados.

³⁸ PTFE: Poli-tetrafluoretileno. Comercializado por DuPont bajo el nombre de Teflón.



PROGRAMACIÓN

Cuando la aleación de Nitinol se activa, recupera una forma previamente fijada. Pero, ¿cómo podemos definirla? Veamos cómo programarlo para que al activarse, adquiera la forma que deseamos (Tabla 9).

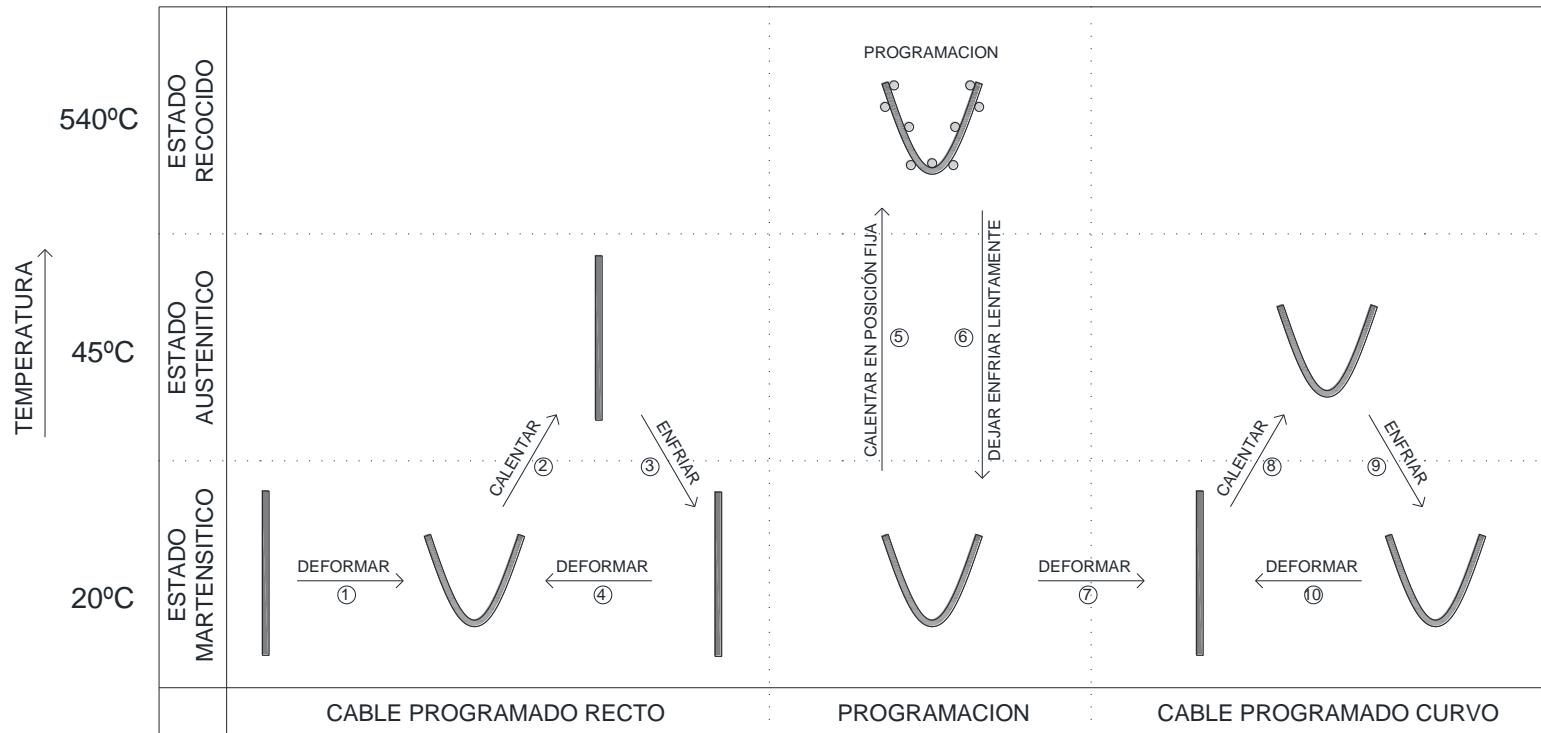


Tabla 9. Programación Nitinol de forma recta a curva (ejemplo)

Normalmente, los cables de NiTi vienen con forma recta predeterminada. Si tenemos una muestra de cable recto, podemos deformarla en frío, por ejemplo, a una forma curva (paso #1). Esta nueva forma, se mantendrá porque el material se deforma plásticamente, en su estado martensítico, pero si la calentamos, por encima de su temperatura de activación o transformación austenítica (en este caso

45°C, paso #2) ésta recuperará su forma original recta, forma que conservará mientras esté por encima de los 45°C. Si la dejamos enfriar, la aleación entrará de nuevo en su estado martensítico (#3) y una vez más, la podremos deformar, a la forma que queramos (#4), como ya hemos visto anteriormente.

Ahora bien, si le damos una forma deseada a la muestra y la fijamos mecánicamente, para que no se mueva mientras la calentamos, por encima de los 540°C (#5), el material intentará ponerse recto, pero la fijación mecánica se lo impide, adoptando esta nueva posición programada. Si la dejamos enfriar lentamente, para evitar tensiones (#6), la forma se conservará de manera que si la volvemos a deformar en frío (#7) y la calentamos por encima de su temperatura de transformación, la muestra volverá a la nueva forma curva programada (#8). Por último, esta forma curva, una vez fría (#9) se puede volver a deformar (#10) y calentar repitiéndose el proceso.

En la práctica, se suelen utilizar planchas microperforadas (Fig. 121). Las pequeñas perforaciones, permiten insertar tornillos con tuercas, para fijar el cable, en una posición determinada. Los tornillos, fijan el cable de NiTi contra la plancha. Así, cuando se calienta la muestra, ésta no se mueve. Para programarlo en forma de muelle, se pueden utilizar tornillos con el diámetro y el paso de rosca deseado o simples cilindros (Fig. 120). Se coloca el cable de Nitinol alrededor del mismo y se fijan los extremos. Posteriormente se eleva la temperatura de la muestra por encima de los 540°C, para memorizar la nueva forma de muelle. Los extremos también se pueden configurar como se quiera, tan solo es necesario repetir el proceso dándole la forma de gancho, recto, circular o como se quiera. Esto es muy útil para aplicaciones que usen muelles de SMA y que necesiten un anclaje fiable. Lo dicho anteriormente también vale, lógicamente, para muestras de NiTi en tiras, placas, tubo, malla, etc.

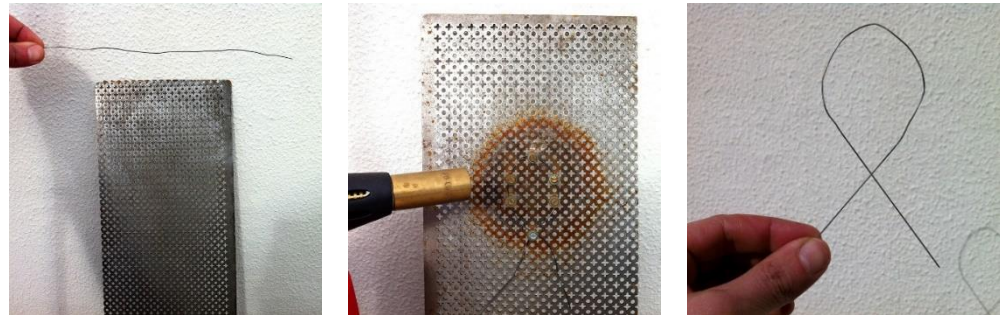


Fig. 121. Programación Nitinol con chapa de acero microperforada y soplete de propano. Fijación en forma de alfa mediante tornillos y tuercas.



Fig. 120. Programación de Nitinol con barra de acero a modo de mandril. Fijación en forma de muelle mediante sargentos metálicos.



ACTIVACIÓN

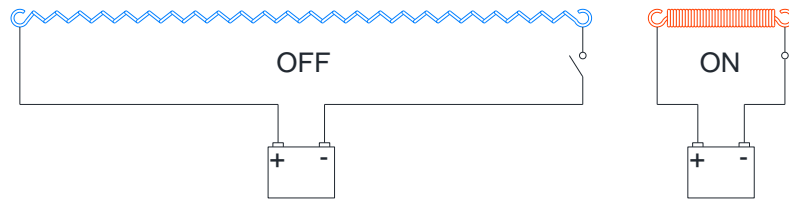


Fig. 122. Calentamiento de muelle SMA por efecto Joule. La electricidad pasa por el conductor (Nitinol) para calentarlo y activarlo

La activación de las aleaciones con memoria de forma, se puede hacer de varias maneras. En general, toda fuente de calor es susceptible de activar el SMA: energía eléctrica por efecto Joule, radiación solar directa, gas o líquido calientes, etc.

Habitualmente, se realiza mediante energía eléctrica. Si hacemos pasar electricidad por un material conductor, en este caso el SMA, éste se calienta (efecto Joule) (Fig. 122). Obviamente cuanto mayor es la sección del conductor, menor será la resistencia eléctrica y

por lo tanto tardará más en calentarse. Por el contrario, cuanto más pequeña sea la sección, mayor resistencia eléctrica ejercerá y se calentará en menos tiempo. Esto es importante, ya que a partir de valores de sección de 1mm de diámetro y mayores (para secciones de cable circular) el tiempo de activación, aumenta. En cables o hilos de menor diámetro como 0,5mm y menores, este tiempo es pequeño. Incluso en secciones muy reducidas, la transformación del material ocurre casi instantáneamente. (Tabla 8)

Naturalmente, también afecta la longitud del SMA, de manera que si el cable es largo, necesitará mayor cantidad de electricidad que si es corto. Para secciones muy grandes también resulta un problema calentarlas con electricidad ya que el material no se activa uniformemente, aparte de la mayor necesidad energía que requieren.

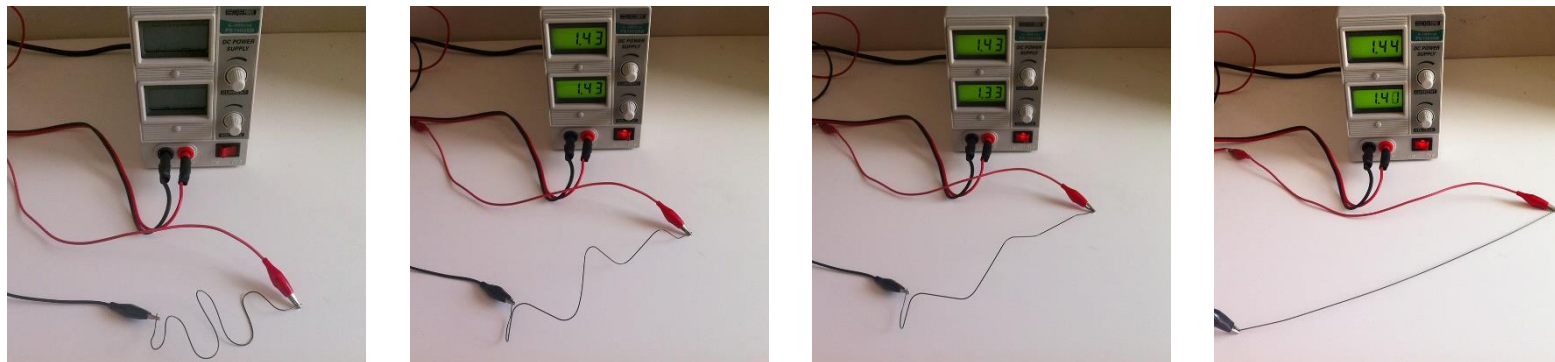


Fig. 123. Activación de alambre de NiTi mediante electricidad. 1,4V y 1,4A aprox. Tiempo de transformación total = 3s

Otra forma de calentar y por tanto de activar el Nitinol, es mediante radiación solar directa. Si tenemos una aleación de NiTi, cuya temperatura de activación final (A_f) es de 30°C , podemos disponer un sistema basado en ella, para que se active con el calor del Sol. El inconveniente que presenta este método, es que la activación resulta lenta y demasiado progresiva, ya que el Sol cuando sale, comienza a calentar, pero hasta que llega a la temperatura deseada y la sobrepasa puede pasar demasiado tiempo. Además, el hecho de que una aleación con memoria de forma, tenga una temperatura de transformación final de 30°C significa que el material comenzará a transformarse unos 5 o 10°C . Para evitar esto, se pueden elegir aleaciones SMA con una histéresis menor, como el caso de las que incluyen cobre en bajas proporciones (NiTiCu) y que tienen en torno a los 5°C o menos. En este caso, nuestro sistema iniciaría la activación a los 25°C , finalizándola a los 30°C .

Para aumentar o potenciar el poder del Sol, se pueden implementar varias medidas. Una de ellas, consiste en “cerrar” el SMA, dentro de un recinto estanco y transparente. Así, el aire del interior, se calentará aún más por efecto invernadero. Lógicamente, este material envolvente debe ser resistente a la intemperie, si se quiere utilizar en aplicaciones de exterior. También se le puede añadir a la medida anterior y si la envolvente del SMA es de sección cilíndrica, pintura oscura, preferiblemente negra, en la mitad inferior e interior de la misma, para absorber la radiación solar mejor y sobrecalentar el aire interior. Este recinto que envuelve a la aleación, podría ser también de aluminio, ya que tiene un alto coeficiente de transmisión térmica. Si el espesor de la misma es pequeño, el Sol calentará la superficie exterior (que además puede estar pintada de negro también) y esta superficie, inmediatamente aumentará la temperatura del interior.

En casos de funcionamiento activo, esto es, cuando lo activamos o desactivamos manualmente a voluntad del usuario, se puede almacenar la electricidad durante el día para poder usarla durante la noche. Si nuestro SMA es de sección relativamente pequeña (alrededor de 1mm) la demanda de energía eléctrica será también pequeña y se podría instalar una placa fotovoltaica de pequeño tamaño y almacenar la energía en una batería. Por supuesto se podría conectar a la red general de suministro, mediante un transformador de corriente alterna a corriente directa.

Sería necesario en este caso utilizar PWM (Pulse Width Modulation). Con esta técnica podemos modificar el ciclo de trabajo de nuestra fuente de energía, para que éste no sea continuo (100%) sino discontinuo (Fig. 124). Si no lo hiciéramos así, sobrecalentaríamos el SMA haciendo perder sus propiedades e incluso, en secciones pequeñas, podemos llegar a quemarlo y destruirlo.

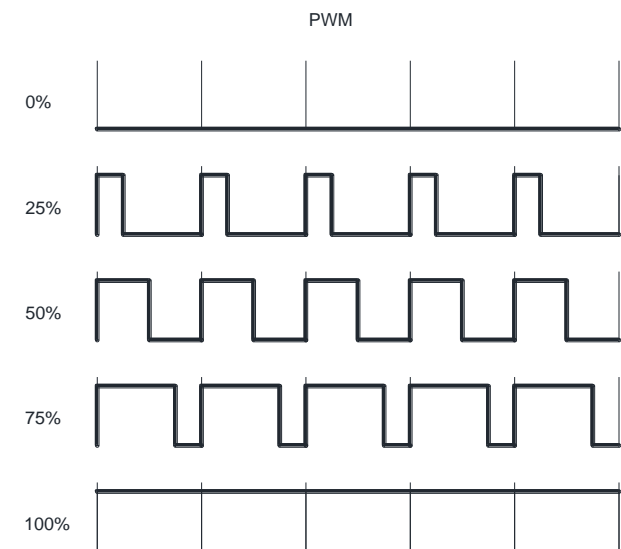


Fig. 124. Esquema de funcionamiento PWM (Pulse Width Modulation)

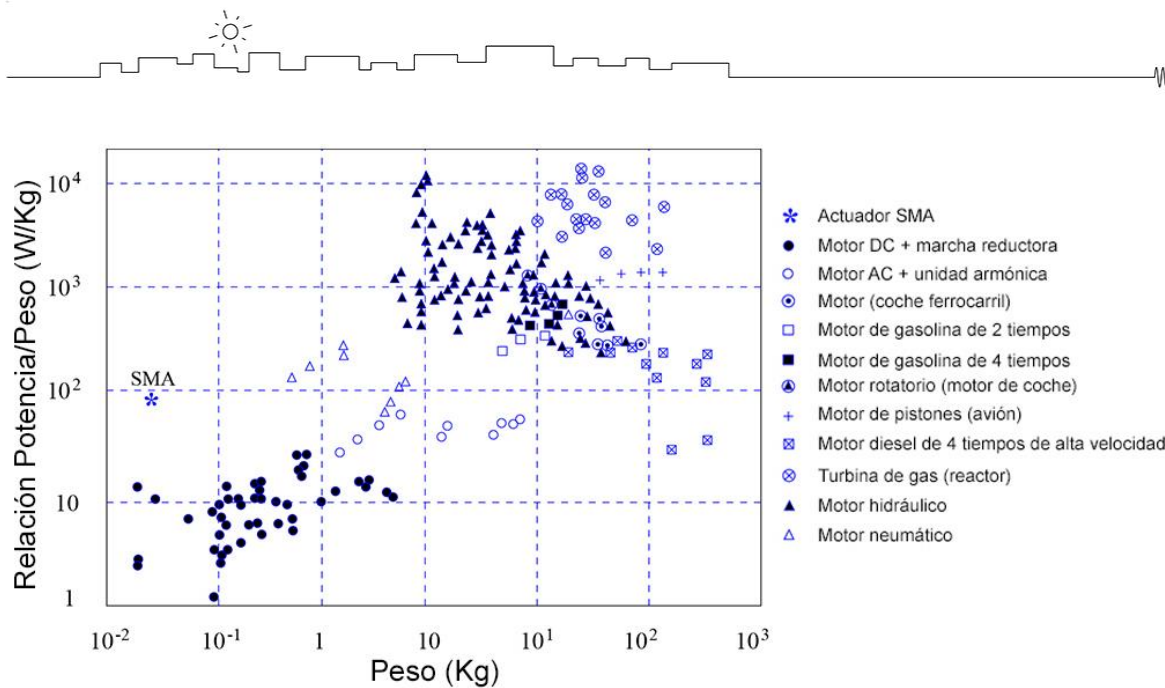


Tabla 10. Comparación de relación peso/potencia entre actuadores SMA y diferentes tipos de motores

Por último, hay que destacar que las aleaciones con memoria de forma, pueden desarrollar grandes fuerzas en relación a su propio peso. De hecho, comparándolas con diversos tipos de motores, tienen la mejor relación potencia/peso (W/Kg) por peso (Kg).

Incluso los pequeños motores ligeros y eléctricos, son demasiado pesados con su equivalente SMA, en desarrollo de potencia/peso o a igualdad de peso, los actuadores basados en SMA son más potentes (Tabla 10).

3.2 DISEÑO DE DISPOSITIVO ACTUADOR

Se describe ahora un dispositivo de actuación basado en Nitinol (Fig. 125). Se ha solicitado derechos de patente sobre el mismo en la Oficina Española de Patentes y Marcas, con fecha de solicitud 3/12/2013, 12:18 (CET) y número P201331762 con el título: “Dispositivo Actuador”.

Este es un dispositivo actuador, del tipo de los utilizados para la generación de un movimiento o desplazamiento en al menos uno de sus extremos, que comprende dos componentes de cualquier sección: uno con memoria de forma y otro superelástico que se curva en forma de arco y se articula a sus extremos, donde el

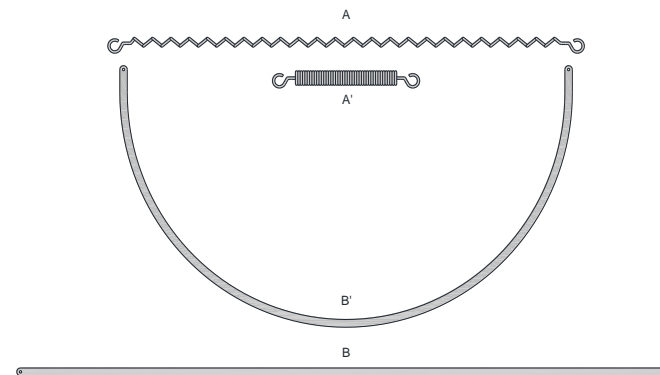


Fig. 125. Dispositivo actuador basado en Nitinol:

- A) muelle con memoria de forma en estado frío (martensítico).
- A') muelle con memoria de forma en estado caliente (austenítico).
- B) barra recta superelástica.
- B') barra superelástica curvada

movimiento se produce por la diferencia de tensiones del conjunto cuando se supera la temperatura de activación del primero. Ambos componentes están hechos de aleación de memoria de forma. En el caso del arco es aleación de memoria de forma con propiedad superelástica y en el caso de la cuerda del arco es aleación de memoria de forma con propiedad de memoria de forma.

Descripción detallada

El dispositivo actuador (Fig. 126) comprende básicamente, al menos un elemento lineal superelástico (1) y un elemento con memoria de forma SMA (2), estando dispuesto el elemento lineal superelástico (1) curvado y relacionado en sus extremos, con los extremos del elemento con memoria de forma SMA (2) mediante dos uniones articuladas (3,4). De esta manera, el conjunto queda en tensión, conformando el elemento lineal superelástico (1) un arco y el elemento con memoria de forma SMA (2) la cuerda de dicho arco.

El elemento con memoria de forma SMA (2) adoptará preferentemente una forma de muelle, con cualquier sección, y su material será preferentemente Nitinol u otro similar. El muelle puede ser recto o cónico, consiguiendo en este último caso, una variación no lineal. El elemento lineal superelástico (1) adoptará preferentemente una forma de barra, de cualquier sección, tanto maciza como hueca o compuesta.

En su realización preferente, uno de sus extremos es fijo y el otro es móvil, aunque está prevista una realización alternativa en la que bien el elemento lineal superelástico (1) o el elemento con memoria de forma SMA (2), dispone de un punto fijo intermedio (5), siendo móviles ambos extremos. Este punto fijo intermedio (5) estará preferentemente ubicado en la parte central del elemento lineal superelástico (1) o del elemento con memoria de forma SMA (2).

El extremo o extremos móviles se encuentran mecánicamente relacionados con un mecanismo o dispositivo externo receptor del movimiento, como por ejemplo una palanca o engranaje.

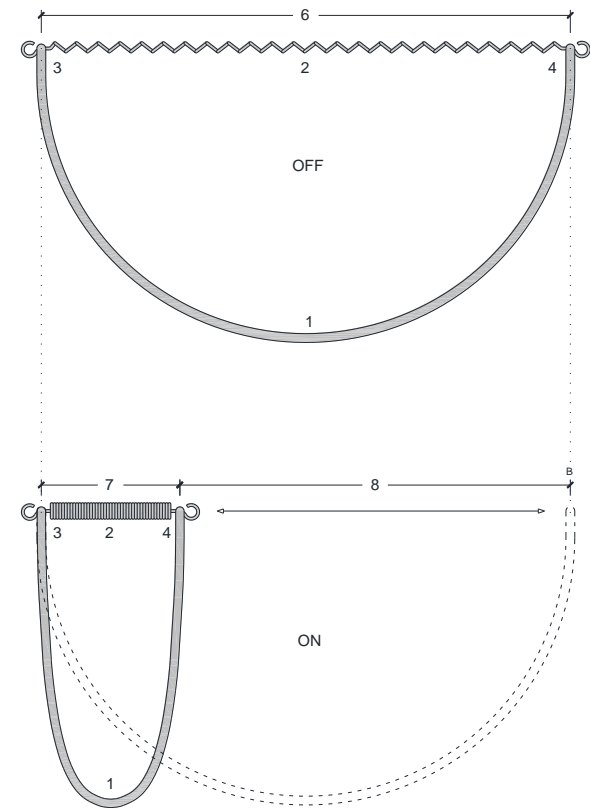


Fig. 126. Dispositivo actuador. Un extremo fijo y el otro móvil. Estados frío (arriba) y caliente (abajo)



La distancia entre sus extremos, quedando definidos estos extremos por las uniones articuladas (3,4), es variable en función de los cambios de temperatura del elemento con memoria de forma SMA (2). Estos cambios de temperatura pueden provenir tanto de fuentes naturales, como por ejemplo la energía solar o geotérmica, como de fuentes artificiales, como por ejemplo agua caliente, efecto Joule, piezoelectricidad, gas caliente, etc...

Este dispositivo actuador, es susceptible de uso tanto individual, como agrupando varios dispositivos en paralelo, en serie, o en combinaciones serie y paralelo. La combinación en paralelo, consiste en la agrupación en paralelo de varios elementos lineales superelásticos (1) y varios elementos con memoria de forma SMA (2) de menor longitud, mediante únicamente dos uniones articuladas (3,4), sumando la fuerza de actuación de cada dispositivo individual. La combinación en serie, consiste en la agrupación de varios elementos lineales superelásticos (1) y varios elementos con memoria de forma SMA (2) de menor longitud, con diversas uniones articuladas (3,4) intermedias, sumando los desplazamientos individuales obtenidos.

El elemento lineal superelástico (1) puede flexionar hasta la forma (B') y volver a la forma (B) debido a su comportamiento elástico. A su vez, el elemento con memoria de forma SMA (2) puede alargarse hasta la su máxima extensión (A) ante una fuerza de tracción y volver a la forma (A') al subir la temperatura por encima de su temperatura de activación.

Si unimos estos dos componentes, podemos combinar ambas cualidades: la superelasticidad y el efecto de memoria de forma, en un único dispositivo actuador. Para ello, se articulan ambos extremos del elemento con memoria de forma SMA (2) a los extremos del elemento lineal superelástico (1) mediante sendas uniones articuladas (3,4). Es necesario que el elemento lineal superelástico (1) se curve y al hacerlo acumula energía. El elemento con memoria de forma SMA (2) ahora impide que el elemento lineal superelástico (1) recupere su forma lineal inicial, manteniéndolo curvado y en tensión.

El elemento con memoria de forma SMA (2) tiene una temperatura de activación, por debajo de la cual el material está en fase martensítica o fase fría. Por encima de esa temperatura de activación el elemento con memoria de forma SMA (2) cambia su estructura cristalina a la fase austenítica o fase caliente, recuperando la forma original y mostrando comportamiento elástico.

Los extremos del elemento lineal superelástico (1) y el elemento con memoria de forma SMA (2) están definidos por las uniones articuladas (3,4). Si fijamos una de las uniones articuladas (3) dejando la otra unión articulada (4) libre, cuando la temperatura del sistema está por debajo de la temperatura de activación, el elemento lineal superelástico (1) ejerce más fuerza que el elemento con memoria de forma SMA (2) y la distancia entre los las uniones articuladas (3,4) es la distancia máxima (6). En esta fase martensítica, el elemento con memoria de forma SMA (2) se deforma y alarga hasta su máxima extensión (2) debido a la fuerza tracción, que le provoca el elemento lineal superelástico (1).

Cuando se supera la temperatura de activación, el elemento con memoria de forma SMA (2), ejerce más fuerza que el elemento lineal superelástico (1) y la unión articulada (4) se desplaza, acercándose a la unión articulada (3), hasta quedar a una distancia (7), reduciéndose la separación entre ambos, una distancia (8). En esta fase austenítica, el elemento con memoria de forma SMA (2), ejerce ahora más fuerza que el elemento lineal superelástico (1), recuperando su forma inicial (A').

Este es un sistema cíclico, de manera que la unión articulada (4), se acerca o aleja a la unión articulada (3), dependiendo de si el dispositivo se calienta o enfría. Es necesario que el elemento con memoria de forma SMA (2), en fase austenítica, sea capaz de ejercer mayor fuerza que el elemento lineal superelástico (1). El diámetro, longitud y forma de los elementos del dispositivo, pueden variar siempre que se cumpla esta condición.

Tal y como hemos visto anteriormente, de manera alternativa, si fijamos el elemento lineal superelástico (1), en un punto intermedio (5), dejando las uniones articuladas (3,4) libres, obtenemos un desplazamiento (9) de ambos puntos, que si el punto intermedio (5) es equidistante, corresponde con la mitad de la distancia (8), anteriormente obtenida (Fig. 128).

Para activar el dispositivo, solo es necesario que el elemento con memoria de forma SMA (2), supere su temperatura de activación. Esto se puede hacer de varias maneras conocidas, reflejando distintas aplicaciones. Por ejemplo, eléctricamente. Si se hace pasar energía eléctrica a través de la misma, esta se calentará por efecto Joule entrando en fase austenítica y recuperando la forma pre-programada. Es conveniente evitar sobrecalentamientos en el Nitinol, es decir, no se debe calentar mucho más de la temperatura de activación ya que, además de ser innecesario, puede alterar las propiedades del material.

Se puede conseguir también con agua o cualquier otro fluido, o bien con aire o cualquier otro gas, lo suficientemente caliente, como para que el elemento con memoria de forma SMA (2) se active. Asimismo, se puede aprovechar el Sol, directamente con el calor que proporciona, amplificándolo con lentes o superficies reflectantes cercanas para conseguir temperatura superior a la de activación del elemento con memoria de forma SMA (2) o por medio de energía fotovoltaica.

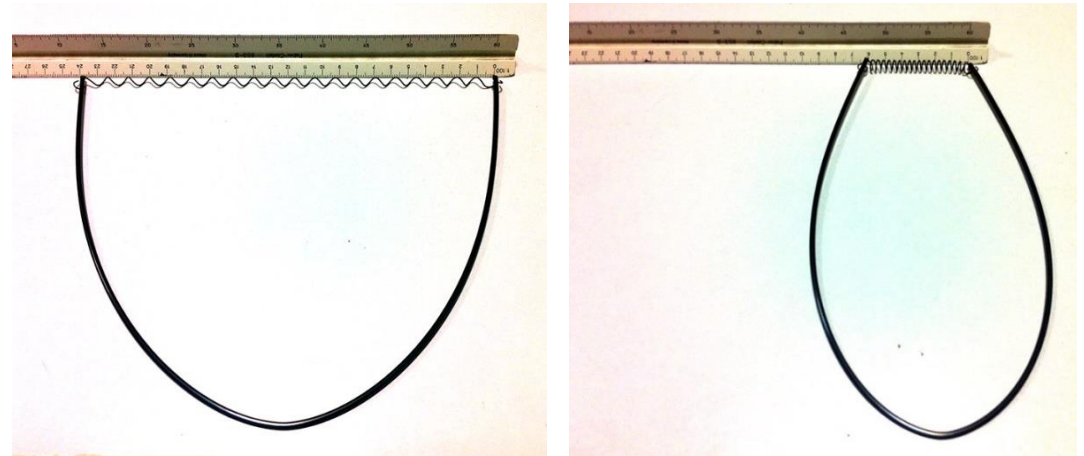


Fig. 127. Dispositivo actuador. Posiciones OFF y ON

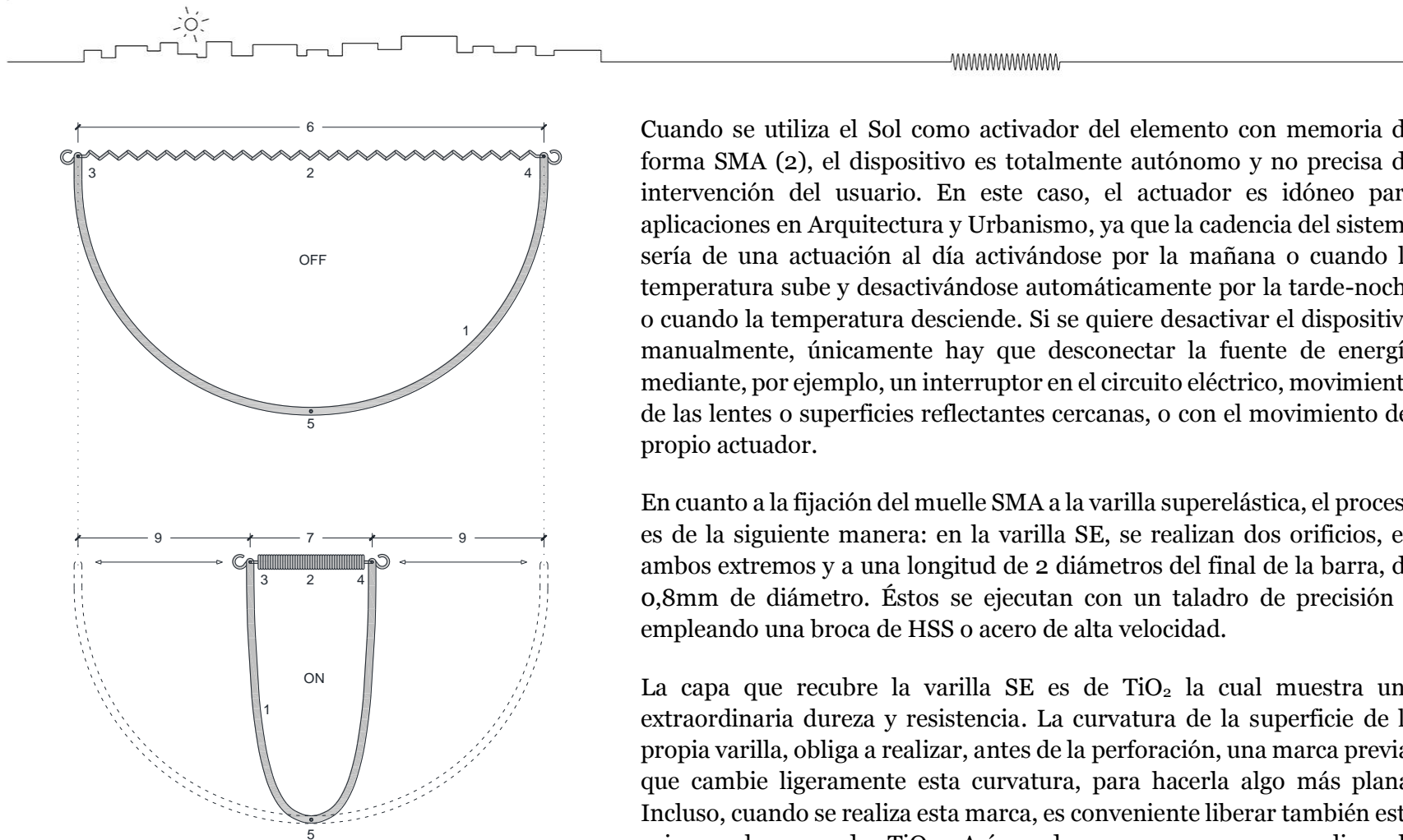


Fig. 128. Dispositivo actuador. Punto central fijo y ambos extremos móviles. Estados frío (arriba) y caliente (abajo)

Cuando se utiliza el Sol como activador del elemento con memoria de forma SMA (2), el dispositivo es totalmente autónomo y no precisa de intervención del usuario. En este caso, el actuador es idóneo para aplicaciones en Arquitectura y Urbanismo, ya que la cadencia del sistema sería de una actuación al día activándose por la mañana o cuando la temperatura sube y desactivándose automáticamente por la tarde-noche o cuando la temperatura desciende. Si se quiere desactivar el dispositivo manualmente, únicamente hay que desconectar la fuente de energía mediante, por ejemplo, un interruptor en el circuito eléctrico, movimiento de las lentes o superficies reflectantes cercanas, o con el movimiento del propio actuador.

En cuanto a la fijación del muelle SMA a la varilla superelástica, el proceso es de la siguiente manera: en la varilla SE, se realizan dos orificios, en ambos extremos y a una longitud de 2 diámetros del final de la barra, de 0,8mm de diámetro. Éstos se ejecutan con un taladro de precisión y empleando una broca de HSS o acero de alta velocidad.

La capa que recubre la varilla SE es de TiO_2 la cual muestra una extraordinaria dureza y resistencia. La curvatura de la superficie de la propia varilla, obliga a realizar, antes de la perforación, una marca previa, que cambie ligeramente esta curvatura, para hacerla algo más plana. Incluso, cuando se realiza esta marca, es conveniente liberar también esta primera barrera de TiO_2 . Así, podremos comenzar a realizar la perforación, evitándola.

Es conveniente lubricar continuamente la broca, para reducir su temperatura, conseguir mayor eficiencia y evitar su rotura. Una vez

ejecutadas las perforaciones, el muelle se inserta por ambas y la forma de gancho de los extremos, así como la escasa diferencia de diámetros (0,75mm el muelle y 0,80mm el orificio), aseguran una correcta fijación mecánica.

Caracterización del muelle SMA

El actuador es simple. Consta solamente de dos partes, el muelle o cuerda y el cable o arco. A continuación, se describen las pruebas realizadas al muelle, que hace de cuerda del arco, en el actuador. Se han probado 3 tipos de muelles, de cuyas características se definen en la Tabla 11:

- L_1 = distancia entre ejes en estado contraído, valores de fábrica.
- L_2 = distancia entre ejes en estado contraído, tras 5 ciclos de carga
- L_3 = distancia entre ejes con el muelle en alargamiento máximo.
- \varnothing_1 = diámetro del cable del muelle
- \varnothing_2 = diámetro exterior del muelle
- \varnothing_3 = diámetro interior del muelle
- D = desplazamiento efectivo= L_3-L_2
- F = fuerza efectiva desarrollada en Newtons
- T = temperatura de activación de la aleación en $^{\circ}\text{C}$ (A_f)

La distancia L_3 corresponde al muelle en su máximo alargamiento y la distancia L_2 es la longitud del muelle entre ejes después de varios ciclos de carga, según se puede apreciar en las imágenes siguientes:

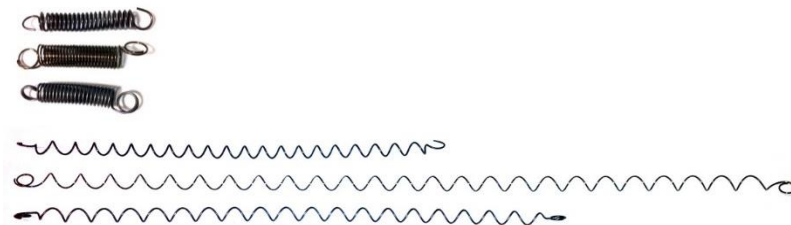


Fig. 130. Muelles ensayados #1, #2 y #3

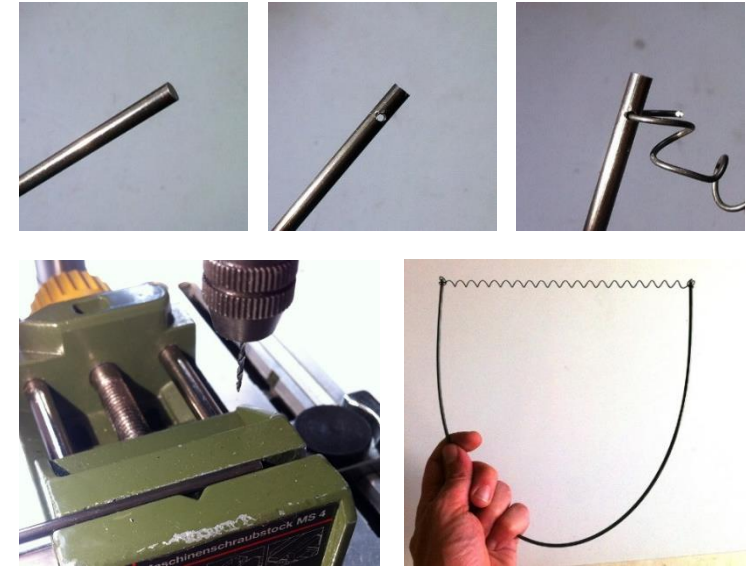


Fig. 129. Unión mecánica de muelle SMA a barra de NiTi SE. Perforación de 0,8mm de diámetro en barra de 2,7mm.

	#1	#2	#3
L_1 entre ejes (mm)	24	27	23
L_2 entre ejes (mm)	37	37	30
L_3 entre ejes (mm)	176	320	240
\varnothing_1 cable (mm)	0,75	0,65	0,75
\varnothing_2 diam. ext. (mm)	6,3	7,5	6,5
\varnothing_3 diam. int. (mm)	4,8	6,2	5
nº vueltas	20	25	20
Desplazamiento (mm)	139	256	190
Fuerza efectiva (N)	5	3,5	7
Temp. activación ($^{\circ}\text{C}$)	45	55	55
Enganche en extremos	casi circular	circular	circular doble

Tabla 11. Características muelles ensayados

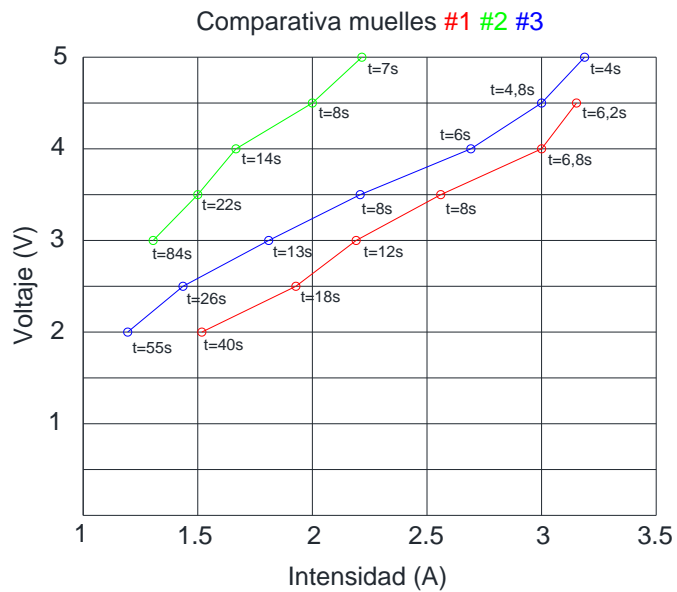


Tabla 12. Gráficas de Intensidad, voltaje y tiempo. Muelle #1 rojo, muelle #2 verde y muelle #3 azul

Inicialmente se han hecho pruebas de funcionamiento, solo de los muelles, aplicándoles calor por efecto Joule. Para ello se ha utilizado una fuente de alimentación eléctrica que proporciona hasta un máximo de 3A de corriente continua. Se ha aplicado corriente de diferentes voltajes y se ha medido el tiempo de reacción o mejor dicho, el tiempo que tarda el muelle en recuperar la forma desde su estado L3 hasta el L2 que es lo mismo que el tiempo que tarda la aleación en cambiar del estado martensítico al austenítico. Estos datos se reflejan en la Tabla 12. Por debajo de los 2V la aleación no se activa en ninguno de los tres casos. Para valores entre 2V y 3V la aleación se activa con tiempos demasiado largos y para valores superiores, el tiempo de transformación completa de fase, se reduce considerablemente.

También se observa que los muelles #1 y #3 tienen un comportamiento parecido, ya que la sección de su cable es idéntica (0,75mm). Se diferencian del muelle #2, que tiene una sección de cable de 0,63mm. Esto influye directamente en la resistencia eléctrica que ofrecen unas y otras muestras.

Para el diseño óptimo del actuador, es necesario que el muelle desarrolle mayor fuerza, en el mínimo tiempo posible. En este punto, sabemos que las muestras #1 y #3 poseen menor tiempo de activación que la #2 a igualdad de voltaje.

Finalmente, se elige el muelle #3, ya que ofrece un buen tiempo de respuesta (4s), una distancia L3 mayor que la del muelle #1 y mayor fuerza (7N). Este muelle además, tiene los extremos en forma circular doble, lo cual resulta mejor a la hora de fijarlo a otro elemento.

3.3 CÁLCULO DE DISPOSITIVO ACTUADOR MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Descripción del modelo

Como ya hemos visto anteriormente, se trata de una barra o varilla de Nitinol superelástico. A los extremos de esta barra se conecta un muelle, también de Nitinol, pero con la propiedad de memoria de forma.

Las características, tanto de la varilla como del muelle, así como su geometría, se indican en la Tabla 13:

CARACTERÍSTICAS ACTUADOR	
Tiempo activación	4s
Tiempo enfriamiento	60s
Dimensiones (off)	260mm x 180mm
Dimensiones (on)	80mm x 200mm
Fuerza	7N
Af (muelle)	55°C
Distancia actuación	160mm
BARRA SUPERELÁSTICA	
Longitud	500mm
Diámetro	2.7mm
Af	0°C
MUELLE SMA	
∅1 muelle	0.75mm
∅2 exterior	6.3mm
∅3 interior	4.8mm
Vueltas	20
Paso de vuelta	1,5mm
Longitud martensita	260mm
Longitud austenita	70mm

Tabla 13 Características actuador

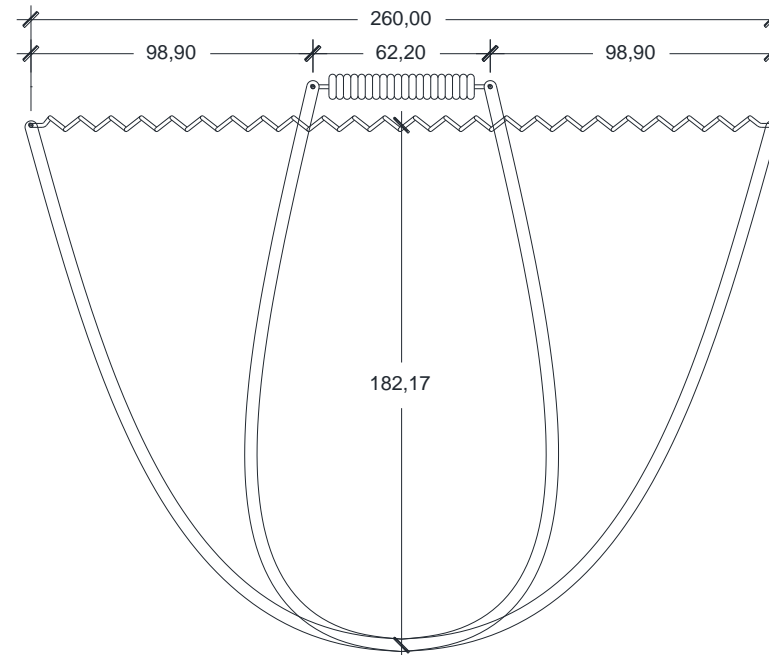


Fig. 131 Dimensiones actuador



Modelo numérico.

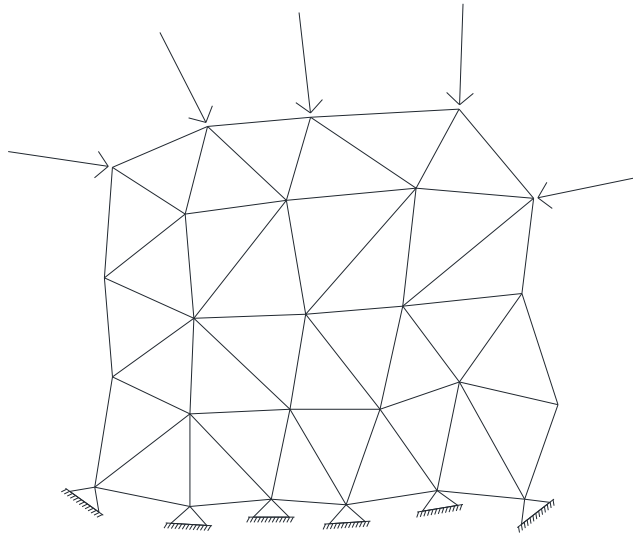


Fig. 132 Ejemplo de sistema de elementos finitos

La representación numérica del modelo, consiste en la utilización de la técnica de los elementos finitos. Esta técnica, consiste en la discretización de lo continuo, en elementos más pequeños.

El continuo, se divide por medio de líneas o superficies imaginarias, en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos. Los elementos finitos, se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nodos (Fig. 132).

Los desplazamientos de los nodos, son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan, unívocamente, la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes. El desplazamiento de un punto cualquiera, viene determinado, por los desplazamientos de los nodos del elemento al que pertenece el punto. Para ello, se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación, que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior, por interpolación de los desplazamientos nodales.

Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales, definen el estado de deformaciones unitarias, en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material, definen el estado de tensiones, en el elemento y en sus bordes. Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento y a las fuerzas exteriores, sobre él actuantes.

La solución numérica, consiste en la obtención de los desplazamientos de los nodos, mediante la integración numérica de un sistema matricial de ecuaciones, que definen la rigidez del modelo a analizar. En un sistema mecánico, la ecuación matricial general a resolver es la siguiente:

$$\{F\} = [K] \cdot \{D\}$$

Donde F , representa las fuerzas exteriores y las condiciones de contorno, que actúan sobre el sistema, K es la matriz de rigidez del sistema, que establece las relaciones de rigidez interna entre los elementos que lo conforman, y D es el vector de desplazamientos nodales, que son las incógnitas a resolver.

A partir de las deformaciones, se pueden obtener valores asociados. En el caso de un análisis lineal, la tensión está relacionada con las deformaciones de la siguiente manera:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}$$

Donde:

$$\{\sigma\} = \text{vector tensión} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$$

$[D]$ = elasticidad o matriz de rigidez elástica o matriz de tensión-deformación.

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} = \text{vector de deformación elástica}$$

$$\{\varepsilon\} = \text{vector de deformación total} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T$$

$$\{\varepsilon^{th}\} = \text{vector de deformación térmica.}$$

Nota:

$\{\varepsilon^{el}\}$ son deformaciones que causan tensiones.

Las deformaciones por cizalladura (ε_{xy} , ε_{yz} y ε_{xz}) son las deformaciones a cortante ingenieriles, que son el doble de las deformaciones de corte del tensor. La notación ε , se utiliza comúnmente, para el tensor de deformaciones por corte, pero aquí es usado como la deformación ingenieril, para simplificar la salida.

El vector tensión, es mostrado en la (Fig. 133). El convenio de signos, para tensiones y deformaciones directas, usado por el programa Ansys, es positivo para tracciones y negativo para compresiones. Para cizalladura, es positivo cuando los dos ejes positivos aplicados, giran uno hacia el otro.

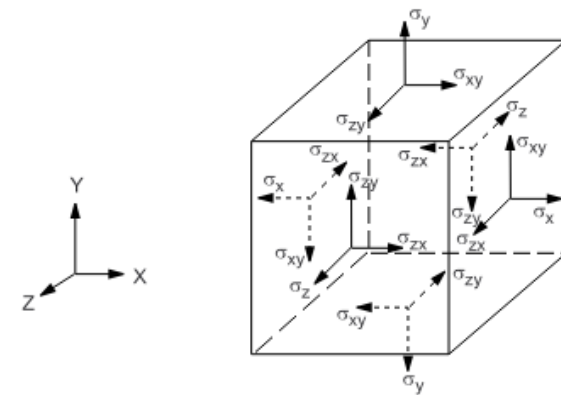
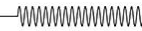


Fig. 133 Definición del vector Tensión



La ecuación, también puede ser invertida resultando:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1}\{\sigma\}$$

Para el caso en 3D, el vector de deformación térmica:

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T[\alpha_x^{se} \ \alpha_y^{se} \ \alpha_z^{se} \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Donde:

- α_x^{se} = coeficiente secante de expansión térmica en la dirección x
- $\Delta T = T - T_{ref}$
- T = temperatura actual en el punto en cuestión
- T_{ref} = temperatura de referencia (deformación libre)

La matriz de flexibilidad $[D]^{-1}$ es:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

Donde los términos típicos son:

- E_x = Módulo de Young en la dirección x
- ν_{xy} = Coeficiente de Poisson principal
- ν_{yx} = Coeficiente de Poisson menor
- G_{xy} = Módulo de elasticidad transversal en el plano xy

La diferencia entre ν_{xy} y ν_{yx} es descrita a continuación. También la matriz $[D]^{-1}$ es simétrica por lo tanto:



$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x} \quad \left| \quad \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{xz}}{E_x} \quad \left| \quad \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y} \right. \right.$$

Debido a las tres relaciones anteriores, ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz} , ν_{yx} , ν_{zy} , ν_{zx} , no son valores independientes y por lo tanto el usuario debe introducir los valores de ν_{xy} , ν_{yz} y ν_{xz} o ν_{yx} , ν_{zy} y ν_{zx} . El uso de coeficientes de Poisson para los materiales ortótropos, a veces causa confusión, por lo que se debe tener cuidado en su uso. Suponiendo que E_x es más grande que E_y , ν_{xy} es mayor que ν_{yx} . Por lo tanto, ν_{xy} se conoce comúnmente como "Coeficiente mayor de Poisson", porque es mayor que ν_{yx} , el cual se conoce comúnmente como "Coeficiente menor de Poisson". Para materiales isótropos ($E_x=E_y=E_z$ y $\nu_{xy}=\nu_{yz}=\nu_{xz}$), por lo que es indiferente que valores de entrada se usen.

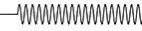
Escribiendo las seis ecuaciones:

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{xy} \sigma_y}{E_x} - \frac{\nu_{xz} \sigma_z}{E_x} \quad \left| \quad \varepsilon_y = \alpha_y \Delta T - \frac{\nu_{xy} \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \sigma_z}{E_y} \quad \left| \quad \varepsilon_z = \alpha_z \Delta T - \frac{\nu_{xz} \sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_{yz} \sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z} \right. \right.$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}} \quad \left| \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}} \quad \left| \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}} \right. \right.$$

Donde los términos típicos son:

- ε_x = deformación normal en la dirección x
- σ_x = tensión normal en la dirección x
- ε_{xy} = Deformación transversal por cortante en el plano x-y
- σ_{xy} = Tensión cortante transversal en el plano x-y



Alternativamente, se pueden obtener las seis ecuaciones explícitas siguientes:

$$\sigma_x = \frac{E_x}{h} \left(1 - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y}{h} \left(\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} \frac{E_z}{E_y} \right) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_y}{h} \left(1 - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T)$$

$$\sigma_z = \frac{E_z}{h} (\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}) (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + \frac{E_z}{h} \left(1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} \right) (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \varepsilon_{xy} \quad \left| \quad \sigma_{yz} = G_{yz} \varepsilon_{yz} \quad \left| \quad \sigma_{xz} = G_{xz} \varepsilon_{xz} \right. \right.$$

Donde:

$$h = 1 - (\nu_{xy})^2 \frac{E_y}{E_x} - (\nu_{yz})^2 \frac{E_z}{E_y} - (\nu_{xz})^2 \frac{E_z}{E_x} - 2\nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} \frac{E_z}{E_x}$$


Si no se introducen los valores del módulo de deformación transversal G_{xy} , G_{yz} y G_{xz} para materiales isotrópicos, se tomarán como:

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})}$$

Resolución de las matrices estructurales

El principio de los trabajos virtuales, establece que un (muy pequeño) cambio virtual de la energía de deformación interna debe ser compensado por un cambio idéntico en el trabajo externo debido a las cargas aplicadas o:

$$\delta U = \delta V$$



Donde:

- U = energía de deformación (trabajo interno) = $U_1 + U_2$
- V = trabajo externo = $V_1 + V_2 + V_3$
- δ = operador virtual

La energía de deformación virtual es:

$$\delta U = \int_{vol} \{\delta \varepsilon\} \{\sigma\} d(vol)^T$$

Donde:

- $\{\varepsilon\}$ = vector deformación
- $\{\sigma\}$ = vector tensión
- vol = volumen del elemento

Continuando la derivación considerando materiales lineales y su geometría, se obtiene:

$$\delta U_1 = \int_{vol} (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) d(vol)$$

Las deformaciones pueden estar relacionados con los desplazamientos nodales por:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\}$$

Donde:

- $[B]$ = matriz deformación-desplazamiento, basada en la función de forma del elemento
- $\{u\}$ = vector de desplazamiento nodal

Se supondrá que todos los efectos están en el sistema cartesiano global. Combinando las ecuaciones anteriores y observando que $\{u\}$ no varía sobre el volumen:



$$\delta U_1 = \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \{u\}$$

$$- \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} d(vol)$$

Otra forma de energía de deformación virtual es cuando una superficie se mueve contra una resistencia distribuida. Esto puede escribirse como:

$$\delta U_2 = \int_{area_f} \{\delta w_n\}^T \{\sigma\} d(area_f)$$

Donde:

- $\{W_n\}$ = movimiento normal a la superficie
- $\{\sigma\}$ = tensión (o presión) realizada por la superficie
- $Area_f$ = área de la resistencia distribuida

Ambos $\{W_n\}$ y $\{\sigma\}$, normalmente solo tendrán una componente, no nula.

El desplazamiento normal de puntos está relacionada con los desplazamientos nodales por:

$$\{w_n\} = [N_n] \{u\}$$

Donde:

- $[N_n]$ = matriz de las funciones de forma para los movimientos normales a la superficie. La tensión $\{\sigma\}$, es:

$$\{\sigma\} = k \{w_n\}$$

Donde:

- k = la rigidez en unidades de fuerza por unidad de longitud por unidad de área



Asumiendo que k es constante sobre el área, se obtiene:

$$\delta U_2 = \{\delta u\}^T k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n] d(area_f) \{u\}$$

Después, se considerará el trabajo virtual externo. Se van a estudiar primero los efectos de inercia:

$$\delta V_1 = - \int_{vol} \{\delta w\}^T \frac{\{F^a\}}{vol} d(vol)$$

Donde:

- $\{w\}$ = vector de desplazamiento de un punto cualquiera
- $\{F^a\}$ = vector de fuerza aceleración (D'Alembert)

De acuerdo con la segunda ley de Newton:

$$\frac{\{F^a\}}{vol} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{w\}$$

Donde:

- ρ = densidad
- t = tiempo

Los desplazamientos dentro del elemento están relacionados con los desplazamientos nodales por:

$$\{w\} = [N]\{u\}$$

Donde $[N]$ es la matriz de las funciones de forma. Combinando las ecuaciones anteriores y considerando que ρ es constante sobre el volumen:



$$\delta V_1 = \{\delta u\}^T \rho \int_{vol} [N]^T [N] d(vol) \frac{\delta^2}{\delta t^2} \{u\}$$

La formulación del vector de fuerza de presión empieza con:

$$\delta V_2 = \int_{area_p} \{\delta w_n\}^T \{P\} d(area_p)$$

Donde:

- $\{P\}$ = El vector de presión aplicada (normalmente contiene una sola componente no nula)
- $area_p$ = área sobre la que actúa la presión

Combinando las ecuaciones obtenemos:

$$\delta V_2 = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n] \{P\} d(area_p)$$

A menos que se indique lo contrario, las presiones se aplican a la superficie exterior, de cada elemento y son normales a las superficies curvas.

Las fuerzas nodales aplicadas al elemento, pueden definirse por:

$$\delta V_3 = \{\delta u\}^T \{F_e^{nd}\}$$

Donde:

- $\{F_e^{nd}\}$ = fuerzas nodales aplicadas al elemento

Finalmente, combinando las ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned} & \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \{u\} - \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} d(vol) + \{\delta u\}^T k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n] d(area_f) \{u\} \\ & = -\{\delta u\}^T \rho \int_{vol} [N]^T [N] d(vol) \frac{\delta^2}{\delta t^2} \{u\} + \{\delta u\}^T \int_{area_p} [N_n]^T \{P\} d(area_p) + \{\delta u\}^T \{F_e^{nd}\} \end{aligned}$$

Considerando que el vector $\{\delta u\}^T$ es un conjunto de desplazamientos virtuales arbitrarios común en todos los términos anteriores, la condición necesaria para satisfacer la ecuación anterior se reduce a:

$$([K_e] + [K_e^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = [M_e]\{\ddot{u}\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\}$$

Donde:

$$[K_e] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) = \text{matriz de rigidez del elemento}$$

$$[K_e^f] = k \int_{area_f} [N_n]^T [N_n] d(area_f) = \text{matriz de rigidez de un elemento de cimentación}$$

$$\{F_e^{th}\} = \int_{vol} [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} d(vol) = \text{vector de carga térmica del elemento}$$

$$[M_e] = \rho \int_{vol} [N]^T [N] d(vol) = \text{matriz de masa del elemento}$$

$$\{\ddot{u}\} = \frac{\delta^2}{\delta t^2} \{u\} = \text{vector aceleración (por ejemplo, la gravedad)}$$

$$\{F_e^{pr}\} = \int_{area_p} [N_n]^T \{P\} d(area_p) = \text{vector presión del elemento}$$

Esta ecuación, representa la ecuación de equilibrio, sobre una base de un elemento.

Las matrices y vectores de carga anteriores, fueron desarrollados como "constantes". Existen otras formulaciones.



Modelo FEM en Ansys

Para la realización del modelo, se ha utilizado el módulo Workbench de la versión 15 de Ansys.

El proceso de implementación en el software de análisis Ansys, está dividido en tres fases diferenciadas, pre-proceso, solver y post-procesado.

- *Pre-Proceso*. Esta fase, es la que determina el modelo a resolver. Se definen los materiales, se generan las geometrías, se elige el tipo de elemento finito a utilizar, se genera el mallado para discretizar el continuo y finalmente se aplican las condiciones de contorno y cargas.
- *Solver*. Se define el tipo de análisis a realizar y se resuelve el sistema de ecuaciones. Se obtienen los desplazamientos nodales.
- *Post-procesado*. Se obtienen, a partir de los resultados primarios (desplazamientos nodales), los resultados secundarios, como tensiones y desplazamientos relativos.

Etapas de análisis

En este apartado, se describe el procedimiento para la implementación del modelo en Ansys, de manera que el modelo FEM, se ajuste a la realidad del conjunto varilla-muelle. El proceso de análisis del modelo es altamente no lineal y por tanto con una gran complejidad de cálculo, ya que intervienen las siguientes no linealidades, a la vez:

- No linealidad del material
- No linealidad geométrica

A continuación, en la Fig. 134, se muestra la representación real del modelo, que se quiere implementar.

En la figura, a) representa el muelle completamente estirado, debido a la fuerza que ejerce la varilla, al intentar recuperar su forma horizontal. En este proceso, el muelle cambia de fase a martensita. En la figura b) se representa el muelle, que ha recuperado su estado austenítico al calentarlo.

Para la simulación de la evolución del conjunto, se va a modelar por separado la varilla y el muelle, debido a la alta no linealidad que presenta el conjunto, que hace que la convergencia numérica sea muy compleja. El proceso de cálculo, se divide en diferentes etapas:

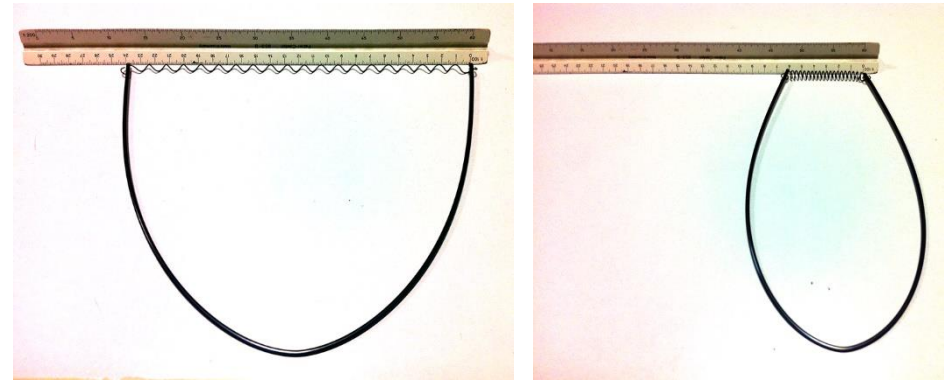


Fig. 134 Estados del actuador: a) frío y b) caliente

- **Etapa 1.** Se realiza el modelo de la varilla superelástica, alineada al eje horizontal, en el que se le aplica una deformación en los extremos de 215 mm hacia el sentido positivo del eje Y. De esta manera, se genera la deformación, hasta alcanzar la dimensión del muelle, en estado austenítico.
- **Etapa 2.** Se obtiene la fuerza que ejerce la varilla sobre el muelle, cuando ésta intenta recuperar su posición. Para ello se le aplica a la varilla curvada, un desplazamiento en el sentido negativo del eje X, de 100 mm y se contabiliza la evolución de la fuerza.
- **Etapa 3.** Se aplica la fuerza obtenida en el modelo anterior, al muelle.
- **Etapa 4.** Una vez alcanzado el equilibrio del sistema, con el muelle completamente elongado, se realiza el calentamiento del mismo, hasta la temperatura que hace reversible, el movimiento del muelle. En esta fase, el muelle recupera la forma que tenía, antes de conectar.
- **Etapa 5.** En esta última etapa, se enfría de nuevo el material. En este momento, el muelle se vuelve estirar, reiniciándose de nuevo el proceso desde la etapa 3.



Definición de los materiales

Ya hemos estudiado las características del material Nitinol. Por comodidad, definiremos el estado austenítico con la letra A y el martensítico con la letra S. En Ansys, se diferencian las dos formas de comportamiento del NiTi, en dos modelos diferentes de material:

- Superelasticidad, donde la transformación de fase está basada solamente en la tensión.
- Memoria de Forma. La forma original se recupera, tras un ciclo de térmico.

SMA Superelasticidad

El modelo asume los siguientes condicionantes:

- La transformación de fase, está basada solo en tensión.
- Tiene en cuenta la transformación de austenita a martensita (A→S) y de martensita a austenita (S→A)
- El módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y coeficiente de dilatación térmica son los mismos para las dos fases diferentes.

Desde una perspectiva macroscópica, los mecanismos de transformación implicados en el comportamiento superelástico son:

- De austenita a martensita (A → S)
- De martensita a austenita (S → A)
- Reorientación de la martensita (S → S)

En la (Fig. 135) se muestra la evolución del diagrama tensión deformación.

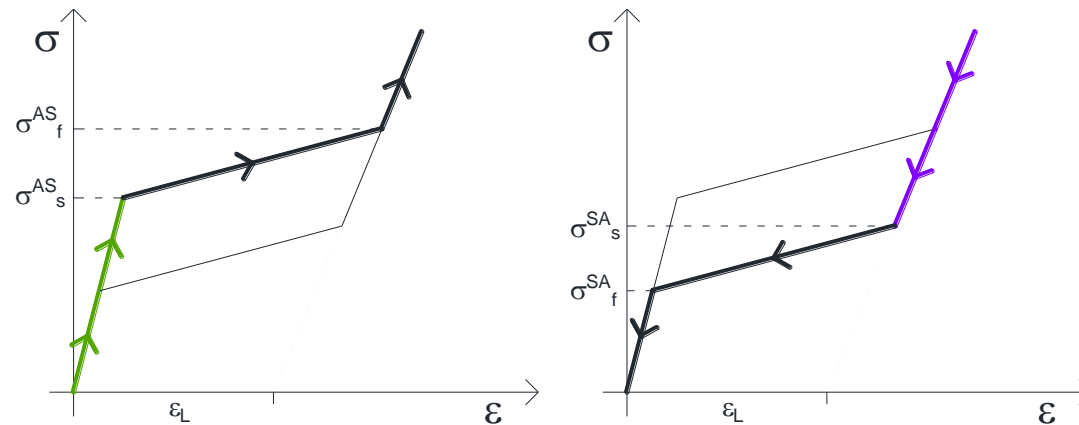


Fig. 135 Curva típica de Tensión-Deformación para una aleación superelástica

Durante la fase de carga, la primera rama (color verde) es 100% fase austenita y está definida por el módulo de elasticidad austenítico. La transformación se inicia en el valor de tensión σ_s^{AS} y termina en σ_f^{AS} que es 100% martensita. La última pendiente (color morado) es 100% martensita y está definida por el módulo de elasticidad martensítico.

Durante la fase de descarga la respuesta es similar. La transformación desde el 100% de martensita, se inicia en el punto σ_s^{SA} . La transformación a 100% austenita, se completa en el punto σ_f^{SA} .

Dos de las fases de transformación son consideradas aquí: $A \rightarrow S$ y $S \rightarrow A$. Se han introducido dos variables internas, la fracción de martensita (ξ_S) y la fracción de austenita (ξ_A). Una de ellas es un variable dependiente y deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$\xi_S + \xi_A = 1$$

La variable interna independiente elegida aquí es ξ_S

El comportamiento del material se considera isotrópico. La dependencia de presión del cambio de fase, es modelada introduciendo la función de carga Drucker-Prager siguiente:

$$F = q + 3\alpha p \quad \left| \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}} S:S \quad \left| \quad S = \sigma - p1 \quad \left| \quad p = \frac{1}{3} \sigma:1$$

Donde α es un parámetro del material, σ es la tensión y 1 es el tensor de identidad. La evolución de la fracción de martensita (ξ_S) es definida como sigue:

$$\dot{\xi}_S = \begin{cases} -H^{AS}(1 - \xi_S) \frac{\dot{F}}{F - R_f^{AS}} & \text{Transformación } A \rightarrow S \\ H^{AS} \xi \frac{\dot{F}}{F - R_f^{AS}} & \text{Transformación } S \rightarrow A \end{cases}$$



Donde:

$$R_f^{AS} = \sigma_f^{AS}(1 + \alpha) \quad \Bigg| \quad R_f^{SA} = \sigma_f^{SA}(1 + \alpha)$$

Donde σ_f^{AS} y σ_f^{SA} son parámetros de material, mostrados en la Fig. 135.

$$H^{AS} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_S^{AS} < F < R_f^{AS} \\ \dot{F} > 0 \\ \text{otro caso} \end{cases} \\ 0 & \end{cases} \quad \Bigg| \quad H^{SA} = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} R_S^{SA} < F < R_f^{SA} \\ \dot{F} < 0 \\ \text{otro caso} \end{cases} \\ 0 & \end{cases} \quad \Bigg| \quad R_S^{AS} = \sigma_S^{AS}(1 + \alpha)$$

El parámetro del material α , caracteriza la respuesta del material, en tensión y compresión. Si el comportamiento en tensión y compresión es el mismo, entonces $\alpha=0$. Para una prueba de tensión-compresión, α puede relacionarse con el valor inicial de la transformación de fase, de austenita a martensita, en tensión y compresión (σ_c^{AS} y σ_t^{AS} respectivamente) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\sigma_c^{AS} - \sigma_t^{AS}}{\sigma_c^{AS} + \sigma_t^{AS}}$$

La relación tensión-deformación es:

$$\sigma = D: (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \quad \Bigg| \quad \dot{\varepsilon}_{tr} = \dot{\xi} \bar{\varepsilon}_L \frac{\partial F}{\partial \sigma}$$

Donde D es el tensor de rigidez, ε_{tr} es el tensor de deformación de transformación, y $\bar{\varepsilon}_L$ es el parámetro del material. El parámetro ε_L describe la máxima cantidad de deformación.

Para la memoria de forma, el valor de máxima deformación de transformación, define el punto donde ocurre el cambio de fase.

En Ansys Workbench, se definen los materiales, en el módulo Engineering Data. A continuación, se indican los parámetros introducidos, para realizar el modelo del material superelástico:

Para la superelasticidad, el parámetro α tiene en cuenta el efecto de la compresión en la transformación. Produce diferente respuesta en tracción y en compresión. Como se ha dicho, si el comportamiento en tracción y en compresión es igual, entonces $\alpha=0$. Para el Nitinol, el valor utilizado normalmente oscila entre 0 y 0,1.

A continuación, se representa gráficamente, la curva tensión-deformación, asociada a esos parámetros:

SMA propiedad de Memoria de Forma

El efecto de memoria de forma, está basado en un modelo termomecánico 3D, para modelos que han sufrido modificación de fase por tensión.

En la Fig. 137, vemos relacionadas la tensión, la deformación y la temperatura, referidas a una aleación con memoria de forma.

Dentro del marco de la termodinámica clásica irreversible, el modelo es capaz de reproducir, todas las características primarias relativas a los materiales de memoria de forma, en un estado 3D de tensión. El potencial de energía libre:

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

MATERIAL SUPERELÁSTICO		
	Valor	Unidades
Módulo elasticidad	70000	MPa
Sigma SAS	250	MPa
Sigma FAS	510	MPa
Sigma SSA	249	MPa
Sigma FSA	50	MPa
Epsilon	0.026905	mm/mm
Alpha	0	

Tabla 14 Características material superelástico

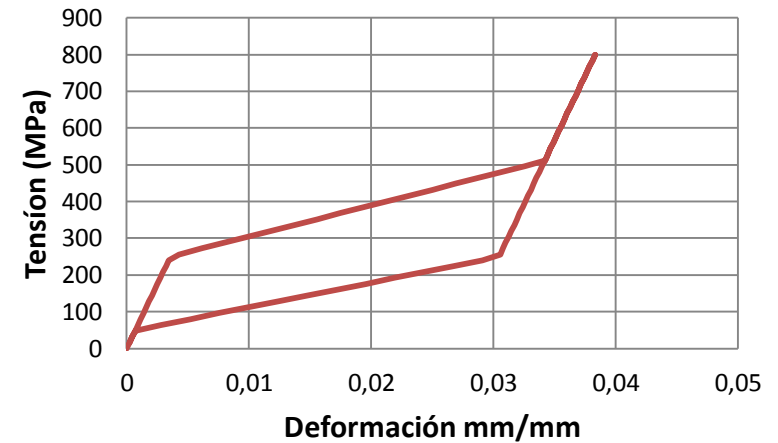


Fig. 136 Diagrama Tensión-Deformación del material superelástico en el modelo



Donde:

D = Tensor de rigidez del material elástico

ϵ = Deformación total

ϵ_{tr} = Deformación total de transformación

ϵ'_{tr} = Deformación de desviación de transformación

$\tau_M(T)$ = Función positiva y monótona creciente de temperatura como $[\beta(T-T_0)]^+$ en la cual $[-]^+$ es la parte positiva del argumento (también conocida como tensión de Maxwell)

β = Parámetro del material

T = Temperatura

T_0 = Temperatura por debajo de la cual no se observa austenita en el estado de tensión libre.

h = Parámetro del material relacionado con la dureza del material durante la transformación de fase.

$I_{\epsilon_{tr}}(\epsilon_{tr})$ = función indicadora introducida para satisfacer la restricción en la transformación, en la cual:

$$I_{\epsilon_{tr}}(\epsilon_{tr}) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \|\epsilon'_{tr}\| \leq \bar{\epsilon}_L \\ +\infty & \text{resto de los casos} \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon} \quad \left| \quad X_{tr} \in -\frac{\partial \Psi}{\partial \epsilon'_{tr}}$$

Donde X_{tr} es definido como la tensión de transformación. Tensión, deformación y deformación por transformación están relacionadas como sigue:

$$\sigma = D: (\epsilon - \epsilon_{tr})$$

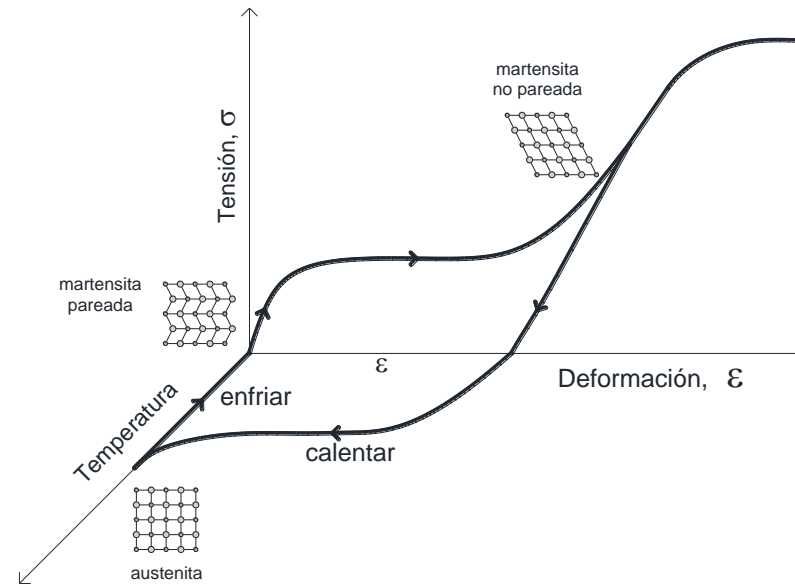


Fig. 137 Diagrama Tensión-Deformación-Temperatura para una aleación con Memoria de Forma

Separando la tensión en componentes desviadoras y volumétricas, obtenemos:

$$S = \sigma - p1 \quad \left| \quad p = \frac{1}{3} \sigma : 1 \right.$$

Donde S , es la tensión de desviación y p es la tensión volumétrica (también llamada presión hidrostática).

La tensión de transformación, se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$X_{tr} = S - [\tau_M(T) + h \|\varepsilon_{tr}\| + \gamma] \frac{\varepsilon'_{tr}}{\|\varepsilon'_{tr}\|}$$

Donde γ es definida como:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & 0 \leq \|\varepsilon'_{tr}\| < \bar{\varepsilon}_L \\ \geq & \|\varepsilon'_{tr}\| = \bar{\varepsilon}_L \end{cases}$$

Donde $\bar{\varepsilon}_L$ es la máxima deformación de transformación.

Numerosas pruebas experimentales, muestran un comportamiento asimétrico de los materiales con memoria de forma (SMA) en tensión y compresión y sugieren, que las SMA se describen como un material isotrópico, con una superficie límite de tipo Lode Prager. En consecuencia, la siguiente función es tomada como:

$$F(X_{tr}) = \sqrt{2J_2} + m \frac{J_3}{J_2} - R$$

Donde X_{tr} es la tensión de transformación, J_2 y J_3 son definidos como sigue:

$$J_2 = \frac{1}{2} (X_{tr}^2 : 1) \quad \left| \quad J_3 = \frac{1}{3} (X_{tr}^3 : 1) \right.$$



La evolución de la deformación de transformación, es definida como:

$$\dot{\varepsilon}_{tr} = \dot{\xi} \bar{\varepsilon}_L \frac{\partial F}{\partial \sigma}$$

Donde ξ , una variable interna, llamada multiplicador de deformación de transformación y $F(X_{tr})$, deben satisfacer las condiciones clásicas de Kuhn-Tucker:

$$\begin{aligned} \xi &\geq 0 \\ \xi F(X_{tr}) &= 0 \end{aligned}$$

Lo que reduce el problema, a una cuestión de optimización. Las propiedades elásticas de la fase austenítica y martensítica difieren. Durante la fase de transformación, el tensor elástico de rigidez del material, varía con la deformación. El tensor de rigidez elástica L se asume que debe ser una función de deformación de transformación ε_{tr} definida como:

$$D = \frac{\|\varepsilon'_{tr}\|}{\bar{\varepsilon}_L} (D_S - D_A) + D_A$$

Donde D_A es el tensor de rigidez elástica de la fase austenítica y D_S es el tensor de rigidez elástica de la fase martensítica. El módulo de Poisson de la fase austenítica, se asume que es el mismo que el de la fase martensítica. Cuando el material está en su fase austenítica, $D=D_A$, y cuando el material ha realizado la transformación completa (fase martensítica), $D=D_S$.

La (Fig. 138) ilustra algunas características del modelo mecánico. La fase austenítica, está asociada con la región horizontal ABCD. La mezcla de fases, está relacionada con la superficie CDEF. La fase martensítica, está representada por la región horizontal EFGH. El punto C, corresponde con la nucleación de la fase martensítica. La transformación de fase, tiene lugar sólo a lo largo de la línea CF, donde:

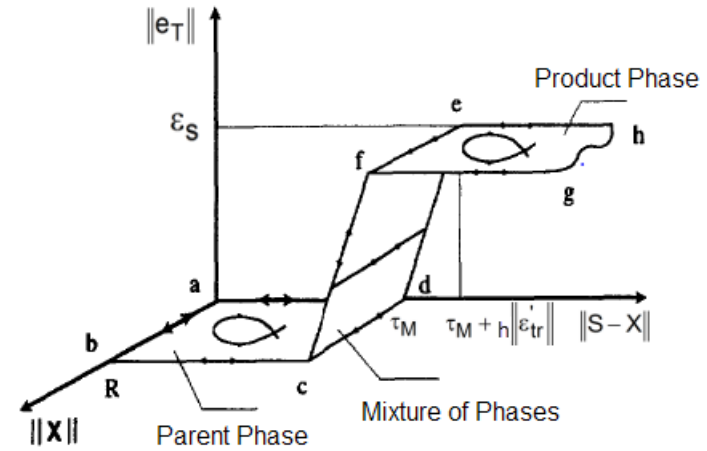


Fig. 138 Caminos admisibles de comportamiento elástico y transformación de fase

$$\|X_{tr}\| + \frac{2mJ_3}{\|X_{tr}\|^2} = R$$

MATERIAL MEMORIA DE FORMA

	Valor	Unidades
Módulo elasticidad	81000	MPa
Parámetro de endurecimiento	500	MPa
Temperatura de referencia	45	°C
Límite elástico	120	MPa
Parámetro escalado de temp.	8,3	MPa/°C
Módulo martensita	70000	MPa
Parámetro dependencia de veta	0	

Tabla 15 Propiedades material con memoria de forma

La transformación de fase saturada, está representada por caminos en la línea FG. La región horizontal EFGH, contiene procesos elásticos excepto, por supuesto, aquellos de la línea FG.

El sistema anterior de integración de Euler, es usado para resolver la actualización de la tensión y la matriz tangencial de rigidez, requerida por la solución de elementos finitos, para obtener una solución no lineal, robusta. Debido a que la matriz tangencial de rigidez es generalmente asimétrica, debe usarse la opción asimétrica de Newton-Raphson, para evitar problemas de convergencia.

En Ansys Workbench, se define el material con memoria de forma, en el módulo Engineering Data. En la Tabla 15 se indican los parámetros introducidos:

Tal y como se ha indicado, en párrafos anteriores, Ansys modela por separado los dos efectos: el superelástico y el de memoria de forma, del Nitinol. En el modelo analizado, el efecto superelástico se le asigna a la varilla, y el efecto de memoria de forma, al muelle.

Con estos parámetros, el material presenta el comportamiento mostrado en los gráficos siguientes:

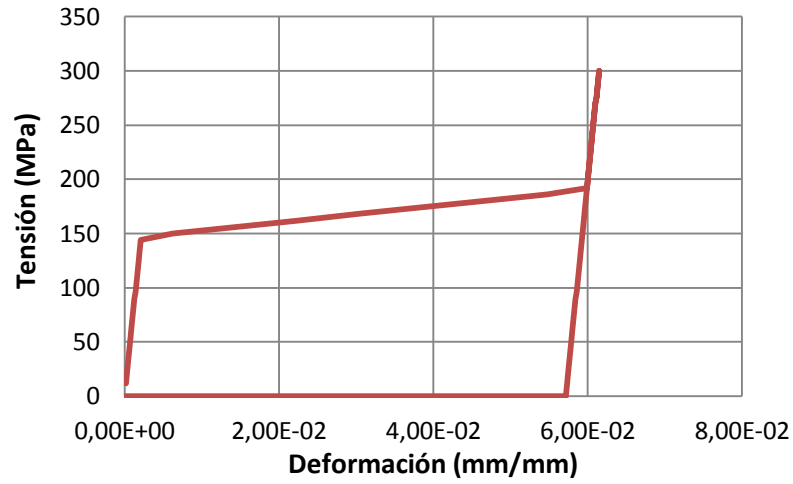


Fig. 140 Tensión-Deformación para un ciclo de carga-descarga

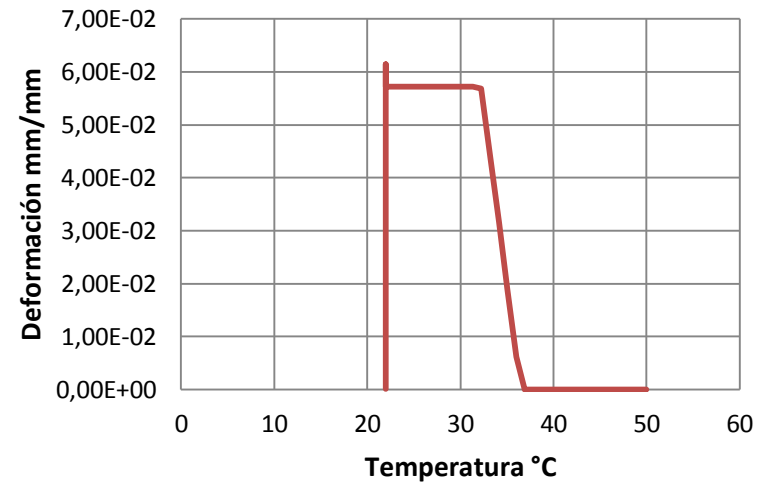


Fig. 142 Deformación-Temp. bajo un estado de tensión=0

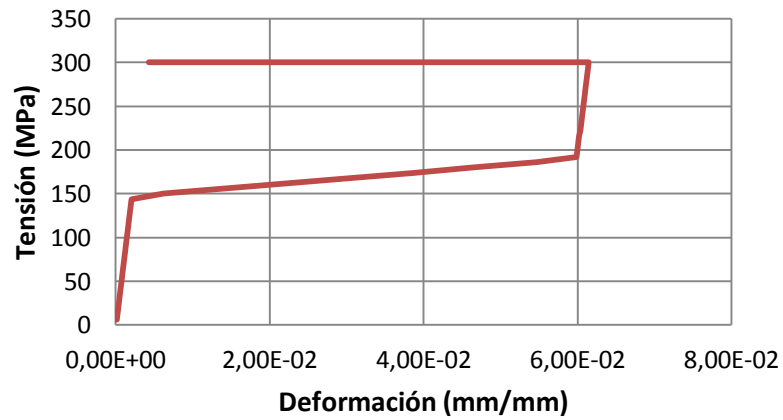


Fig. 141 Recuperación deform. bajo un estado de tensión=300 MPa

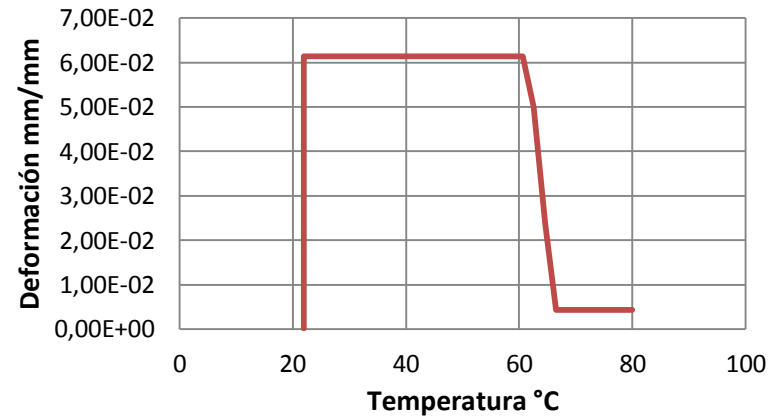


Fig. 139 Deformación-Temp. bajo un estado de tensión=300 MPa

Generación de la geometría.

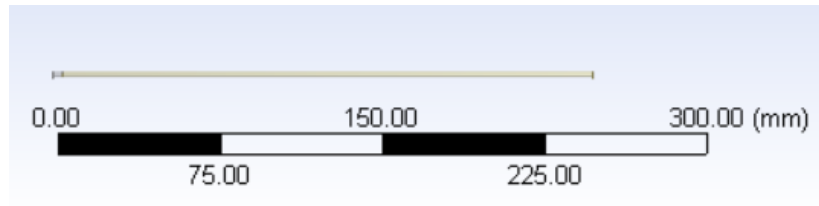


Fig. 143 Modelo para la varilla superelástica

Para simplificar el modelo, se utilizará la condición de simetría, por tanto se genera la mitad del conjunto. La unidad de longitud utilizada es el mm.

Se genera la geometría, en el módulo Design Modeler de Ansys. El origen de coordenadas, se situara en el plano de simetría, colocando las piezas centradas en este sistema de referencia.

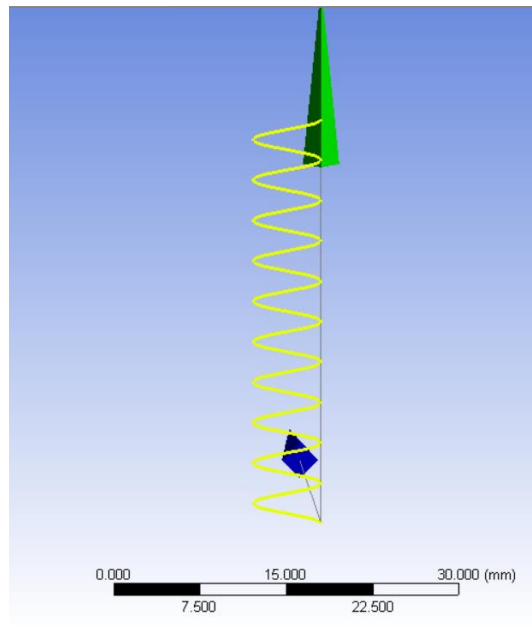


Fig. 144 Modelo de hélice SMA

En primer lugar, se genera el volumen que representa la varilla, obteniéndose un cilindro de 500 mm de longitud, mediante el extruido de un círculo, de diámetro 2,71 mm. Posteriormente, se aplica la simetría para quedarnos con un cilindro de 250 mm de longitud.

Para la obtención del muelle, se realiza una operación de barrido, de tipo hélice (sweep) de un punto, a lo largo de un camino (path). El punto se genera en un sketch, con coordenadas 2,96,0,0. El path, se genera en otro sketch mediante una línea de dos puntos con coordenadas 0,0,0 y 0,35,0

Se genera la operación sweep, definiendo:

- Profile> el sketch del punto.
- Path> el sketch de la línea
- Aligment> Path Tangent
- Twist Specifications> Turns
- Turns> 10

Al ejecutar esta operación, se crea un elemento lineal (line bodie) al que hay que asignar, una sección transversal. Se define una cross section, de tipo circular y radio 0.375 mm. En el muelle, también se aplica la condición de simetría, tomando 10 de las 20 vueltas del mismo.



Esa sección transversal se le asigna al line bodie. Una vez generada la geometría se pasa al siguiente proceso. Se cierra el Design Modeler y se abre el módulo Mechanical.

Generación del modelo.

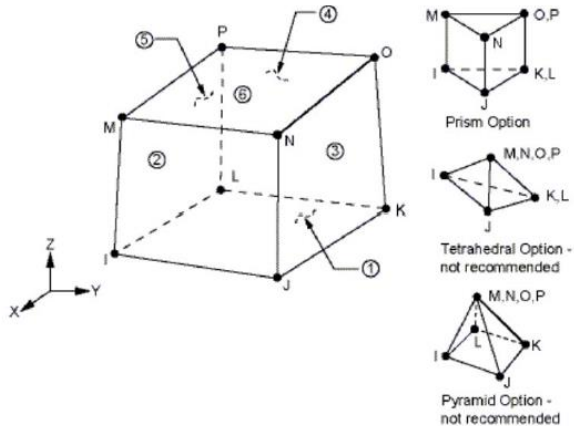


Fig. 145 Representación gráfica del elemento SOLID185

En primer lugar, se asigna a cada cuerpo, el material definido en apartados anteriores. Al sólido de la varilla, el material superelástico y al muelle el material con memoria de forma. A continuación, se realiza la discretización de las geometrías en modelos de elementos finitos.

Para el desarrollo del modelo, se han utilizado los siguientes elementos:

- Para la varilla superelástica, se han utilizado elementos tridimensionales SOLID185. En Ansys, no se pueden utilizar elementos beam, para definir componentes con la condición de material superelástico.
- Para el muelle, se han utilizado elementos lineales tipo barra BEAM188, ya que en Ansys sí se pueden definir materiales con memoria de forma, con este tipo de elementos.

El elemento SOLID185, es un elemento tridimensional, definido por 8 nodos, con tres grados de libertad en cada nodo. Traslación en los ejes x,y,z

El elemento BEAM188, es un elemento tipo barra, definido por 2 nodos, con 6 grados de libertad por nodo. Traslación en los ejes x,y,z y rotación según esos ejes. Está basado en la Teoría de barras de Timoshenko.

Condiciones de contorno.

Partimos con la varilla en posición horizontal y recta. Se le aplica un desplazamiento al extremo, en un punto, de 215 mm. En el sentido positivo del eje Y. Esta posición de movimiento final, corresponde con la posición de conexión muelle-varilla.

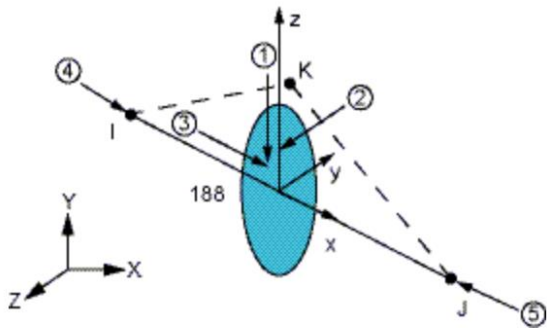


Fig. 146 Representación gráfica del elemento BEAM188

Al analizar este modelo, obtenemos la fuerza que genera la varilla sobre el muelle, al intentar recuperar ésta su posición estirada.

Se obtiene una curva de ajuste, del diagrama fuerza-desplazamiento:

$$y = 0.0002x^2 - 0.0444x + 7.4421$$

Con un parámetro de correlación $R^2=0.995$

Este valor de carga, es el que se introduce en el modelo del muelle con memoria de forma.

En la Fig. 147, se representa la relación fuerza desplazamiento en el instante del contacto varilla muelle.

En el modelo real, el desplazamiento que se produce con el muelle conectado, está próximo a una longitud del muelle estirado de 24 cm. Considerando el modelo simétrico, corresponde con un elongamiento del muelle de $(24 - 7)/2=8.5$ cm. Si analizamos la grafica anterior, corresponde con una fuerza, en ese punto, de 5 N.

En el modelo del muelle, se intruducirá una carga de 5N, que representa la carga que tiene éste en la situación estacionaria, esto es, totalmente elongado.

Se aplica una temperatura variable en el modelo, que oscila entre los 22 °C, considerando esta como temperatura ambiente, a los 150°C.

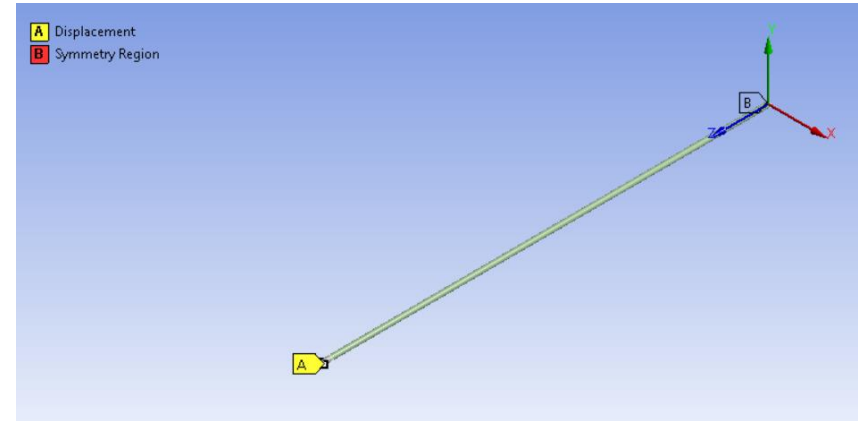


Fig. 147 Condiciones de contorno varilla superelástica

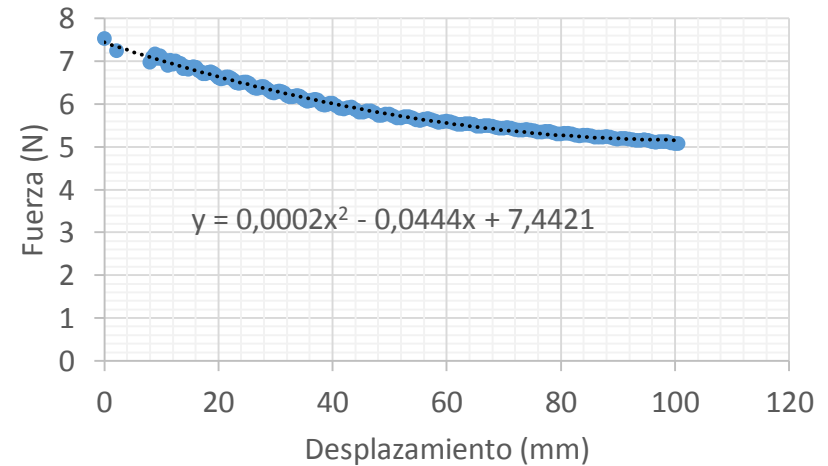


Fig. 148 Fuerza-Desplazamiento en momento de conexión varilla-muelle



En la (Fig. 149), se muestra la evolución en el tiempo, del esquema de cargas planteado.

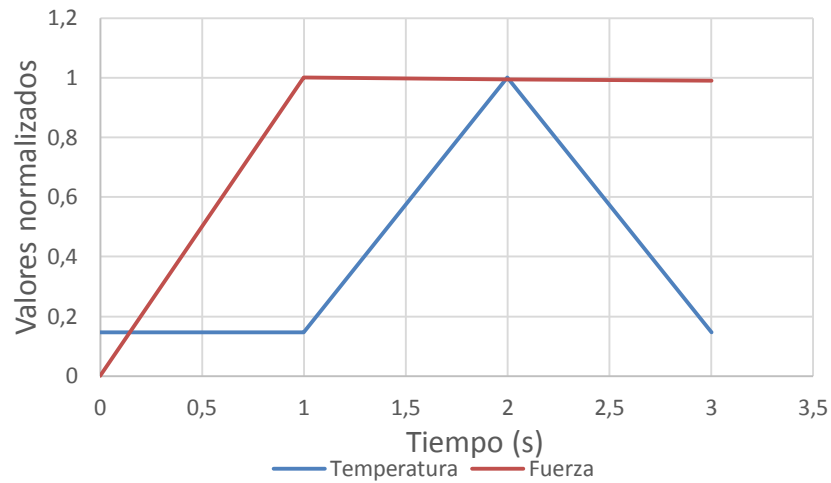


Fig. 149 Evolución del estado de cargas aplicado al muelle

El modelo analizado, es un modelo transitorio en el tiempo, que no tiene en cuenta la integración del tiempo, por lo que los efectos dinámicos inerciales no se tienen en cuenta.

Resultados obtenidos.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en el modelo.

Resultados Varilla.

Se obtiene el diagrama fuerza-desplazamiento en la siguiente gráfica. Ésta representa, el ciclo de carga, hasta conectar con el muelle y el ciclo de descarga donde la varilla intenta recuperar la posición inicial.

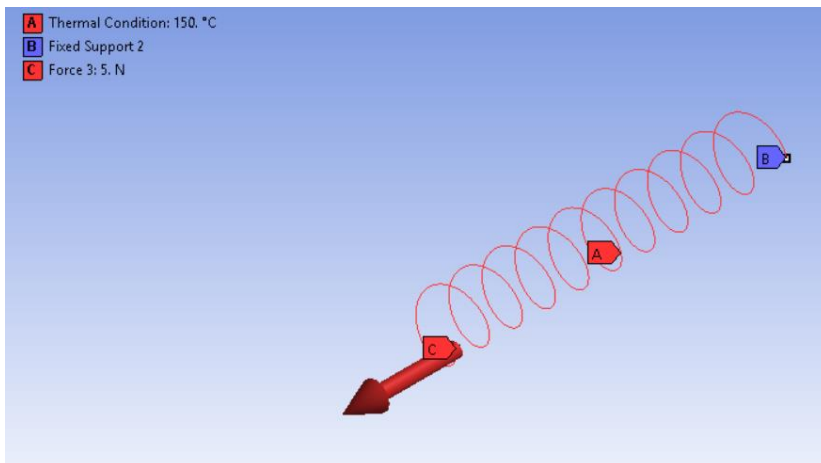


Fig. 150 Condiciones de contorno muelle SMA

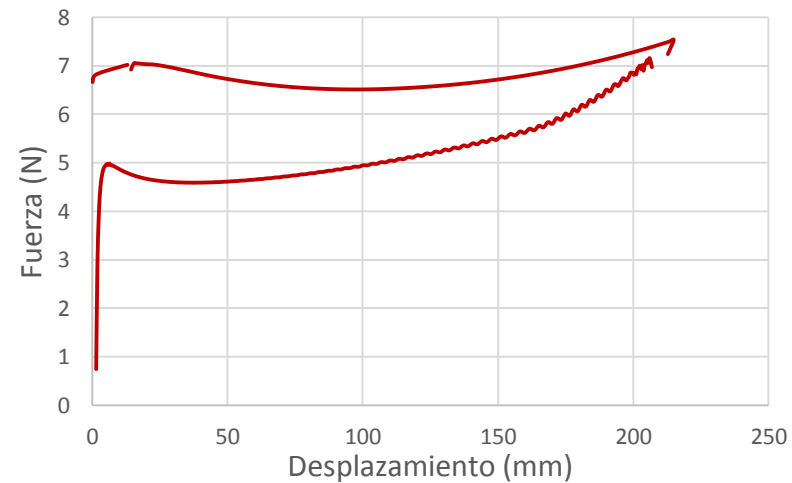


Fig. 151 Ciclo de carga-descarga en la varilla superelástica



Se analiza la evolución de la tensión máxima, en el ciclo carga-descarga de la varilla. Esta se produce en la parte central de la varilla, bajo la situación de máximo desplazamiento de la misma, tal y como se representa la figura.

Analizando qué ocurre con las tensiones máximas principales durante el proceso de carga-descarga, se observa que las tensiones evolucionan de forma diferente, ya que la varilla pasa por fases diferentes.

No en toda la varilla se produce el cambio de fase. Solo en aquellas que han alcanzado el valor de 250 MPa, punto de inicio de la transformación. En la varilla, las zonas que alcanzan ese límite son aquellas más traccionadas, como se muestra en la figura siguiente.

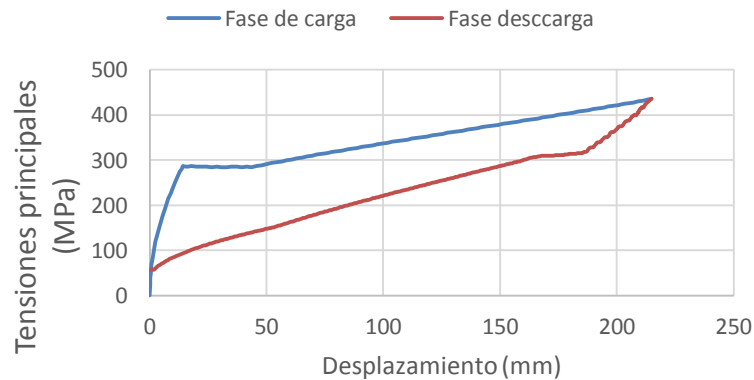


Fig. 155 Evolución de las tensiones en la varilla, durante la fase de carga-descarga

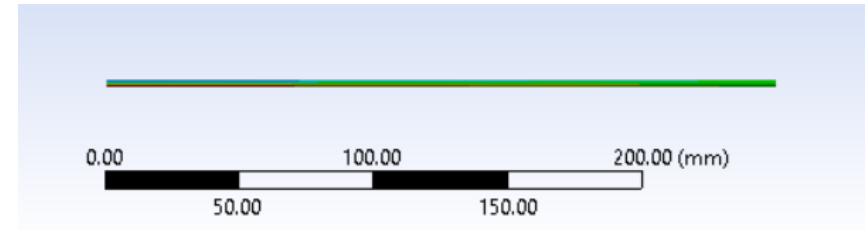


Fig. 152 Desplazamiento en el instante inicial

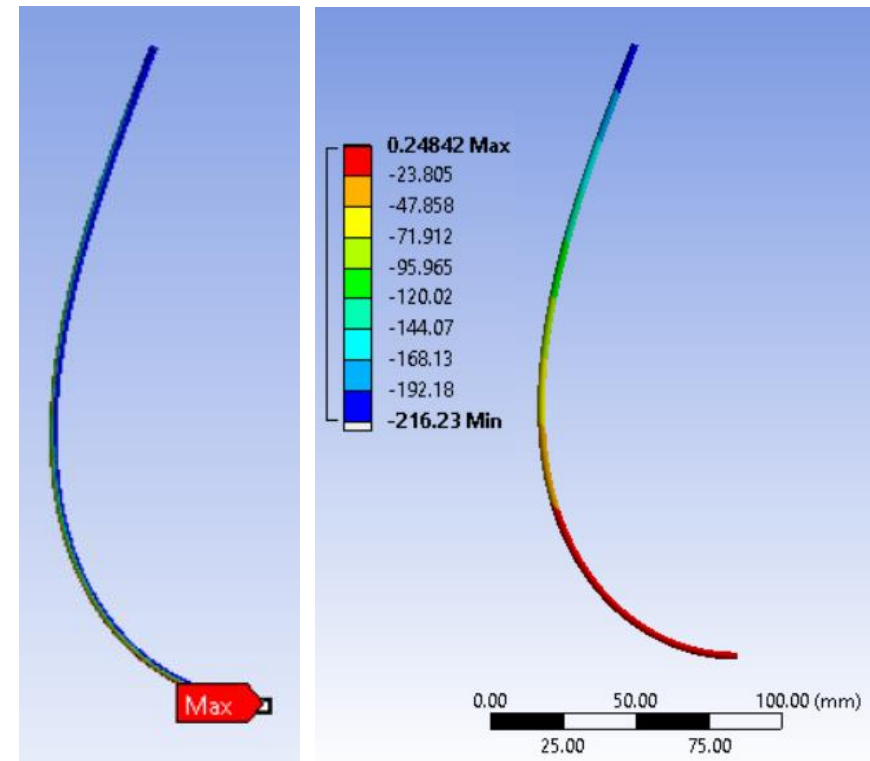


Fig. 153 Tensión máx. bajo desplazamiento máximo

Fig. 154 Desplazamiento en el instante final

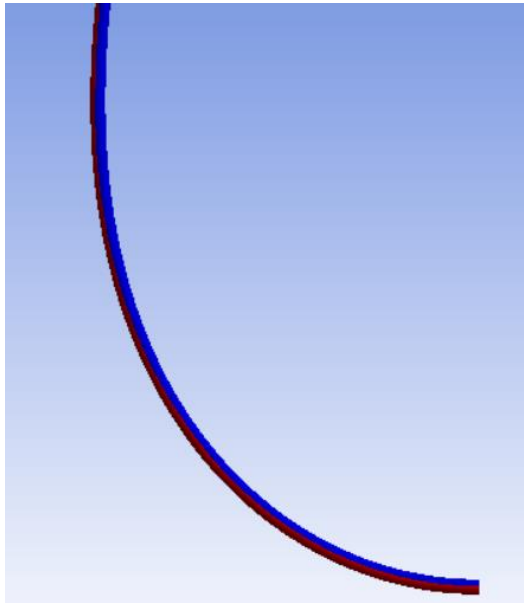


Fig. 156 Zonas sin variación de fase (azul) y zonas con cambio de fase de austenita a martensita (rojo)

Resultados en el muelle

Se obtiene el gráfico de deformación del muelle, bajo carga mantenida.

Bajo el estado de cargas de 5N, se alcanza el equilibrio del sistema cuando el muelle ha alcanzado una deformación máxima de la punta de 75,05 mm. Teniendo en cuenta que la longitud del muelle son 35 mm y que el sistema es simétrico, la longitud del muelle total pasará de los 70 mm iniciales a los 220,1 mm finales.

El cambio de fase en el material, de austenita a martensita, se produce cuando la tensión del muelle es de 140 MPa. Este estado tensional, se alcanza en el instante 0,47 s. En ese momento, la fuerza actuante en el muelle, es de 2,35 N.

Al aplicar la temperatura, el material recupera la forma, quedando una componente elástica de 8,8 mm. de deformación. La temperatura que produce el cambio de fase S→A se produce a 50°C tal y como se ve en la Fig. 161.

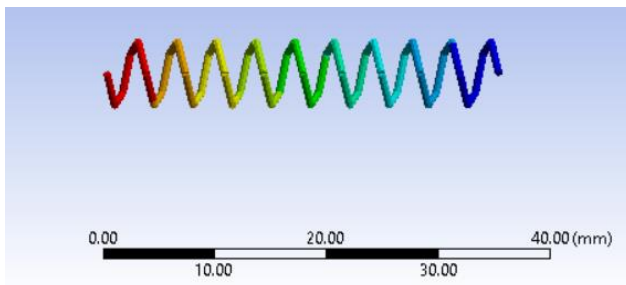


Fig. 157 Deformación del muelle sin carga

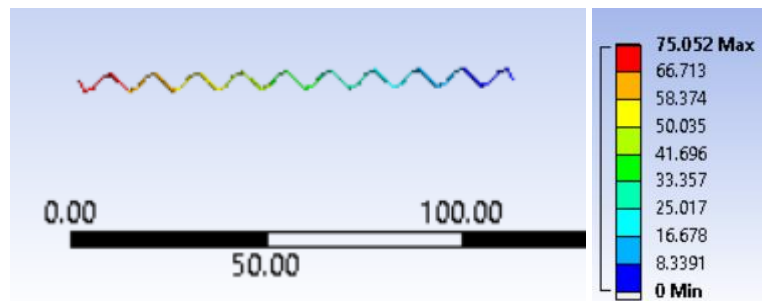


Fig. 158 Muelle deformado bajo carga de 5N

Manteniendo la fuerza de 5 N, el material se enfría. De nuevo, se produce el inicio del cambio de fase de A→S cuando el material alcanza la temperatura de 37° C. A partir de ese momento, se inicia otra vez, el alargamiento del muelle hasta alcanzar los 75 mm.

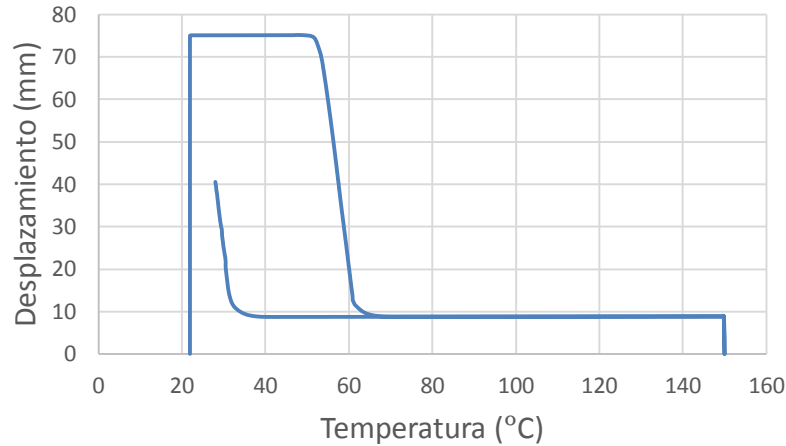


Fig. 161 Diagrama Desplazamiento-Temperatura

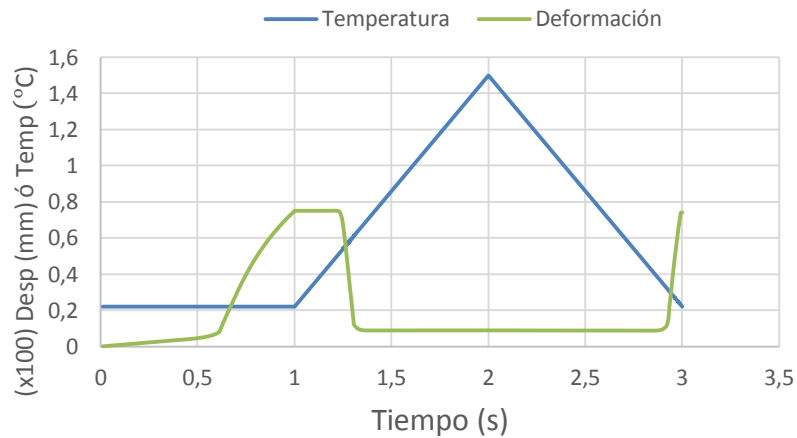


Fig. 159 Diagrama de evolución en el tiempo de la temperatura (azul) y la deformación del muelle en el tiempo (verde)

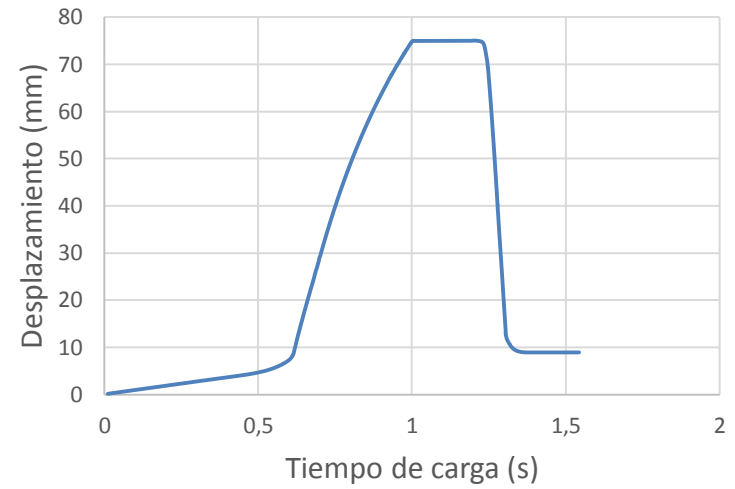


Fig. 162 Diagrama de evolución del desplazamiento

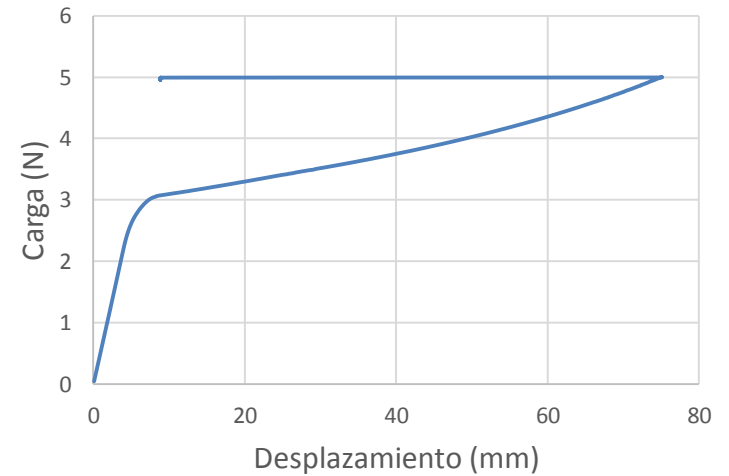


Fig. 160 Diagrama Carga-Desplazamiento



3.4 APLICACIONES

Las siguientes aplicaciones han sido estudiadas durante el tiempo de investigación de esta Tesis y siguen en continuo desarrollo. Como hemos visto, las SMA se utilizan para diversos fines. En el caso de aplicación en Arquitectura, parece evidente la necesidad de aprovechar la propiedad de estas aleaciones de cambiar de forma en función de la temperatura. Esa temperatura, podemos fijarla como el valor límite por encima del cual tenemos sensación de calor.

Además, con esta tecnología, no necesitamos de elementos extra, como en otros sistemas. El propio material actúa como elemento sensible a la temperatura, como un termostato, un dispositivo que activa un sistema, al pasar de un valor de calor. Por lo tanto, no se requiere instalar este elemento auxiliar, presente en los sistemas actuales, que complica la instalación al aumentar el número de elementos y partes de la misma.

También debemos aprovechar la otra excelente cualidad de las SMA, la superelasticidad. Con ella podemos tener dispositivos con alta flexibilidad y recuperación elástica, sin fatiga y sin ruidos ya que todo el “mecanismo” (que no es tal) sucede o funciona a nivel atómico.

Esta investigación se centra, sobre todo, en aprovechar las cualidades comentadas, en el desarrollo de sistemas o en la implementación de sistemas actuales, actuados por materiales con memoria de forma y superelasticidad. Especialmente aplicados e elementos textiles que se mueven según se necesite, para dar sombra a nuestras calles, plazas, espacios públicos y edificios.

Como sabemos, estas aleaciones deben superar su temperatura de transformación para activarse. Ya hemos comentado que esto puede hacerse de varias maneras. Se verá cómo funcionan principalmente en modo “activo”, o sea, cuando es activado por el usuario manualmente o a través de un software específico. Esta manera de controlar el sistema es válida y proporciona el dominio del mismo al usuario que puede activarlo o desactivarlo cuando quiera o cuando se necesite.

Pero el objetivo es también conseguir que esta tecnología funcione en modo “pasivo”. Así, los usuarios no deben preocuparse del sistema sino que es el sistema el que se preocupa de ellos. De esta manera, cuando la Arquitectura esté deshabitada, ésta cuidará del espacio para mantenerlo en condiciones de confort térmico, para que cuando lleguemos, encontremos nuestra vivienda o edificio a la temperatura ideal.

Veamos algunas de estas aplicaciones:

3.4.1 TOLDO DE VENTANA

Estos elementos de protección solar para ventanas, proporcionan sombra a las mismas. Es habitual que en la envolvente de los edificios, los puntos débiles en cuanto a ganancias o pérdidas de calor sean los huecos por mal diseño o por mala elección de vidrios y carpinterías.

Habitualmente son estáticos y permanecen puestos de noche o cuando no hay sol. Con la simple instalación de un actuador de Nitinol, se moverá para ponerse o quitarse cuando sea necesario.

Para este caso, es idóneo el actuador objeto de la anteriormente citada patente. Bastará con instalarlo en el toldo existente para actuar sobre él. Este tipo de protectores solares, suelen estar formados por un elemento rígido al que se fija el textil.

Si conseguimos moverlo, desplazaremos toda la tela desde la posición ON hasta la posición OFF. Como suelen ser ligeros, no es problema para el actuador. Además, el peso propio del toldo descansa sobre los puntos de anclaje de la estructura al paramento. Estos puntos son articulaciones que se llevan la carga vertical. El actuador solo debe hacer fuerza horizontalmente. Además, si se equilibra el mecanismo, esta fuerza es mínima.

En la Fig. 164, se puede ver el funcionamiento en detalle del actuador. Se muestra una barra que sería la estructura

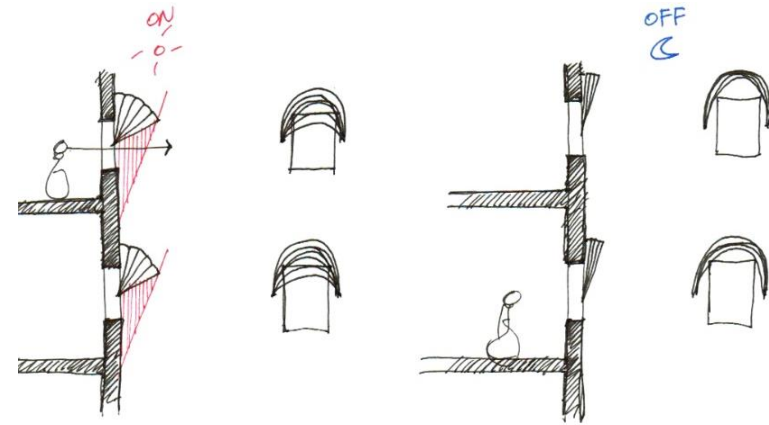


Fig. 163. Toldos de ventana en edificio (sección). Toldos desplegados por el calor del día (izquierda) y plegados con el frío de la noche

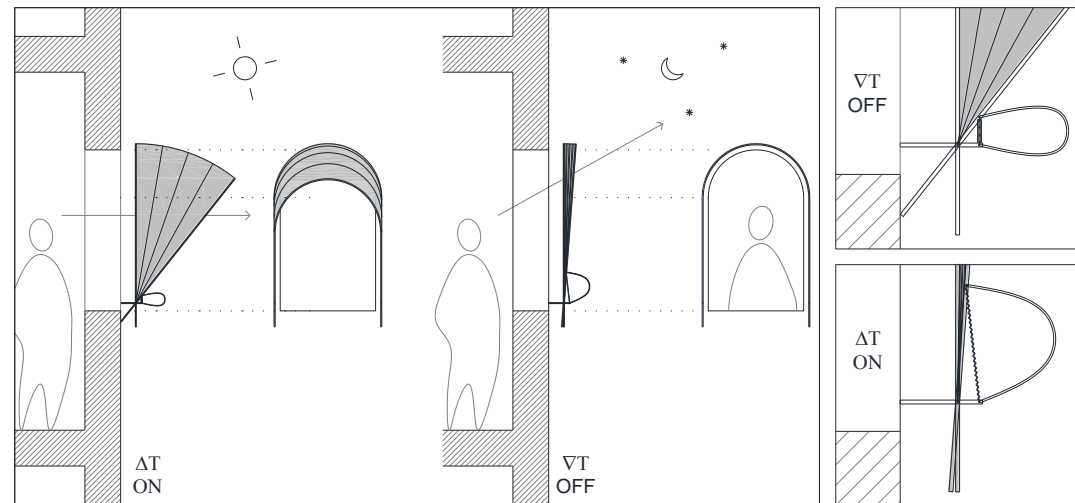


Fig. 164. Esquema de toldo de ventana con actuador basado en SMA



que sustenta el textil (no representado). La barra inicialmente está posición vertical. Como está articulada en un punto, puede girar y el propio paramento hace de tope, para limitar el movimiento de ida, mientras que una pequeña cuña, junto a la articulación, hace lo mismo en el movimiento de vuelta.

PROTOTIPO

Se ha construido un prototipo, a escala real, de este dispositivo, el cual se pasa a describir a continuación:

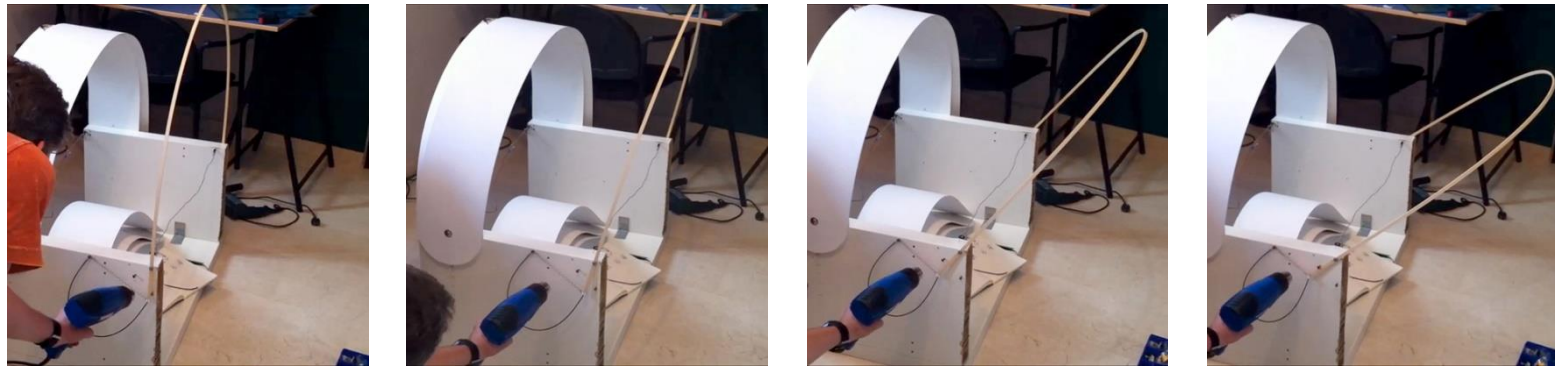


Fig. 166. Secuencia de activación con pistola térmica de toldo ventana. Solo estructura principal (sin cobertura)

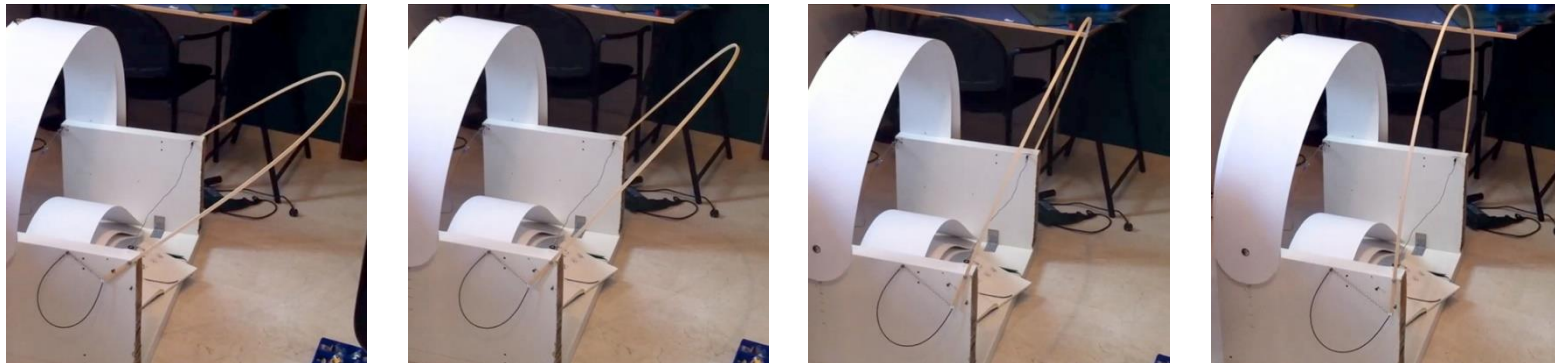


Fig. 165. Secuencia de desactivación de toldo ventana. Solo estructura principal (sin cobertura)

Este toldo de ventana, se ha dimensionado para un hueco libre de fachada o ventana común, de 72cm de ancho. Se ha hecho una primera prueba, solamente con un arco formado por un listón de madera, de pino curvado y articulado en sus extremos, en dos apoyos fijados al soporte, que en este caso ha sido un cajón de madera, fabricado a tal efecto. Sobre esta pequeña prueba, se ha comprobado que el actuador funciona inclinando el arco cuando se activa y devolviéndolo a su posición inicial cuando se desactiva (Callejas & Calero, 2014).

PROTOTIPO CON LAMAS ANCHAS

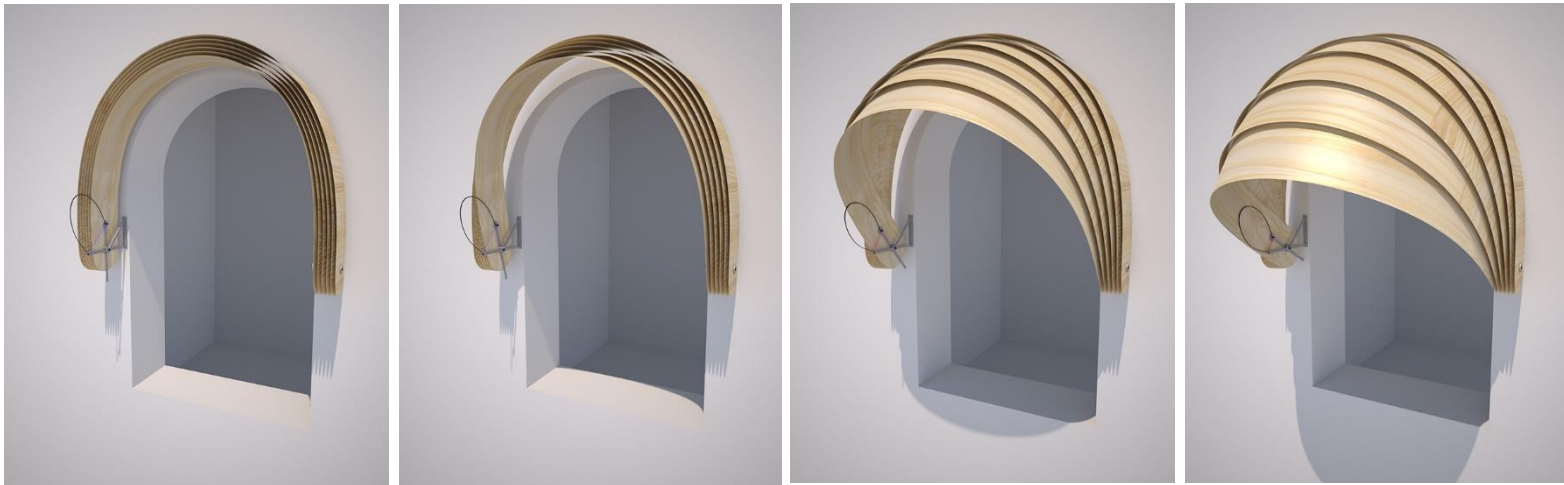


Fig. 167. Representación virtual de toldo de ventana con lamas anchas

El prototipo se ha fabricado inicialmente, con 6 lamas, cuya longitud varía 5cm, entre cada una de ellas. Estas lamas se curvan en forma de arco y también se articulan, en ambos extremos.

Finalmente, se ha comprobado que con 6 lamas el toldo se cerraba completamente, impidiendo la visión en horizontal del exterior, para una persona situada en el interior. El objetivo es permitir esta visión, así que se han eliminado 2 de las lamas para dejarlas en 4, ya que se ha comprobado que el solape entre ellas es menor en la realidad, que en el modelo teórico, debido a la distancia entre los topes de las guías utilizadas y fabricadas expresamente para este prototipo.



Las lamas, están hechas de planchas semirrígidas de espuma de PVC, que además es termoconformable. Esta propiedad de este material, se podría haber utilizado para darle la forma de arco a las lamas, aplicar calor superior a los 80°C y dejar permanentemente esta forma fijada, para así liberar de tensiones a estas piezas y que giren libremente. No ha sido necesario, ya que dichas tensiones no afectan significativamente al movimiento. Este material, es apto para su uso en exterior y su color blanco ayuda a reflejar la radiación solar.

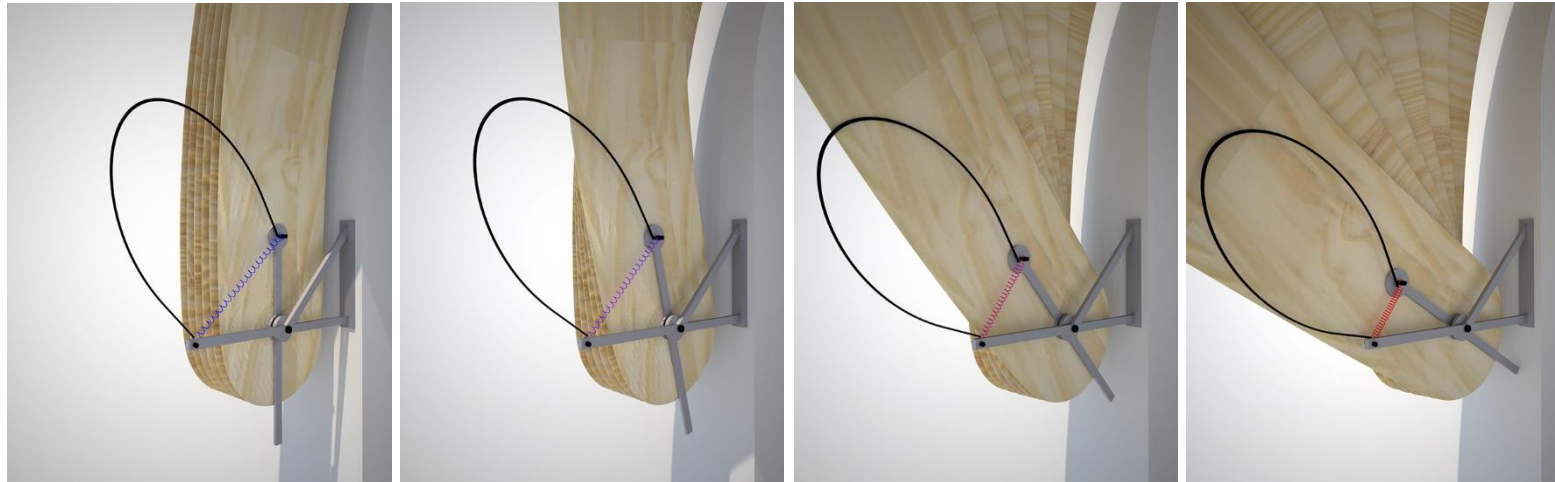


Fig. 168. Detalle de actuador en toldo de ventana. Incremento de la temperatura exterior de izquierda a derecha

El espesor de las lamas es de 3mm, con un ancho constante de 20cm y una longitud variable, como se ha dicho, donde la lama más larga mide 2m y las longitudes de las menores, disminuyen cada una 5cm. El conjunto presenta un equilibrio entre rigidez y flexibilidad que permite mantener la forma de arco, pero también absorber el empuje del viento, el cual se contrarresta con pequeñas deformaciones elásticas y temporales.

En el centro de cada lama, se han instalado guías fabricadas con perfil hueco de aluminio, de sección cuadrada de 6x6mm, por 1mm de espesor. A estas guías, se les ha hecho una acanaladura a todo el largo, de 2 mm de ancho, para permitir la inserción de las cabezas de los tornillos, que van alojadas en su interior. Estos tornillos, son los que fijan los perfiles de aluminio a las lamas y a la vez hacen de macho-guía, para evitar que éstas se muevan diferencialmente en horizontal, unas respecto de las otras. Además, estos tornillos (2 por guía) sirven como topes para el camino de ida y el camino de vuelta, del conjunto de lamas.

Se ha elegido el material aluminio, por su rigidez y ligereza, así como su fácil mecanizado. Para fijar el toldo a la pared, en este caso al cajón de madera de prueba, se utilizan dos escuadras metálicas, que sirven de soporte al conjunto del toldo y también sirven para fijar el actuador en su sitio, esto es, un punto a la escuadra y el otro a la primera lama.

El toldo, se puede poner por fuera del plano de fachada o dentro del ámbito de la propia ventana. En este caso, no serían necesarias dichas escuadras, sino que se pueden sacar dos ejes, directamente de las jambas de la ventana. De esta manera, cuando el toldo está desactivado, el paquete de lamas queda integrado en el propio hueco e invisible desde una visión lateral. Para esta disposición, el ancho del conjunto de lamas debería ser igual o menor al ancho de la carpintería del hueco, para no reducir la dimensión de la visión, a través de la misma.

Además, la forma del toldo debería acompañar a la forma de la ventana. Esto es, si la ventana tiene forma de arco de medio punto, el toldo debería tenerla también y viceversa, si la ventana es de dimensiones cuadrada o rectangular, el toldo debería serlo también. En este caso, es conveniente

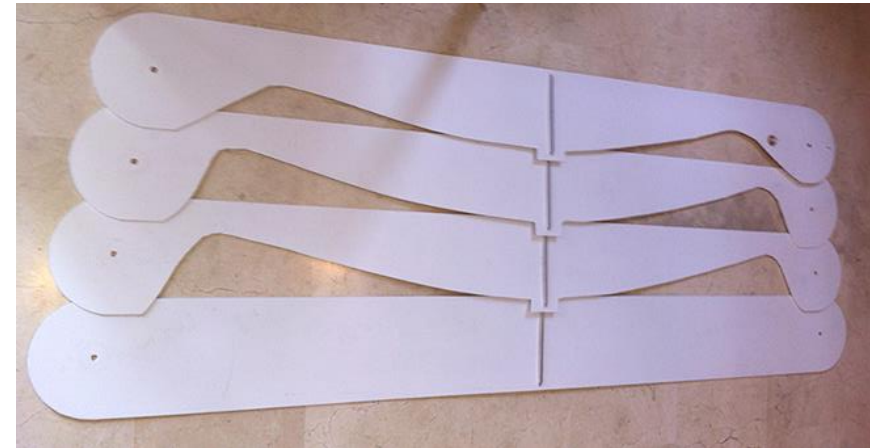


Fig. 169. Desarrollo de las lamas de espuma de PVC (e=3mm). Lamas recortadas en zona de solapes.



Fig. 170. Detalle de perfiles huecos de aluminio con micro tornillos sirviendo de fijación y de guía para el movimiento



Fig. 171. Detalle eje de fibra de vidrio

que las esquinas de las lamas estén redondeadas con un radio de giro mínimo de 5cm. Esto reforzará estos puntos y acortará la distancia del dintel para evitar así al máximo la pequeña flecha que tomarán las lamas en el centro.

Una vez fijadas las escuadras al soporte, se practican orificios para alojar los 2 ejes, uno a cada lado. Para los ejes, se ha utilizado fibra de vidrio en forma de barra cilíndrica hueca de 6mm de diámetro. La fibra de vidrio permite también su fácil mecanizado, es resistente y ligera y por estos motivos ha sido elegida. Además, es aislante eléctrico y esta cualidad será útil para cuando se active el actuador eléctricamente, ya que se evita así el contacto del actuador con otras partes metálicas y que la electricidad necesaria para su calentamiento por efecto Joule se disperse y vaya donde no es necesaria.



Fig. 172. Cajón para pruebas de toldo ventana. Detalles de soportes laterales con ejes.

A estos ejes, se les realiza orificios diametrales de 2mm, para alojar los pequeños pasadores, también de fibra de vidrio, que evitarán que los ejes se muevan lateralmente (Fig. 171).

Para mantener una separación constante entre lamas y que estas no se toquen unas con otras, provocando el mal funcionamiento del sistema, se utilizan espaciadores entre ellas. Estos espaciadores, se han fabricado con tablero de DM de 10mm de espesor y 50mm de diámetro, además de un orificio en el centro de 6mm para alojar el eje. Esta distancia de 10mm entre lamas, provocada por los espaciadores, se mantiene constante en toda su longitud puesto que las guías-eje del centro de las lamas y los tornillos que las sustentan



Fig. 174. Toldo de ventana. Prototipo. Diferentes posiciones en movimiento de apertura y cierre.



Fig. 173. Toldo de ventana. Prototipo. Vistas en perspectiva.

haciendo a la vez de macho y hembra, están dimensionadas para ello. De esta manera, las lamas giran equidistantes durante todo su funcionamiento. También, esta separación provoca que, la pequeña cantidad de aire caliente almacenado bajo el toldo, pueda salir verticalmente, evitando que suba la temperatura en este pequeño volumen de aire. Se permite además, la salida de este aire caliente entre la separación de la última lama (la más grande) y el plano de fachada.

Esta última lama, se fija en un punto a la fachada del edificio, ya que será fija e inmóvil durante el movimiento del sistema. La que provoca el movimiento de todo el conjunto, es la primera lama, a la que se le fija el actuador. Ésta se mueve y cuando su guía llega al



Fig. 175. Dispositivo actuador en toldo de ventana

tope de la lama siguiente, tira de ella para acompañar a dicho movimiento. Es una reacción en cadena, donde la lama motriz, es la primera y el resto le acompañan, mediante el mecanismo de guías y topes, salvo la última que queda fija, como se ha dicho.


El actuador, se coloca solamente en una de las escuadras soporte, para probar que su fuerza sea suficiente, para el movimiento buscado. El disponer de dos actuadores, uno a cada lado, aumentaría la fuerza de actuación al doble, pero provocaría el tener que activarlos simultáneamente, lo cual puede resultar complicado, ya que aunque serían de iguales dimensiones, no así lo serían sus puntos de fijación. Esto podría causar un comportamiento diferencial de dichos actuadores, que podría provocar el mal funcionamiento del toldo, al ejercer fuerzas no simultáneas, a ambos lados del mismo.

Un extremo del actuador se fija a la escuadra y el otro a la primera lama. El punto de fijación del actuador a la escuadra, se realiza practicando dos orificios a la misma, para permitir alojar el pequeño eje, también de fibra de vidrio y diámetro 6mm. En un extremo de este eje, se practican dos perforaciones, para insertar un extremo del muelle del actuador y un extremo de la barra superelástica del mismo. Ambos extremos, se aseguran también con

alambre, para evitar que deslicen y se salgan. Este punto de conexión del actuador con la escuadra, debe permitir el giro que se provocará cuando éste se active. Por ello, es importante que el diámetro del orificio practicado, coincida con el diámetro del eje, para que este puede girar libremente. Además, el propio material de fibra de vidrio, junto con el acero de la escuadra, provoca poco rozamiento, lo cual interesa para un mejor giro o para tener que ejercer una menor fuerza de actuación.

El otro extremo del actuador, se dispone en la primera lama, en el centro del eje longitudinal de la misma y a una distancia de 14mm del centro de giro de la misma o lo que es igual, del punto donde se aloja el eje de giro. Este punto, se toma a la lama mediante suplementos de DM de 3mm de espesor, a cada lado de la misma. Estos suplementos, se atornillan entre sí, aprisionando a la lama y, sobre todo, repartiendo las tensiones que provocarían, si esta fijación fuera puntual y pudiera provocar el corte en este punto del PVC. En el centro de estas pequeñas placas de reparto, se inserta otro pequeño eje también de fibra, donde se enganchan los otros dos extremos del muelle y la barra superelástica del actuador. Todas estas fijaciones deben ser fiables, ya que a través de ellas se transmite la fuerza ejercida al actuador.

Por último, se instalan dos cables eléctricos de 2,5mm² de sección, uno a cada extremo del muelle del actuador. Ahora es cuando el eje de fibra de vidrio, impide que la electricidad que se aplicará al muelle, pase a la barra SE. Estos cables eléctricos estarán conectados



a la fuente de energía deseada que, inicialmente puede ser eléctrica a través de baterías comunes, a la red general de suministro eléctrico, mediante un transformador de corriente alterna a corriente directa o mediante un pequeño panel fotovoltaico para su alimentación directa.

OBJETIVOS DE LA PRUEBA

Lo que se espera de la prueba, es que el sistema funcione de la siguiente manera:

Cuando el actuador se activa, bien manualmente, mediante un interruptor o bien automáticamente, el muelle se transforma en su estado austenítico, recuperando su forma inicial o contraída. Esta fuerza del actuador, es ejercida sobre la primera de las lamas, que comienza a moverse girando. Cuando la guía de la primera lama, llega al tope de la guía de la segunda, se provoca el movimiento de ésta, acompañando a la primera y así sucesivamente con el resto, en lo que se denomina el “camino de ida” del sistema. De esta manera, cuando el actuador está activo, el toldo está desplegado proporcionando sombra a la ventana.

Por el contrario, cuando el actuador se desactiva por la tarde-noche, el muelle se enfría y la barra superelástica empuja a la primera de las lamas hacia arriba. Cuando el tope de su guía, llega al tope de la guía de la segunda lama, la primera la empuja y así sucesivamente, en lo que se denomina el “camino de vuelta”, hasta colocar todo el conjunto en su posición recogida, esto es, todas las lamas dispuestas paralelas a la fachada y superpuestas unas sobre otras.

Debido a que el Nitinol, tarda menos en calentarse que en enfriarse, el camino de ida sería sensiblemente más rápido que el de vuelta. Se espera que la activación del actuador y el movimiento completo de ida duren, aproximadamente, 6 segundos, mientras que para la vuelta, la estimación asciende a los 40 o 45 segundos. Estos tiempos, realmente no son determinantes, en el sentido de que para colocar un toldo de una ventana o en este caso, para retirarlo, no es tan importante el tiempo de duración, como su correcto funcionamiento.

Se espera además que sea silencioso. El único ruido que se espera que provoque, es el del deslizamiento de los tornillos en las guías. Se observará también si el viento provoca ruidos al pasar entre la separación de las lamas. En cuanto al viento, como se ha comentado, todo el conjunto tiene la flexibilidad necesaria como para absorber el empuje que pudiera provocar. Se comprobará que esto es así. A priori, este sistema podría trabajar incluso en condiciones de viento adversas, al contrario que la mayoría de sistemas actuales de sombra, en los que existen sensores de viento que, superado determinado valor de velocidad del mismo, hacen que el sistema no funcione o no se active para evitar daños a la estructura. Estructura que normalmente es rígida y que por esta condición no es idónea



cuando hace viento y a la inversa que el sistema propuesto, que en situación de viento, permite su utilización. Sistemas ligeros y flexibles, que no luchan contra el viento de manera rígida, sino que se deforman elásticamente, para disipar la energía del empuje del mismo.

En cuanto al comportamiento del toldo en el exterior, frente a los agentes climatológicos, se espera que no haya demasiados problemas, en cuanto a durabilidad. El color blanco del PVC, así como su propia naturaleza, hacen que se espere una vida útil de, al menos mínimo, dos años. Los espaciadores de DM, sí podrían dar problemas con el agua. Si este fuera el caso, se sustituirían por otro de material polímero. La instalación eléctrica, puede funcionar al exterior debidamente protegida, pero es necesario recalcar que la electricidad suministrada es muy baja intensidad y sobre todo, no resulta peligroso al contacto directo, más allá de un leve hormigueo.


Se analizará el funcionamiento del sistema, en los modos manual y automático y se observarán las diferencias entre un modo y el otro. Para el modo automático, se estudiará la posibilidad de instalar e integrar los 2 o 4 módulos fotovoltaicos necesarios (el número depende de la cantidad de energía eléctrica que pueda suministrar cada módulo) en el centro de la cara superior de la última lama, la que queda fija.

RESULTADOS DE LA PRUEBA

Después de haber realizado la construcción del prototipo, según las especificaciones antes descritas, se presentan una serie de problemas, que ahora se pasa a describir y que no surgieron en el anterior modelo, elaborado únicamente con arcos ligeros de formados por listoncillos de madera y tela de algodón. En este caso anterior, el sistema era más ligero.

El principal problema que surge es que las lamas de PVC y el conjunto en general, pesa demasiado. El actuador, no es capaz de devolver el toldo a su posición original. Para resolver esto, se estudian diferentes soluciones, las cuales se realizarán para ver el resultado.

Como primera medida, existe la posibilidad de duplicar el actuador. Esto es, colocar otro en el otro extremo de apoyo del toldo. De esta manera, se duplica la fuerza ejercida. Para esta posible solución, se plantea otro problema añadido, que sería el hacer que los dos SMA del actuador, trabajen al mismo tiempo. En cuanto a la conexión eléctrica, no habría problema ya que la electricidad viaja por los hilos conductores tan rápido, como para considerar que es instantáneo, en ambos muelles de Nitinol, pero estos no son todos iguales y su longitud, forma y tipo de aleación pueden variar ligeramente. En especial, el tipo de aleación, ya que si se usan muelles de diferente momento de fabricación, la histéresis y los diferentes puntos de temperatura de activación pueden cambiar ligeramente.



Otra manera de resolver el problema del peso del toldo con lamas de PVC, es precisamente introducir peso en ellas, en el extremo corto. Cuando el toldo está desplegado, la gravedad tiende a mantenerlo en esa posición. Colocando carga sobre el extremo de cada una de las lamas, se puede intentar equilibrar el sistema, para la posición desplegada. Así, el cable superelástico tendría una ayuda extra, para mover el toldo, en su camino de vuelta. Para añadir este lastre, se utilizará plomo, material denso y pesado que ocupa menos volumen que otros materiales. Se irán añadiendo pequeñas piezas de plomo, hasta equilibrar el sistema en la posición activa o desplegada. Se analizará también, el comportamiento del propio material de PVC, ante estas nuevas tensiones. Se observará si este sufre deformaciones o fisuras y si es capaz de asumir los esfuerzos de compresión, en la zona de la primera lama, entre su punto de apoyo y el punto de actuación. En esta zona, el muelle SMA comprime el material y el PVC debe ser capaz de absorber estas compresiones, sin deformarse.

Por otro lado, se estudia también la posibilidad de sustituir el PVC por otro material más ligero. Este material podría ser papel, recubierto para su protección ante los agentes atmosféricos.

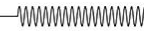
Se elaborará también otro toldo de ventana con papel, al estilo de los farolillos usados tradicionalmente en la Feria de abril de Sevilla. La idea es hacerlo igual, pero solamente con un quinto del desarrollo normal de uno de estos farolillos. De esta manera, el elemento de cubrición y generador de sombra sería el papel y solo habría una única costilla motriz, que desplegaría todo el toldo. El sistema sería más ligero, seguiría teniendo flexibilidad y no sería necesaria tanta fuerza de actuación. En los farolillos hechos de esta manera, todo el material se pliega y queda recogido en una forma plana de arco.

Esta es la clave que se busca, un toldo ligero, que despliegue una superficie para dar sombra, pero que cuando se repliega, queda recogido en su propia forma plana de arco, en este caso, en el ámbito de la ventana. Los pequeños pliegues que se realizan en el papel, sirven para generar la forma curva deseada, y también añaden rigidez.

Se estudiará la fabricación con diferentes grosores de papel, que junto con los pliegues y el material que se use para su recubrimiento y protección, formen un conjunto válido, funcional y duradero.

Actualización 1 (elemento de cubrición, fabricado con lamas de madera de balsa, de 1mm de espesor)

Se ha probado a realizar el toldo de ventana, con otro material ligero, la madera de balsa. Se han utilizado tiras de 10cm de ancho por 100cm de largo. Como las piezas no vienen con el largo deseado (al menos 150cm), se han fabricado conjuntos de lamas adheridas unas a otras, con cola de carpintero y empleando un molde curvo, fabricado al efecto. Este molde, se ha realizado con resina de



poliuretano rígida, que permite una rápida fabricación, gracias a su gran velocidad de endurecimiento (apenas 5 minutos) y su gran resistencia mecánica.



Fig. 176. Molde de resina de poliuretano para fabricación de lamas de madera de balsa curvadas. Sargentos comprimiendo las lamas con adhesivo

Sobre este molde, se han ido colocando las lamas de madera de balsa, previo extendido de la cola. Se ha dispuesto una lama de 100cm y a continuación otra de 50cm, para llegar a los 150cm buscados. Sobre ellas y matando la junta, se ha colocado otra lama de 100cm y otra de 50cm. Después se ha colocado una lámina de protección de PVC de 3cm de espesor y se han presionado con sargentos metálicos y piezas de madera, para ejercer una presión constante y asegurar una buena unión.

Cuando se han quitado del molde, una vez la cola ha secado, las lamas no han guardado la forma semicircular del molde, sino que han abierto ligeramente a la forma de arco. Esto provoca, en los extremos donde están articuladas a las escuadras de soporte, un rozamiento excesivo, que impide el correcto funcionamiento del movimiento del conjunto. Por eso, de momento, se desecha esta solución, hasta resolver estos problemas. Se podría intentar hacer un molde con forma de arco, ligeramente más cerrado que el semicircular, para que, una vez quitadas las lamas del molde y estas deformen, dicha deformación quede en la forma circular deseada.

Se probará más adelante, ya que las propiedades estéticas de la madera, así como la bajísima densidad del tipo escogido (madera de balsa), lo hacen muy interesante.

Actualización 2 (elemento de cubrición hecho de papel)

Se ha probado a sustituir el elemento de cubrición de lamas, por una superficie plegada y continua de papel. En un principio, se ha pensado que así se reduce el peso a desplazar por el actuador, para hacer el movimiento más fluido y rápido. Además, el papel cuando se pliega, ocupa muy poco espacio, lo cual sería interesante para la posición recogida del toldo y así poderse meter en el hueco de la ventana y no ser visto lateralmente.

El resultado no ha sido satisfactorio. A pesar de que el papel tiene pliegues y estos le confieren algo de rigidez, no es suficiente y el elemento de cobertura, no guarda la forma esférica esperada. Muy al contrario, esta se deforma hasta niveles inadmisibles, lo cual

hace que esta solución sea desechada o pendiente de futuro estudio, ya que se podría solucionar introduciendo costillas intermedias. Habría que calcular, el peso del conjunto de cobertura de papel más esas costillas, para no sobrepasar el peso de la anterior prueba, de lamas de PVC.

Para realizar esta prueba, se ha acudido a los profesionales de la fabricación de estos elementos de feria. Estos tienen unas dimensiones determinadas. El farolillo típico es pequeño y aunque los hay más grandes, ninguno llega al tamaño, que puede tener una ventana convencional (a partir de los 50 o 60 cm). Las técnicas que se utilizan y las máquinas empleadas, no permiten hacer estos toldos más grandes, lo cual sería ideal, ya que un tamaño de pliegue mayor supondría mayor rigidez y quizá solventar el problema de la deformación excesiva o al menos mitigarla hasta niveles aceptables.

Actualización 3 (elemento de cobertura fabricado con lamas de espuma de PVC de 1mm de espesor)

Se ha probado el toldo, con lamas de 1mm de espesor, más delgadas que las anteriores de 3mm y del mismo material: espuma de PVC. A pesar de disminuir el espesor a un tercio, su peso no desciende en la misma medida, resultando que ambas lamas, de 1 y 3mm, a igualdad de forma, pesa una la mitad de la otra. Esto es, debido a sus diferentes densidades.

Con estas lamas más delgadas, el conjunto del toldo de ventana pesa la mitad que antes. El actuador ahora, sí puede moverlo sin problemas de fuerza. Pero, se presenta el inconveniente de que la lama primera, la motriz o la que tiene incorporado el actuador y por tanto, a la que se le aplica la fuerza, no tiene la suficiente rigidez y se alabea en su plano longitudinal, es decir, en la posición ON o cuando está el toldo puesto y dando sombra al hueco de ventana, cuando el actuador aplica la fuerza para levantarlo, quitarlo o devolverlo a la posición OFF, la primera lama en el extremo donde tiene el actuador, avanza más que en el extremo que no lo tiene, provocando este alabeo de la forma, de la lama curva. Esto hace, que la primera lama no encaje bien con la siguiente y que no funcione correctamente el sistema.

Para resolver esto se aumenta el espesor de la lama primera para darle mayor rigidez y que la forma curva se mantenga paralela al plano de fachada, haciendo que el sistema ahora sí funcione correctamente.



Fig. 177. Toldo de ventana con cobertura de papel plegado. Posiciones cerrado y abierto



3.4.2 PROTECCIÓN DE FACHADAS

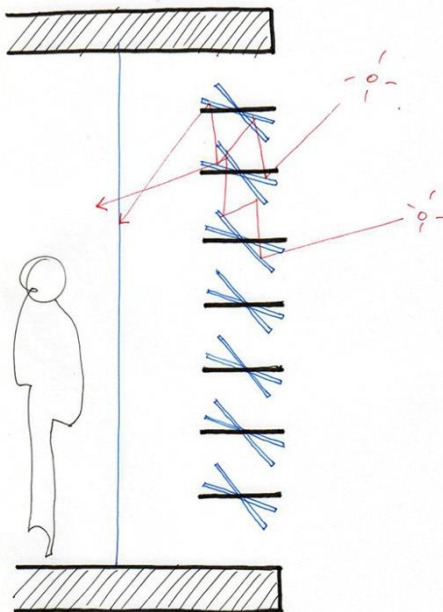


Fig. 178. Esquema de Brise-soleil dinámico


Hemos visto, en el punto anterior, un sistema de protección solar, para los huecos de un edificio. Veamos ahora, cómo podemos proteger el resto de la envolvente, en el caso de que ésta sea completamente de vidrio o por su propia naturaleza, es insuficiente para combatir el soleamiento excesivo. En este caso, veremos soluciones teóricas que no se han desarrollado en esta investigación, pero que sin duda se desarrollarán en el futuro próximo.

Nuestro punto de partida, se inicia con los sistemas que conocemos y que se han ido implementando a lo largo de la historia de la Arquitectura. Fijémonos, por ejemplo, en los sistemas de lamas verticales y horizontales, utilizados desde los años del Estilo Internacional. Estos sistemas, han demostrado su eficacia y han ayudado a que los edificios sean más eficientes energéticamente y se mejore el confort en su interior.

El brise-soleil del maestro Le Corbusier (Ruiz, 2011), consiste en un conjunto de elementos, dispuestos en las fachadas. Sus dimensiones y posición relativa entre estos elementos, garantizan el soleamiento del interior en las estaciones frías, cuando el sol está más bajo. Por el contrario, en las estaciones cálidas, cuando el sol está más alto, se bloquea para que no se sobrecaliente el interior. En el caso de orientaciones sur, el arquitecto dispone estos elementos o lamas en posición horizontal y, como se ha dicho, sus dimensiones y posición están calculadas para conseguir el efecto buscado.

Normalmente estas lamas son fijas, no se mueven. Tampoco varían su geometría. Esto, se traduce en que los niveles de iluminación natural del interior, escapan a nuestro control. La luz directa e indirecta que entra en el interior, está relacionada, con la posición y geometría de estas lamas, así como del material, color y superficie de las mismas.

Con el uso de materiales con memoria de forma, podemos diseñar sistemas de actuación e implementarlos a los sistemas actuales. De esta manera, podremos dotarlos de movimiento. Si instalamos actuadores basados en SMAs y si además incluimos sensores de luz, podremos tener un sistema que varía la posición de las lamas de acuerdo a los niveles de iluminación interiores. Así, tendremos el nivel deseado y ahorraremos en energía eléctrica, ya que las lamas podrán moverse ahora sincronizadas, con estos sensores, por medio de un software de control general del sistema. Moviendo las lamas con este software y de acuerdo a la información de los sensores, controlamos el ángulo de incidencia del soleamiento directo, además de controlar también, la cantidad de luz indirecta que entra en



el interior y que viene reflejada por las propias lamas. Incluso en la propia superficie de las lamas, podemos actuar para hacer que de ese plano surjan pequeños deflectores, microlamas verticales y en general, actuar y cambiar su geometría, para acentuar el efecto. El pequeño consumo de energía de los propios actuadores, como sabemos, puede satisfacerse con celdas fotovoltaicas. De esta manera, el balance de consumo energético será favorable.

La misma idea, se puede aplicar para orientaciones este y oeste o para lamas o elementos verticales. Todos son susceptibles de ser dotados de movimiento dependiente de la temperatura o del nivel de iluminación que queramos.

También podemos tener elementos móviles, que ocultan parcial o totalmente la fachada de vidrio, como en el caso de los arquitectos austriacos en el Showroom Kiefer Technic (Architekturburo, 2007) que utilizan motores eléctricos, para mover unos paneles que se despliegan por toda la fachada. Estos motores eléctricos, pueden ser sustituidos por actuadores SMA. Reduciremos el consumo eléctrico, el ruido y ganaremos en fiabilidad. Se puede hacer con muelles SMA, como ya mostraron los arquitectos (Khoo, Salim, & Burry, 2012).

Estos elementos móviles de protección solar de fachadas, se encuentran en el exterior del edificio, por delante de la envolvente. Pero también pueden ir integrados en la propia fachada, en el caso de que sea completamente de vidrio. Como vimos, esto ya lo han desarrollado los americanos Decker&Yeadon (Minner, 2011). En este caso, ellos integran una pantalla de microlamas, en el propio cerramiento de vidrio, dentro de la cámara. La idea es similar a lo comentado anteriormente, estas lamas pueden girar sobre sí mismas, para obtener el grado de oscurecimiento que queramos. Se puede controlar activamente, por medio de un accionador o podemos también hacerlo mediante un software de control, de nuevo sincronizado con sensores de luz interiores. Todas las pequeñas lamas, pueden moverse con un solo elemento de SMA, lo cual lo hace interesante en cuanto a costes.

Por último, si no tenemos opción de intervenir en el exterior, podremos hacerlo en el interior. Tradicionalmente, tenemos dispositivos de protección solar, en el interior de los edificios. Contraventanas, celosías, cortinas, etc. son elementos, a los que podemos dar movimiento “inteligente”. Pensemos en el caso de las cortinas, por ejemplo. Para viviendas con poca superficie de huecos o pequeñas estancias, no parece problema el accionar estos elementos manualmente...como tradicionalmente se ha venido realizando. Pero, si imaginamos espacios más grandes, espacios de celebración o de reunión de muchas personas, en los que la superficie de huecos es mayor, convendremos en que resulta de interés, la posibilidad de que estos elementos, estén automatizados. No solo por el hecho de la comodidad, de no tener que accionarlos todos manualmente, sino por los aspectos ya comentados de ahorro de energía.

Estas cortinas inteligentes, funcionarían igual que el sistema explicado más adelante para los toldos. Un único muelle de SMA, puede desplazar el textil de un lado a otro o hasta la posición que el usuario quiera. Conectando el muelle a una fuente eléctrica, podremos



calentarlo y activarlo. Su sencillez es absoluta y es muy fácil instalarlo en cualquier cortina existente. Activando la mitad del muelle, hacemos que se contraiga y mueva la cortina a un lado. Activando la otra mitad, conseguiremos devolverla a su posición original. Obviamente, podemos ordenar estas activaciones desde un dispositivo de control instalado en el propio recinto, desde un ordenador central de control o desde nuestros dispositivos móviles o tablets.

Podemos actuar además, sobre la carpintería de nuestras fachadas. Hace años que se ha realizado con éxito, la instalación de actuadores que abren y cierran ventanas, dependiendo de la temperatura (Duerig T. , Applications of Shape Memory, 1990). Esto se ha hecho de forma pasiva, esto es, los actuadores SMA tienen una temperatura de transformación, superada la cual, el material cambia y recupera la forma, actuando sobre la ventana para abrirla.

Pero, podemos tener todo un conjunto de ventanas o superficies de fachada de vidrio que estén sincronizadas con sensores interiores de temperatura. Todos ellos estarían conectados al mismo ordenador, que controla los demás dispositivos de iluminación anteriores, de manera que el sistema los unifica, para tener un mayor control de las condiciones térmicas y lumínicas.

3.4.3 TOLDO de PATIO, CALLE o PLAZA

En los países de la zona mediterránea y en otras zonas del mundo, es común el uso de textiles dispuestos horizontalmente, sobre el patio de un edificio o sobre una plaza o calle, para proporcionar sombra ante el soleamiento directo.

En concreto, en ciudades como Sevilla, esta práctica está muy consolidada. En sus casas patio, los toldos cubren el espacio para dar sombra y mitigar el calor intenso. En sus calles, también se disponen toldos, entre las fachadas de los edificios. Existen además espacios, como la plaza de toros, centros deportivos, restaurantes, mercadillos... incluso los coches de caballos o los barcos que pasean a los turistas por la ciudad, disponen de un pequeño elemento horizontal de protección solar.

Normalmente, estos textiles son fijos y permanecen así durante toda la temporada calurosa. Quizá en viviendas si se pone y se retira manualmente cada día, mediante poleas y cuerdas. Con dispositivos actuadores basados en Nitinol, podemos hacer que se quiten y pongan automáticamente, dejando libre la vista del cielo nocturno y permitiendo la renovación del aire acumulado.

Como se ha dicho, los textiles móviles funcionan, normalmente, con un sistema de poleas y cuerdas, accionado manualmente o bien por medio de motores eléctricos. Esta solución, implica la intervención del usuario o la instalación de sensores dependientes de la temperatura, para accionar dichos motores.

En el caso del Nitinol, dicho sensor es el propio material que, al superar la temperatura de activación, cambia de forma, activando el dispositivo de actuación.

Para hacerlo, debemos saber cómo funcionan exactamente los toldos existentes e implementar el sistema con actuadores de Nitinol. Estos toldos, normalmente están suspendidos de argollas metálicas, cada 50cm, en los dos ejes, aproximadamente. Estas argollas, a su vez, están suspendidas de cables de acero galvanizado, separados también unos 50cm. Por último, estos cables acometen a



Fig. 179. Calle Sierpes entoldada. Sevilla, 1920-36

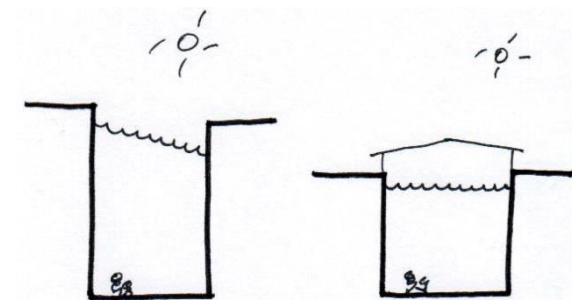


Fig. 180. Secciones de calle y patio con toldos



Fig. 181. Toldos en patio de vivienda.

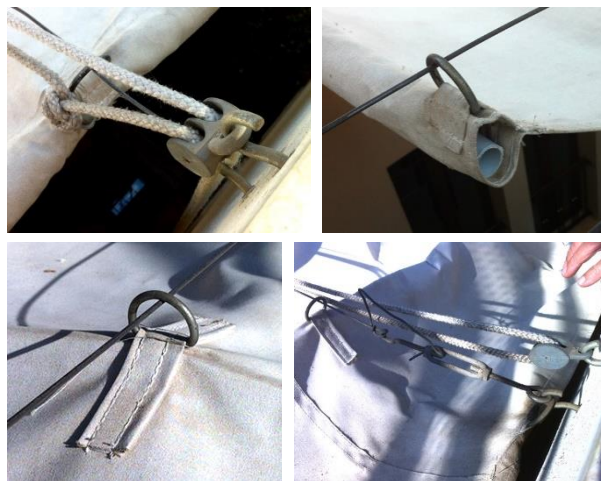


Fig. 182. Detalle de sistema de sujeción del toldo mediante cables de acero tensados y anillas de acero. Sistema de poleas y detalle de barra rigidizadora

ambos lados del espacio a cubrir. Por lo tanto, lo que debemos hacer para moverlo es instalar los dispositivos actuadores en estas argollas o anillas. Acercándolas o alejándolas, conseguiremos mover el conjunto del textil.

No es necesario hacerlo en todos los puntos. Bastará con ponerlos, en una de las líneas de apoyo, por cada paño de toldo.

En las Fig. 183 y Fig. 184, se propone un esquema de instalación para toldo de calle, plaza o patio. Su funcionamiento, a lo largo de una jornada diaria, sería el siguiente: Cuando amanece y comienza el día, el toldo está en la posición abierta (OFF). En este estado, el Nitinol MF (Memoria de Forma-color rojo), se encuentra en su fase martensítica o fría y el Nitinol SE (Superelástico-color azul) está en su fase austenítica. En este momento, el SE desarrolla más fuerza que el MF, manteniendo las anillas juntas y el textil abierto.

A medida que el día avanza, la temperatura va subiendo y cuando llega a un valor, por encima del cual, tenemos sensación de calor (entre 25°C y 27°C) el Nitinol MF, se calienta activándose la fase austenítica y recuperando así la forma pre-programada, que en este caso, es en U, como se aprecia en las figuras.

En esta fase “caliente”, el Nitinol MF ejerce más fuerza que el SE, lo que provoca que el primero se mueva, a pesar del segundo, en un equilibrio dinámico de fuerzas, dependiente de la temperatura.

Por la tarde-noche, la temperatura vuelve a descender, de ese valor límite de sensación de calor. El Nitinol MF, vuelve a su fase fría o martensítica. Ahora el SE, de nuevo ejerce más fuerza, devolviendo el toldo a su posición inicial, completándose así, el ciclo diario.

El sistema, se puede instalar en toldos existentes, sin provocar impacto visual, ya que los actuadores van instalados en la parte superior del mismo, en la cara oculta

de la vista de los usuarios. Esto supone una mejora e integración en los mismos, de manera invisible.

Además, es reversible. Con el textil recogido, se pueden quitar y poner los actuadores con facilidad. Presenta la ventaja también, de que al material no le afecta la corrosión, lo que implica que puede estar al exterior, sin riesgo de deterioro. Es reutilizable, en cuanto a que los actuadores, se pueden quitar de un lugar e instalarlos en otro. Por último, su funcionamiento silencioso, supone una mayor integración en el edificio, ya que no se percibe su existencia.

En todo caso, este sistema ha resultado ser ineficaz en las pruebas realizadas, ya que la fuerza ejercida por los actuadores, con este esquema, es insuficiente. Por lo tanto, se va a probar una nueva configuración, de mayor fuerza de actuación y que se describe a continuación.

Actualización 1 (actuadores con barras articuladas en V)

En este nuevo planteamiento, se sustituyen las anillas de acero, de las que cuelga el textil, por pequeñas poleas. De esta forma, se pretende reducir el rozamiento producido por las anillas y disminuir así, la fuerza de actuación necesaria. Para ello, directamente sobre la tela y en los puntos donde están situadas las anillas, se colocan estas poleas, tomadas con unos pequeños discos de madera, para asegurarlas al textil.

Se disponen unas barras articuladas, de fibra de vidrio, en forma de V y conectando cada par de poleas. Estas barras están articuladas, de manera que se permite el giro en estos puntos. Se instalan los actuadores en las barras, entre cada dos poleas. Cuando la temperatura sube, por encima de la temperatura de activación del muelle SMA, éste se activa y recupera su forma memorizada, haciendo que las barras en V se abran y empujen a las poleas adyacentes, desplegando el toldo, hasta cubrir el espacio completamente.

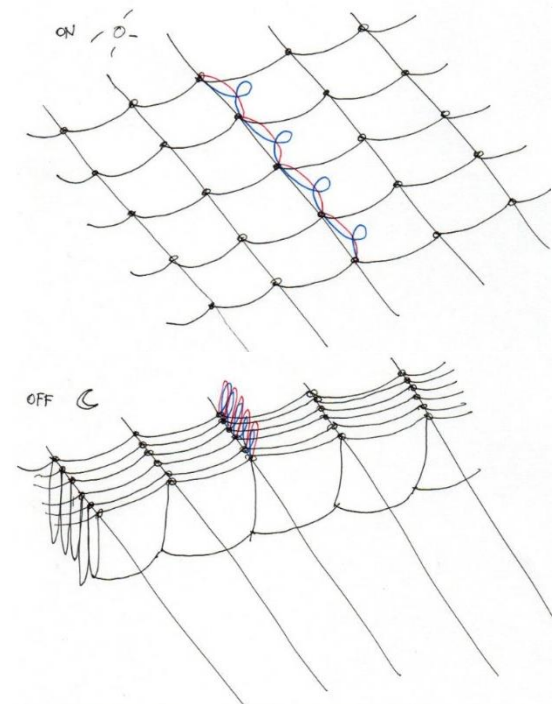


Fig. 183. Toldo abierto (noche) y cerrado (día)

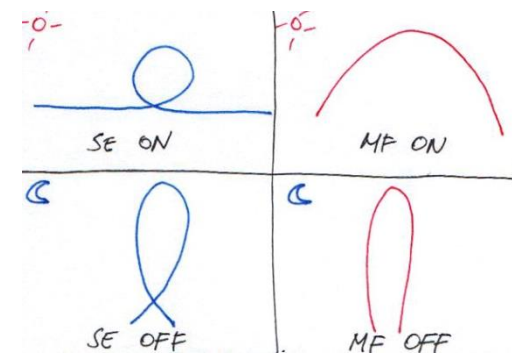


Fig. 184. Esquema funcionamiento actuadores

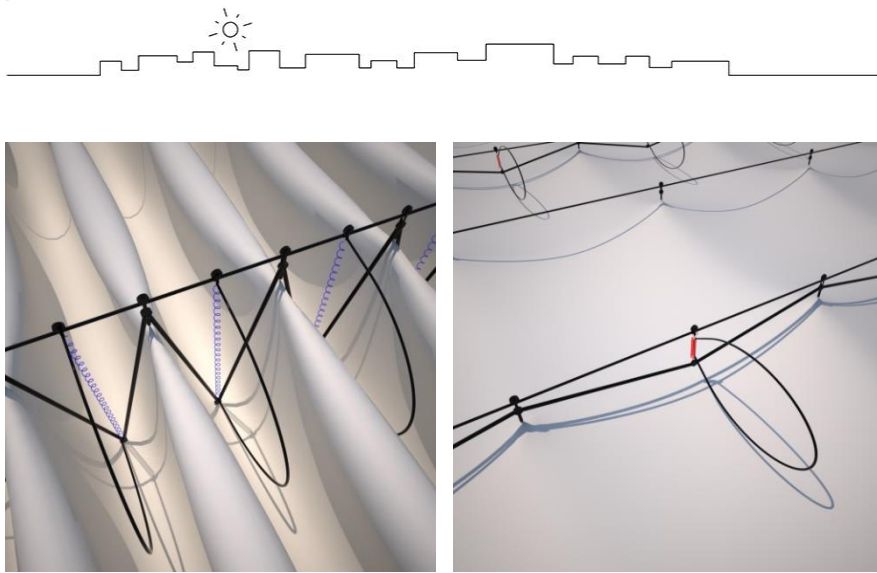


Fig. 185. Detalle de sistema de toldo inteligente formado por barras móviles y articuladas en V, poleas, cables de sustentación y actuadores de SMA activados a la derecha y desactivados a la izquierda

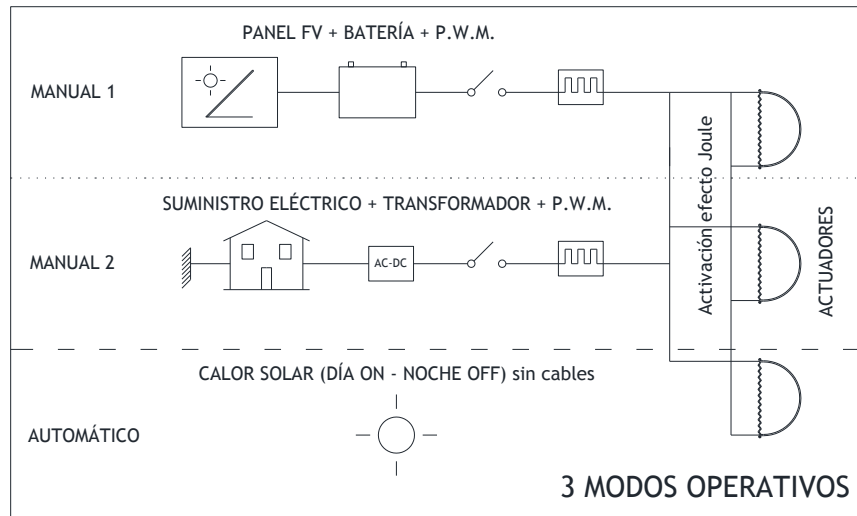


Fig. 186 Diferentes modos operativos de toldo inteligente

Cuando por la tarde-noche la temperatura desciende por debajo de la temperatura de activación del SMA, éste vuelve a su estado martensítico. Ahora la barra superelástica, ejerce más fuerza que el muelle y el actuador recupera su posición inicial, haciendo que las barras en V se cierren y por lo tanto, las poleas se acerquen unas a otras, provocando la apertura total del toldo sobre el patio. (Callejas & Calero, 2014)

El sistema, tiene varias opciones de funcionamiento: dos manuales y una autónoma, según puede verse en la Fig. 186. En la forma manual 1, un panel fotovoltaico, de pequeñas dimensiones, recibe la luz del sol y la transforma en energía eléctrica directa. Esta energía, se puede almacenar en una batería y disponer de ella cuando sea necesaria. Mediante un simple interruptor, permitimos el paso de la electricidad al muelle SMA, el cual se calienta por efecto Joule.

En la forma manual 2, la energía eléctrica se toma directamente de la red de suministro general. Después, esta energía eléctrica alterna, es transformada en directa y de nuevo, mediante un interruptor, se calientan los muelles de los actuadores.

La última forma de operar de este sistema, es en modo automático. En este modo, no hay cables eléctricos, ni interruptores, ni nada más que el toldo y el propio material de Nitinol. Este material debe tener una temperatura de activación en torno a los 25-27°C, que es la temperatura umbral para la sensación de calor. Esta aleación debe también ser, de histéresis estrecha, para que la transformación del estado martensítico al austenítico, sea

rápida y eficaz. En esta forma automática, el usuario no se debe preocupar por el sistema y estaría indicado quizá para toldos en las calles, plazas y espacios públicos, para un funcionamiento autónomo.

Tras haber realizado las primeras pruebas, surgen algunas cuestiones que necesitan ser mejoradas. Los cables eléctricos que alimentan los actuadores, deben estar dispuestos de manera que no entorpezcan el movimiento del toldo. Para ello, se fijan al textil en los puntos de las anillas y en los puntos medios de cada tramo. Sin embargo, una vez hecho esto, se observa que esta disposición de los cables, hace que el textil adquiera cierta rigidez, lo cual es perjudicial para el sistema de actuación.

Se observa también, que disponer de varias líneas de actuación, implica mayor número de actuadores. Éstos deben trabajar coordinados al mismo tiempo

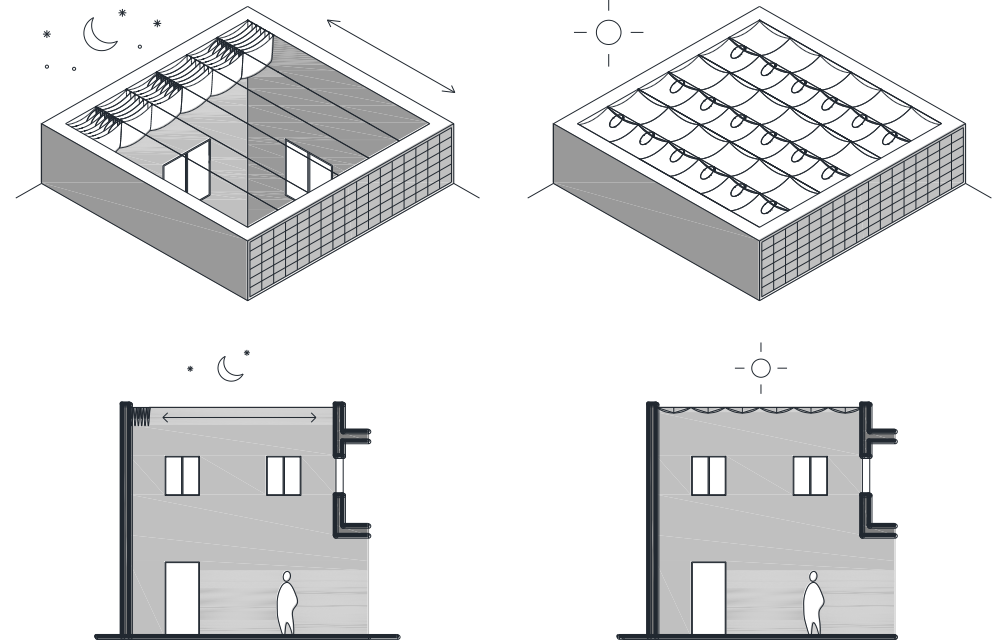


Fig. 187 Toldo con sistema de actuadores basados en Nitinol

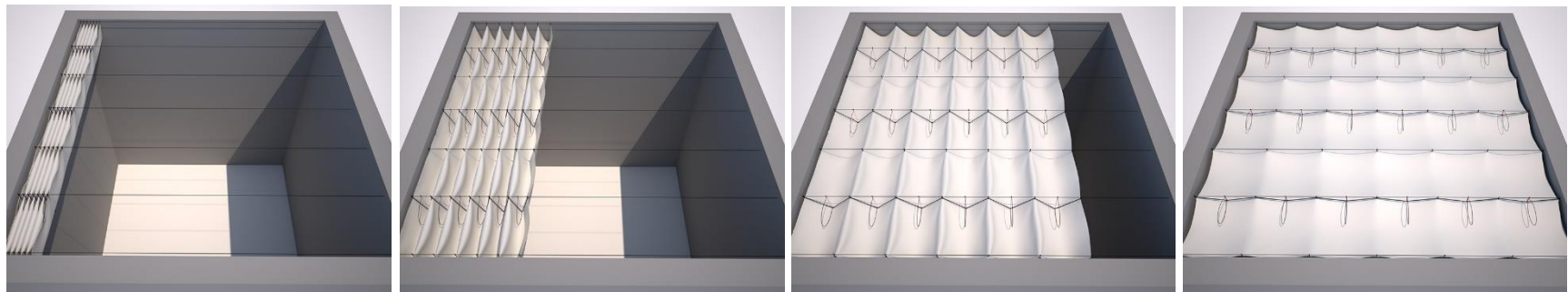


Fig. 188 Secuencia de movimiento de toldo con actuadores SMA

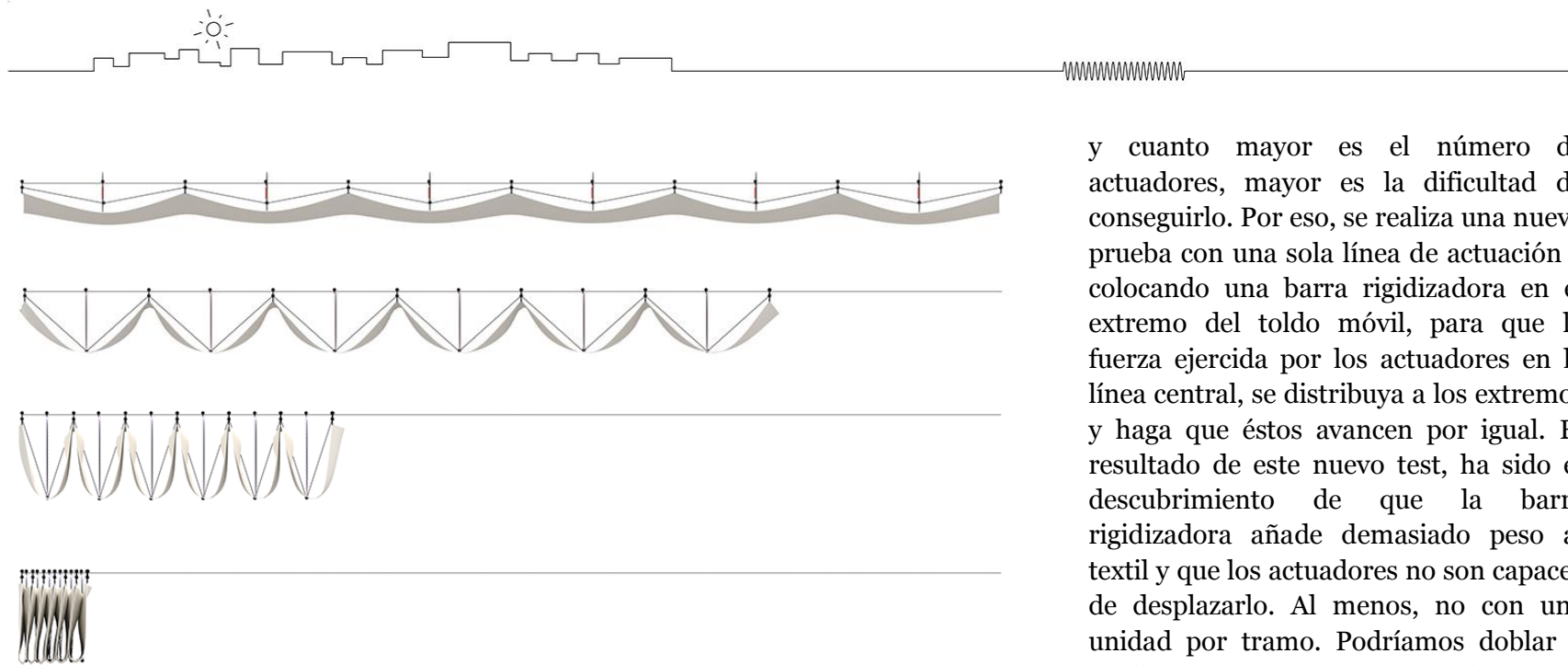


Fig. 189. Toldo inteligente con sistema de actuadores basados en Nitinol con memoria de forma y superelasticidad. Actuadores trabajando con barras en diagonal y poleas

y cuanto mayor es el número de actuadores, mayor es la dificultad de conseguirlo. Por eso, se realiza una nueva prueba con una sola línea de actuación y colocando una barra rigidizadora en el extremo del toldo móvil, para que la fuerza ejercida por los actuadores en la línea central, se distribuya a los extremos y haga que éstos avancen por igual. El resultado de este nuevo test, ha sido el descubrimiento de que la barra rigidizadora añade demasiado peso al textil y que los actuadores no son capaces de desplazarlo. Al menos, no con una unidad por tramo. Podríamos doblar o triplicar el número de actuadores por tramo, pero volveríamos al problema comentado anteriormente de hacerlos trabajar coordinadamente de manera

correcta.

Al cambiar la barra rigidizadora de aluminio, por otra de igual diámetro, pero menor espesor, de fibra de vidrio, se reduce el peso, pero la barra no tiene la suficiente rigidez y flexiona horizontalmente, haciendo que los puntos extremos del toldo queden retrasados, respecto de la línea central, impidiendo además, el cierre total del espacio. Por otro lado, el sistema resulta ser muy silencioso. Incluso, el pequeño ruido generado por las anillas al desplazarse, a lo largo de los cables de sustentación de acero, se elimina con el uso de pequeñas poleas de caucho o material similar.

En todo caso, se plantea la cuestión de la imposibilidad de fijar el toldo, en una posición intermedia, sin la necesidad de suministrar continuamente electricidad a los actuadores. Dicho de otra manera, el sistema mejoraría si se pudiera detener el toldo, por ejemplo, a la mitad de su recorrido y no fuera necesario alimentar eléctricamente a los actuadores. Esto sería, como hemos visto, para el caso de funcionamiento activo o controlado por el usuario. En la forma pasiva, el sistema de actuación, solo tendría dos posiciones: toldo totalmente abierto o totalmente cerrado.

Actualización 2.

Debido a las cuestiones planteadas en el sistema anteriormente expuesto, se propone otra manera de afrontar el problema. Para esta nueva prueba se buscará aligerar al máximo el peso del elemento generador de sombra. Para ello, en un primer momento se hará un ensayo con papel. El papel se pliega a modo de acordeón con una altura de pliegue de 50mm.

Se estudiará una parte o tramo básico del toldo. Esto es, una franja de 4m de longitud y 1m de anchura. Así, el toldo, cuando está replegado (OFF) queda recogido en un paquete de 1m de ancho, 10cm de longitud mientras que cuando está desplegado (ON) cubre completamente los 4m con una altura de pliegue de 2cm.

Esta franja de toldo, que repitiéndola en anchura formaría el toldo completo, se sustenta con 3 cables de poliéster de 1,25mm de diámetro. Un cable central y dos en los extremos. Al papel se le practican orificios de 5mm de diámetro a modo de ojales por los que irán introducidos los cables de sujeción.

Para reforzar estos puntos de contacto de los cables de poliéster con el papel, con el mismo extendido en el suelo, se coloca cinta adhesiva por ambas caras a modo de refuerzo. Una vez colocadas se realizan las perforaciones. De este modo se pretende ahorrar el peso de las anillas que serían necesarias en un sistema de toldo convencional.



Fig. 190. Detalles de sujeción de toldo con muelle NiTiCu, tensores y extensión con polea para guiado de carga de camino de vuelta

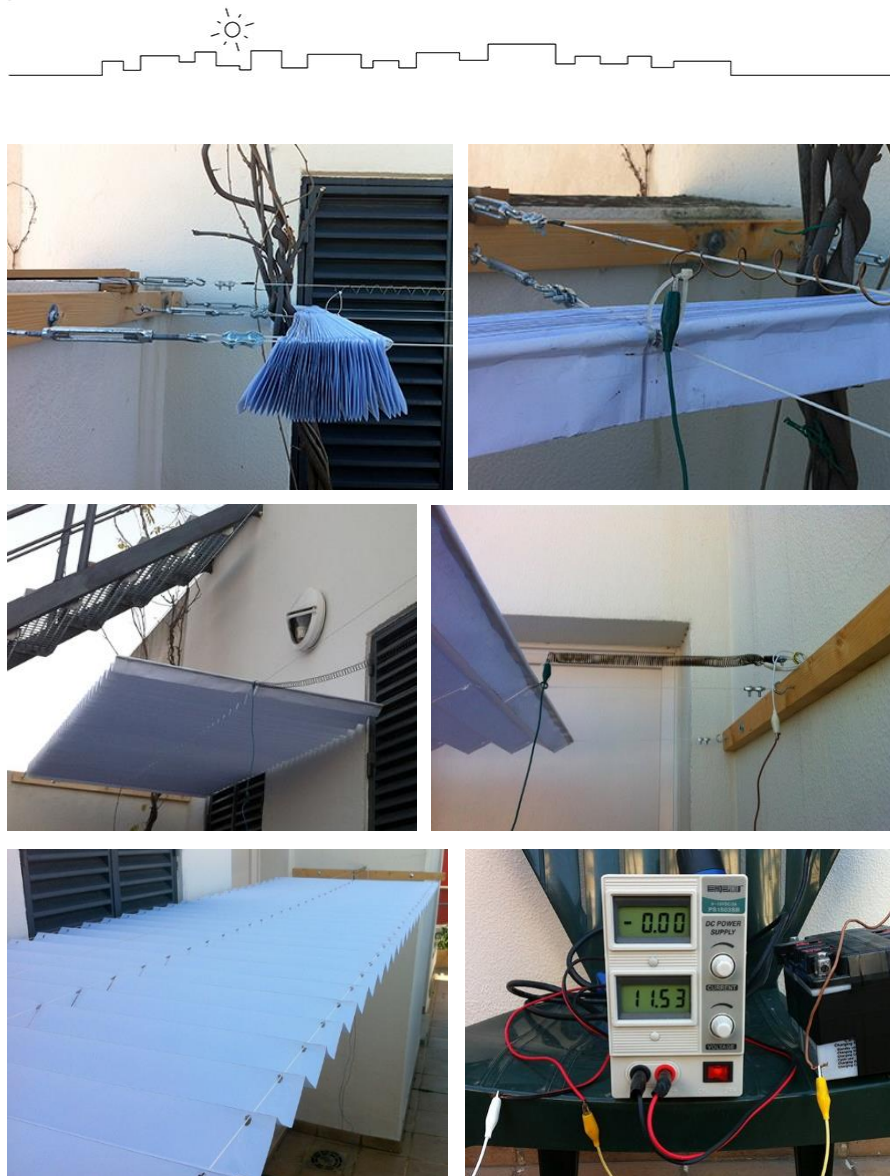


Fig. 191. Toldo de papel desplegándose y detalle de conexión eléctrica de muelle NiTiCu. Suministro eléctrico mediante fuente de alimentación variable

A un extremo del toldo se coloca una varilla de fibra de vidrio de 5mm de diámetro para rigidizar el mismo y conseguir así que, tirando de su centro, este avance por igual en sus dos extremos.

Para moverlo, se dispone un cuarto cable en el centro del toldo y elevado sobre este 5cm, ya que si no se hace así y solo se fija a sus extremos, éste adquirirá una flecha inadmisibles (en torno a los 40cm). Este cable sirve de sustento para el muelle SMA que se fija, por un lado a uno de los extremos y por el otro a la pared que delimita el espacio a cubrir. Este muelle servirá para el camino de ida del toldo, esto es, para activarlo y que de sombra. Para el camino de vuelta, inicialmente se colocará una pequeña polea en el extremo opuesto de la pared delimitadora del espacio. Esta polea permitirá que un recipiente de agua cuelgue de ella y llegue hasta el centro de la varilla rigidizadora. Cuando el SMA esté frío, la carga del recipiente de agua será mayor, provocando que el toldo se repliegue. Por el contrario, cuando el muelle de memoria de forma se caliente, este ejercerá una fuerza mayor y el toldo se pondrá en su posición de sombra.

Los cables de poliéster se tensan con unos pequeños tensores metálicos. De este modo, estos se mantendrán horizontales o al menos con una flecha mínima. Esto es importante para mejorar el funcionamiento del sistema, para que deslice bien el toldo y las fuerzas necesarias para su movimiento sean mínimas. Además, se elige el poliéster por su buen comportamiento al exterior además de su carácter aislante eléctrico.

El muelle SMA utilizado, tiene una temperatura de activación (A_f) de 45°C , un diámetro de cable de 1mm, diámetro de muelle de 16,3mm, separación entre vueltas de 1mm y número de vueltas de 140. Cuando está activo o en su estado austenítico tiene una longitud de 20cm inicialmente. Esta longitud aumenta hasta los 40cm en los primeros usos del mismo, permaneciendo estable posteriormente. Cuando no está activo o en su estado martensítico, el muelle se alarga hasta los 4m de longitud del espacio a cubrir.

Actualización 3.

Se ha realizado otra prueba de toldo. Esta ha consistido en construir una maqueta o más bien una prueba de concepto, para poder estudiar su funcionamiento con mayor comodidad (Fig. 192).

Una estructura ligera y móvil de madera de 200cm x 50cm, sirve de soporte a tres hilos de nylon de 0,6mm de diámetro, que se disponen longitudinalmente y se tensan. Uno en el centro y dos en los extremos, separados entre sí 24cm. El textil es 100% poliéster y tiene unas dimensiones de 49cm x 135cm. En él se fijan unas anillas de acero cincado de 10mm de diámetro con las que el textil cuelga de los hilos de nylon, simulando la estructura o instalación de un toldo común.

En la estructura soporte, hay dos travesaños que sirven para anclar los cables que sustentan al tejido. En los extremos de esta, separados 200cm, se fija un muelle de NiTi con temperatura de activación 45°C , diámetro de cable 1mm y diámetro de muelle 2cm. Dicho muelle tiene 104 vueltas y en su punto medio, en la vuelta 52, se conecta a la anilla central de la primera fila del toldo. Esta línea del toldo es móvil, mientras que la del extremo opuesto, se fija al travesaño de la estructura. Además, se dispone una barra de fibra de vidrio de pequeño diámetro (3mm) para dar rigidez en esta línea y que los tres puntos primeros se muevan homogéneamente. Esta barra es muy ligera y no aporta apenas peso al sistema. Se encuentra alojada en un doblez del textil y no interfiere con el resto de la instalación.

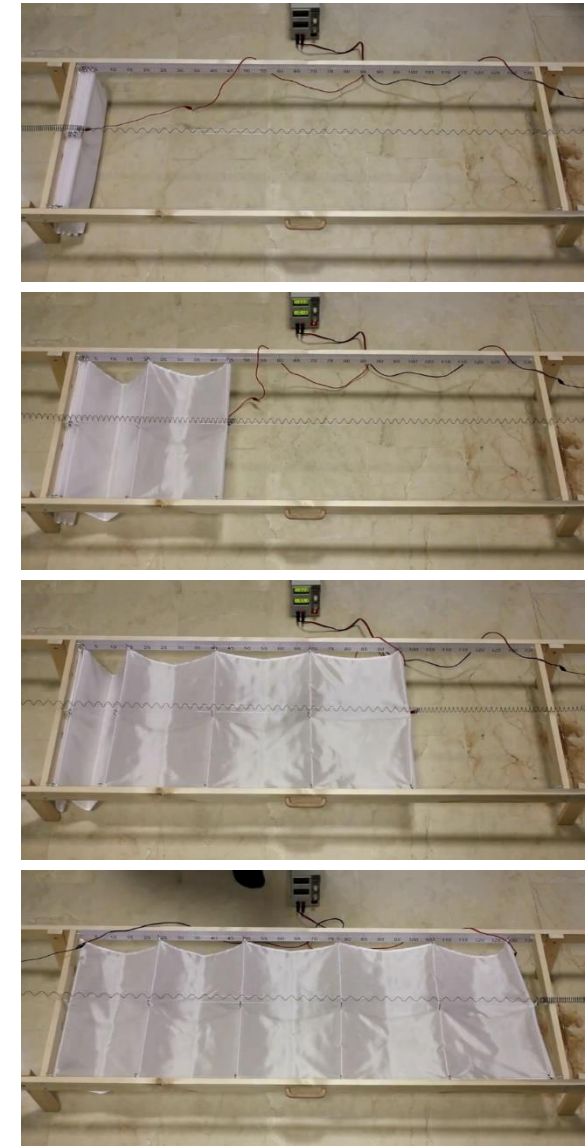


Fig. 192. Textil accionado por un muelle de NiTi

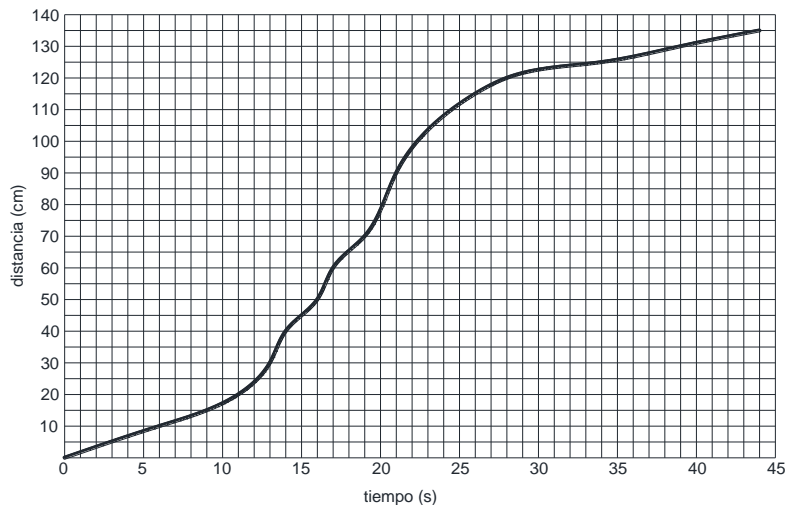
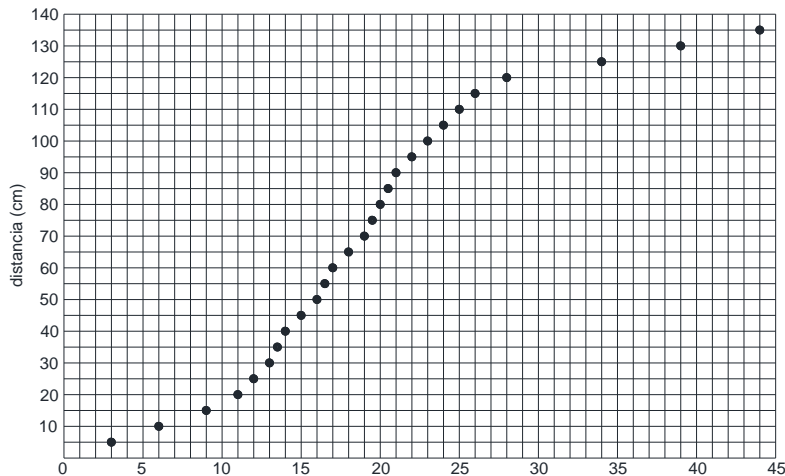


Fig. 193. Velocidad de actuación en Toldo inteligente

Los otros tres puntos del textil, se fijan a la estructura de madera con bridas de polímero, ya que estos puntos no se moverán.

A continuación se añade una fuente de energía. En este caso, se utiliza una fuente de alimentación eléctrica variable. De ella salen dos cables de alimentación. Uno de ellos se conecta a un extremo del muelle SMA y el otro se conecta en el centro del mismo y sobre el punto de fijación al toldo. Al suministrar 3A y 10V de corriente directa, la mitad del muelle se calienta y recupera la forma programada y contraída, mientras que la otra mitad permanece fría y se estira al máximo. Esto provoca el desplazamiento del toldo hacia un extremo.

Si repetimos la misma operación en la otra mitad del muelle, la mitad extendida se calentará y se contraerá y el toldo se desplazará los 1,35m hasta el otro extremo, devolviendo el textil a la posición inicial, para cerrar el ciclo completo.

No existe peligro de electrocución por contacto directo con el muelle, ya que la corriente eléctrica es de muy baja intensidad. El muelle SMA se puede tocar durante el funcionamiento del mismo sin ningún peligro, resultando seguro tanto para las personas como para los pequeños animales o aves que pudieran tocarlo. Lógicamente, la electricidad necesaria es muy poca (3A y 10V), solo la necesaria para calentar el material hasta los 45°C.

Todo el proceso ocurre de forma muy silenciosa, ya que no hay motores ni mecanismos. El único sonido producido es el rozamiento de las anillas con los cables de nylon, el cual resulta prácticamente inaudible.

En cuanto a la velocidad, en el arranque y durante los primeros segundos hasta que se calienta el muelle SMA, tiene una aceleración suave y progresiva, con velocidad inicial de unos 5cm/s, velocidad media de 10cm/s y una velocidad final de nuevo de 5cm/s hasta que se detiene (Fig. 193).

Obviamente, estas velocidades se pueden incrementar, si aumentamos la velocidad de calentamiento y fuerza del SMA, aunque esto implica suministrar mayor cantidad de electricidad al sistema. Esta velocidad de funcionamiento, se considera aceptable y comparada con la de los sistemas actuales que existen en el mercado es similar o superior. El tiempo total empleado por este toldo en recorrer los 1,35m es de 45s.

3.4.4 PARASOL INTELIGENTE

Otra posible aplicación para esta tecnología, es la creación de elementos urbanos generadores de sombra, diferentes de los toldos de calle. Serían elementos puntuales y agrupados, formando zonas de sombra. Éstos pueden tener la forma de una palmera o sombrilla y su funcionamiento sería el siguiente:

Por la mañana se activan los muelles de Nitinol permitiendo a los actuadores mover las hojas de la palmera artificial o sombrilla. Estas hojas se despliegan entonces hasta la posición de sombra, como en una palmera normal. Por la noche, los muelles de los actuadores se enfrían y las hojas se cierran en posición vertical.

De esta manera, se permite la visión del cielo y la liberación del espacio. Los parasoles se disponen en varias alturas e intercalados unos a otros para garantizar una zona de sombra homogénea y completa.

Se pueden implementar además, con luminarias para que, en la posición cerrada o nocturna, iluminen el espacio. La energía para esta iluminación, puede tener origen fotovoltaico, para garantizar que en ningún caso se va a aumentar la demanda de energía.

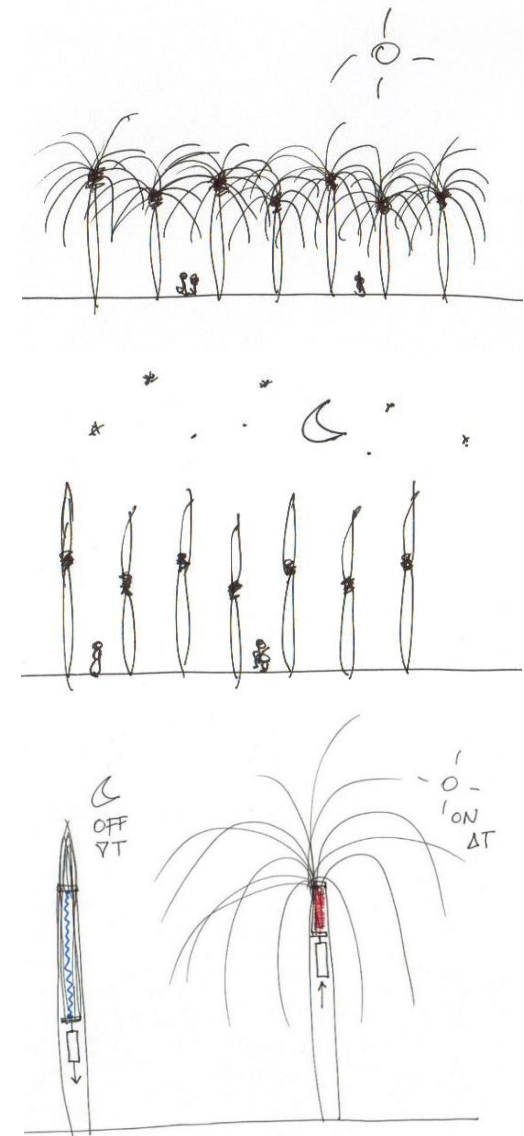


Fig. 194 Esquema de Parasol inteligente



En el sistema propuesto en la Fig. 194, un único muelle es el encargado del movimiento de todo el conjunto. Dentro del tronco hueco del parasol, las hojas se unifican en una pieza que sube y baja, a modo de pistón. Esto ocurre porque el muelle queda fijo en su parte superior y libre en la inferior. Cuando se calienta, se acorta y hace subir el pistón con las hojas. Cuando se enfría, desciende con la ayuda de una pequeña carga, colocada por debajo del mismo. Los cables eléctricos que alimentan el muelle, se alojan también en el interior del tronco y quedan ocultos a la vista.

La idea es que las hojas, cuando el sistema está desactivado o frío, están dentro del tronco, pero cuando el sistema se activa o calienta y al subir el pistón, como en este momento la mayor parte de la longitud de las mismas está en el exterior, éstas caen y se deforman por su propio peso y flexibilidad. Cuando se recogen, al tirar el muelle de ellas, lo hacen a la inversa y se van enderezando al ir entrando en el tronco, hasta quedar la mayor parte de su longitud, en el interior de éste.

Por lo tanto, para el camino de ida, para desplegar las hojas, se utiliza nitinol y para el camino de vuelta es la gravedad la encargada de devolver las mismas a su posición recogida.

Como las hojas están fabricadas de fibra de vidrio de 1 o 2 capas solamente, son muy ligeras y flexibles. Esta flexibilidad es idónea para combatir el viento ya que las hojas se deformarán elásticamente ante el empuje de éste, pero no romperán.

Queda por definir la fuente de alimentación eléctrica para este sistema. Podrían ser dos. La primera es conectarla directamente a la red general, pero en este caso el sistema sería demandante de energía para su funcionamiento y esto no es interesante porque se trata de no consumir recursos no renovables. La segunda manera de suministrar energía, sería mediante placas fotovoltaicas. En este caso toda esta energía sería suministrada por el Sol. Dado que la demanda de electricidad para activar el nitinol sería baja, la superficie de placa fotovoltaica no es grande y se puede integrar en la parte superior del tronco. El consumo de esta energía eléctrica sería inmediato sin necesidad de almacenamiento. No obstante, si se quisiera se podría almacenar para dar servicio a posibles luminarias que se instalen, aunque esto va en contra de la idea de poder ver el cielo nocturno, sin contaminación lumínica.

En el ejemplo propuesto, se ha pensado en algo parecido a una palmera cuyas hojas serían las generadoras de sombra, pero este esquema obviamente es susceptible de variar y las hojas podrían ser simplemente un elemento textil, con unos nervios que le ayuden a desplegarse, similares a las sombrillas de playa o las que se usan en terrazas de restaurantes y cafeterías, aunque de mayor tamaño.

El esquema de la estructura, es similar a la de un paraguas común, en el que unas varillas principales, están conectadas a otras secundarias. Cuando las primeras se mueven, empujan a las segundas, que están fijadas al elemento textil, el cual se despliega para cubrir de la lluvia. En este caso, el funcionamiento de la sombrilla solar de nitinol, sería igual solo que en vez de ser la mano humana

la que accione el mecanismo y abra el paraguas, sería un muelle SMA colocado en el eje del soporte, el encargado de hacer este trabajo. De nuevo, para el camino de vuelta, la gravedad cerraría estas sombrillas por la noche.

Estos elementos, se colocarían al tresbolillo en planta y a diferentes alturas, para crear una zona de sombra uniforme.

Esta idea, podría aplicarse en espacios como el de la Medina del Santo Profeta en Arabia Saudí (comentado anteriormente en el Estado del Arte). En este caso, las sombrillas actualmente instaladas para proteger del sol a los fieles y que funcionan con motores eléctricos, se pueden sustituir por este sistema basado en SMA, con varias ventajas, entre las que destaca el menor peso, en general, del sistema, lo que significa menor gasto energético para abrirlo y cerrarlo. Gasto energético que en todo caso es nulo, ya que es el sol el encargado de proporcionar dicha energía. Además, al ser un sistema mucho más ligero que las pesadas estructuras metálicas y robotizadas actuales, la velocidad de apertura y cierre sería mayor.

También se pueden utilizar en ciudades calurosas, como dispositivos de protección solar para todo tipo de funciones, tales como dar sombra a los vehículos estacionados en la calle o a los peatones que caminan por las aceras, a modo de árboles artificiales que se repliegan sobre sí mismos por la noche para poder contemplar el cielo y liberar al espacio de su cobertura diurna.

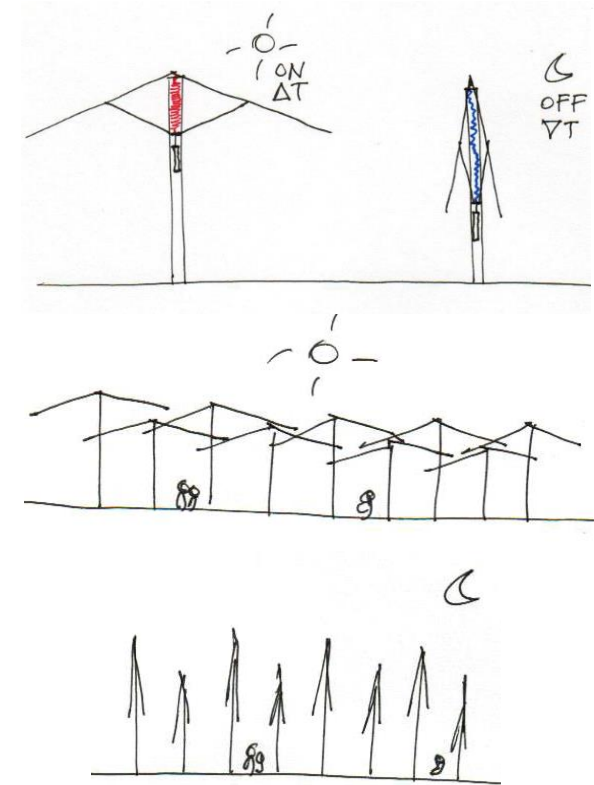


Fig. 195 Esquema de sombrillas inteligentes



Actualización 1.

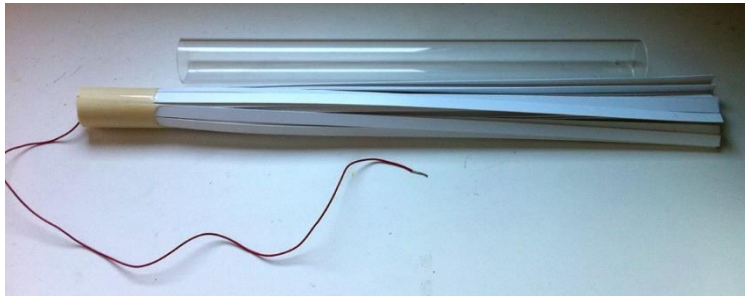


Fig. 196. Laminas de PVC unidas en la base con resina de poliuretano con conexión eléctrica y tubo de metacrilato para el tronco

Se ha fabricado un prototipo para probar el funcionamiento de esta idea. Para ello, se ha utilizado un tubo de metacrilato de 50mm de diámetro, 3mm de espesor y 500mm de longitud. Este será el soporte de la estructura y simula al tronco de la palmera inteligente. Se ha utilizado un material transparente para ver mejor el funcionamiento por dentro.

Para las hojas de la palmera o parasol, se han usado láminas de 500mm de longitud, 10mm de ancho y 1mm de espesor de espuma de PVC. Estas se disponen en capas radiales y concéntricas al eje del soporte. Todas ellas se unen en la base con resina de poliuretano rígida. Esta resina mantiene todas las hojas unidas, a la vez que sirve de contrapeso para el camino de vuelta de la palmera. En la cara superior de esta pieza base de resina, se fija uno de los extremos de un pequeño muelle de NiTi de 0,75mm de diámetro de cable y 6mm de diámetro de muelle, con una temperatura de activación de 45°C. El otro extremo se fija al final del tubo soporte, a un pequeño travesaño de fibra de vidrio. Ambos extremos del muelle de Nitinol se conectan a una fuente de alimentación eléctrica.

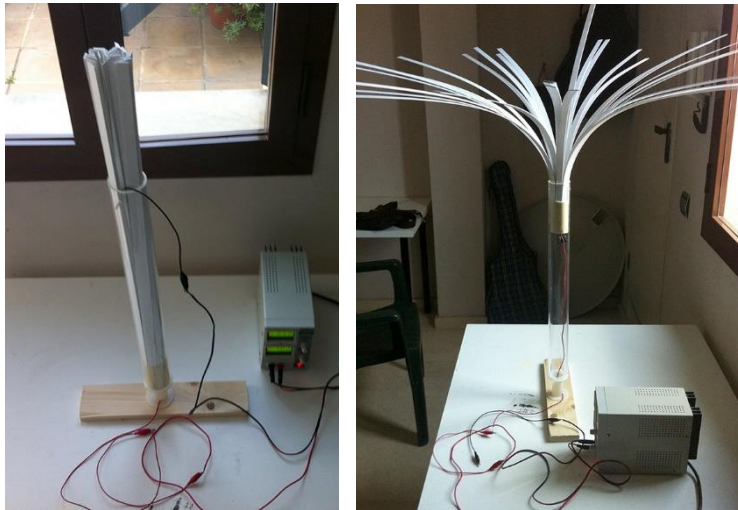


Fig. 197. Hojas de PVC dentro y fuera del tronco de metacrilato. Posiciones nocturna y diurna. Conexión a fuente de alimentación eléctrica variable

En la posición inicial, las hojas se encuentran dentro del tronco. La palmera entonces, es un elemento lineal que minimiza su proyección horizontal. Esta sería la posición nocturna, con el muelle frío y las hojas dentro de la palmera. Durante el día, el muelle se calienta y activa mediante electricidad directa. Esto hace que el muelle recupere su forma original (contraída) y, como tiene un extremo móvil y el otro fijo, la base de contrapeso que unifica las hojas se eleva haciendo que estas salgan al exterior, se abran y proporcionen sombra. Cuando llega la

tarde/noche y el muelle se enfría, éste se alarga por el peso de la base de resina con las hojas, haciendo que éstas entren en el tronco de la palmera de nuevo y cerrando así el ciclo diario.

De nuevo este sistema está actuado de forma activa. Cuando queremos activar la palmera, le aplicamos electricidad y cuando queremos desactivarla se la quitamos. Pero hay que insistir en que este sistema puede funcionar de forma pasiva. Para hacerlo debemos elegir la aleación adecuada de SMA, así como su temperatura de activación y su histéresis. Si queremos que estas palmeras funcionen de forma pasiva (sin intervención del usuario) podemos instalar nuestro muelle SMA y dotarlo de medios de sobrecalentamiento naturales como puede ser introducirlo en otro tubo transparente y cerrado, para que se produzca efecto invernadero y aumente la temperatura dentro del tronco o soporte.

En las pruebas realizadas no se han obtenido resultados del todo satisfactorios. En el momento de redacción de esta Tesis, se está trabajando en un modelo mayor, a escala 1:4 y con muelles mayores dimensiones y de mayor fuerza.

La generación de la sombra, corre a cargo de las hojas. Estas pueden ser más anchas, más estrechas o de diferentes formas. Lo ideal es que cuando estén dentro del tronco, estén todas juntas y ocupando el menor espacio posible, pero cuando están fuera, es deseable que desarrollen una gran superficie, para generar la máxima sombra. Además, deben ser lo más ligeras posibles, para optimizar la cantidad de SMA utilizado.

Se está trabajando para solventar pequeños problemas que surgen como por ejemplo el rozamiento provocado por el contacto de las hojas con el borde superior del tronco, que hace que el muelle tenga que trabajar más. Además, se ha reducido el diámetro de la base de resina para hacerlo menor al del tronco. Lo que sucedía es que la base no descendía, ya que ocupaba toda la sección del tubo. Con el diámetro menor el aire puede circular por los bordes de la pieza-base y no interferir así en su movimiento. También se podría haber mantenido el mismo diámetro y haber realizado orificios para permitir la circulación del aire.



Fig. 198. Detalle de conexión eléctrica del muelle NiTi en la base del parasol



3.4.5 DISPOSITIVOS DE TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA

Hemos visto, que el nitinol se activa al superar un determinado valor de temperatura. En realidad, esta activación no ocurre totalmente alcanzando ese valor, sino que se inicia en él y finaliza completamente, superado un cierto incremento de temperatura. Además, necesitamos también del frío para que la aleación vuelva a su estado martensítico y podamos completar un ciclo de actuación. Por lo tanto, necesitamos un diferencial térmico.

Si nos preguntamos dónde podemos encontrar ese diferencial de temperatura en nuestros edificios, inmediatamente podemos pensar en el sistema de abastecimiento de agua potable de los mismos y aquí es donde podemos aprovechar la energía del sol y usarla en espacios interiores, en forma de cualquier aplicación que se nos ocurra.

En España, desde la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación, el uso de sistemas de producción de agua caliente sanitaria mediante placas termo-solares ha aumentado considerablemente y hoy es usual que nuestros edificios dispongan de ellos.

Es importante porque, lo que se plantea ahora es robar calor de las tuberías para activar el nitinol. Por este motivo, en una instalación en la que la producción de A.C.S. fuera por electricidad, gas o cualquier otro recurso no renovable, no sería interesante, ya que ese robo de calor repercutiría directamente en un mayor consumo de ese gas o electricidad.

Sin embargo, cuando el agua caliente se produce en las placas termo-solares, todo ese calor proviene del Sol. Así, la idea es quitar calor a la tubería, para hacer funcionar dispositivos basados en nitinol sabiendo que el Sol asumirá gratuitamente ese incremento de consumo.

La temperatura del agua caliente del interior de la tubería, ronda los 60°C-70°C y la del agua fría, puede variar entre los 5°C, 10°, 15°C, 20°C o más dependiendo de varios factores como la época del año, localización geográfica o la propia disposición de la tubería (interior, exterior, etc.) pero lo importante es que tenemos el salto térmico que buscamos, que en el peor de los casos sería de 30°C o 40°C, suficientes para las aleaciones SMA.

Se podría usar esta idea, para diseñar pequeñas máquinas acopladas a las tuberías de agua caliente, para tomar calor y a las de agua fría para cederlo. Podrían ser incluso de un tamaño pequeño para poderlas ocultar en el propio cerramiento o paramento por el que discurren. Aunque la producción de electricidad de uno solo de estos dispositivos sería baja, se pueden colocar tantos como fuera necesario y conectarlos en serie, paralelo o combinación de ambos, para obtener el valor de energía eléctrica deseado.

Este sistema se podría implantar tanto en instalaciones de edificios existentes, como en obra nueva. Solo habría que “pinchar” estos dispositivos a lo largo de la tubería. La energía eléctrica producida, puede ser almacenada o consumida inmediatamente. En este caso, se podría utilizar, por ejemplo, para alimentar pequeñas luminarias de bajo consumo en sótanos o espacios en los que no hay luz diurna, a modo de iluminación permanente y gratuita. Obviamente el sistema se alimenta del calor de la tubería. Calor que es producido por el Sol durante el día. Durante la noche, esto no sería posible, a menos que durante el día se haya producido la suficiente cantidad de agua caliente. Y así es en muchas instalaciones, en las que usualmente un calentador de apoyo, mantiene constante la temperatura de este volumen de agua caliente acumulado durante el día. En este caso, estaríamos consumiendo electricidad para generar o mantener un calor que después queremos volver a transformar en electricidad y esto sería un error. En vez de eso, podemos acumular parte de esa energía eléctrica producida con nitinol en baterías para su posterior funcionamiento nocturno.

En la actualidad, existen diversas maneras de reutilizar las aguas grises de nuestros edificios. Recirculándolas en vez de tirarla directamente a la red de saneamiento, podemos sacar mayor provecho de ellas. En estos casos también es compatible el uso de dispositivos de nitinol.

También se podrían utilizar, cuando hay excedente de agua caliente producida por placas solares. Es habitual, en algunas instalaciones, el hecho de tirar este excedente a una piscina para no dañar la instalación. Todo ese calor, se podría aprovechar para transformarlo en electricidad. El nitinol lo utilizaría para funcionar liberando a las placas de ese excesivo calor que podría estropearlas.

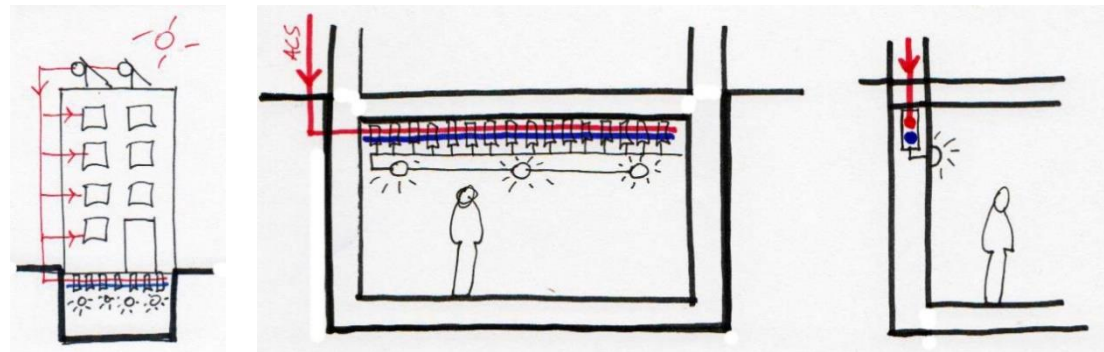


Fig. 199. Ejemplo de dispositivos de transformación de energía térmica, en energía eléctrica para iluminación en sótanos

Con energía geotérmica, lógicamente también se pueden activar estas aleaciones. De nuevo solo necesitamos un diferencial de temperatura. Los dispositivos podrían tomar el calor del subsuelo y el frío del exterior. Se situarían en el límite entre estos pozos geotérmicos y el exterior, normalmente a cota de planta baja de las edificaciones por lo que podrían ir ocultos, en pequeñas arquetas y no interferir así en el espacio útil. Los dispositivos de nitinol estarían conectados a la red eléctrica produciendo continuamente electricidad. Hay que recordar de nuevo que la producción sería pequeña pero constante, además de ser un sistema pasivo y sin apenas mantenimiento, lo cual lo hace más interesante.



4

CONCLUSIONES



4 CONCLUSIONES

4.1) Metodología de trabajo adecuada.

Se ha establecido una metodología de trabajo mixta, que parte del conocimiento de estos materiales, basado en la experimentación (empírica) y el análisis mediante cálculos por Elementos Finitos. Los diseños de aplicaciones con materiales SMA en Arquitectura, se proyectan y predimensionan. Después se calculan y corrigen mediante cálculos informáticos. Por último, se construyen a escala real y se prueban en condiciones reales de servicio.

Para el actuador diseñado y aplicado al caso de toldo de ventana, se ha seguido esta metodología, la cual, ha resultado ser adecuada y efectiva. Se estableció la necesidad de dotar de movimiento a este elemento arquitectónico, se diseñó el actuador SMA idóneo, se calculó mediante ANSYS y se construyó un prototipo para ser aplicado y testeado en un modelo a escala real.

Se concluye que este proceso es válido para otras posibles investigaciones.

4.2) Posibilidad real de diseño, cálculo y construcción de un dispositivo actuador, basado en SMA y aplicado en Arquitectura y Urbanismo.

Se ha diseñado, calculado y construido un actuador basado en aleaciones con memoria de forma y superelasticidad. Se ha probado con éxito en las aplicaciones para el mismo que nos habíamos propuesto en nuestro campo tecnológico.

El diseño, aprovecha las dos principales propiedades del Nitinol, memoria de forma y superelasticidad, en un único dispositivo de actuación y después de haber realizado los cálculos mediante el método de Elementos Finitos (realizado con el software Ansys), junto con la construcción de un actuador a escala real, han permitido el correcto contraste entre simulación y realidad, con las ventajas que ello supone.

Se utilizó el actuador en varios casos analizados en esta Tesis, como ejemplos de aplicación y de nuevo la conclusión es que es posible el empleo de actuadores basados en SMA y emplearlos con éxito en Arquitectura y Urbanismo.



4.3) Viabilidad de las aplicaciones de las SMA en Arquitectura y Urbanismo.

Se ha analizado el Estado del Arte y se han estudiado los casos en los que estos materiales SMA se han empleado con éxito, en diferentes campos, además del de la Arquitectura, donde las obras construidas, que disponen de sistemas basados en SMA, demuestran su buen funcionamiento.

A partir de este análisis y tras realizar diversas pruebas, en prototipos de elementos arquitectónicos generadores de sombra, como toldos o parasoles, el investigador ha podido comprobar la viabilidad de la aplicación de estos sistemas en Arquitectura.

Se han obtenido resultados positivos. En el caso del toldo de ventana, se demuestra su correcto diseño, mediante la construcción de un modelo a escala real, el funcionamiento de apertura y cierre del mismo, basado en un actuador elaborado con Nitinol. La activación de dicho actuador, se ha realizado con pleno éxito.

En el caso del toldo de patio o calle, se han realizado pruebas en un toldo a escala real, donde se obtuvieron resultados satisfactorios.

En ambos casos, los sistemas resultaron ser silenciosos y eficaces, con escasa demanda de energía eléctrica y suavidad en el movimiento. Por lo tanto, la conclusión es que queda demostrada la viabilidad del empleo de aleaciones con memoria de forma y superelasticidad, en Arquitectura y Urbanismo.

4.4) Optimización y simplicidad.

Los dispositivos y sistemas de actuación diseñados, han demostrado tener grandes cualidades. Destaca la simplicidad de sus partes o componentes que, para el caso del actuador diseñado, solo se compone de dos. La simplicidad, en cualquier máquina o sistema es siempre una garantía de reducción de la posibilidad de fallo.

Por otro lado, la característica de biocompatibilidad de las aleaciones SMA, las hace inmunes a la corrosión, lo cual es de gran interés para sistemas al exterior.

Además, los dispositivos y sistemas de actuación se diseñan a la carta. Para cada necesidad concreta, se desarrolla un actuador específico, aumentando la optimización del material, fuerzas y demanda de energía.



4.5) Conclusiones finales.

Quizá el mayor aporte de esta investigación, es el descubrir y demostrar, que los elementos arquitectónicos ligeros y generadores de sombra, como los textiles horizontales o toldos, pueden actualizarse y mejorarse, con la implementación de la cualidad de ofrecer una respuesta inteligente, ante un estímulo externo. Este activador es el calor, que transforma el estado del material con memoria de forma, para generar movimiento y sombra sobre la Arquitectura y el espacio urbano.

Se ha demostrado que esto es posible de manera activa, aplicando calor a los sistemas SMA directamente u obteniendo ese calor por efecto Joule. Además, se ha comprobado la mínima demanda de energía de estos sistemas y dispositivos NiTi, así como su escaso mantenimiento, alta fiabilidad y mínimo ruido.

Por último, como se ha expuesto anteriormente, queda demostrada la viabilidad de estos sistemas en Arquitectura y Urbanismo.

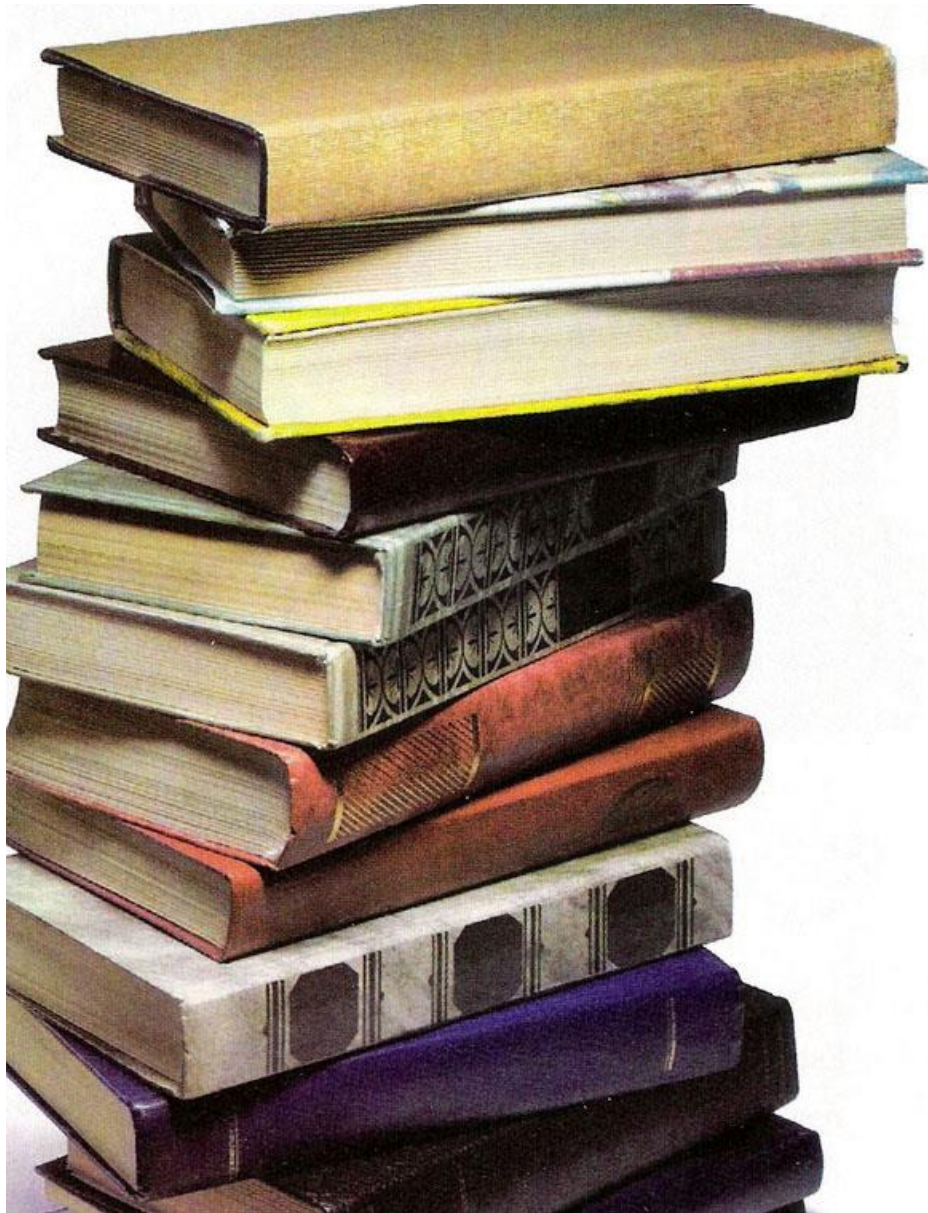
4.6) Futuras líneas de investigación.

En el futuro, se debería ampliar la investigación, en el desarrollo de sistemas auxiliares y de apoyo a las SMA. Superficies reflectantes del Sol, colores, materiales y envolventes de los sistemas NiTi, para potenciar y acelerar su activación, de manera pasiva.

También será interesante, cuantificar el descenso de temperatura que estos sistemas proporcionan, en las diferentes situaciones (patio interior de edificio, calle, plaza, etc.) y traducir ese descenso en ahorro en climatización, para los casos de espacios interiores y cerrados, y en términos de aumento de confort, para los casos de espacios exteriores.

La utilización de aleaciones con memoria de forma, combinadas con otros materiales como fibra de carbono/vidrio y resina epoxi, siliconas o grafeno, entre otros, se presenta de gran interés para el futuro.

Así mismo, los dispositivos transformadores de energía basados en NiTi, que no se han estudiado en profundidad, son otra prometedora línea de investigación. Estos dispositivos, se alimentarán del calor de los edificios y lo transformarán en energía eléctrica, lista para ser consumida o almacenada para hacerlo posteriormente. De esta manera, los edificios serán los centros de generación de energía del futuro.



5

BIBLIOGRAFÍA



5 BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Allegranza, C., Gaillard, L., Le Letty, R., Patti, S., Scolamiero, L., & Toso, M. (2014). Actuators for Space Applications: State of the Art and New Technologies. *Actuator2014*, (págs. 283-288). Bremen.
- Anson, T. (1999). Shape Memory Alloys - Medical Applications. *Materials World*, 7(12), 745-747.
- Architekturburo, E. G. (2007). *www.giselbrecht.at*. Recuperado el 12 de 11 de 2014, de http://giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html#
- Ardila, D., Luna H., D., Luna, I., & Begle, M. (2013). *S8 Advanced Materials*. Recuperado el 16 de 01 de 2015, de <http://www.iaacblog.com/maa2012-2013-advanced-materials/2013/06/advanced-materials-shape-memory-alloy/>
- Banks, R. (2012). *www.youtube.com*. Recuperado el 2012, de <https://www.youtube.com/watch?v=oKmYqUSDch8>
- Barbero Bernal, L. I. (2004). *Cyclic Behavior of Superelastic Nickel-Titanium and Nickel-Titanium-Chromium Shape Memory Alloys*. Atlanta, Georgia, USA: Georgia Institute of Technology. Recuperado el 2014
- Bar-Cohen, D. Y. (1999). *www.nasa.gov*. Recuperado el 05 de 11 de 2014, de <http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-armwrestling.htm>
- Bar-Cohen, J. (2002). Electro-active polymers: current capabilities and challenges. *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium*. 4695-02. San Diego, CA: SPIES. Recuperado el 10 de 12 de 2014, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.77.8128&rep=rep1&type=pdf>
- Bargsten, C. J., & Gibson, M. T. (2011). *NASA Innovation in Aeronautics*. Washington: NASA. Recuperado el 08 de 2014, de <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080014174.pdf>
- Baughman, R. (26 de 07 de 2011). *www.youtube.com*. Recuperado el 21 de 09 de 2014, de <https://www.youtube.com/watch?v=xMGXqT0LWUI&index=2&list=PLrIFWZMbusyXglh4KUaL538JnSI5k3-LJ>
- Berzowska, J., & Coelho, M. (2005). *Kukkia and Vilkas: Kinetic Electronic Garments*. Osaka: iswc, pp.82-85, Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05).
- Braz Fernandes, F., & Dragos Moldovan, I. (2010). Caracterização Estrutural, Térmica E Mecânica De Ligas Ni-Ti com Memória de Forma para Aplicação em Engenharia Civil. *Congresso Reabilitar-2010 - Conservação e Reabilitação de Estruturas, At LNEC*. Lisboa. Recuperado el 2015, de <http://www.researchgate.net/publication/27274598>
- C., C., Shahverdi, M., Brönnimann, R., Leinenbach, C., & Motavalli, M. (2014). Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 56, 94-105.
- Callejas, M., & Calero, J. (2014). Nitinol Based Actuator for Architectural Technology in Hot Climate Countries. En H. Borgmann (Ed.), *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 702-705). Bremen. doi:10.13140/2.1.2912.0805




- Camelia, S., & Fleser, T. (2010). Clinical and Mechanical Characteristics for Orthodontic Nitinol Wires. *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*, 4(3).
- Cladera, A., Weber, B., Leinenbach, C., Czaderski, C., Shahverdi, M., & Motavalli, M. (2014). Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: an Overview. *Construction and Building Materials*, 63, 281-293.
- Conrad, J. M. (2005). *Stiquito Controlled! Making a Truly Autonomous Robot*. IEEE Computer Society.
- DeviceMed. (09 de 2014). La chaussure... à mémoire de forme. *DeviceMed*(5), 22. Recuperado el 02 de 03 de 2015, de www.devicemed.fr
- Di Leo, C. V. (2009). Nitinol-Reinforced Shape-Memory Polymers. Chicago, USA: Massachusetts Institute of Technology MIT.
- Díaz, I. M., & Orjuela, E. C. (2012). *Diseño conceptual y diseño de contenidos de una prenda inteligente*. Chía - Cundinamarca: Universidad de La Sabana.
- Divringi, K., & Ozcan, C. (2009). *Advanced Shape Memory Alloy Material Models for ANSYS*. Sunnyvale, CA: Ozen Engineering Inc.
- Duerig, T. (1990). Applications of Shape Memory. *Materials Science Forum*. 56-58, pp. 679-692. Switzerland: Trans Tech Publications.
- Duerig, T., & Pelton, A. (1994). Ti-Ni Shape Memory Alloys. In *Materials Properties Handbook Titanium Alloys* (pp. 1035-1048). NDC.
- Duerig, T., & Wholey, M. (2002). A Comparison of Balloon and Self-Expanding Stents. *Minimally invasive therapy & allied technologies*, 4(11).
- Duerig, T., Melton, K., Stoeckel, D., & Wayman, C. (1990). *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Essex, UK: Butterworth-Heinemann Ltd.
- Duerig, T., Pelton, A., & Stoeckel. (s.f.). The Use of Superelasticity in Medicine. *Metall*, 9(96), 569-574.
- Farzaneh, S., Fitoussi, J., Lucas, A., Bocquet, M., & Tcharkhtchi, A. (2013). Shape Memory Effect and Properties Memory Effect of Polyurethane. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(5), 3240-3249.
- Fasching, A. A. (2015). *An Evaluation of a NiTiCo Alloy and its Suitability for Medical Device Applications*. Lainate (Milán): SAES Getters. Recuperado el 2015
- Ford, D., & White, R. (1995). Thermomechanical Behavior of 55Ni45Ti Nitinol. En E. S. Ltd. (Ed.), *Acta mater*. 44, No. 6, págs. 2295-2307. Urbana, Illinois (USA): Acta Metallurgica Inc. Recuperado el 2014
- Galperin, Y. (2001). *Introduction to Modern Solid State Physics*. Blindern, Oslo: Department of Physics, P.O.Box 1048.
- George B. Kauffman, I. M. (1996). The Story of Nitinol. *Chem Matters*, 2(2), 1-7.
- Goulthorpe, M., & Architects, d. (n.d.). *Hyposurface*. Retrieved 01 27, 2014, from <http://www.hyposurface.org/>
- Haines, C., Lima, M., Spinks, G., Foroughi, J., Madden, J., Kim, S., . . . Baughman, R. (21 de 02 de 2014). Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread. *Science*, 343, 868-872. doi:0.1126/science.1246906

- 
- Holschuh, B., Obropta, E., & Newman, D. (2014). Low Spring Index NiTi Coil Actuators for Use in Active Compression Garments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1-14.
- Huang, H., Hu, J., & Zhu, Y. (30 de 01 de 2015). Shape-Memory Biopolymers Based on b-Sheet Structures of Polyaniline_Segments Inspired by Spider Silks. *Macromolecular Journals*. doi:10.1002/mabi.201200306
- Huang, W. (1998). *Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures*. Cambridge: Peterhouse. Recuperado el 2014
- Hubert, A., Calchand, N., Le Gorrec, Y., & Gauthier, J.-Y. (08 de 2012). Magnetic Shape Memory Alloys as smart materials for micro-positioning devices. *Advanced Electromagnetics*, 1(2), págs. 75-84.
- Hübler, M., Nissle, S., Gurka, M., & Breuer, U. (2014). Load-Conforming Design and Manufacturing of Active Hybrid fiber Reinforced Polymer Structure with Integrated Shape Memory Alloy Wires for Actuation Purposes. *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 222-225). Bremen.
- Hutchinson. (2014). *www.htchmfg.com*. Recuperado el 2014, de <http://www.htchmfg.com/how-sma-ois-works.html>
- IWU, F. I. (13 de 04 de 2015). *www.tendencias.net*. Recuperado el 14 de 04 de 2015, de http://www.tendencias21.net/Llegan-las-fachadas-inteligentes-que-ayudan-a-ahorrar-energia_a40190.html
- Johnson, A. (1978). Memory Alloy Heat Engine and Method of Operation. En M. Goldstein, & L. McNamara (Ed.), *Proceedings of the Nitinol Heat Engine Conference*, (págs. 2-5). Silver Spring, Maryland, USA.
- Kelloggs, J. (s.f.). *www.kelloggsresearchlabs.com*. Recuperado el 23 de 01 de 2015, de <http://www.kelloggsresearchlabs.com/Nitinol/Raw-Material>
- Khoo, C. K., Burry, J., & Burry, M. (2011). Soft Responsive Kinetic System. An elastic transformable architectural skin for climatic and visual control. *Integration Through Computation* (pp. 334-341). Acadia 2011 Proceedings.
- Khoo, K., Salim, F., & Burry, J. (2012). Designing Architectural Morphing Skins with Elastic Modular Systems. *International Journal of Architectural Computing*, 09(04), 397-419.
- Kubrick, S. (Dirección). (1968). *2001: Una odisea del espacio* [Película]. UK-USA.
- Kunze, J., Motzki, B., Holz, B., York, A., & Seelecke, S. (2014). Realization of Vacuum Gripper System Using Shape Memory Alloy Wires. *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 210-213). Bremen.
- Lai, A., Du, Z., Gan, C., & Schuh, A. (2013). Shape Memory and Superelastic Ceramics at Small Scales. *Science*, 341(10.1126), 1505-1508.
- Levy, D. (11 de 02 de 2015). *www.diariodesevilla.com*. Recuperado el 12 de 02 de 2015, de <http://www.diariodesevilla.es/article/tecnologia/1960342/vidrio/inteligente/con/sello/espanol.html>
- Ley, R., & G. Stein, J. (01 de 08 de 2009). *www.reefseries.com*. Recuperado el 24 de 01 de 2015, de http://www.reefseries.com/downloads/Reef_Ley_Stein.pdf



- Lichtheim, M. (1973). *Ancient Egyptian Literature: Volume II: The New Kingdom* (Vol. II). Los Angeles, USA: University of California Press.
Recuperado el 12 de 06 de 2014
- Liu, W., Chen, W., Yang, L., Wang, Y., Zhang, L., Zhou, C., . . . Ren, X. (2006). Electro-shape memory effect in hybrid doped BaTiO₃ ceramics. *Materials Science and Engineering, A 438-440*, 350-353.
- Melcor. (2000). *Thermoelectric Handbook*. Trenton, NJ, USA. Recuperado el 2014
- Menges, A. (2010). Performative Wood: Integral Computational Design for a Climate-Responsive Timber Surface Structure. In M. Mostafavi, & G. Doherty, *Ecological Urbanism* (pp. 522-527). Lars Müller Publishers.
- Mercier, O., Melton, K., Gotthardt, R., & Kulik, A. (1982). Dynamic Young's modulus vs temperature. *Conf. Solid-Solid Phase Transformations, H.I. Aaronson; D.E. Laughlin; R.F. Sekerka; C.M. Wayman. Ed. AIME p 1259*, (pág. 1259).
- Midé. (24 de 11 de 2014). *www.midetechnologies.com*. Recuperado el 2014, de <http://www.midetechnologies.com/shape-memory-2/shape-memory-sensoractuator/sma-emergency-sprinkler-valve/>
- Mills, J. W. (1993). *"Stiquito: A Small, Simple, Inexpensive Hexapod Robot"*. Computer Science Department. Indiana: Indiana University.
- Ministerio de Industria, E. y. (s.f.). IDAE. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de IDAE: <http://www.idae.es/index.php/idpag.23/re/menu.344/mod.pags/mem.detalle>
- Minner, K. (2011). *"Moving Homeostatic Facade Preventing Solar Heat Gain"*. Retrieved 01 24, 2014, from ArchDaily: www.archdaily.com
- Miyazaki, S., & Otsuka, K. (1986). Electric resistance vs temperature. *Metall. Trans. A*, 17, 53.
- NASA. (2007, 09 28). *YouTube*. (NASA) Retrieved from <http://www.youtube.com/watch?v=vR3T8mdpTI>
- Nava Rodríguez, N., Collado, M., & Cabás, R. (2014). Qualification Campaign of New Pin Puller and HDRM Based on Shape Memory Alloy Technology. *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 471-474). Bremen.
- Nhan Nguyen. (2010). *Elastically Shaped Future Air Vehicle Concept*. Moffett Field, California: NASA Ames Research Center.
- Nouvel, J. (1987). *jeannouvel.com*. Recuperado el 25 de 09 de 2014, de <http://www.jeannouvel.com/>
- Ocel, J., DesRoches, R., León, R., Hess, W., Krumme, R., Hayes, J., & Sweeney, S. (05 de 2004). Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys. *Journal of Structural Engineering*, 130(5), 732-740. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:5(732)
- Orambra. (2011). *www.orambra.com*. Recuperado el 05 de 08 de 2014, de <http://www.orambra.com/~prairieHouse.html>
- Orthokeratology, E. A. (2014). *www.eurok.eu*. Recuperado el 14 de 04 de 2015, de <http://www.eurok.eu/>
- Otani, S., Hiraishi, H., Midorikawa, M., Teshigawara, M., Fujitani, H., & Saito, T. (2000). Development of Smart Systems for Building Structures. Newport Beach: SPIE's Seventh Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, conference 3988 Smart Systems for Bridges, Structures and Highways.

- 
- Patel, H., & Turner, T. (14 de 10 de 2003). *www.mscsoftware.com*. Recuperado el 02 de 08 de 2014, de http://web.mscsoftware.com/events/vpd2003/na/proceedings/Tues_Desoto_1545_Structures/2003-74_Turner_Patel.pdf
- Patterson, G., & Sobral, M. (12 de 2007). Efecto Peltier. *Laboratorio 4 - Dpto. Física*, 2. Recuperado el 11 de 2014
- Pline, A. (2007, 11 30). *Designing the 21st Century Aerospace Vehicle*. (NASA) Retrieved 01 21, 2014, from <http://www.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/morphing.html>
- Pott, P., & Schlaak, H. (2014). Actuators from Head to Toe - Biomedical Applications of New Actuators. *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 149-156). Bremen.
- Rasch, D. B. (n.d.). *SL Rasch. Institute for Scientific Architecture*. Retrieved 02 14, 2014, from <http://www.sl-rasch.de/>
- Rees, S. M. (Dirección). (2005). *Es este nuestro último siglo?* [Película]. UK. Recuperado el 15 de 09 de 2014, de https://www.ted.com/talks/martin_rees_asks_is_this_our_final_century?language=es#t-834364
- Ridgway Banks, inventor del primer motor de calor con Nitinol en 1973. (s.f.).
- Ritter, A. (2007). *Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*. Basel, Suiza: Birkhäuser. Recuperado el 02 de 09 de 2014
- Rottiers, W., Van den Broeck, L., Peeters, C., & Arras, P. (2011). Shape Memory Materials and their Applications. Samara, Russia: Korolev's readings: conference proceedings pages 250-251.
- Ruiz, I. R. (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el Movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)* (Vol. Tomo I). Alicante: Universidad de Alicante.
- Ruiz-Geli, E. (2010). *www.ruiz-geli.com*. Recuperado el 12 de 06 de 2013, de <http://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic>
- Sandoval, J. (2012). *You Tube*. Recuperado el 10 de 09 de 2014, de https://www.youtube.com/watch?v=-X_KxijpJT0
- Sato, N. (. (14 de 01 de 2015). *Tu Blog de Diseño*. Obtenido de http://tublogdediseno.blogspot.com.es/2013_11_01_archive.html
- Schiepp, T., Maier, M., Pagounis, E., & Laufenberg, M. (2014). Controlling Dynamic Behaviour of Magnetic Shape Memory Based Actuators. *14th International Conference on New Actuators*, (págs. 116-118). Bremen.
- Siret, D., & Harzallah, A. (2006). *Architecture et contrôle de l'ensoleillement*. Nantes: IBPSA France. Recuperado el 05 de 03 de 2015
- Stack, A., Goulding, J., & Owen, J. (03 de 03 de 2000). *Solar shading for the European climates*. Recuperado el 18 de 09 de 2014, de <http://www.buildup.eu/es/publications/7850>
- Stanco, R. (20 de 01 de 2015). *Geek Alerts*. Obtenido de www.geekalerts.com/vagra-lamp/
- Stein, J., & Ley, R. (2010). *www.radical-craft.com*. Recuperado el 06 de 11 de 2014, de <http://www.radical-craft.com/index.html>
- Stoeckel, D. (1990). Shape Memory Actuators for Automotive Applications. *Materials and Design*, 11(6).
- Stoeckel, D. (1992). Shape Memory Actuators Improve Car Performance. *Springs*, 31.




- Stoeckel, D. (1995). The Shape Memory Effect - Phenomenon, Alloys and Applications. Proceedings: Shape Memory Alloys for Power Systems EPRI pp.1-13.
- Stoeckel, D., & Yu, W. (1990, 09). Superelastic Ni-Ti Wire. *Wire Journal International*, 6.
- Sung, D. K. (2009). *Skin Deep: Breathing Life into the Layer between Man and Nature*. Washington D.C.: AIA report on university research volume 3.
- Tesla, N. (Junio de 1900). The Problem of Increasing Human Energy. *Century Illustrated Magazine*.
- Teslonian, M. (2013). *Homemade Thermal electric generator 250mv. cell constuction*. Obtenido de www.youtube.com: <https://www.youtube.com/watch?v=gdzRktn7j3A>
- Teslonian, M. (2013). *How to make a thermoelectric generator from nitinol wire and copper*. Recuperado el 15 de 07 de 2014, de www.youtube.com: <https://www.youtube.com/watch?v=bnQpl-5cca8>
- Tobushi, H., Hayashi, S., Sugimoto, Y., & Date, K. (2009). Two-Way Bending Properties of Shape Memory Composite with SMA and SMP. *Materials*, 1180-1192. Recuperado el 14 de 09 de 2015, de www.mdpi.com/journal/materials
- TVE (Dirección). (2015). *Las cinco claves. Quinta parte: El Sol* [Película]. España. Recuperado el 2015, de <http://www.rtve.es/alaharta/videos/documenta2/documenta2-cinco-claves-5-parte-sol/3250320/>
- UE. (19 de 05 de 2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, págs. L 153/13-L 153/35.
- Westerhoff, J. (09 de 01 de 2015). *Westerhoff Ontwerp*. Obtenido de www.jurgenwesterhoff.com
- Wu, M. H. (2001). Fabrication of Nitinol Materials and Components. *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies* (pp. 285-292). Kunming, China: Memry Inc.
- Yuan, S. (2014). *www.dornob.com*. Recuperado el 22 de 01 de 2015, de <http://dornob.com/heat-actived-paint-for-color-changing-interior-designs/>

Otra bibliografía de interés:

- Sherif M.S.E.. (21/01/2013). **“Smart structures and material technologies in architecture applications”**. Academic Journals, 8(31), 1512-1521. 25/06/2014, De <http://www.academicjournals.org/SRE>
- Berglin, L.. (2013/11/06). **“Smart Textiles and Wearable Technology - A study of smart textiles in fashion and clothing. A report within the Baltic Fashion Project”**. Swedish School of Textiles, University of Borås, -, 1-34. 12/01/2014, De <http://www.hb.se/THS/>
- Yee Harn Teh. (2008). **“Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators.”** Tesis. Department of Information Engineering ANU College of Engineering and Computer Science: The Australian National University
- Leng, J.; Du, S.. (2010). **“Shape-Memory Polymers and Multifunctional Composites.”** Florida: CRC Press ISBN: 13: 978-1-4200-9020-8
- Bellia, L.; Marino, C.; Minichiello, F.; Pedace, A.. (2014). **“An overview on solar shading systems for buildings.”** Energy Procedia, 62, 309-317 Online en: www.sciencedirect.com
- Mingallon, M.; Ramaswamy, S.. (2012). **“Bio-Inspired Self-Actuating Composite Materials.”** Canadá, India: Intech. DOI: 10.5772/47860 <http://www.intechopen.com/books/composites-and-their-applications/bio-inspired-self-actuating-composite-materials>
- Bellia, L.; De Falco, F.; Minichiello, F.. (2013). **“Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates”**. Applied Thermal Engineering, 54, 190-201. 13/02/2014, De www.elsevier.com/locate/apthermeng
- PHYSIBEL - Dr.ir. Piet Standaert. (2005). **“Energy saving and CO2 reduction potential from solar shading systems and shutters in the EU-25.”** 2014, de European Solar Shading Organization Sitio web: <http://www.es-so.com/science/research>
- ES-SO Position Paper. (2012). **“Solar shading is essential for low energy buildings.”** 2014, de European Solar Shading Organization Sitio web: <http://www.es-so.com/new/archived/266-launching-es-so-position-paper-solar-shading-is-essential-for-low-energy-buildings>
- Konstantinos Andrianesis, Yannis Koveos, George Nikolakopoulos and Anthony Tzes (2010). **“Experimental Study of a Shape Memory Alloy Actuation System for a Novel Prosthetic Hand”**, Shape Memory Alloys, Corneliu Cismasiu (Ed.), ISBN: 978-953-307-106-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/shapememory-alloys/experimental-study-of-a-shape-memory-alloy-actuation-system-for-a-novel-prosthetic-hand>
- Malekzadeh, K.; Mozafari, A.; Ghasemi, F.A.. (2014). **“Free Vibration Response of a Multilayer Smart Hybrid Composite Plate with Embedded SMA Wires.”** Latin American Journal of Solids and Structures, 11, 279-298. 2015, De www.lajss.org
- Österbacka, R.; An, C.P.; Jiang, X.M.; Vardeny, Z.V.. (2000). **“High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%.”** Science, 287, 836-839. 2014, De www.sciencemag.org
- Robert Zarnetta,* Ryota Takahashi, Marcus L. Young, Alan Savan, Yasubumi Furuya, Sigurd Thienhaus, Burkhard Maaß, Mustafa Rahim, Jan Frenzel, Hayo Brunken, Yong S. Chu, Vijay Srivastava, Richard D. James, Ichiro Takeuchi, Gunther Eggeler, and Alfred Ludwig. (2010). **“Identification of Quaternary Shape Memory Alloys with Near-Zero Thermal Hysteresis and Unprecedented Functional Stability.”** Advanced Functional Materials, 20, 1-7. 2014, De www.afm-journal
- Brown, P.J.; Stevens, K.. (2007). **“Nanofibers and nanotechnology in textiles.”** Cambridge, England: CRC Press



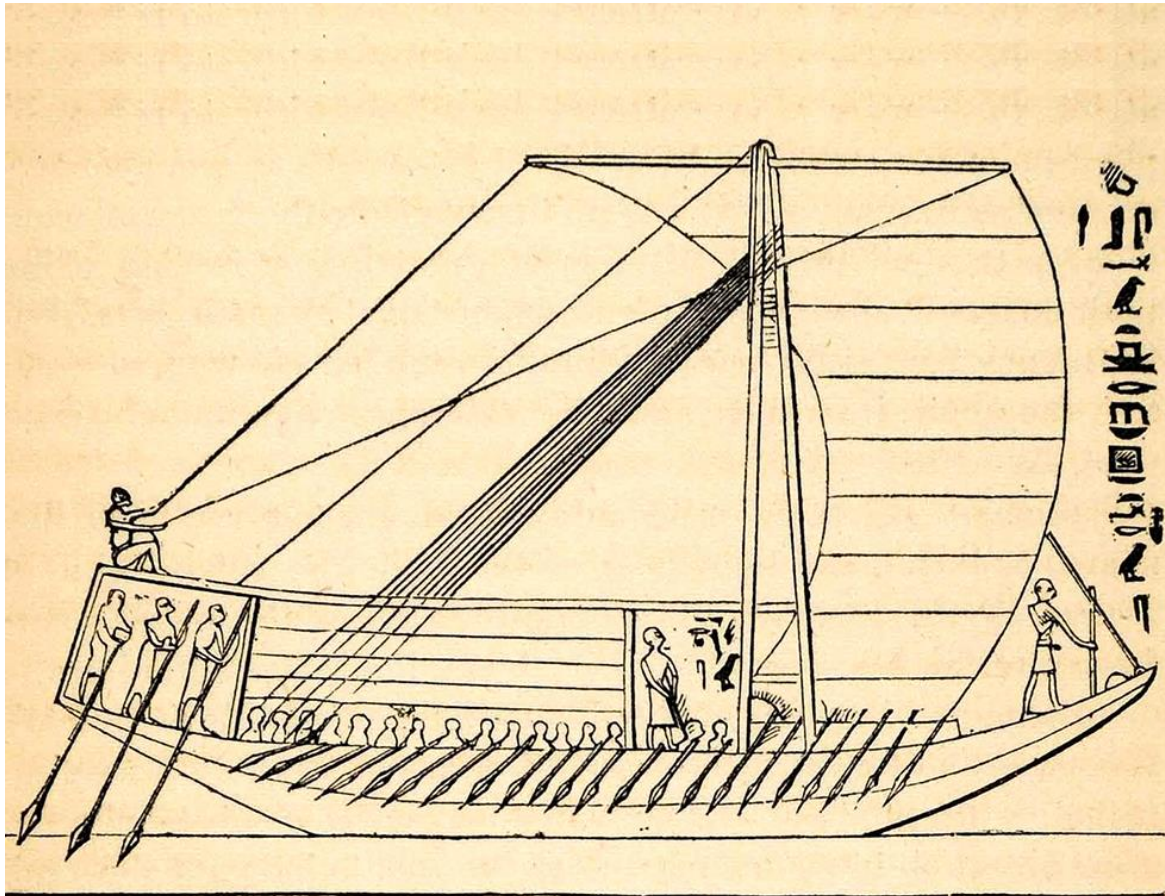
- Liu, Y.; Du, H.; Liu, L.; Leng, J.. (2014). “**Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review.**” Smart Materials and Structures, 23, 22pp. 2015, De <http://iopscience.iop.org/0964-1726/23/2/023001>
- Sim, H. J., Choi, C., Lee, C. J., Kim, Y. T., Spinks, G. M., Lima, M. D., Baughman, R. H. and Kim, S. J. (2015), “**Flexible, stretchable and weavable piezoelectric fiber.**” Adv. Eng. Mater.. doi: 10.1002/adem.201500018 - <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.201500018/full>
- Attanasi, G.; Auricchio, F. Fenves, G.L.. (2008). “**Feasibility Investigation of Superelastic Effect Devices for Seismic Isolation**” Applications. Journal of Materials Engineering Performance, 18, 729-737. 2013, De <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11665-009-9372-3>
- Watkins, R.T.; Shaw, J.A.; Triantafyllidis, N.; Grummon, D.. (2011). “**Design Study of Shape Memory Alloy Honeycombs for Energy Absorption.**” Proceedings of the ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems SMASIS, 5091, 10pp. 2014, De <http://www.experts.umich.edu/pubDetail.asp?t=pm&id=84859545821&>
- P.A. Michailidis, N. Triantafyllidis, J.A. Shaw, D.S. Grummon. (2009). “**Superelasticity and stability of a shape memory alloy hexagonal honeycomb under in-plane compression.**” International Journal of Solids and Structures, 46, 2724–2738. 2014, De <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309001012>
- Matthew Speicher, Darel E. Hodgson, Reginald DesRoches, and Roberto T. Leon. (2009). “**Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings.**” Journal of Materials Engineering and Performance, 18, 746-753. 2015, De <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11665-009-9433-7>
- J. Frenzel, A. Wiecezorek, I. Opahle, B. Maaß, R. Drautz and G. Eggeler. (2015). “**On the effect of alloy composition on martensite start temperatures and latent heats in Ni–Ti-based shape memory alloys.**” Acta Materialia, 90, 213-231. 2015, De www.elsevier.com/locate/actamat
- Otsuka, K.; Wayman, C.M.. (1998). “**Shape Memory Materials.**” Cambridge, UK: Cambridge University Press
- K. Yamauchi, I. Ohkata, K. Tsuchiya and S. Miyazaki. (2011). “**Shape memory and superelastic alloys. Technologies and applications.**” Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited
- Matthew E. Piccini, Bruce C. Towe. (2006). “**A shape memory alloy microvalve with flow sensing.**” Sensors and Actuators A: Physical, 128, 344-349. 2014, De www.sciencedirect.com
- M.C. Kong, D. Axinte, W. Voice. (2010). “**Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling.**” Journal of Materials Processing Technology, 211, 959-971. 2013, De <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec>
- Laura Isabel Barbero Bernal. (2004). “**Cyclic Behavior of Superelastic Nickel-Titanium and Nickel-Titanium-Chromium Shape Memory Alloys.**” Georgia, USA: Georgia Institute of Technology. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/4937>
- A Y N Sofla, D M Elzey and H N GWadley. (2008). “**Cyclic degradation of antagonistic shape memory actuated structures.**” Smart Materials and Structures, 17, 6pp. 2015, De <http://iopscience.iop.org/0964-1726/17/2/025014/>
- Gang Zhou, Peter Lloyd. (2009). “**Design, manufacture and evaluation of bending behaviour of composite beams embedded with SMA wires.**” Composites Science and Technology, 69, 2034-2041. 2015, De <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>

- 
- Savas Dilibal, R. Murat Tabanlı, Adnan Dikicioglu. (2004). **“Development of shape memory actuated ITU Robot Hand and its mine clearance compatibility.”** Journal of Materials Processing Technology, 155-156, 1390-1394. 2015, De www.elsevier.com/locate/jmatprotec
 - Hyun-Chul Kim, Young-Ik Yoo, Jung-Ju Lee. (2008). **“Development of a NiTi actuator using a two-way shape memory effect induced by compressive loading cycles.”** Sensors and Actuators A: Physical, 148, 437-442. 2015, De <http://www.elsevier.com/locate/sna>
 - T. Duerig, A. Pelton, D. Stockel. (1999). **“An overview of nitinol medical applications.”** Materials Science and Engineering A, 273, 149-160. 2013, De www.elsevier.com/locate/msea
 - Jinsong Leng, Xin Lan, Yanju Liu and Shanyi Du. (2008). **“Electroactive thermoset shape memory polymer nanocomposite filled with nanocarbon powders.”** Smart Materials and Structures, 18, 7pp. 2014, De <http://stacks.iop.org/SMS/18/074003>
 - Sia Nemat-Nasser, Yu Su, Wei-Guo Guo, Jon Isaacs. (2005). **“Experimental characterization and micromechanical modeling of superelastic response of a porous NiTi shape-memory alloy.”** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 53, 2320-2346. 2014, De www.elsevier.com/locate/jmps
 - D.S. Burton, X. Gao, L.C. Brinson. (2004). **“Finite element simulation of a self-healing shape memory alloy composite.”** Mechanics of Materials, 38, 525-537. 2014, De <http://www.journals.elsevier.com/mechanics-of-materials>
 - Zhao-Yi Zeng, Cui-E. Hu, Ling-CangCai, Xiang-RongChen, Fu-QianJing. (2010). **“First-principles determination of the structure, elastic constant, phase diagram and thermodynamics of NiTi alloy.”** Physica B, 405, 3665-3672. 2014, De www.elsevier.com/locate/physb
 - Ean H. Schiller. (2002). Tesis: **“Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design.”** Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic Institute.
 - Jinsong Leng, Xuelian Wu, Yanju Liu. (2009). **“Infrared Light-Active Shape Memory Polymer Filled with Nanocarbon Particles.”** Journal of Applied Polymer Science, 114, 2455-2460. 2013, De <http://onlinelibrary.wiley.com/>
 - José R. Santiago Anadón. (2002). Tesis: **“Large Force Shape Memory Alloy Linear Actuator.”** Florida: University Of Florida.
 - Durul Ulutan, Tugrul Ozel. (2010). **“Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review.”** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51, 250-280. 2013, De www.elsevier.com/locate/ijmactool
 - J.M. McNaney, V. Imbeni, Y. Jung, Panayiotis Papadopoulos, R.O. Ritchie. (2002). **“An experimental study of the superelastic effect in a shape-memory Nitinol alloy under biaxial loading.”** Mechanics of Materials, 35, 969-986. 2014, De <http://www.journals.elsevier.com/mechanics-of-materials>
 - N.B. Morgan. (2003). **“Medical shape memory alloy applications—the market and its products.”** Materials Science and Engineering A, 378, 16-23. 2013, De www.elsevier.com/locate/msea
 - Koray K. , Safak, George G. Adams. (2002). **“Modeling and simulation of an artificial muscle and its application to biomimetic robot posture control.”** Robotics and Autonomous Systems, 41, 225-243. 2013, De www.elsevier.com/locate/robot
 - Matthijs Langelaar, Fred van Keulen. (2007). **“Modeling of shape memory alloy shells for design optimization.”** Computers and Structures, 86, 955-963. 2013, De <http://www.journals.elsevier.com/computers-and-structures>



- Steeve Montminy, Erick Dupuis, Henri Champlaud. (2007). “**Mechanical design of a hopper robot for planetary exploration using SMA as a unique source of power.**” *Acta Astronautica*, 62, 438-452. 2013, De <http://www.elsevier.com/locate/actaastro>
- I. Muller And S. Seelecke. (2001). “**Thermodynamic Aspects of Shape Memory Alloys.**” *Mathematical and Computer Modelling*, 34, 1307-1355. 2013, De <http://www.journals.elsevier.com/mathematical-and-computer-modelling>
- Yanju Liu, Haibao Lv, Xin Lan, Jinsong Leng, Shanyi Du. (2008). “**Review of electro-active shape-memory polymer composite.**” *Composites Science and Technology*, 69, 2064-2068. 2014, De <http://www.elsevier.com/locate/compscitech>
- G. N. Dayananda, B. Varughese, M. Subba Rao. (2007). “**Shape Memory Alloy Based Smart Landing Gear for an Airship.**” *Journal Of Aircraft*, 44-5, 1469-1477. 2013, De <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.26811>
- J.D. Chiodo, N. Jones, E.H. Billett, D.J. Harrison. (2002). “**Shape memory alloy actuators for active disassembly using ‘smart’ materials of consumer electronic products.**” *Materials and Design*, 23, 471-478. 2013, De www.elsevier.com/locate/matdes
- Michael Leyton. (2005). “**Shape as Memory Storage.**” *LN Artificial Intelligence*, 3345, 81-103. 2013, De Springer-Verlag
- Jinsong Leng, Haibao Lu, Yanju Liu, Wei Min Huang, and Shanyi Du. (2009). “**Shape-Memory Polymers—A Class of Novel Smart Materials.**” *Mrs Bulletin*, 34, 848-855. 2013, De <http://www.mrs.org/bulletin/>
- Yves Bellouard. (2007). “**Shape memory alloys for microsystems: A review from a material research perspective.**” *Materials Science and Engineering A*, 481-482, 582-589. 2013, De www.elsevier.com/locate/msea
- Dana M. Elzey, Aarash Y.N. Sofla, Haydn N.G. Wadley. (2005). “**A shape memory-based multifunctional structural actuator panel.**” *International Journal of Solids and Structures*, 42, 1943-1955. 2013, De <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768304002690>
- Haibao Lv, Yanju Liu, Dongxing zhang, Jinsong Leng, and Shanyi Du. (2008). “**Solution-responsive Shape-Memory Polymer Driven by Forming Hydrogen Bonding.**” *Advanced Materials Research*, 47-50, 258-261. 2013, De <http://www.scientific.net/>
- M.R. Daymond a, M.L. Young, J.D. Almer, D.C. Dunand. (2007). “**Strain and texture evolution during mechanical loading of a crack tip in martensitic shape-memory NiTi.**” *Acta Materialia*, 55, 3929-3942. 2014, De <http://www.journals.elsevier.com/acta-materialia>
- Luc Saint-Sulpice, Shabnam Arbab Chirani and Sylvain Calloch. (2007). “**Super-elastic Behavior of Shape Memory Alloys under Cyclic Loading.**” *Materials Science & Engineering A*, 481-482, 174-177. 2013, De <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.144>
- D. Vojtěch, J. Fojt, L. Joska, P. Novák. (2010). “**Surface treatment of NiTi shape memory alloy and its influence on corrosion behavior.**” *Surface & Coatings Technology*, 204, 3895-3901. 2013, De <http://www.journals.elsevier.com/surface-and-coatings-technology>
- Shuichi Miyazaki, Yong Qing Fu, Wei Min Huang. (2009). “**Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications.**” Cambridge: Cambridge University Press.
- Vašina, Michal. (2003). “**Uncommon Actuators for Robotics – Shape Memory Alloy.**” XXVIII. ASR '2003 Seminar, Instruments and Control, -, 363-367. 2013, De <http://akce.fs.vsb.cz/2003/asr2003/Proceedings/papers/>
- Goldstein, M.D.; McNamara, J.L.. (1978). “**Proceedings of the Nitinol Heat Engine Conference.**” NSWC MP 79-441, -, 1-269. 2013, De <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA108973>
- Sanghaun Kim and Maenghyo Cho. (2010). “**A simple smart wing actuator using Ni-Ti SMA.**” *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24 (9), 1865-1873. 2014, De <http://link.springer.com/journal/12206>

- 
- Dr. Amr M. Baz, Karim R. Iman and Dr. John J. McCoy. (1987). “**Active Control Of Flexible Space Structures Using Nitinol Shape Memory Actuators**”. Final Report for Phase I Sdio, 89, 110pp. 2013, De AD-A205948
 - Angelo Garcia. (2003). Tesis: “**Control of Nitinol Wire Actuator**”. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury
 - Reg Dunlop and Angelo C Garcia. (2002). “**A Nitinol Wire Actuated Stewart Platform**”. Proc. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation, 27-29, 122-127. 2013, De <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.227.3107>
 - John Conti et al. (2013). “**International Energy Outlook 2013**”. U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis U.S. Department of Energy, 2013, 312pp. 2014, De www.eia.gov/ieo/
 - Sangok Seok, Cagdas Denizel Onal, Member, IEEE, Kyu-Jin Cho, Member, IEEE, Robert J. Wood, Daniela Rus, Fellow, IEEE, and Sangbae Kim. (2012). “**Meshworm- A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators**.” IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, -, 13pp. 2013, De <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6232458>
 - F. Calkins, G. Butler, and J. Mabe, “**Variable Geometry Chevrons for Jet Noise Reduction**”, AIAA-2006-2546, 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge MA, May 2006.
https://www.researchgate.net/publication/238529545_Boeing%27s_Variable_Geometry_Chevron_Morphing_aerospace_structures_for_jet_noise_reduction_-_art._no._617100
 - Robert T. Ruggeri, Richard C. Bussom, Darin J. Arbogast, “**Development of a ¼-scale NiTiNol actuator for reconfigurable structures**” SPIE Smart Materials and Structures, 2008, paper 6930-21. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008SPIE.6930E..15A>
 - Tad Calkins, Mabe James H., Ruggeri R.T.. (2008). “**Overview of Boeing’s Shape Memory Alloy Based Morphing Aerostructures**.” ASME 2008 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems , 648, 10.1115/SMASIS2008-648. 2014, De https://www.researchgate.net/publication/267617561_Overview_of_Boeings_Shape_Memory_Alloy_Based_Morphing_Aerostructures
 - Aaron Stebner, Joseph Krueger, Anselm J. Neurohr, David C. Dunand, L. Catherine Brinson, James H. Mabe, Frederick T. Calkins. (2011). “**Light-Weight, Fast-Cycling, Shape-Memory Actuation Structures**.” Proceedings of the ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, -, 7pp. 2014, De https://www.researchgate.net/publication/267617881_Light-Weight_Fast-Cycling_Shape-Memory_Actuation_Structures
 - R. Dodge Daverman. (2005). “**A Novel Binary Actuator Using Shape Memory Alloy**.” Master Of Science In Mechanical Engineering, -, 140pp. 2013, De <http://mit.dspace.org/handle/1721.1/32363>
 - Jun Cui, Yong S. Chu, Olugbenga O. Famodu, Yasubumi Furuya, Jae. Hattrick-Simpers,, Richard D. James, Alfred Ludwig, Sigurd Thienhaus, Manfred Wuttig, Zhiyong Zhang and Ichiro Takeuchi. (2006). “**Combinatorial search of thermoelastic shape-memory alloys with extremely small hysteresis width**.” Nature Materials, 5, 286-290. 2014, De <http://www.mse.umd.edu/news/documents/TakeuchiSMANatureMat.pdf>
 - Christoph Haberland, Mohammad Elahinia and Jason Walker. (2013). “**Visions Concepts And Strategies for Smart Nitinol Actuators and Complex Nitinol Structures Produced by Additive Manufacturing**.” Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, -, 8pp. 2014, De <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1833167>



352. Large boat with sail, apparently made of the papyrus, a double mast, and many rowers.
In a tomb at Kom Ahmar, above Minieh.

6

LISTADO de FIGURAS



6 LISTADO DE FIGURAS

Fig. 1. Vista idealizada de la Vía Láctea. Vista superior	9
Fig. 2. El Faraón y la familia real bajo los rayos de Atón	10
Fig. 3. El Faraón Akenatón	10
Fig. 4. Nikola Tesla	11
Fig. 5. Sir Martin Rees y A. Einstein	11
Fig. 6. Robert Oppenheimer y explosión nuclear	12
Fig. 7. W. J. Buehler, descubridor del Nitinol	12
Fig. 8. Le Corbusier. Torre de las sombras En Chandigarh, India y Unidad de Habitación en Marsella, Francia	15
Fig. 9. Toldos en terrazas de restaurantes	17
Fig. 10. Control domótico desde tlf. móvil y aparato de A.A.	17
Fig. 11. Edificios con fachadas expuestas al sol	18
Fig. 12. Vivienda con vidrio inteligente.....	23
Fig. 13. Papel de pared termocrómico decorativo	24
Fig. 14. Edificio inteligente Media-TIC. Arq. Ruiz-Geli	25
Fig. 15. Lavabo termocrómico y piscina con dibujo para saber la temperatura del agua.....	25
Fig. 16. Polímero con memoria de forma en sus dos estados.	26
Fig. 17. Esquema de modelo para polímero con memoria de forma basado en las talas de araña	27
Fig. 18. Imagen del concurso para desarrollar un músculo artificial basado en EAP capaz de batir a un brazo humano	28
Fig. 19. Pinza de 4 dedos con actuadores basados en polímeros electro-activos (EAP)	28
Fig. 20. Músculos artificiales a base de lámina de carbono	29
Fig. 21. Histéresis para NiTi y Nylon	30
Fig. 22. Temperatura de activación, tensión nominal y % de actuación.....	30
Fig. 23. Dispositivo de actuación de material con memoria de forma magnético.	31
Fig. 24. Pavimentos con dispositivos piezoeléctricos	31
Fig. 25. Actuador piezoeléctrico (izquierda) y esquema de funcionamiento material piezoeléctrico ante la aplicación de corriente eléctrica (derecha)	32
Fig. 26. Esquema de funcionamiento efecto Peltier	33
Fig. 27. Célula Peltier	33
Fig. 28. Efecto termoeléctrico al calentar la unión de dos barras conductoras, una de Nitinol y la otra de Cobre (izquierda). Conexión en serie de múltiples cables de Cobre y Aluminio (derecha)	34
Fig. 29. Muestra al microscopio de cerámica con memoria de forma (SMC). Martensita al aplicar carga y austenita al aplicar calor.....	35
Fig. 30. Lámina de aleación con memoria de forma (SMA)	35



Fig. 31. Configuración de laminado de resina epoxi-fibra de vidrio (en gris claro) y cables de Nitinol y epoxi (en gris oscuro)	37
Fig. 32. Fuerza de recuperación en función de la temperatura al calentar y al enfriar.....	38
Fig. 33. Laminado en diferentes formas según la temperatura.....	38
Fig. 34. Esquema funcionamiento Stent neumático en vena obstruida.....	39
Fig. 35. Llaves de NiTi para dientes sueltos (izquierda) y aparato superelástico para corrección dental.....	39
Fig. 36. NASA Morphing Aerospace Vehicle.....	40
Fig. 37. Boeing 747 Dreamliner, con chevron modificado con SMA para reducción de ruido. Funcionamiento autónomo y dependiente de la temperatura	40
Fig. 38. Prototipo de traje espacial desarrollado por el MIT (izquierda). Actuador-faja con micromuelles de NiTi (centro) y actuador aplicado alrededor de un cilindro (derecha).....	41
Fig. 39. Dispositivo “pin-puller”.....	41
Fig. 40. Dispositivo actuador basado en NiTi (derecha) en misión GAIA (izquierda).....	42
Fig. 41. Propuesta brasileña de vehículo rover para el concurso Lunar Xprize. Sistema de movilidad mediante resortes de muelles superelásticos de Nitinol precomprimidos en la Tierra.	42
Fig. 42. Diversos dispositivos de NiTi en un automóvil.....	43
Fig. 43. Válvula accionada por muelle de Nitinol (izquierda) y de acero (derecha)	43
Fig. 44. Pequeño generador eléctrico basado en Nitinol acoplado al sistema de escape de un turismo	44
Fig. 45. Esquema funcionamiento SMA en cámara fotográfica.	44
Fig. 46. Lente equipada con SMA	44
Fig. 47. Gafas con montura superelástica	44
Fig. 48. Camisa de hilo de Nitinol	45
Fig. 49. Ortoqueratología. Lentes aplicadas a la córnea para cambiar su forma durante la noche.....	45
Fig. 50. Hilos de NiTi intercalados en la fibra textil.....	46
Fig. 51. El textil arrugado, recupera su forma inicial, al aplicarle calor.....	46
Fig. 52. “Stiquito” robot-insecto con músculos de alambre de Nitinol. Alimentado por dos pequeñas baterías y controlado por un microprocesador	47
Fig. 53. Instalación electrónica con hilos de NiTi controlados por hardware y software	47
Fig. 54. Prototipo, partes componentes y equilibrio de fuerzas (abajo centro)	48
Fig. 55. Polímeros con fibra de vidrio y cables de NiTi embebidos y activados eléctricamente.....	48
Fig. 56. Tren de alta velocidad japonés Shinkansen, con sistema de cambio de marchas asistido por SMA	49
Fig. 57. Funcionamiento del sistema de cambio de marchas con muelle de aleación con memoria de forma (SMA)	49
Fig. 58. Tiras de FeSMA con resaltes diagonales para mejorar la adherencia con el hormigón.....	50
Fig. 59. Conexión entre soporte y viga metálicos mediante tendones SMA.....	51

Fig. 60. Tendones SMA de conexión entre elementos metálicos. Arriba los tendones deformados en estado martensítico. Abajo después de calentarse y recuperar la forma	52
Fig. 61. Iglesia de San Francisco de Asís. Italia. Sistema de disipación de energía y control de deformaciones mediante mecanismos de aleaciones SMA	52
Fig. 62. Muelle de CuZnAl en actuador de ventana de invernadero	53
Fig. 63. Sistema de control de la temperatura del agua mediante resortes de NiTi y acero	53
Fig. 64. Sistema de actuación en lama pivotante de A.A. basado en muelles de acero y SMA	54
Fig. 65. Rejillas de ventilación dependientes de la temperatura exterior y controladas por SMA, para ventilación de forjados sanitarios	54
Fig. 66. Rociador para protección contra incendios con actuador SMA.	54
Fig. 67. "Nitinol Kinetic Lamp". Dos muelles de Nitinol se activan con el calor generado por la lámpara	55
Fig. 68. V/agra Lamp	55
Fig. 69. Fachada Instituto Mundo Árabe de Jean Nouvel. París 1987	56
Fig. 70 Detalle del interior con la luz natural entrando por los diafragmas robotizados	56
Fig. 71. Pantalla inteligente "Hyposurface" que responde a estímulos externos cambiando de forma	57
Fig. 72 Showroom Kiefer Technic. Sistema de fachada de paneles móviles.....	58
Fig. 73. Sistema de control lumínico mediante SMA	59
Fig. 74. Fachada homeostática.....	59
Fig. 75. Muelle SMA frío a la izquierda (martensita) y caliente a la derecha (austenita).....	59
Fig. 76. Láminas flexibles actuadas por hilos de Nitinol	60
Fig. 77. Lamas actuadas con Nitinol y activadas eléctricamente	60
Fig. 78. Malla de escamas de contrachapado de madera	61
Fig. 79. Estructura móvil con muelles SMA y goma de silicona	61
Fig. 80. Sombrillas en la Medina del Santo Profeta en Arabia Saudí. Estructura metálica y móvil mediante motores eléctricos. Membrana de cobertura de PTFE	62
Fig. 81. Secuencia de apertura y cierre de sombrillas	62
Fig. 82. Prairie House con estructura de barras, muelles y cables en tensegridad.....	63
Fig. 83. Láminas de bimetalo que cambian de forma con la temperatura	63
Fig. 84. Prototipo de fachada actuada por SMA.....	64
Fig. 85. Estructura textil basada en SMA para fachadas	64
Fig. 86. Membrana de fachada sensible actuada por cables de Nitinol. Detalle de flores textiles SMA	65
Fig. 87. William Buehler y Frederick E. Wang	69
Fig. 88. Motor de calor con muelle de Nitinol, agua caliente y fría	70
Fig. 89. Heatmobile	70
Fig. 90. Motor de calor con cables de Nitinol. R. Banks (1973)	71



Fig. 91. Ridgway Banks	71
Fig. 92. Sistema de unión de tubos metálicos “Cryofit”	72
Fig. 93 Estructura cristalina Martensita y Austenita.....	72
Fig. 94. Porción central diagrama de fases aleaciones TiNi	73
Fig. 95. Grado de transformación austenítica y temperatura con tramo de comportamiento superelástico.	74
Fig. 96. Elasticidad clásica de Hooke y superelasticidad.	74
Fig. 97 Deformación superelástica de la estructura cristalina austenítica.....	75
Fig. 98 Curva característica de Tensión-Deformación para una aleación superelástica.....	75
Fig. 99 Regiones de comportamiento en la curva típica de tensión-deformación para una aleación 55Ni45Ti	76
Fig. 100 Cambio de estructura cristalina austenítica a martensita no pareada, bajo carga	76
Fig. 101 Variación del límite elástico en función de la temperatura y del número de ciclos de trabajo	77
Fig. 102 Influencia de la temperatura exterior en el régimen de trabajo de una aleación superelástica.....	77
Fig. 103 Modificación de la curva Tensión-Deformación de una aleación superelástica, mediante la adición de pequeños porcentajes de Cobalto	78
Fig. 104 Comparación curvas tensión-deformación para una aleación NiTi (derecha) y NiTiCo (izquierda)	78
Fig. 105. Límite elástico en curvas características de Tensión-Deformación de acero y SMA	80
Fig. 106. Doblado a 180° de barra de acero (arriba) y barra de NiTi superelástico (abajo)	80
Fig. 107. Comparativa NiTi y otros materiales	81
Fig. 108. Deformaciones recuperables mediante aplicación de calor	81
Fig. 109 Transformación de la estructura cristalina en una aleación SMA, en función de la tensión y la temperatura	82
Fig. 110. Esquema funcionamiento memoria de forma.	82
Fig. 111 Curva de Tensión-Deformación característica de una SMA.....	82
Fig. 112. Efecto de memoria de forma. El cable de NiTi se deforma en frío, mantiene la deformación y mediante la aplicación de calor recupera la forma inicial.	83
Fig. 113. Deformación de la estructura atómica desde el estado twinned martensite o martensita pareada (sin carga) al de-twinned martensite o martensita no pareada (con carga).....	84
Fig. 114. Módulo de Young dinámico en función de la temperatura	86
Fig. 115. Al calentar el SMA disminuye de longitud	86
Fig. 116. Resistencia eléctrica en función de la temperatura	86
Fig. 117. Capacidad de salida de trabajo de una aleación NiTi ante una carga	87
Fig. 118. Deformaciones recuperables en función de la tensión	87
Fig. 119. Terminales de conexión para cables y microtornillos para hilo de Nitinol de 0,3mm de diámetro	90
Fig. 120. Programación de Nitinol con barra de acero a modo de mandril. Fijación en forma de muelle mediante sargentos metálicos.	93




Fig. 121. Programación Nitinol con chapa de acero microperforada y soplete de propano. Fijación en forma de alfa mediante tornillos y tuercas.	93
Fig. 122. Calentamiento de muelle SMA por efecto Joule. La electricidad pasa por el conductor (Nitinol) para calentarlo y activarlo	94
Fig. 123. Activación de alambre de NiTi mediante electricidad. 1,4V y 1,4A aprox. Tiempo de transformación total = 3s	94
Fig. 124. Esquema de funcionamiento PWM (Pulse Width Modulation)	95
Fig. 125. Dispositivo actuador basado en Nitinol:	96
Fig. 126. Dispositivo actuador. Un extremo fijo y el otro móvil. Estados frío (arriba) y caliente (abajo)	97
Fig. 127. Dispositivo actuador. Posiciones OFF y ON	99
Fig. 128. Dispositivo actuador. Punto central fijo y ambos extremos móviles. Estados frío (arriba) y caliente (abajo)	100
Fig. 129. Unión mecánica de muelle SMA a barra de NiTi SE. Perforación de 0,8mm de diámetro en barra de 2,7mm.	101
Fig. 130. Muelles ensayados #1,#2 y #3	101
Fig. 131 Dimensiones actuador	103
Fig. 132 Ejemplo de sistema de elementos finitos.	104
Fig. 133 Definición del vector Tensión	105
Fig. 134 Estados del actuador: a) frío y b) caliente	115
Fig. 135 Curva típica de Tensión-Deformación para una aleación superelástica	116
Fig. 136 Diagrama Tensión-Deformación del material superelástico en el modelo	119
Fig. 137 Diagrama Tensión-Deformación-Temperatura para una aleación con Memoria de Forma	120
Fig. 138 Caminos admisibles de comportamiento elástico y transformación de fase	122
Fig. 139 Deformación-Temp. bajo un estado de tensión=300 MPa	124
Fig. 140 Tensión-Deformación para un ciclo de carga-descarga	124
Fig. 141 Recuperación deform. bajo un estado de tensión=300 MPa	124
Fig. 142 Deformación-Temp. bajo un estado de tensión=0	124
Fig. 143 Modelo para la varilla superelástica	125
Fig. 144 Modelo de hélice SMA	125
Fig. 145 Representación gráfica del elemento SOLID185	126
Fig. 146 Representación gráfica del elemento BEAM188	126
Fig. 147 Condiciones de contorno varilla superelástica	127
Fig. 148 Fuerza-Desplazamiento en momento de conexión varilla-muelle	127
Fig. 149 Evolución del estado de cargas aplicado al muelle	128
Fig. 150 Condiciones de contorno muelle SMA	128
Fig. 151 Ciclo de carga-descarga en la varilla superelástica	128
Fig. 152 Desplazamiento en el instante inicial	129
Fig. 153 Tensión máx. bajo desplazamiento máximo	129



Fig. 154 Desplazamiento en el instante final.....	129
Fig. 155 Evolución de las tensiones en la varilla, durante la fase de carga-descarga	129
Fig. 156 Zonas sin variación de fase (azul) y zonas con cambio de fase de austenita a martensita (rojo).....	130
Fig. 157 Deformación del muelle sin carga	130
Fig. 158 Muelle deformado bajo carga de 5N	130
Fig. 159 Diagrama de evolución en el tiempo de la temperatura (azul) y la deformación del muelle en el tiempo (verde)	131
Fig. 160 Diagrama Carga-Desplazamiento	131
Fig. 161 Diagrama Desplazamiento-Temperatura.....	131
Fig. 162 Diagrama de evolución del desplazamiento	131
Fig. 163. Toldos de ventana en edificio (sección). Toldos desplegados por el calor del día (izquierda) y plegados con el frío de la noche (derecha)	133
Fig. 164. Esquema de toldo de ventana con actuador basado en SMA.....	133
Fig. 165. Secuencia de desactivación de toldo ventana. Solo estructura principal (sin cobertura)	134
Fig. 166. Secuencia de activación con pistola térmica de toldo ventana. Solo estructura principal (sin cobertura)	134
Fig. 167. Representación virtual de toldo de ventana con lamas anchas.....	135
Fig. 168. Detalle de actuador en toldo de ventana. Incremento de la temperatura exterior de izquierda a derecha.....	136
Fig. 169. Desarrollo de las lamas de espuma de PVC ($e=3\text{mm}$). Lamas recortadas en zona de solapes.	137
Fig. 170. Detalle de perfiles huecos de aluminio con micro tornillos sirviendo de fijación y de guía para el movimiento.....	137
Fig. 171. Detalle eje de fibra de vidrio	138
Fig. 172. Cajón para pruebas de toldo ventana. Detalles de soportes laterales con ejes.....	138
Fig. 173. Toldo de ventana. Prototipo. Vistas en perspectiva.	139
Fig. 174. Toldo de ventana. Prototipo. Diferentes posiciones en movimiento de apertura y cierre.	139
Fig. 175. Dispositivo actuador en toldo de ventana.....	140
Fig. 176. Molde de resina de poliuretano para fabricación de lamas de madera de balsa curvadas. Sargentos comprimiendo las lamas con adhesivo.....	144
Fig. 177. Toldo de ventana con cobertura de papel plegado. Posiciones cerrado y abierto	145
Fig. 178. Esquema de Brise-soleil dinámico	146
Fig. 179. Calle Sierpes entoldada. Sevilla, 1920-36.....	149
Fig. 180. Secciones de calle y patio con toldos.....	149
Fig. 181. Toldos en patio de vivienda.	150
Fig. 182. Detalle de sistema de sujeción del toldo mediante cables de acero tensados y anillas de acero. Sistema de poleas y detalle de barra rigidizadora.....	150
Fig. 183. Toldo abierto (noche) y cerrado (día).....	151
Fig. 184. Esquema funcionamiento actuadores día y noche	151

Fig. 185. Detalle de sistema de toldo inteligente formado por barras móviles y articuladas en V, poleas, cables de sustentación y actuadores de SMA activados a la derecha y desactivados a la izquierda	152
Fig. 186 Diferentes modos operativos de toldo inteligente	152
Fig. 187 Toldo con sistema de actuadores basados en Nitinol	153
Fig. 188 Secuencia de movimiento de toldo con actuadores SMA	153
Fig. 189. Toldo inteligente con sistema de actuadores basados en Nitinol con memoria de forma y superelasticidad. Actuadores trabajando con barras en diagonal y poleas.....	154
Fig. 190. Detalles de sujeción de toldo con muelle NiTiCu, tensores y extensión con polea para guiado de carga de camino de vuelta	155
Fig. 191. Toldo de papel desplegándose y detalle de conexión eléctrica de muelle NiTiCu. Suministro eléctrico mediante fuente de alimentación variable	156
Fig. 192. Textil accionado por un muelle de NiTi.....	157
Fig. 193. Velocidad de actuación en Toldo inteligente.....	158
Fig. 194 Esquema de Parasol inteligente.....	159
Fig. 195 Esquema de sombrillas inteligentes	161
Fig. 196. Lamas de PVC unidas en la base con resina de poliuretano con conexión eléctrica y tubo de metacrilato para el tronco.....	162
Fig. 197. Hojas de PVC dentro y fuera del tronco de metacrilato. Posiciones nocturna y diurna. Conexión a fuente de alimentación eléctrica variable	162
Fig. 198. Detalle de conexión eléctrica del muelle NiTi en la base del parasol	163
Fig. 199. Ejemplo de dispositivos de transformación de energía térmica, en energía eléctrica para iluminación en sótanos	165

Todas las figuras del autor salvo las indicadas a continuación:

Introducción (portada)	www.123rf.com
Fig. 1.....	https://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery/Milky_Way_Annotated.jpg
Fig. 2.....	http://theredlist.com/media/database/muses/couples/historic/nefertiti-et-akhenaton/006_nefertiti-et-akhenaton_theredlist.jpg
Fig. 3.....	http://4.bp.blogspot.com/-BSp9dDONVPI/UoiWMdz99ZI/AAAAAAAAANM/4ltNR5tMCg0/s1600/Akenaton++2.jpg
Fig. 4.....	www.123rf.com
Fig. 5.....	http://www.phys-astro.sonoma.edu/brucemedalists/rees/index.html
Fig. 6.....	http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2008_Esplosivi/Immagini/nuclear-explosion.jpg
Fig. 7.....	http://kaiser.pbworks.com/w/page/27215567/Assignment%204
Fig. 8.....	https://pautorf1.files.wordpress.com/2014/02/briey_unite_d_habitation.jpg
Fig. 9.....	www.123rf.com
Fig. 10.....	www.123rf.com



Fig. 11	www.123rf.com
Estado del Arte (portada) modificada por el autor	http://portfolios.risd.edu/gallery/5786475/Nitinol-Prosthetics
Fig. 12	http://www.diariodesevilla.es/article/tecnologia/1960342/vidrio/inteligente/con/sello/espanol.html
Fig. 13	http://dornob.com/heat-actived-paint-for-color-changing-interior-designs/
Fig. 14	http://www.ruiz-geli.com/projects/built/media-tic
Fig. 15	A. Ritter, Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design, Basel: Birkhäuser, 2007
Fig. 16	T. Anson, «Shape Memory Alloys – Medical Applications,» Materials World, vol. 7, nº 12, pp. 745-747, 1999
Fig. 17 .....	.....H. Huang, J. Hu y Y. Zhu, «Shape-Memory Biopolymers Based on b-Sheet Structures of Polyanine_Segments Inspired by Spider Silks» Macromolecular Journals, 30 01 2015
Fig. 18	http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/lommas/eap/EAP-armwrestling.htm
Fig. 19 J. Bar-Cohen, «Electro-active polymers: current capabilities and challenges,» de Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, San Diego, CA, 2002	
Fig. 20	https://www.youtube.com/watch?v=xMGXqT0LWUI&index=2&list=PLrIFWZMbusyXgIh4KUaL538JnSI5k3-LJ
Fig. 21, Fig. 22.....	C. . Haines, M. Lima, G. Spinks, J. Foroughi, J. Madden, S. Kim, M. De Andrade, F. Göktepe, Ö. Göktepe, S. Mirvakili, S. Naficy, X. Lepró, J. Oh, M. Koslov, S. Kim, X. Xu, B. Swedlove, G. Wallace y R. Baughman, «Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread,» Science, vol. 343, pp. 868-872, 21 02 2014.
Fig. 23 .....	..... A. Hubert, N. Calchand, Y. Le Gorrec y J.-Y. Gauthier, «Magnetic Shape Memory Alloys as smart materials for micro-positioning devices,» Advanced Electromagnetics, vol. 1, nº 2, pp. 75-84, 08 201
Fig. 24	https://carlosmatallana.files.wordpress.com/2011/02/the-sustainable-dance-club.png
Fig. 25 (izquierda)	C. Allegranza, L. Gaillard, R. Le Letty, S. Patti, L. Scolamiero y M. Toso, «Actuators for Space Applications: State of the Art and New Technologies,» de Actuator2014, Bremen, 2014
Fig. 25 (derecha)	Imagen del autor
Fig. 28	Mr Teslonian - https://www.youtube.com/watch?v=bnQpl-5cca8
Fig. 29 .....	.....
... A. Lai, Z. Du, C. Gan y A. Schuh, «Shape Memory and Superelastic Ceramics at Small Scales,» Science, vol. 341, nº 10.1126, pp. 1505-1508, 2013	
Fig. 30	http://www.carnorama.com/wp-content/gallery/automotive-smart-memory-materials/automotivesmartmemorymaterials6.jpg
Fig. 31	http://web.mscsoftware.com/events/vpd2003/na/proceedings/Tues_Desoto_1545_Structures/2003-74_Turner_Patel.pdf
Fig. 32, Fig. 33.....	H. Tobushi, S. Hayashi, Y. Sugimoto y K. Date, «Two-Way Bending Properties of Shape Memory Composite with SMA and SMP,» Materials, pp. 1180-1192, 2009
Fig. 34	www.123rf.com

Fig. 35.....	.....S. Camelia y T. Fleser, «Clinical and Mechanical Characteristics for Orthodontic Nitinol Wires» International Journal of Biology and Biomedical Engineering, vol. 4, nº 3, 2010
Fig. 36.....	.....NASA - http://www.youtube.com/watch?v=vR3T8mdpdTI
Fig. 37 (izquierda) .....	.....http://www.boeing.com/commercial/787/
Fig. 37 (derecha).....	.....http://santi60.blogspot.com.es/2013/11/la-industria-aeronautica-por-el-perfil.html
Fig. 38.....	.....B. Holschuh, E. Obropta y D. Newman, «Low Spring Index NiTi Coil Actuators for Use in Active Compression Garments» IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pp. 1-14, 2014
Fig. 39.....	.....
	N. Nava Rodríguez, M. Collado y R. Cabás, «Qualification Campaign of New Pin Puller and HDRM Based on Shape Memory Alloy Technology,» de 14th International Conference on New Actuators, Bremen, 2014
Fig. 40.....	.....
	.....C. Allegranza, L. Gaillard, R. Le Letty, S. Patti, L. Scolamiero y M. Toso, «Actuators for Space Applications: State of the Art and New Technologies,» de Actuator2014, Bremen, 2014
Fig. 41.....	.....http://lunar.xprize.org/teams/spacemeta
Fig. 42.....	.....D. Stoeckel, “Shape Memory Actuators Improve Car Performance” Springs, vol. 31, 1992
Fig. 43.....	.....D. Stoeckel, “Shape Memory Actuators for Automotive Applications,» Materials and Design, vol. 11, no. 6, 1990
Fig. 44.....	.....http://www.autoblog.com/2009/11/02/gm-awarded-doe-money-to-research-shape-memory-alloy-heat-engines/
Fig. 45.....	.....http://www.htchmfg.com/how-sma-ois-works.html
Fig. 47.....	.....http://cargocollective.com/justinchen/Ray-Ban-Memo-Ray
Fig. 46.....	.....http://www.htchmfg.com/how-sma-ois-works.html
Fig. 49.....	.....http://www.eurok.eu/
Fig. 48, Fig. 51 .....	.....http://www.gradozero.eu/gzenew/index.php?pg=oricalco&lang=en&PHPSESSID=b4bc2c61453a39fb00c0cf3e4d8fe222
Fig. 50.....	.....http://www.quo.es/ser-humano/zapatos-el-cerebro-de-los-pies
Fig. 52.....	.....J. M. Conrad, Stiquito Controlled! Making a Truly Autonomous Robot, IEEE Computer Society, 2005
Fig. 53.....	.....http://www.arduino.cc/
Fig. 54.....	.....
	.....J. Kunze, B. Motzki, B. Holz, A. York y S. Seelecke, «Realization of Vacuum Gripper System Using Shape Memory Alloy Wires,» de 14th International Conference on New Actuators, Bremen, 2014
Fig. 55.....	.....M. Hübler, S. Nissle, M. Gurka y U. Breuer, «Load-Conforming Design and Manufacturing of Active Hybrid fiber Reinforced Polymer Structure with Integrated Shape Memory Alloy Wires for Actuation Purposes,» de 14th International Conference on New Actuators, Bremen, 2014
Fig. 56.....	.....http://www.industri-sl.com/blog/shinkansen-tren-bala-japones-cumple-50-anos/
Fig. 57.....	.....FURUKAWA - https://www.furukawa-ftm.com/english/nt-e/appli/car.htm



Fig. 58 ...A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi y M. Motavalli, «Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: an Overview,» Construction and Building Materials, vol. 63, pp. 281-293, 2014

Fig. 59 (C., Shahverdi, Brönnimann, Leinenbach, & Motavalli, 2014)

Fig. 60
..... J. Ocel, R. DesRoches, R. León, W. Hess, R. Krumme, J. Hayes y S. Sweeney, «Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys,» Journal of Structural Engineering, vol. 130, nº 5, pp. 732-740, 05 2004.

Fig. 61 (Braz Fernandes & Dragos Moldovan, 2010)

Fig. 62 T. Duerig, “Applications of Shape Memory,” in Materials Science Forum, Switzerland, 1990

Fig. 63, Fig. 65..... <https://www.furukawa-ftm.com/english/nt-e/appli/juutaku.htm>

Fig. 64 <https://www.furukawa-ftm.com/english/nt-e/appli/kaden.htm>

Fig. 66 <http://www.midetechnologies.com>

Fig. 67 www.jurgenwesterhoff.com

Fig. 68 www.geekalerts.com/vagra-lamp/

Fig. 85 <http://www.iaacblog.com/maa2012-2013-advanced-materials/2013/06/advanced-materials-shape-memory-alloy/>

Fig. 69 www.123rf.com

Fig. 70 www.123rf.com

Fig. 84 https://www.youtube.com/watch?v=-X_KxijpJT0

Fig. 83D. K. Sung, Skin Deep: Breathing Life into the Layer between Man and Nature, Washington D.C.: AIA report on university research volume 3, 2009

Fig. 76 http://www.reefseries.com/downloads/Reef_Ley_Stein.pdf

Fig. 77 <http://www.radical-craft.com/index.html>

Fig. 74 www.archdaily.com

Fig. 73, Fig. 75..... <https://www.youtube.com/watch?v=65vmSRcmwmA#t=66>

Fig. 86
..... http://www.tendencias21.net/Llegan-las-fachadas-inteligentes-que-ayudan-a-ahorrar-energia_a40190.html
(Las dos imágenes de la derecha son del autor)

Fig. 78 A. Menges, “Performative Wood: Integral Computational Design for a Climate-Responsive Timber Surface Structure,” in Ecological Urbanism, Lars Müller Publishers, 2010, pp. 522-527

Fig. 71 <http://www.hyposurface.org/>

Fig. 80, Fig. 81..... <http://www.sl-rasch.de/>

Fig. 79
.....K. Khoo, F. Salim y J. Burry, «Designing Architectural Morphing Skins with Elastic Modular Systems,» International Journal of Architectural Computing, vol. 09, nº 04, pp. 397-419, 2012

Fig. 82 <http://www.orambra.com/~prairieHouse.html>

Fig. 72.....	(Architekturburo, 2007)
Análisis SMA (portada) punto 3.....	Imagen del autor
Fig. 87.....	I. M. George B. Kauffman, "The Story of Nitinol," Chem Matters, vol. 2, no. 2, pp. 1-7, 1996
Fig. 88.....	http://www.imagesco.com/nitinol/images/he2-components.jpg
Fig. 89.....	http://www.scientificsonline.com/product/heatmobile-2-0-kit
Fig. 90.....	https://www.youtube.com/watch?v=oKmYqUSDch8
Fig. 91.....	https://www.youtube.com/watch?v=oKmYqUSDch8
Fig. 92.....	(arriba) http://www.intrinsicdevices.com/history.html (abajo) Imagen del autor
Fig. 93.....	http://education.mrsec.wisc.edu/images/mem_met_unit_cells%281%29.gif
Fig. 99, Fig. 101, Fig. 102.....	(Ford & White, 1995)
Fig. 104.....	(Fasching, 2015)
Fig. 107, Fig. 108.....	(Duerig, Pelton, & Stoeckel, The Use of Superelasticity in Medicine)
Fig. 114.....	(Mercier, Melton, Gotthardt, & Kulik, 1982)
Fig. 115.....	(Miyazaki & Otsuka, 1986)
Fig. 117, Fig. 118.....	(Duerig & Pelton, Ti-Ni Shape Memory Alloys, 1994)
Fig. 133.....	Manual de ayuda Ansys 15
Fig. 135.....	(Divringi & Ozcan, 2009)
Fig. 138, Fig. 145, Fig. 146.....	Manual de ayuda Ansys 15
Fig. 179.....	Wunderlich, Otto. Fototeca del Patrimonio Histórico. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte
Conclusiones (portada) punto 4.....	www.123rf.com
Bibliografía (portada) punto 5.....	http://perlbai.hi-pi.com/blog-images/395072/gd/1175213397/BIBLIOGRAFIA-Lista-basica-I.jpg
Listado de figuras (portada) punto 6.....	http://threesheetsnw.com/aquilaslogbook/
Anexos (portada) punto 7.....	http://es.masternewmedia.org/2005/12/29/bookmarks_basados_en_enlaces_clipmarks.htm

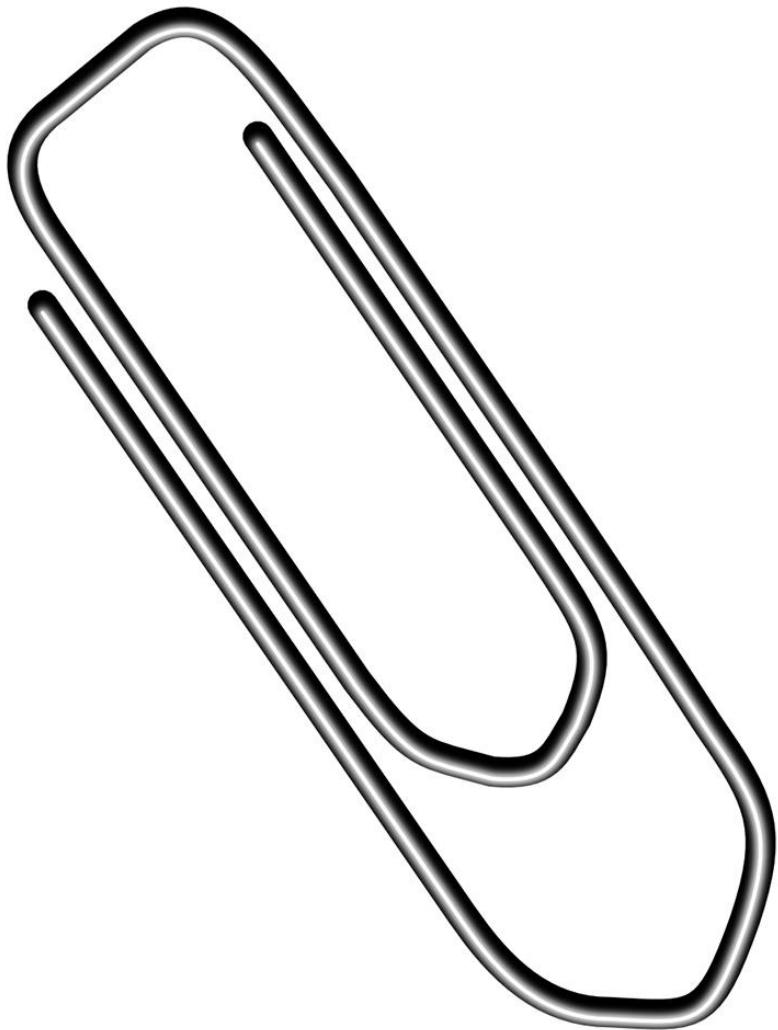


LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Principales EAP utilizados (electrónicos e iónicos).....	28
Tabla 2. Principales aleaciones con memoria de forma conocidas.....	73
Tabla 3 Comparativa entre aleaciones NiTi ternarias.....	79
Tabla 4 Comparación NiTi y acero inoxidable.....	81
Tabla 5. Dependencia de la temperatura de transformación de aleaciones SMA en función del %Níquel.....	85
Tabla 6. Diferentes tipos de aleación para diferentes temperaturas de activación.....	85
Tabla 7. Propiedades Nitinol.....	88
Tabla 8 Comparativa Nitinol de 70°C y 90°C para diferentes diámetros.....	88
Tabla 9. Programación Nitinol de forma recta a curva (ejemplo).....	92
Tabla 10. Comparación de relación peso/potencia entre actuadores SMA y diferentes tipos de motores.....	96
Tabla 11. Características muelles ensayados.....	101
Tabla 12. Gráficas de Intensidad, voltaje y tiempo. Muelle #1 rojo, muelle #2 verde y muelle #3 azul.....	102
Tabla 13 Características actuador.....	103
Tabla 14 Características material superelástico.....	119
Tabla 15 Propiedades material con memoria de forma.....	123

Todas las tablas del autor, salvo las indicadas a continuación:

Tabla 1.....	J. Bar-Cohen, «Electro-active polymers: current capabilities and challenges,» de Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, San Diego, CA, 2002
Tabla 2.....	http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=134#_Alloy_Types
Tabla 3.....	(Barbero Bernal, 2004)
Tabla 4.....	www.jmmedical.com
Tabla 5.....	(Duerig, Melton, Stoeckel, & Wayman, 1990)
Tabla 6.....	SAES Getters S.p.A.
Tabla 7.....	www.jmmedical.com
Tabla 8.....	http://www.dynalloy.com
Tabla 10.....	W. Huang, Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures, Cambridge: Peterhouse, 1998



7

ANEXOS



7 ANEXOS

Compañías suministradoras de SMA (en negrita los fabricantes):

- ADMEDES (GER) <http://www.admedes.com>
- **ATIMETALS** (USA) <https://www.atimetals.com>
- DYNALLOY, Inc. (USA) <http://www.dynalloy.com>
- EUROFLEX GmbH (GER) <http://www.euroflex.de>
- FLEXMET (BEL) <http://www.flexmet.be>
- FORT WAYNE METALS (USA) <http://www.fwmetals.com>
- **FURUKAWA TECO MATERIAL** (JAP) <https://www.furukawa-ftm.com>
- GOODFELLOW (USA) <http://www.goodfellow.com>
- GRAND ILLUSIONS (UK) <http://www.grand-illusions.com>
- IMAGESCO (USA) <http://www.imagesco.com>
- **INGPULS** (GER) <http://ingpuls.de>
- JOHNSON MATTHEY MEDICAL COMPONENTS (USA) <http://www.jmmedical.com>
- KELLOGG'S RESEARCH LABS (USA) <https://www.kelloggsresearchlabs.com>
- LUMENOUS DEVICE TECHNOLOGIES (USA) <http://www.lumens.com>
- MEMRY (Saes Group) (ITA) <http://memry.com>
- NDC (USA) <http://www.nitinol.com>
- NIMESIS (FRA) <http://www.nimesis.com>
- NITITEX (CZE) <http://nititex.fzu.cz>
- NORMAN NOBLE Inc. (USA) <http://www.nnoble.com>
- **SAES Group** (ITA) <http://www.saesgetters.com>
- SMARTERALLOYS (CAN) <http://smarteralloys.com>
- SMARTWIRES (CZE) <http://smartwires.eu>
- STANFORD ADVANCED MATERIALS (USA) <http://www.samaterials.com>
- TINI AEROSPACE (USA) <http://www.tiniaerospace.com>
- TINI ALLOY COMPANY (USA) <http://www.tinialloy.com>
- TMP-PRODUCTS (GER) <http://www.tmp-products.com>
- TOKI CORPORATION (JAP) <http://www.toki.co.jp>
- ULTIMATE R&D (USA) <http://www.ultimateniti.com>
- VASCOTUBE (GER) <http://www.vascotube.com>
- G.RAU INNOVATIVE METALLE (GER) <http://www.g-rau.de/en/>
- MIDÉ TECHNOLOGIES USA) <http://www.midetechnologies.com/>



Estudios de Arquitectura:

- SL Rach (GER)..... <http://www.sl-rasch.de/index.html>
- DOSU (USA) <http://www.dosu-arch.com/>
- Achim Menges (GER)..... <http://www.achimmenges.net>
- dECOi architects (FRA, UK)..... <http://www.decoi-architects.org/>
- Martina Decker - One Lab (USA) <http://www.onelab.org/people-decker.html>
- Peter Yeadon (USA)..... <http://www.yeadonspaceagency.com/>
- Chen (USA) <http://www.varchen.com/feathered-inversion.html>
- Rob Ley (USA) <http://rob-ley.com/>
- Radical Craft (USA) <http://www.radical-craft.com/index.html>
- Lotus (NLD) <https://www.studio Roosegaarde.net/project/lotus-dome/>
- Orambra (USA)..... <http://www.orambra.com/>
- Jean Nouvel (FRA) <http://www.jeannouvel.com/>
- Enric Ruiz-Geli..... <http://www.ruiz-geli.com/>

Videos:

www.youtube.com

- Muscle wire actuator..... https://youtu.be/MOIdGcb_ZvA
- Erste Experimente mit Nitinol (Flexinol®) <https://youtu.be/qga-y9aaGtE>
- Flexinol Actuators <https://youtu.be/YR5lf4btWfw>
- Green Challenge Smartscreen..... <https://youtu.be/Ny5-9kZELX4>
- Nitinol Heat Engine Version 1.0 Part 2 <https://youtu.be/7a5HJB1-1s4>
- Nitinol heat engine version.1 proto-type <https://youtu.be/7BA8-MdO8so>
- Soft autonomous earthworm robot at MIT <https://youtu.be/EXkf62qGFII>
- Snap-action and bistable mechanisms <https://youtu.be/VZkgGIS3li4>
- Making The Reciprocating Rack & Pinion..... <https://youtu.be/zae2ZePQTWQ>
- Motor térmico <https://youtu.be/Zq749A80Zt0>
- Hopping Jumping Mechanism with Nitinol spring SMA <https://youtu.be/GvkcCKdgdgtg>
- Venus flytrap-inspired robot prototype II <https://youtu.be/4wueEr3eeUc>
- Shading system <https://youtu.be/iNRGn4F5SJ6A>
- Nitinol Nichrome Instrument..... <https://youtu.be/FaEkISXtnZs>
- Solar Powered Shape Memory Alloy Engine <https://youtu.be/nQA6NWuV02s>
- Comparison of Nitinol And Steel Reinforced Concrete Beams <https://youtu.be/yk-Glih4dTg>
- Nitinol Heat Engine Prototype 1. <https://youtu.be/KTBSztasC9w>



- Smart materials <https://youtu.be/LpXyTfan48A>
- SMART materials https://youtu.be/3Tp6IC_SXu0
- A Quick Guide to Smart & Modern Materials <https://youtu.be/FgrlDibPmJo>
- ShapeShift <https://youtu.be/4XGVMXCxBNA>
- Smart Composite- Shape Memory Alloy and Shape Memory Polymer..... https://youtu.be/HraB_KEFfsY
- Articulated Cloud by Ned Kahn <https://youtu.be/nvkNdIKVP2Y>
- Dynamic facade "Kiefer technic showroom" <https://youtu.be/rAn4ldWjw2w>
- SKWRATH: kinetic dress https://youtu.be/65_L05cJCjM
- Material Dynamics/Emergent Materials in Architecture - Martina Decker - 13 September 2012 <https://youtu.be/h3ffl2kBNKA>
- LULL - A lamp that open and closes like a flower <https://youtu.be/KudHOq8AGgE>
- SpaceMETA Inspirational rover project from Morphex..... <https://youtu.be/M4CgpPdSSfQ>
- SpaceMETA presents NITINOL demo Engine concept..... <https://youtu.be/8bDzA-RWlIal>
- The Nod <https://youtu.be/oWzxm8jsi6A>
- Architectural Association (AA) Canopy by Emtech_short version <https://youtu.be/Ja24cZLISAk>
- Hacking the butterfly..... <https://youtu.be/6lpWri1DOIY>
- Nitinol Antrieb - Hubweg einer Formgedächtnislegierung durch Wasserdampf NITI Motor <https://youtu.be/iTch3qdizsA>
- Nitinol Motor Formgedächtnislegierung NITI Feder Effekt Shape Memory <https://youtu.be/LYw07Er8Qxo>
- Nitinol Snail <https://youtu.be/MGMH-R7s2oM>
- Actuatins of a nitinol wire screen with a fiber battery textile <https://youtu.be/oQwaSHBpgT8>
- Nitinol Power Plant <https://youtu.be/RP1-bTB5YwA>
- A Machine To Die For The Quest For Free Energy <https://youtu.be/c6UgV3gVmd0>
- Shape Memory Alloy (SMA) Release Mechanism <https://youtu.be/MbZ77Ix8frA>
- Responsive Kinematics <https://youtu.be/IecR-fSRnL8>
- Curling SMA paper mechanism <https://youtu.be/EYsybu2fP0Q>
- Smart Materials Demo <https://youtu.be/VU-dChOfkAg>
- Shape Memory Textiles <https://youtu.be/HdRRy7hltgl>
- Materiales Asombrosos <https://youtu.be/Ei3DpWpPV48>
- Nitinol and Felt (test 4): the "jellyfish" https://youtu.be/F8L_etiBGMc
- Chiral shape memory alloy antenna..... <https://youtu.be/RGDufoVQ7hg>
- Nitinol Motor Experiment II..... <https://youtu.be/bmWWZKPKdv4>
- Seminar: Shape Memory and Superelasticity <https://youtu.be/zbjgzMhzPzY>
- Nitinol Wärme Maschine Fresnell Linse Sonnenenergie Umsetzung in mechanische Energie <https://youtu.be/Y4In-TAMIGA>
- How to make a thermoelectric generator from nitinol wire and copper <https://youtu.be/bnQpl-5cca8>
- Nitinol air temperature transitions..... <https://youtu.be/UzudyF0oNRQ>
- NDC's Dave Niedermaier reviews the unique properties of nitinol material <https://youtu.be/cYflfp6mEkk>
- Hantel Tech Webinar Series: The use of nitinol in medical devices <https://youtu.be/8ZqRn9xh1qo>
- MigaOne SMA Actuator Moving a Binary Latch - Miga Motor Company https://youtu.be/7M4_uRqkbSQ
- A New Form of Peristaltic Locomotion in a Robot..... <https://youtu.be/f6mA8walaSk>
- Smart materials (3 of 5): shape shifting material, drug delivering nano particles <https://youtu.be/i6n8cplKzHE>

- Shape Memory Alloy Demonstration <https://youtu.be/1rrPv5AIVXg>
- [alumgrill] two cases <https://youtu.be/T82UzbSIjYo>
- Hydro-Fold - ECAL/Christophe Guberan <https://youtu.be/rJeFDa2gPuc>
- BLOOM Construction- expanded <https://youtu.be/r40U7Gp-8hY>
- AliveSpaces Module: Michael Nef <https://youtu.be/VQKp8VUyKTs>
- wood slats 02_subscript..... <https://youtu.be/hoaFGQXOo30>
- Nitinol and Felt (test 2): the "furl"..... https://youtu.be/_Ug9k1WDp0w
- Interactive wall LOTUS 7.0 by Roosegaarde which fold open in response to human behavior <https://youtu.be/HsC8iezbEHE>
- Shape memory polymer..... <https://youtu.be/vWIRcazeSnU>
- kinetic surface..... <https://youtu.be/MsCQM1DCkMU>
- SMAAD Surface <https://youtu.be/e-YdJTvesL4>
- Responsive Kinetic surface (study3) https://youtu.be/_qWb5tVrNyM
- Kinetower by Kinetura..... <https://youtu.be/0C1sWImmVAE>
- The living architecture: Soo-in Yang at TEDxSeoul https://youtu.be/Wlkfu1k_v5s
- David Benjamin & Soo-in Yang <https://youtu.be/ysD3Dj13DA0>
- Raw Video: Flexible Robot Crawls in Tight Spaces <https://youtu.be/Z19OZUQV20E>
- Smarter Buildings: USC Architect Doris Sung <https://youtu.be/-Ms5qoMO3gQ>
- Kinetic Cybernetic surface (study4)..... <https://youtu.be/r8NtwfKayKs>
- Reef - A Responsive Architectural Installation Rob Ley (Urbana) & Joshua G. Stein (Radical Craft) <https://youtu.be/pbxTafJ13lc>
- living 6..... <https://youtu.be/BPWR6qHnh9o>
- Super Cilia Skin <https://youtu.be/tKz0wwT68BM>
- Patio and window canopy <https://youtu.be/TIUMKwYQ59g>
- Artificial Muscle..... <https://youtu.be/ltUjuqQdk9E>
- Buildings That Breathe | Doris Sung's Living Architecture https://youtu.be/V17Lp1X0_ao
- Pair of Shape Memory Actuators Operate an Automotive Louver - Miga Motor Company <https://youtu.be/cAQuMSf7jX8>
- Flexon 30sec Spot 1 <https://youtu.be/1-mIByg0sGM>
- Shape Memory Alloy-Based Self-Folding Roller <https://youtu.be/0M6wJaQI3sw>
- Shape Memory Textile Jacket <https://youtu.be/EikQOrLyc-A>
- Nitinol and Acrylic <https://youtu.be/-SMps0tAXK4>
- Jean Nouvel: Institut du Monde Arabe, Paris..... <https://youtu.be/5DEEjTIJl8E>
- Masjid Nabawi - Prophet's Muhammed Phuh's Mosque in Medina Shareef, umbrellas closing..... <https://youtu.be/xpbTtZIVe1l>
- masjid nabawi..... <https://youtu.be/zSpHmZlSe8A>
- Computer animation of the Umbrellas for the Piazza of the Prophet's Mosque..... <https://youtu.be/TLTRJScemaw>
- SpaceMETA present NITINOL explanation by MIT..... <https://youtu.be/2YVwpBAiA1A>
- Nitinol Soldering <https://youtu.be/vUgl124EBvs>
- Magical metals, how shape memory alloys work - Ainissa Ramirez https://youtu.be/yR-6_IS9vts



www.vimeo.com

- Memory metal lamp..... <https://vimeo.com/38483669>
- Shade, Simon Heijdens, London 2014..... <https://vimeo.com/106669679>
- Squamata..... <https://vimeo.com/8837163>
- Adaptive Survival Clothing by Jacqueline Nanne..... <https://vimeo.com/87093786>
- Shutters..... <https://vimeo.com/12935882>
- Leyla Interactive Niqab <https://vimeo.com/62362915>
- Shape Memory Alloy Panel System <https://vimeo.com/17066296>
- Discovering shape memory alloys..... <https://vimeo.com/6237559>
- Beech veneer kinetic surface <https://vimeo.com/41609117>
- Moving Textiles - Versuche mit Nitinol und Flexinol..... <https://vimeo.com/31779949>
- Interactive Architecture – Chair..... <https://vimeo.com/11256077>
- Shape Memory Alloy Exercise 1 <https://vimeo.com/19691896>
- Actuated Tensegrity by Milan Tanedjiov and Christian Pelletier <https://vimeo.com/23090738>
- Muscle Wire Sample..... <https://vimeo.com/44270466>
- Lilypad-Nitinol..... <https://vimeo.com/11723840>
- BioMetal Fibre <https://vimeo.com/38931168>
- Sleeping Bed - Rhythmic Study <https://vimeo.com/5292175>
- Magnetically Free /5 Nitinol Meta-Material <https://vimeo.com/56445246>
- Plant Y Interactions <https://vimeo.com/116718706>
- Self deploying Nitinol knit..... <https://vimeo.com/15528597>
- Capacitive touch sensor + Nitinol paper <https://vimeo.com/33658371>
- Phototrope <https://vimeo.com/56303020>
- Smarter Alloys - Explainer Videos..... <https://vimeo.com/111119622>
- Alligator Chomp with Nitinol Wire..... <https://vimeo.com/23938597>
- Movement <https://vimeo.com/52230501>
- Feathered Inversions 2.0 <https://vimeo.com/90068675>
- SMA Test | 150 Degree Oven..... <https://vimeo.com/22087547>
- Memory Geotextile <https://vimeo.com/61501340>
- Chamäleon-Membran / Adaptive Fassadenelemente / Prototyp I <https://vimeo.com/106487988>
- STEP 4c_ Nitinol and Fabric..... <https://vimeo.com/58038577>
- Nitinol Façade <https://vimeo.com/83007973>
- Shape Changing Textile_test..... <https://vimeo.com/38043849>
- Nitinol + Supercaps <https://vimeo.com/119408560>
- SN-218 Reinforced Buildings..... <https://vimeo.com/119048615>

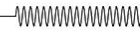


Ted Talks – www.tedtalk.com

- Catarina Mota: Play with smart materials<http://on.ted.com/Mota>
- Doris Kim Sung: Metal that breathes <http://on.ted.com/Sung>
- Martin Rees: Is this our final century? http://www.ted.com/talks/martin_rees_asks_is_this_our_final_century
- Martin Rees: Can we prevent the end of the world?http://www.ted.com/talks/martin_rees_can_we_prevent_the_end_of_the_world
- Bill Gross: A solar energy system that tracks the sun http://www.ted.com/talks/bill_gross_on_new_energy
- Skylar Tibbits: The emergence of "4D printing" <http://go.ted.com/bBsG>
- Michael Hansmeyer: Building unimaginable shapes <http://go.ted.com/bBsW>
- Marc Kushner: Why the buildings of the future will be shaped by ... you <http://go.ted.com/bBsQ>

Websites de interés

- Shape Memory Alloy Shape Training Tutorial.....<http://www-personal.umich.edu/~btrease/share/SMA-Shape-Training-Tutorial.pdf>
- Shape memory actuators ... http://www.saesgetters.com/sites/default/files/Shape%20Memory%20Actuators%20for%20Automotive%20Applications_0.pdf
- How to Form Memory Wire Nitinol..... <http://www.instructables.com/id/How-to-Form-Memory-Wire-Nitinol/>
- How-To: Work with Shape-Memory Alloy<http://makezine.com/2012/01/31/skill-builder-working-with-shape-memory-alloy/>
- Use of Shape Memory Alloys in High Reliability Fastening Applications <http://www.intrinsicdevices.com/history.html>
- Solar Hot Water Nitinol Heat Engines..... <http://www.packratworkshop.com/hotwater7.htm>
- Robot Design - Flexinol and other Nitinol Muscle Wires..... <http://robotics.hobbizine.com/flexinol.html>
- Delight lamps by Ido Mohar <http://www.dezeen.com/2012/08/07/delight-lamps-by-ido-mohar/>
- Nitinol for medical use..... <http://www.endosmart.com/en/>
- Protección solar y ahorro energético <http://www.revistatoldo.com/noticia.php?id=261>
- Finding a new way to rehabilitate deteriorating reinforced concrete http://www.asminternational.org/news/industry-/journal_content/56/10180/18763165/NEWS
- Las claves de la inminente casa del futuro de Apple..... http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-05-28/las-claves-de-la-inminente-casa-del-futuro-de-apple_137511/
- ¿Por qué se nos pone la 'piel de gallina'? <http://maikelnai.elcomercio.es/2014/02/25/por-que-se-nos-pone-la-piel-de-gallina/>
- Gran éxito del estudio de la UIB sobre el potencial uso de aleaciones con memoria en la construcción <http://ultimahora.es/noticias/local/2014/09/29/134349/gran-exito-del-estudio-uib-sobre-potencial-uso-aleaciones-memoria-construccion.html>
- Shape memory alloys debut in textiles <http://www.iom3.org/materials-world-magazine/news/2009/aug/01/shape-memory-alloys-debut-textiles>
- SmartLab Texas A&M..... <http://smart.tamu.edu/overview/overview.html>
- Shrink-wrapping spacesuits <http://newsoffice.mit.edu/2014/second-skin-spacesuits-0918>



- How to make ceramics that bend without breaking <http://newsoffice.mit.edu/2013/how-to-make-ceramics-that-bend-without-breaking-0926>
- How Does SMA OIS Work? <http://www.htchmfg.com/how-sma-ois-works.html>
- Una casa capaz de adaptarse a nuestras necesidades <http://es.euronews.com/2014/11/25/una-casa-capaz-de-adaptarse-a-nuestras-necesidades/>
- Un nuevo material elimina el calor de los edificios y lo envía al espacio <http://www.abc.es/ciencia/20141126/abci-nuevo-material-elimina-calor-201411261727.html>
- ¿Qué es la impresión 4-D? <http://www.lagranepoca.com/archivo/34632-que-es-impresion-4-d.html>
- Smart Composite – Shape Memory Materials <http://materiability.com/smart-composite-shape-memory-materials/>
- Functional Fatigue of Shape Memory Actuators https://dbs-lin.ruhr-uni-bochum.de/ww/en/lehre/forschendes_lernen__qkluii.php
- 2014 Chevy Corvette Debuts Lightweight Smart Material <http://www.autoguide.com/auto-news/2013/02/2014-chevy-corvette-debuts-lightweight-smart-material.html>
- GM awarded DOE money to research Shape Memory Alloy heat engines <http://www.autoblog.com/2009/11/02/gm-awarded-doe-money-to-research-shape-memory-alloy-heat-engines/>
- The problem of increasing human energy with special references to the harnessing of the sun's energy. By Nikola Tesla <http://www.tfcbooks.com/tesla/1900-06-00.htm>
- Metamorphic materials are in vogue, the future is now. <http://www.inmatteria.com/2013/10/19/metamorphic-materials-are-in-vogue-the-future-is-now/>
- Shape Memory Alloys & Super-elastic Alloys Furukawa NT Alloys <https://www.furukawa-ftm.com/english/nt-e/actuator01.htm>
- Shape Memory And Iron Palladium Alloys <https://taboodada.wordpress.com/tag/alloy/>
- Electronic Origami Flapping Crane <http://highlowtech.org/?p=1448>
- European Initiative on Smart Cities <https://setis.ec.europa.eu/set-plan-implementation/technology-roadmaps/european-initiative-smart-cities>
- NASA Nondestructive Evaluation and Advanced Actuators (NDEAA) <http://ndea.jpl.nasa.gov/>
- Misión a Júpiter con tecnología 'made in Spain' <http://www.elmundo.es/ciencia/2015/03/23/550ef14cca474193758b456b.html>
- Llegan las fachadas inteligentes que ayudan a ahorrar energía http://www.tendencias21.net/Llegan-las-fachadas-inteligentes-que-ayudan-a-ahorrar-energia_a40190.html
- Brise Soleil study <http://urbanalyse.com/research/brise-soleil-study-2/>
- Tu próximo calzado te dirá cuándo debes descansar o modificar la pisada <http://www.libertaddigital.com/ciencia-tecnologia/tecnologia/2015-04-16/tu-proximo-calzado-te-dira-cuando-debes-descansar-o-modificar-la-pisada-1276545761/>

- 
- Mano robótica que responde con sensibilidad humana gracias a músculos hechos de un metal “inteligente” <http://noticiasdela ciencia.com/not/13681/mano-robotica-que-responde-con-sensibilidad-humana-gracias-a-musculos-hechos-de-un-metal-ldquo-inteligente-rdquo-/>
 - Model Analyzes Shape-Memory Alloys for Use in Earthquake-Resistant Structures <http://www.news.gatech.edu/2012/02/09/model-analyzes-shape-memory-alloys-use-earthquake-resistant-structures>
 - Smart Textile Services <http://dqj.id.tue.nl/sts/>
 - Sewing Flexinol Into Fabric <https://sarahlayne.wordpress.com/2009/09/01/sewing-flexinol-into-fabric-2/>
 - SMA Smocking <http://www.kobakant.at/DIY/?p=5276>
 - Moving Fabric Petals <http://www.kobakant.at/DIY/?p=3396>
 - Technology Integration into Textiles: Empowering Health and Security <http://www.nano-tera.ch/projects/69.php>
 - Oricolco shape memory fabric <http://www.gradozero.eu/gzenew/index.php?pg=oricalco&lang=en&PHPSESSID=b4bc2c61453a39fb00c0cf3e4d8fe222>
 - Graphene-coated fibers make a good fit for wearable electronics. <http://www.gizmag.com/graphene-coated-fibers-electronic-fabric/37495/>
 - Thermochromic materials <http://openmaterials.org/materials-101-thermochromic/>
 - Heat-Activated Paint for Color-Changing Interior Designs <http://dornob.com/heat-actived-paint-for-color-changing-interior-designs/>
 - Un edificio con «pelos» que captura energía eólica <http://www.abc.es/ciencia/20130522/abci-edificio-pelos-captura-energia-201305221259.html>
 - The world's smallest micro linear pusher http://www.mikrogetriebe.de/englisch/products/micro_linear_pusher_actuator_drive/mlp_properties.htm
 - Miga Motors <http://www.migamotors.com/>
 - European Solar Shading Organization <http://www.es-so.com/>
 - Build Up - The European Portal For Energy Efficiency In Buildings <http://www.buildup.eu/>
 - A non-Intrusive Method for People Counting <http://sensingtex.com/smart-mat>
 - Windstalk, la energía eólica mediante tallos en lugar de aspas <http://www.ecoticias.com/energias-renovables/35416/>
 - Scientists just created some of the most powerful muscles in existence .. <http://io9.com/scientists-just-created-some-of-the-most-powerful-muscl-1526957560>
 - Synthetic Muscle Made of Fishing Line is 100 Times Stronger Than the Real Thing <http://www.popularmechanics.com/science/health/a3088/synthetic-muscle-made-of-fishing-line-is-100-times-stronger-than-the-real-thing-16514805/>
 - Memometal Foot and Ankle Products http://uk.memometal.com/products/foot_ankle/index.html
 - Flexon Eyewear <http://www.marchon.com/HTML/flexon.asp>



Congresos y Conferencias:

- **ACTUATOR.** International Conference and Exhibition on New Actuators and Drive Systems..... www.actuator.de/
- **ASME.** Conference on Smart Materials, Adaptative Structures and Intelligent Systems.....
<http://www.asmeconferences.org/SMASIS2015/index.cfm>
- **CANSMART.** International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering.....<http://www.cansmart.com/>
- **HTSMAs.** International Conference on High-Temperature Shape Memory Alloys..... <http://www.dgm.de/dgm/htsmas/>
- **ICAEM.** International Conference on Advances in Engineering Materials. <http://www.icaem.org/>
- **ICANM.** International Conference & Exhibition on Advanced & Nano Materials. <http://icanm2015.iaemm.com/index.php>
- **ICCAR.** International Conference on Control, Automation and Robotics. <http://www.iccar.org/index.html>
- **ICEIM.** International Conference on Engineering and Innovative Materials. <http://www.iceim.org/index.html>
- **ICFSMA.** International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys. <http://www.material.tohoku.ac.jp/~icfsma/index.html>
- **ICIMC.** International Conference on Innovative Materials and Construction. <http://www.icimc.org/>
- **ICMTS.** International Conference on Materials Technologies and Sciences. <http://www.icmts.org/>
- **ICOMAT.** International Conference on Martensitic Transformations. <http://www.icomat2014.com/>
- **ICOAE.** International Conference on Aerospace Engineering. <http://www.icoae.org/>
- **ICSMR.** International Conference on Smart Material Research. <http://www.icsmr.org/>
- **SMST.** Shape Memory and Superelastic Technologies Conference and Exposition.
..... <http://www.asminternational.org/web/smst-2015-event/home>
- **SPIE.** Smart Structures/NDE Conference. <http://spie.org/x12228.xml>
- **WCSM.** World Congress of Smart Materials. <http://www.bitcongress.com/wcsm2015/default.asp>
- **HASLE.** Home Automation & Smart Living Event..... <http://www.beursdomoticaenslimwonen.nl/beursdomotica/>

Requerimientos Técnicos al encargar un Actuador basado en SMA. (Inguls.de)

Para fabricar un actuador basado en aleaciones con memoria de forma, los fabricantes necesitan saber algunos datos relativos al uso que le vamos a dar a nuestro dispositivo. Estas son nuestras necesidades como cliente. A partir de aquí, los ingenieros diseñan y fabrican el tipo de aleación que se adapte a nuestros requerimientos.

- **Description and function of application:**

Descripción y función de la aplicación: Debe definirse con claridad qué función debe hacer el actuador y la aplicación para la que se ha pensado.



- **Actuator stroke and / or stroke-characteristics:**

Stroke es la distancia de actuación. También se puede llamar “travel distance”. Es la distancia que cubre el actuador basado en SMA. Es uno de los datos claves para definir un actuador, su distancia de actuación.

En cuanto a las características del stroke, debe definirse si este será fijo, variable o si tendrá alguna situación o condición especial que afecte a la distancia de actuación, por ejemplo podemos querer un dispositivo que actúe una cierta distancia en un momento determinado y que actúe el resto de la distancia en otro momento posterior.

- **Actuator force and / or force-characteristics:**

La fuerza de nuestro actuador también es otro de los factores importantes. La expresaremos en N y debemos determinar con exactitud cuanta fuerza necesitamos ya que va directamente relacionada con la cantidad de SMA necesaria. Un cálculo preciso de las necesidades de fuerza repercute en un diseño óptimo del actuador y por lo tanto se optimiza también su precio.

- **Installation space (3D CAD-draw, samples, etc.):**

¿Dónde se instalará nuestro actuador? Debemos indicar al fabricante las condiciones espaciales en las que se instalará el dispositivo y si es posible, es conveniente adjuntar modelos 3D, dibujos, fotos, vídeos, muestras o cualquier otro medio que le ayude a entender mejor nuestro proyecto para que así nos diseñe el tipo de SMA más adecuado.

- **Frequency of activation:**

Frecuencia de activación. Debemos indicar si el SMA se activará muchas y repetidas veces en cortos periodos de tiempo o si por el contrario se activará pocas veces y con cierto tiempo entre ellas. Solo es importante para casos en los que esta frecuencia sea muy alta. Si es excesivamente alta podría haber problemas con el SMA en cuanto a que podría no darle tiempo a enfriarse antes de que se le pida activarse de nuevo. Esto provocaría el mal funcionamiento del actuador.

- **Operating time in one activation-cycle:**

Dentro de un único ciclo de activación... ¿cuál es el tiempo que se requiere? La velocidad de actuación va directamente relacionada con la cantidad de energía eléctrica suministrada al SMA. Más, si necesitamos una velocidad mayor y menos si no es importante la velocidad de actuación. En Arquitectura este factor no es tan importante. No es importante si un elemento textil para dar sombra, por ejemplo, se despliega en más o menos segundos.

- **Number of cycles during service life:**

El número de ciclos durante la vida útil del dispositivo. Las SMA soportan muchos ciclos de carga y descarga continuados sin mostrar apenas signos de fatiga. Sin embargo, debemos tener en consideración el número de ciclos esperado para nuestro dispositivo. No es lo mismo el muelle SMA de un vehículo que se activa varias veces en cada uso a otro actuador que solo se active una o dos veces en



cada uso. La ligera bajada de rendimiento al cabo de muchísimos ciclos puede ser muy importante en dispositivos donde se requiera una extrema fiabilidad y rendimiento, por ejemplo en misiones aeroespaciales.

- **Definition of operation conditions:**

En interior, exterior, ambiente marino, sumergido, espacio exterior, etc. Tenemos que tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se someterá la aleación. En función de ellas podemos necesitar características especiales como por ejemplo el tipo de recubrimiento o la protección del conjunto del actuador ante radiación o temperaturas extremas, etc.

- **Fixing / Interfaces to actuator-system / protection class, etc. (electric, mechanic):**

¿Cómo se fijará el actuador al elemento actuado? Para dar la forma adecuada al SMA debemos pensar cómo se fijará a nuestro elemento. En función de eso, se pueden diseñar los extremos del actuador con diversas formas (gancho, circular, circular doble, extensión recta, etc.). También podemos necesitar SMAs unidos entre sí mediante soldadura, en cuyo caso también debemos indicarlo al fabricante y éste puede tratar los puntos de unión para que ésta resulte más fácil y sobre todo fiable.

- **Energy supply (AC/DC):**

¿Cuál será la fuente de energía del SMA? El calor necesario para su activación, ¿será con corriente eléctrica directa o alterna?, ¿energía solar directa?, ¿líquido o gas caliente?, ¿radiación?, ¿electromagnetismo?.

Sevilla, Septiembre de 2015