



## Materiales con memoria de forma metálicos y plásticos, estudio y aplicación

**J. Barandiaran Mancheño<sup>(1)</sup>, J. Muñoz García<sup>(2)</sup>**

*(1) Dpto. Materiales y Estructuras. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial  
barandiaranj@inta.es*

*(2) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación. ETSII-Universidad Politécnica de Madrid  
jumunoz@etsii.upm.es*

---

*Hace ya algunos años, dentro del Instituto nacional de técnica aeroespacial surgió el interés por la aplicación de materiales con memoria de forma en actuadores, primero enfocado al uso en mandos de vuelo en proyectos aeronáuticos, después reduciendo su tamaño, para su uso en pequeños actuadores en programas espaciales.*

*Los primeros estudios se realizaron sobre materiales metálicos, aleaciones de Ni Ti, se estudio su uso en superficies de control adaptativas y se realizaron ensayos de caracterización del material en cables.*

*De estos ensayos se ha concluido acotando el rango de aplicaciones donde este tipo de actuadores son de aplicación.*

*Más recientemente se ha iniciado un proceso similar de estudio y caracterización de materiales plásticos, estos materiales presentan ventajas e inconvenientes respecto a los materiales metálicos antes considerados para estas aplicaciones.*

*Los primeros ensayos se realizaron sobre un Hytrel suministrado por la empresa DuPont, y se empezó por determinar sus características mecánicas.*

*Finalmente se trata de comparar las características de los materiales metálicos y plásticos con memoria de forma, acotar el rango de aplicación de los materiales plásticos como antes se hizo con las aleaciones metálicas y mediante una cuidada caracterización utilizarlos en aplicaciones concretas dentro de los programas en los que INTA está involucrado, tanto aeronáuticos como espaciales, dedicando un especial esfuerzo a estos últimos.*

*En este artículo se presentan, tanto los resultados de estos ensayos, como las propuestas de aplicación de estos materiales en varios programas espaciales.*

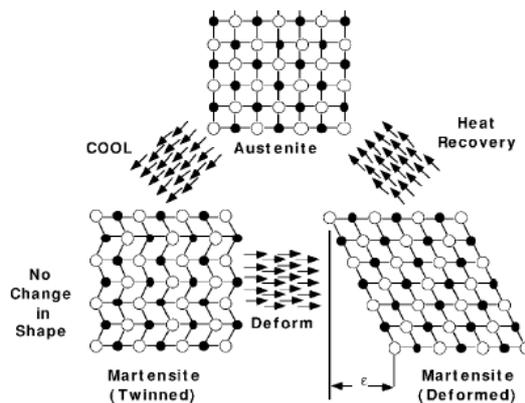
---

### **1. MEMORIA DE FORMA, NOCIONES GENERALES Y SITUACIÓN ACTUAL DE LA TÉCNICA**

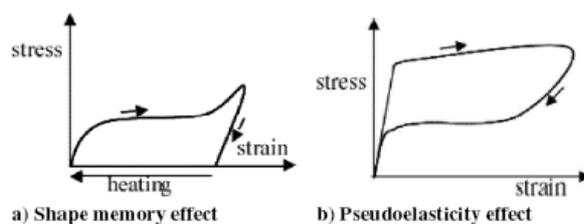
La memoria de forma se refiere a la habilidad de un determinado material de recordar la forma que tenía a una determinada temperatura y estado tensional incluso después de haber sufrido grandes deformaciones a bajas temperaturas.

En el caso de los materiales metálicos estos materiales, sometidos a deformación en fase martensítica, mantendrán esta deformación hasta ser calentados, momento en que recuperarán la forma anterior, como se puede apreciar revisando la bibliografía sobre estos materiales [1], la base del funcionamiento de estas aleaciones estriba en la facilidad con que esta pueda cambiar de fase martensita-austenita.

Sin embargo estas aleaciones varían mucho en sus propiedades mecánicas y eléctricas con pequeñas variaciones en su composición química, como podemos apreciar comparando estos valores de referencia con los valores manejados en los documentos de referencia 2 y 4 [2,4].



Sin embargo cuenta con importantes ventajas, por un lado no se aprecian fenómenos de histéresis, de modo que el mecanismo es en teoría completamente reversible, por otro la tensión con que debe alimentarse el circuito es muy inferior a la necesaria para desplazar un piezoeléctrico o incluso para deformar un material plástico [4].



En el caso de los materiales plásticos el comportamiento a nivel macroscópico es similar, aunque limitado a medida que el material se acerca a su temperatura de transición vítrea, además de introducir mayor variabilidad en función de los procedimientos utilizados en su fabricación.

Los polímeros electroactivos se conocen desde hace décadas, en 1925 se descubrió el que posiblemente fuera el primer polímero piezoeléctrico, llamado Electret, sin embargo no sería hasta la década de 1990 cuando estos materiales empezaran a desarrollarse y estudiarse para su uso industrial.

Estos materiales pueden desarrollar una fuerza limitada y requieren voltajes típicos durante su operación del orden de 150 MV/m, a esto se añadía el mayor de los problemas el alto coste de estos materiales en comparación con sus competidores.

Sin embargo a estos problemas, alguno de los cuales se ha ido reduciendo en los últimos años, se contraponen varias ventajas, por un lado los tiempos de respuesta de estos materiales demuestran ser más cortos que en su contrapartida en materiales metálicos, por otro un mayor rango de actuación del que es posible alcanzar con materiales cerámicos.

La caracterización de elastómeros en condiciones de funcionamiento (presión y temperatura) de los programas espaciales está en una fase muy temprana, pero ya se están proponiendo distintas aplicaciones para estos materiales, similares a la propuesta por Barbet [3].

Las propiedades mecánicas de estos elementos se deben estudiar en profundidad [6] aplicando las técnicas más adecuadas al comportamiento de los mismo [8].

## 2. METAL CON MEMORIA DE FORMA, NI TI

El primer material estudiado es una aleación metálica de Níquel y Titanio, esta aleación se encuentra ampliamente extendida con varias aplicaciones, por ejemplo en sistemas de protección contra incendios, sin embargo, cuando tratamos de buscar sus propiedades nos encontramos con enormes diferencias en función de las fuentes consultadas. [1,4,5].

El comportamiento del material pese a ajustarse en líneas generales al que se describe en obras de referencia como la de Duerig, Melton, Stöckel y Wayman [1] requiere de una serie de ensayos de cada lote para cuantificar cada una de sus características antes de poder considerar sus uso.

En este caso las variaciones de temperatura se inducen mediante una corriente eléctrica aplicada directamente sobre el cable, lo que facilita muchísimo el ensayo ya que no es necesario utilizar instalaciones especiales, pero hace un poco más difícil el tratamiento de los datos, ya que se trata casi siempre de medidas indirectas. De modo que pasaremos a describir los objetivos específicos de los ensayos de caracterización realizados a los cables de SMA suministrados por Dynalloy.

### 2.1. Alcance ensayos Ni Ti

En el caso de la aleación Ni Ti el ensayo abarcó desde la resistividad eléctrica hasta el comportamiento en la zona elástica de la curva esfuerzo deformación a distintas temperaturas.

### 2.2. Ensayo nº 1: Mantenimiento de fase austenita

En este ensayo, se ha tratado de encontrar la intensidad y tensión necesarias para obtener una fase austenita constante para diferentes cargas.

El ensayo se ha realizado con el kit suministrado por Dynalloy. Para el ajuste de la tensión e intensidad se ha utilizado una fuente de tensión con limitación de intensidad. En cuanto a la medición de temperatura, dado la dificultad de encontrar un sistema capaz de proporcionar una medida fiable (debido a la propia geometría del cable), se ha optado por el uso de un termopar. El termopar tiene un muestreo de aproximadamente un segundo. Además, el cable tiene muy poca masa, por lo que el calentamiento del termopar va a ser algo más lento que el del cable. Los resultados pueden observarse en las siguientes figuras:

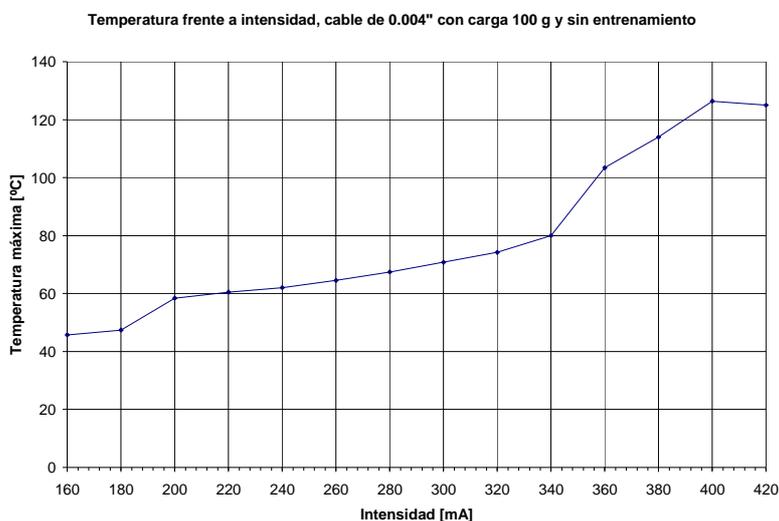


Figura 1

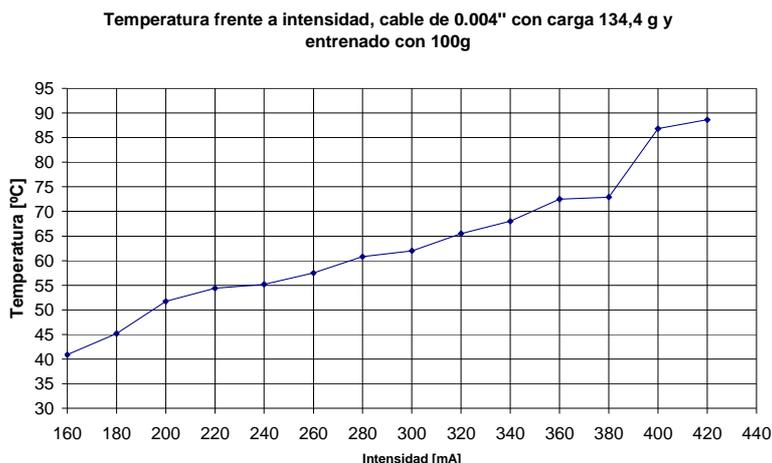


Figura 2

De lo que se concluye que es posible conseguir que un cable de SMA pase a la fase austenita y se mantenga en ella de forma estable a una temperatura estable mediante una intensidad determinada como se aprecia en las figuras 1 y 2.

Las figuras 3 y 4 representan uno de los puntos más característicos de los SMA en cuanto a su forma de trabajo. En los SMA, el cambio de fase depende de las condiciones de esfuerzo (en el caso de los cables, carga) [1] y de la temperatura. A una carga, el paso a austenita se da a una temperatura determinada. Si aumentamos la carga, aumenta la temperatura de cambio.

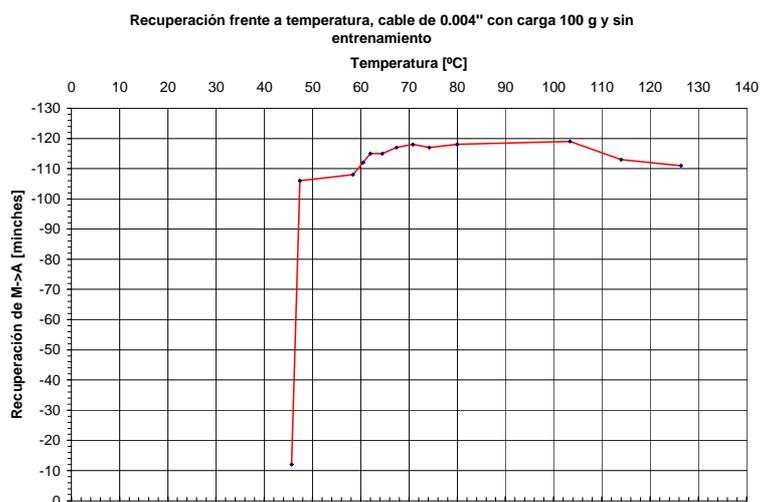


Figura 3

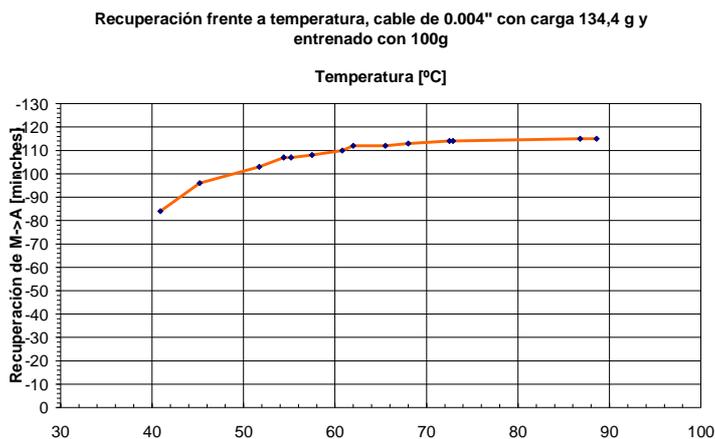


Figura 4

Entre los métodos utilizados para encontrar las temperaturas de cambio de fase en las SMA se encuentra medir la resistencia frente a la temperatura. La fase austenítica y la martensítica tienen diferente resistencia eléctrica. Además, en el cambio de fase hay un cambio de resistencia apreciable. Las gráficas de temperatura-resistencia en las figuras 5 y 6 se han construido para verificar que el ensayo se realizaba correctamente.

**Resistencia frente a Temperatura, cable de 0.004" con carga 100 g y sin entrenamiento**

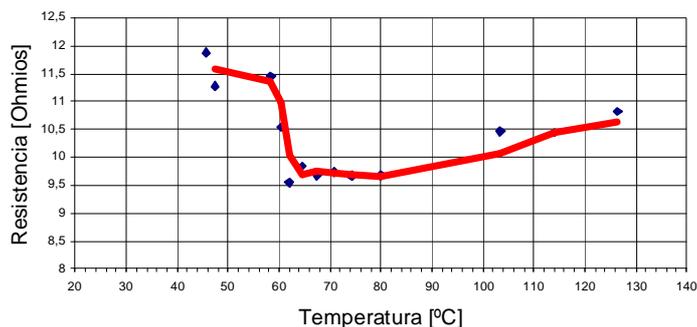


Figura 5

**Resistencia frente a temperatura, cable de 0.004" con carga 134,4 g y entrenado con 100g**

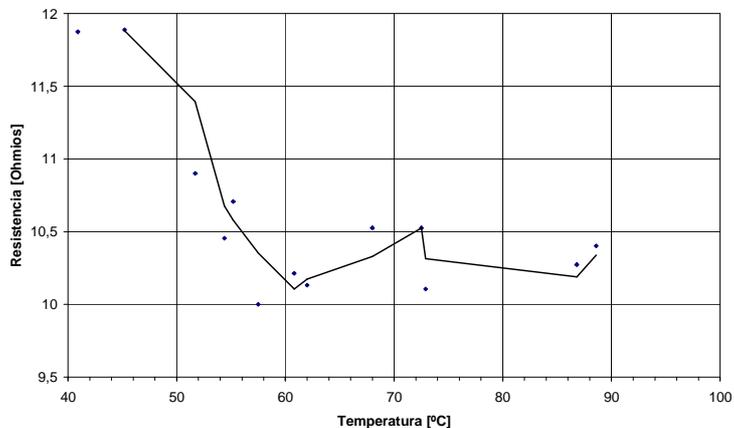


Figura 6

### 2.3. Ensayo n° 2: Ensayo de intensidad máxima y comportamiento en quemado

Con un cable de 0.006" entrenado con una carga de 300 g, se procedió de la siguiente forma: Se daba un calentamiento a una intensidad, se dejaba estabilizar, se anotaba la recuperación en fase austenita y luego se dejaba enfriar. Esto se repetía aumentando las intensidades hasta que se observara el quemado.

| Intensidad [mA] | Voltaje [V] | Resistencia [ $\Omega$ ] | $\Delta L$ [ $10^{-3}$ pulgadas] | Recuperación a Martensita |
|-----------------|-------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 554             | 3.05        | 5.5                      | -109                             | 0                         |
| 600             | 3.27        | 5.45                     | -110                             | 0                         |
| 650             | 3.48        | 5.35                     | -110                             | 0                         |
| 703             | 3.84        | 5.46                     | -109                             | 0                         |
| 803             | 4.3         | 5.35                     | -----<br>cediendo                | -----                     |

Tabla 1. Resultados del ensayo de intensidad máxima

El quemado se observa a 803 mA de forma continua, un 200% de la intensidad máxima recomendada de forma continua.

Se observo que al calentar sube bruscamente hasta  $-113 \cdot 10^{-3}$  pulgadas y después empieza a relajar hasta  $-109$ , pero sigue cediendo. Cede de forma continua a unas  $3 \cdot 10^{-3}$  pulgadas por 30 segundos, es decir unas  $0,1 \cdot 10^{-3}$  pulgadas por segundo.

### 3. HYTREL

El segundo material estudiado será el material plástico Hytrel 6356 suministrado por la empresa DuPont.

El Hytrel es un poliéster, con comportamiento elastómero y termoplástico desarrollado por Dupont que promete buenas propiedades mecánicas para aplicaciones específicas y una gran facilidad en su procesado dadas sus características como termoplástico.

En este caso se ha comenzado por estudiar el comportamiento a temperatura ambiente, dejando para más adelante el estudio del comportamiento a diferentes temperaturas, aunque el objetivo final será estudiar el comportamiento a muy bajas.

#### 3.1. Ensayo de Módulo elástico

En este ensayo, se ha tratado de determinar el módulo elástico del material a temperatura ambiente, la temperatura medida durante el ensayo fue de  $23^{\circ}\text{C}$ , la norma aplicada ASTM 638-03 [8] y el n° de bastidor de la máquina utilizada 5583.

Esta norma es la que más se ajusta a las propiedades que queremos medir y a las probetas suministradas por el fabricante. [7,8].



Figura 7

Observando el montaje en detalle podemos ver la sujeción del extensímetro a la probeta estudiada, esta técnica se utiliza en el INTA habitualmente para medir microdeformaciones en materiales compuestos cuando se requiere mucha precisión en la medida.

Pese a diferir en cerca de un 25 % de lo indicado por el fabricante, las propiedades siguen siendo adecuadas para el tipo de sollicitación que se busca, sin embargo quedan aún muchas incógnitas relacionadas con el funcionamiento del material a distintas temperaturas.

Los resultados del ensayo parecen presentar muy poca dispersión, a falta de realizar una serie más larga de ensayo podemos resumir los resultados obtenidos en las siguientes figuras.

Esf vs Def (zona elástica)

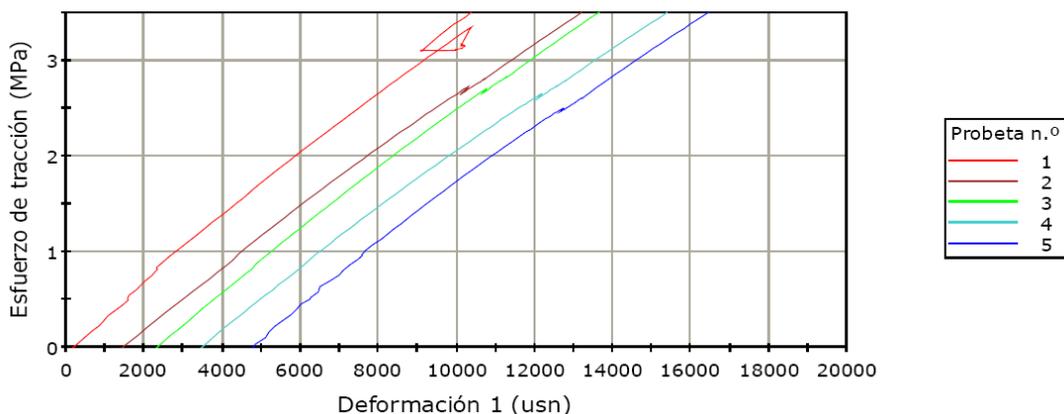


Figura 8

Eliminando la zona de la curva donde se retira el extensímetro se puede apreciar que el comportamiento es muy similar en todas las probetas.

Carga vs Desplazamiento

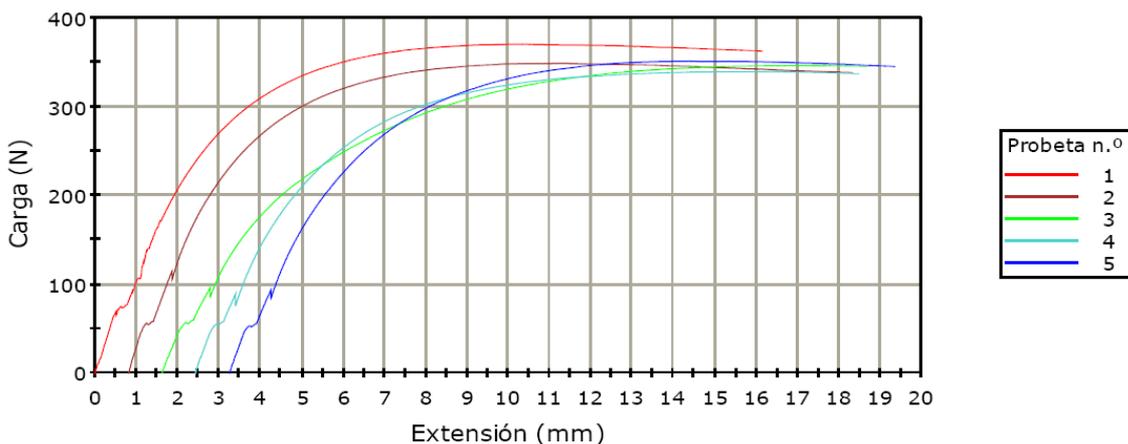


Figura 9

El límite elástico parece situarse sobre los 15MPa, un valor más que aceptable en la mayoría de las aplicaciones propuestas, aunque no llegue a los 19 MPa especificados por el fabricante.

#### **4. CONDICIONES AMBIENTALES Y DE APLICACION**

En el marco de los programas desarrollados en INTA las mayores solicitudes para los mecanismos utilizados derivan de las condiciones ambientales de funcionamiento.

Es habitual en el ámbito espacial el funcionamiento a temperaturas y presiones muy bajas, así como entornos en vibración mientras se necesita dar soporte a elementos muy delicados.

##### **4.1. Presión (desgasificación)**

Un valor típico en misiones embarcadas estaría en torno a  $10E-6Pa$ .

Este requisito debe ser tenido en cuenta en la elección de materiales.

Debe tenerse cuidado con la estanqueidad. Tanto para mantenerla en el caso de los pasamuros, como para evitarla en los elementos montados en el interior de la cámara.

En el caso de elementos embarcados estos elementos tienen que asegurar que no mantienen zonas estancas, y que son capaces de eliminar todo el aire contenido en caso de descompresión de emergencia, sin sufrir daños que puedan derivar en la proyección de elementos.

En el caso que nos ocupa y teniendo en cuenta los materiales estudiados habría que tener especial cuidado en caso de desgasificación del Hytrel, aunque no hay datos que sugieran que sufra una desgasificación apreciable. En caso de que sufriese desgasificación y esta fuera superior a la fijada en las normas de calidad aplicables, muy duras en el caso de elementos ópticos embarcados, el material no podría usarse.

##### **4.2. Temperatura ( condiciones extremas)**

En el caso de misiones embarcadas la temperatura de operación suele variar entre  $-170^{\circ}C$  hasta  $+160^{\circ}C$  aunque suelen ser más habituales las bajas temperaturas.

En casos como el instrumento MIRI (parte del telescopio espacial JWST) y la contribución española al mismo, el MTS, la temperatura mínima era de tan solo 24K.

Se trata de un requisito limitante en cuanto la elección del motor y otros elementos mecánicos.

Conlleva problemas con el uso de lubricantes, aquellos que se podrían usar en altas temperaturas no se pueden usar en bajas.

Problemas en la elección de materiales estructurales, los materiales más comunes en diseños para bajas temperaturas tienen tratamientos térmicos incompatibles con la parte superior del rango como es el caso del Al6061 T6.

Y en el caso que nos ocupa puede ser un problema para la utilización de materiales plásticos.

#### **5. CONCLUSIONES Y APLICACIÓN PRÁCTICA**

De los ensayos del cambio de fase del NiTi se concluye que es posible conseguir que un cable de SMA pase a la fase austenita y se mantenga en ella de forma estable a una temperatura estable mediante una intensidad determinada como se aprecia en las figuras 1 y 2.

Sólo es necesario caracterizar primero esa intensidad con un ensayo. En la documentación suministrada por Dynalloy, se obtienen unos primeros valores de intensidad, pero estos valores solamente nos dan una idea de la intensidad que se puede dar de forma continuada sin quemar el cable (se equilibra el calor producido por la corriente con el disipado al aire) y que sea suficiente para el paso a austenita. Sin embargo para casos de carga altos, puede aparecer el fenómeno de SIM. [1]

Era el objetivo principal, comprobar si podíamos regular la fuente de alimentación para mantener el cable en fase de austenita, a una carga dada y con el mismo comportamiento mecánico.

En el caso del Hytrel los resultados de los ensayos con el material plástico son prometedores.

Pese a diferir en cerca de un 25 % de lo estimado por el fabricante, las propiedades siguen siendo adecuadas para el tipo de sollicitación que se busca, sin embargo quedan aún muchas incógnitas relacionadas con el funcionamiento del material a distintas temperaturas.

Los resultados del ensayo presentan muy poca dispersión, y son coherentes, por lo que el método seguido para su ensayo parece válido, y por tanto adecuado para caracterizar el material en futuras aplicaciones. Cubriendo de este modo el principal objetivo de este ensayo, buscar un método adecuado para la caracterización del material.

Las aplicaciones que se están estudiando para estos materiales están en el caso de los materiales plásticos en fases tempranas de desarrollo. Mientras en el caso de los materiales metálicos se empiezan a usar y presentan buenas características pese a su difícil manejo y poca fiabilidad.

Se ha planteado el uso de NiTi para actuar un sistema de extensión de paneles solares en pico satélites del estándar cubesat Figura 10.

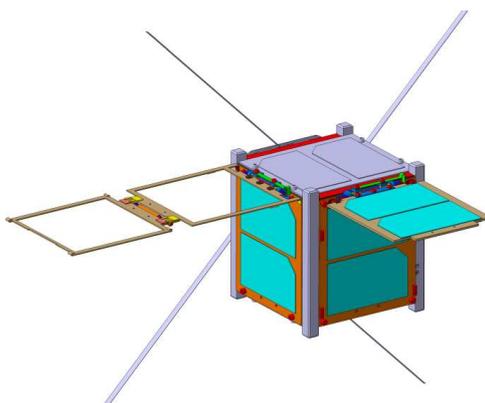


Figura 10

Por otro lado los materiales plásticos están siendo estudiados para su uso como soporte de elementos ópticos embarcados

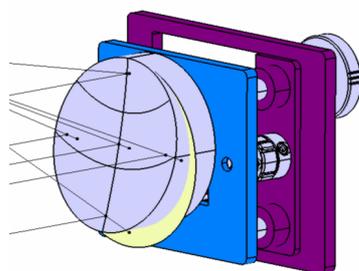


Figura 11

Con el desarrollo de la nueva generación de telescopios espaciales JWST, EChO, SPICA, que deben situarse en órbita L2 y operar a temperaturas criogénicas este sector está viendo una fuerte demanda de estos elementos, capaces de dar soporte durante la misión, garantizando la fiabilidad en la situación de las lentes y espejos pero siendo capaz además, de amortiguar parte de las cargas del lanzamiento.

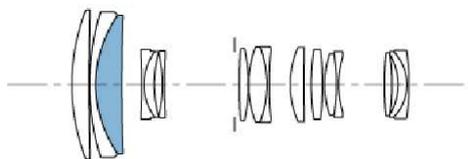


Figura 12

Finalmente el estudio de los materiales aun está por desarrollar, es necesario, para su uso en las futuras aplicaciones que están planteándose, el estudio pormenorizado de la variación de sus propiedades mecánicas eléctricas y térmicas a temperaturas criogénicas. Del mismo modo el desarrollo continuo en la aplicación de productos dopantes a estos materiales para mejorar su conductividad eléctrica, entre otras características, hacen de este un terreno que debe seguir explorándose.

## 6. REFERENCIAS

- [1] T W Duerig; K N Melton; D Stöckel; C M Wayman, Ed: Butterworth-Heinemann, Engineering aspects of shape memory alloys (1990)
- [2] Tak, W. Shape Memory Alloy Actuator Based Satellite Separation Device Using Plastic Deformation ESA, 2009
- [3] Barbet, V. A shape memory alloy actuator for solar array deployments ESA, 2005
- [4] Inderjit Chopra, Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems AIAA Journal 2002
- [5] Chris Haag Texas AandM University, College Station, TX, UNITED STATES; Monish Tandale Texas AandM University, College Station, TX, UNITED STATES; John Valasek Texas AandM University, College Station, TX, UNITED STATES Characterization of Shape Memory Alloy Behavior and Position Control Using Reinforcement Learning AIAA 2005
- [6] Juan M Mejia-Ariza; Koorosh Guidanean; Thomas W Murphey; Adam Biskner Mechanical Characterization of L'Garde Elastomeric Resin Composite Materials AIAA, 2010
- [7] I.A. Ballinger; Dr. D. Sims Development of an Enhanced EPDM Elastomeric Material for use in Hydrazine Propulsion System AIAA 1999
- [8] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics1 ASTM 638-03