

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar y adaptar los modelos constitutivos existentes para la caracterización termomecánica de las aleaciones con memoria de forma de níquel-titanio (Ni-Ti) para permitir su uso en aplicaciones tecnológicas.

Los modelos constitutivos macroscópicos a analizar son los desarrollados por Tanaka [TAN,1986]_a Liang-Rogers [LIA,1990]_b Brinson [BRI,1993]_a y Auricchio [AUR,1997]_a realizándose la evaluación de dichos modelos en el ámbito numérico y experimental. Para el análisis numérico se implementan numéricamente los modelos seleccionados bajo un algoritmo propio de control por deformación adaptado específicamente para este fin. Para la verificación experimental se desarrollan todas las técnicas adecuadas para la obtención de sus parámetros constitutivos, y, en base a ello, se detectan las deficiencias y las necesidades de mejora de los modelos constitutivos macroscópicos. Como consecuencia de este análisis se propone un modelo constitutivo propio que reproduce más adecuadamente el comportamiento de estas aleaciones.

Para contrastar las mejoras aportadas a los modelos así como para profundizar en su comparación, se desarrolla una teoría a flexión para viga empotrada comparando los resultados numéricos obtenidos con los resultados experimentales.

JUSTIFICACIÓN

Las aleaciones con memoria de forma (SMA) son una clase de materiales que presentan unas propiedades mecánicas que no son habituales en los materiales usados generalmente en aplicaciones ingenieriles. Estas aleaciones tienen la habilidad de sufrir transiciones de fase micromecánicas reversibles cambiando su estructura cristalográfica. Esta capacidad se traduce a nivel macroscópico en dos propiedades fundamentales y características de las SMA: *la superelasticidad y la memoria de forma*.

Aunque existen varias aleaciones que poseen estas propiedades, sólo aquellas que pueden recobrar cantidades substanciales de deformación y, o pueden generar fuerza significativa tienen, en la actualidad, interés comercial. Estas aleaciones son las de níquel-titanio (NiTi o nitinol) y las de base cobre (CuZnAl o CuAlNi). Comparándolas, las aleaciones de NiTi pese a ser más caras que las de base cobre, poseen mayor deformación con memoria de forma, son térmicamente más estables, poseen mejor resistencia a la corrosión y mayor ductilidad. Son además biocompatibles y sus temperaturas de transformación son más estables. Este material posee también un comportamiento mecánico altamente no-lineal, con alta capacidad de amortiguación y altos valores de tensión de cedencia. Todas estas propiedades hacen que las aleaciones NiTi puedan ser utilizadas en muchas aplicaciones innovadoras dentro de diversos campos tecnológicos, desde la biomedicina hasta dispositivos aeroespaciales. Por estas razones, el presente trabajo se centra en las aleaciones con memoria de forma NiTi.

De las propiedades remarcadas anteriormente, *el efecto memoria de forma* es la habilidad del material de recuperar grandes deformaciones inducidas mecánicamente (hasta el 8%) mediante moderados incrementos de temperatura. *La pseudoelasticidad* se refiere a la capacidad del material, en un régimen de altas temperaturas, de acomodar deformaciones relativamente altas en un proceso de carga y recuperar su forma original en la descarga mediante un ciclo de histéresis. El mecanismo subyacente es la transformación martensítica termoelástica reversible entre dos fases en estado sólido. Esta transformación puede ser inducida por cambios en la temperatura o bien por cambios en la tensión, causando un fuerte acoplamiento termo-mecánico en el comportamiento del material. Este comportamiento del NiTi es debido a la interacción entre dos fases, la fase de alta temperatura (austenita) con una estructura cúbica, y la fase a baja temperatura (con estructura monoclinica). Debido al bajo grado de simetría, la fase martensita existe como una estructura maclada aleatoriamente (baja temperatura, baja tensión) o bien como una estructura demaclada inducida por tensión que puede acomodar grandes deformaciones sin deformaciones permanentes.

Pese al hecho de que estas aleaciones fueron descubiertas prácticamente 40 años atrás, los modelos constitutivos se han ido desarrollando relativamente despacio, debido

básicamente a la complejidad del comportamiento del material y a las limitadas bases experimentales que han existido durante años. A nivel micromecánico, los resultados de la literatura han alcanzado una madurez considerable, sin embargo, el enlace entre el comportamiento macroscópico y microscópico tiene un grado de complejidad muy elevado y está en una fase reciente de investigación. En las últimas décadas se ha realizado un considerable esfuerzo en la obtención de modelos constitutivos y se han realizado nuevos descubrimientos experimentales que han dado un nuevo ímpetu para el diseño y aplicación de estos materiales. Sin embargo, todavía se está lejos de poder decir que existen modelos constitutivos realmente fiables y adecuados para la mayoría de aplicaciones ingenieriles especialmente en lo referente a procesos de cargas cíclicas. De hecho, algunos de los resultados experimentales consultados ponen de manifiesto algunas de las inestabilidades del material, sobre todo en lo referente al comportamiento pseudoelástico.

Por todo esto, se puede decir que el campo de aplicación de las aleaciones con memoria de forma y sus especiales propiedades está ampliamente limitado debido, entre otras causas, a la falta de un modelo teórico que reproduzca con suficiente precisión el comportamiento termomecánico de estas aleaciones y que esté ampliamente reconocido y aceptado. Pese a que existe una relativa amplia cantidad de modelos en la literatura pocos, por no decir ninguno, están generalmente aceptados como recomendación para el diseño de elementos de SMA. Esto se debe a que requieren conocimientos excesivamente específicos de diferentes disciplinas para su correcta aplicación, no están suficientemente desarrollados como para permitir el cálculo aplicando las características del material obtenidas por procedimientos rutinarios, se basan en parámetros difíciles de obtener o bien son difíciles de implementar en métodos numéricos.

En base a lo expuesto anteriormente, este trabajo se centra en los siguientes objetivos. En primer lugar es necesario analizar todos los modelos existentes en la bibliografía para poder seleccionar aquellos aplicables directamente al diseño de elementos mecánicos y estructurales, es decir, aquellos conceptualmente sencillos pero capaces de representar todas las propiedades de las SMA, compuestos de parámetros fácilmente

obtenibles experimentalmente y con capacidad para ser implementados numéricamente con razonable sencillez.

Una vez analizados y seleccionados los modelos, se procede a su comparación, poniendo de manifiesto las peculiaridades de cada uno de ellos. Para ello se requiere un procedimiento experimental de ensayos a tracción para la obtención de los parámetros constitutivos de cada modelo, y así compararlos numérica y experimentalmente. Con esta comparación experimental se pueden poner de manifiesto ciertas deficiencias en los modelos que deberán ser subsanadas y mejoradas dando lugar al desarrollo de un modelo constitutivo propio que reproduzca mejor el comportamiento de este material.

Para complementar la comparación de los modelos con un estado de carga diferente al de tracción, del que se extraen los parámetros constitutivos, se realizan ensayos a tensión constante y en combinado tensión constante-deformación constante. Este estado de carga simula el comportamiento de un actuador. También como complemento a esa comparación se desarrolla una teoría adecuada para el análisis a flexión para el caso de viga empotrada, comparando los resultados numéricos de las ecuaciones seleccionadas y del modelo propuesto con los resultados experimentales de los ensayos a flexión. Para ello se han desarrollado las técnicas experimentales necesarias para el ensayo a flexión de las probetas SMA.

APORTACIONES

Pese a que existen en la literatura comparaciones previas de los modelos constitutivos macroscópicos, dichas comparaciones han sido, en la mayoría de los casos, meramente descriptivas o teóricas. Con este trabajo de investigación es la primera vez que se *compararan, bajo el mismo conjunto de ensayos experimentales y en las mismas condiciones, los modelos de Tanaka, Liang-Rogers, Brinson y Auricchio.*

Dado que los modelos constitutivos utilizan como variables de control la tensión y la temperatura, la implementación numérica de los modelos en control por deformación y temperatura se torna excesivamente compleja. En consecuencia, otra contribución

esencial es el ***desarrollo de los algoritmos adecuados para la implementación numérica de los modelos constitutivos en control por deformación***. Para ello, se utiliza una técnica semejante a la empleada por los algoritmos de plasticidad: predicción elástica-corrección plástica. En ningún caso se encuentra en la literatura el desarrollo de los algoritmos en control por deformación para todos los modelos analizados.

Para la obtención de los parámetros constitutivos de los modelos seleccionados se requiere la realización de una serie de ensayos a tracción a diferentes temperaturas. Sin embargo, el comportamiento de este material varía significativamente en el ciclado a tracción (número de veces que se repite un proceso de tracción carga-descarga) por lo que se estudia con detalle las consecuencias de la estabilización de las aleaciones con el ciclado en la obtención de los parámetros constitutivos, y se compara con la obtención de los parámetros en probetas sin ciclar. Otra aportación original de este trabajo es ***el estudio exhaustivo de las condiciones de la estabilización***: número de ciclos, deformación en el ciclado, condiciones de estabilización y temperatura de estabilización de tal forma que queden claras la influencia de la estabilización en la obtención de los parámetros.

Como consecuencia de la comparación y análisis experimental de los modelos constitutivos seleccionados ***se desarrolla un modelo constitutivo propio*** complementario al modelo de Brinson y Auricchio, que subsana las deficiencias encontradas por los modelos estudiados y complementa la modelización de estos materiales.

Otra aportación importante de este trabajo, es el ***desarrollo de un modelo de viga empotrada sometida a flexión*** adecuado a las ecuaciones constitutivas evaluadas así como el análisis experimental del comportamiento a flexión de una probeta de SMA empotrada en un extremo. Los estudios experimentales revisados en la literatura se han realizado con flexión en tres o cuatro puntos, en éste último caso para poder obtener un tramo con flexión pura. No se encuentra en la bibliografía un estudio teórico ni experimental del análisis a flexión con viga empotrada con carga en el extremo basado en la teoría clásica de Euler-Bernouilli. Este estudio es muy interesante puesto que la

simplicidad derivada de los pocos parámetros cinemáticos implicados en el modelo de viga permite el análisis detallado del complejo comportamiento de las aleaciones estudiadas. Si los ensayos se realizan bajo condiciones de baja velocidad de deformación, se puede evaluar la propagación de la transformación a lo largo de la sección al incrementar la fuerza aplicada, comparando así la evolución teórica de la transformación martensítica según modelos con la evolución real.

ESTRUCTURACIÓN

El presente trabajo está estructurado en seis capítulos y dos anejos. En el **CAPÍTULO 1** se revisan las principales características de las aleaciones con memoria de forma. Se comienza analizando las propiedades metalúrgicas desde un nivel microscópico para proseguir explicando cómo las transformaciones de fase a nivel microscópico dan lugar a las propiedades que observamos física o macroscópicamente. Seguidamente se explican, de forma general, los parámetros típicos que afectan al comportamiento físico de la aleación, como la tensión, deformación, tratamientos térmicos e historia termomecánica. Por último, se analiza el proceso de fabricación y suministro del material y se revisan también las aplicaciones de estas aleaciones.

El **CAPÍTULO 2** se centra en el modelado de las ecuaciones constitutivas desarrolladas para las SMA. La mayoría de las aplicaciones existentes con estas aleaciones son en forma de alambre, por lo que se da más énfasis a los modelos uniaxiales, que son los usualmente utilizados en tests numéricos. Una vez presentada una revisión bibliográfica de los modelos constitutivos existentes en la actualidad, se seleccionan y analizan cuatro de ellos que, según la literatura reciente, son los más adecuados para aplicaciones casi estáticas: el modelo de Tanaka; Liang-Rogers; Brinson y Auricchio, éste último con dos aproximaciones diferentes para las leyes de evolución: lineal y exponencial.

Para cada uno de los modelos se realiza, en primer lugar, una breve descripción detectando los parámetros constitutivos que deberán ser obtenidos experimentalmente; se reformulan en base a un conjunto de parámetros comunes a todos los modelos para facilitar su posterior comparación; se desarrollan las ecuaciones necesarias para la

implementación numérica en control por deformación; se diseñan los algoritmos propios de predicción elástica-corrección por transformación; se implementan en el programa de simulación MATLAB v 6.0 y se subrayan las principales ventajas y desventajas para valorar mejor su correcta aplicación.

En el **CAPÍTULO 3** se presenta toda la primera fase de estudio experimental. En primer lugar se destacan cuáles son las principales características de las aleaciones que condicionan la experimentación con estos materiales, estableciendo, de una forma sistemática, los condicionantes fundamentales de los ensayos a tracción. Estos condicionantes determinan la programación de los ensayos posteriores para que sean realizados de una manera cuidadosa y sistemática, asegurando tanto la precisión de los resultados como su repetibilidad.

Se justifica también la elección del material realizado, se presentan los equipos experimentales diseñados específicamente para este trabajo y se desarrolla una operativa adecuada para la obtención de los parámetros constitutivos de los modelos.

La parte fundamental de este capítulo es el estudio de la estabilización previa de las probetas y su influencia en la obtención de los parámetros. La estabilización garantiza un comportamiento estable de las SMA en sucesivos ciclos de aplicación, pero puede provocar dispersión en la obtención de los parámetros en función de las condiciones en las que se realiza la estabilización. Se determina experimentalmente el número de ciclos necesario, la deformación del ciclado, la velocidad de deformación y la temperatura óptima para el ciclado. Se estudia cómo afectan estas condiciones en los parámetros constitutivos necesarios para los modelos. Como consecuencia de este análisis se determina experimentalmente que la variabilidad en la obtención de los parámetros constitutivos con diferentes probetas estabilizadas es notablemente elevada, con lo que la comparación de modelos bajo estas condiciones no garantiza una uniformidad de resultados. Por ello se realiza un conjunto de ensayos a tracción con probetas no cicladas (vírgenes), determinando en ellas los parámetros constitutivos empleados en la comparación de los modelos.

En el **CAPÍTULO 4** se verifican los modelos implementados numéricamente con los resultados obtenidos experimentalmente para las probetas vírgenes, poniendo de relieve las principales discrepancias teóricas y experimentales de los modelos estudiados. Esta comparación se realiza inicialmente con los ensayos a tracción, sin embargo, dado que son de estos ensayos de donde se obtiene los parámetros, se requiere el desarrollo de un conjunto de ensayos complementarios e independientes para la verificación. Estos ensayos de verificación son a tensión constante y en combinado tensión constante-deformación constante, simulando el comportamiento de un actuador. Para ambos conjuntos de ensayos se desarrollan todas las técnicas experimentales más adecuadas para la obtención de los resultados de comparación.

Como consecuencia fundamental de este capítulo y ante las discrepancias encontradas en la contrastación experimental de los modelos estudiados, *se propone y formula completamente un modelo constitutivo propio* complementario al modelo de Auricchio y de Brinson. Este modelo propuesto es también verificado y contrastado bajo los diferentes estados de carga desarrollados.

En el **CAPÍTULO 5** se aplican los modelos a un ensayo a flexión con viga empotrada como complemento a la verificación y contrastación experimental. Se desarrolla e implementa una teoría a flexión para viga empotrada para los modelos estudiados basada en la teoría clásica de Euler-Bernouilli y se diseñan los elementos necesarios para el ensayo experimental a flexión de probetas SMA. Se comparan, de nuevo, los valores obtenidos numéricamente con los resultados experimentales.

En el **CAPÍTULO 6** se presentan las conclusiones generales de todo el trabajo, se resaltan las aportaciones originales, se analizan los posibles estudios derivados de la presente tesis, así como las recomendaciones deducidas para dichos futuros trabajos.

En el **ANEJO 1** se presenta una comparación, en forma de tabla, de las referencias bibliográficas donde se han realizado comparaciones de algunos de los modelos seleccionados. En el **ANEJO 2** se presenta el Certificado de Calidad de la aleación empleada para la verificación experimental.