

CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

6.2. Aportaciones del trabajo de investigación

6.3. Propuestas de futuro

6.1. CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo de investigación se ha evidenciado que el comportamiento de las aleaciones con memoria de forma es suficientemente complejo como para que el diseño de cualquier aplicación industrial con estos materiales requiera de un modelo constitutivo adecuado. Este modelo debe ser capaz de reproducir el complejo comportamiento termomecánico de las SMA de forma precisa. Ha de permitir, además, una implementación numérica robusta con recursos computacionales limitados y tiempos discretos de cálculo.

De las *comparaciones numéricas realizadas para los modelos de Tanaka, Liang-Rogers, Brinson y Auricchio*, se han extraído las siguientes conclusiones:

- *Todos los modelos han sido adecuados para su implementación bajo el algoritmo de control desarrollado*: predicción de transformación completa-corrección para el proceso de transformación y todos los modelos han simulado adecuadamente todos los estados de carga propuestos. Sin embargo, los modelos de Liang-Rogers y Brinson, al no tener las ecuaciones de evolución expresadas en forma temporal, han presentado mayor dificultad en su adaptación a la notación diferencial. Esto hace compleja la aplicación de estos modelos para estados de carga cíclicas con transformaciones incompletas, donde debe definirse claramente las condiciones iniciales de cada ciclo.
- *Los modelos de Tanaka y Liang-Rogers*, al no contemplar fracciones diferentes de martensita, no pueden simular el comportamiento isotérmico por debajo de la temperatura de transformación M_s . Para las simulaciones a deformación constante

y tensión constante, la simulación ha podido realizarse modificando las condiciones iniciales en la transformación. Esto lleva a la complejidad de simulación de estados de carga más complejas.

- **Los modelos de Liang-Rogers y Brinson**, al tener las ecuaciones de evolución basadas en expresiones cosenoidales, han tenido que ser implementados delimitando claramente el rango de aplicación de dichas ecuaciones. Esto hace que, para algoritmos de simulación más complejos, se haga difícil su implementación.
- **En el modelo de Tanaka**, al utilizar una expresión exponencial para la evolución de la fracción de martensita, los resultados han sido muy sensibles a pequeñas variaciones de los parámetros constitutivos, teniendo tendencia a volverse inestable en ciertos casos debido a problemas de convergencia numérica tanto en la tensión como en la fracción de martensita.
- **El modelo de Brinson**, al existir una indefinición de las ecuaciones de evolución para el caso de tensión constante y deformación constante en la zona de temperaturas entre M_f y M_s , ha tenido que ser reformulado para estados de carga con transformaciones incompletas.
- **El modelo de Auricchio** presenta las leyes de evolución en forma temporal, sin embargo, al considerar parámetros constitutivos no constantes, no ha podido ser integrado en forma cerrada y ha requerido una implementación numérica más compleja.
- **Para el modelo de Auricchio**, en la bibliografía consultada, existían ciertas discrepancias en los signos y en algunas notaciones de las ecuaciones de las leyes de evolución, posiblemente debido a errores tipográficos. Las ecuaciones presentadas en este trabajo han incluido las modificaciones y correcciones que se han considerando oportunas.
- **El modelo de Auricchio con ley de evolución exponencial**, al tener dichas leyes exponenciales expresadas en función del parámetro β , es el más versátil para simular diferentes comportamientos del material en la zona de transformación. Sin embargo, es el más complejo en cuanto a número de parámetros constitutivos, pues considera diferentes valores de β para la transformación a cada temperatura.

- En todos los modelos se ha considerado el módulo elástico de la ecuación constitutiva no constante y dependiente de la fracción de martensita. Se han empleado dos aproximaciones diferentes para la expresar esa dependencia: la aproximación de Voigt y la aproximación de Reuss. **En ningún caso de las simulaciones numéricas, las diferencias entre ambas expresiones ha sido significativa**, con lo que la dificultad que aporta, desde el punto de vista numérico la aproximación de Reuss, hace más recomendable utilizar la expresión de Voigt.

En el ámbito experimental, como consecuencia **del análisis de diferentes probetas cicladas a distintas temperaturas**, se han extraído las siguientes conclusiones:

- **La tensión de inicio y final de la transformación** martensítica **decrece** al incrementar el número de ciclos durante el proceso de carga y descarga a temperatura constante. Este resultado es consistente con los resultados obtenidos por otros autores que analizaron detalladamente el ciclado como [LIM,1999]_a, aunque es su estudio detectaron un aumento progresivo de la deformación residual al ser procesos de mayor deformación.
- Esta variación es mucho **más pronunciada en los ciclos iniciales**, esencialmente para aquellas tensiones correspondientes a las deformaciones próximas a las deformaciones de inicio de transformación **alcanzando la estabilidad a partir de un determinado número de ciclos (alrededor de 50)**. Este fenómeno fue explicado por Y.Liu [LIU,1999] sugiriendo un endurecimiento por deformación debido a la generación de defectos en la red (dislocaciones) a causa de las sucesivas deformaciones. Filip y Mazanek [FIL,1994] sugirieron además, que estas dislocaciones provocaban la estabilización de las placas de martensita y estas placas de martensita formadas favorecían la aparición más temprana, en subsiguientes ciclos, de las nuevas placas de martensita hasta un punto de saturación y estabilización.
- **La variación inicial es más acusada en las probetas cicladas a menores temperaturas que las de mayor temperatura**. Esto se explica probablemente porque, para menores temperaturas, la deformación máxima impuesta produce una transformación completa (o prácticamente completa) a diferencia de las probetas

cicladas a mayor temperatura, donde esa deformación está dentro de la meseta de transformación. El ciclado dentro de un rango de menores deformaciones, produce menos degeneración del comportamiento [TOB,1998], [MIY,1981].

- El decrecimiento de las tensiones de transformación provoca que **las líneas de inicio y final de transformación martensítica se muevan en dirección de menores tensiones y mayores temperaturas** al progresar la deformación cíclica.
- **Las temperaturas de transformación varían con el ciclado**, decreciendo las temperaturas M_s y M_f ligeramente, siempre bajo la interpretación de las curvas según Ling y Kaplow [LIN, 1980], [LIN,1981]. Esta observación también es coherente con los resultados obtenidos por P.Filip y K.Mazanek [FIL,1994].
- **La deformación residual apenas se ve afectada con el ciclado** puesto que el valor elegido como deformación impuesta no llega a provocar aparentes deformaciones plásticas permanentes.
- **Los módulos elásticos en el proceso de carga y descarga tampoco sufren variaciones tan apreciables** como la tensión. La diferencia más significativa se produce en aquella probeta ciclada a una temperatura más próxima a la de inicio de transformación austenítico.

Del análisis del **comportamiento a diferentes temperaturas entre las probetas estabilizadas**, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- **La estabilización a una determinada temperatura determina claramente el comportamiento a otras temperaturas**, siendo preferible estabilizar a la menor temperatura posible de utilización de un componente SMA para así obtener mayores valores de tensión a temperaturas mayores.
- **El ciclado a tracción de las aleaciones SMA afecta severamente su comportamiento**, alterando las temperaturas de transformación, las tensiones de transformación y las deformaciones de transformación. La estabilidad de estos parámetros determinará lo estable que sea la aleación en lo referente a sus propiedades mecánicas, físicas y de memoria de forma. Es por ello necesario analizar cuidadosamente esta estabilización para poder obtener resultados repetitivos en una aplicación dada.

- ***El ciclado depende de la máxima deformación impuesta (a mayor deformación será más difícil su estabilización) y de la temperatura a la que se cicle.*** A igualdad de deformación máxima impuesta, aparentemente se estabiliza más rápidamente a mayor temperatura, pero se corre el riesgo de no llegar a una transformación completa y no poder obtener los parámetros constitutivos completos. Por otro lado, todas las probetas estabilizadas presentan mayores valores de tensión a temperaturas superiores que las estabilizadas a estas temperaturas superiores. Esto indica la conveniencia de ciclar siempre a la temperatura más baja prevista de uso y obtener, a partir de este ciclado, los parámetros constitutivos.

Realizados los ensayos a tracción con las probetas vírgenes (probetas sometidas a tratamiento térmico previo) se han obtenido todos los valores necesarios para el diagrama crítico tensión temperatura y todos los parámetros constitutivos de los modelos. ***De la representación gráfica del diagrama crítico se han deducido las siguientes conclusiones:***

- Para temperaturas inferiores a M_s , la relación tensión temperatura presenta una ligera tendencia creciente para la tensión crítica al disminuir la temperatura.
- Las tensiones de inicio y final de la transformación martensítica son muy semejantes, lo que indica que la transformación ocurre en un pequeño margen de tensiones.
- La tendencia de la relación entre la tensión crítica y la temperatura es claramente lineal, siguiendo la relación de Clausius-Clapeyron para temperaturas entre alrededor de 50°C y 100°C.
- Para temperaturas superiores a 100°C, la relación tensión-temperatura abandona la linealidad, adoptando una ligera forma curva. Esto puede ser indicio de plastificaciones previas al proceso de transformación.
- Las tensiones críticas para el proceso de descarga pseudoelásticas son difíciles de detectar, con lo que la pendiente C_A ha de ser confirmada con otro tipo de ensayos diferentes a los de tracción isotérmica.

De la *comparación entre el diagrama crítico tensión-temperatura experimental y el teórico que considera cada modelo* se han extraído las siguientes conclusiones:

- Puesto que el diagrama crítico tensión-temperatura presenta una relación lineal a temperaturas inferiores a M_S , las aproximaciones para este diagrama crítico de los modelos de Brinson y Auricchio son más adecuadas que la de los modelos de Tanaka y Liang-Rogers.
- Para poder comparar los modelos de Tanaka y Liang-Rogers con los modelos de Brinson y Auricchio, al considerar diagramas críticos diferentes se debe cambiar los valores para las temperaturas de transformación ***En los modelos de Tanaka y Liang-Rogers se debe tomar como temperaturas de transformación las temperaturas de transición en estos modelos como la intersección de las curvas de pendiente positiva (C_M) con el eje de temperaturas.***
- Para los modelos de Auricchio y Brinson, analizado el diagrama crítico tensión-temperatura, debe cambiarse el valor de intersección entre el tramo de pendiente C_M con el tramo a tensión constante. Así pues, ***en lugar de tomar el valor de M_S como temperatura de transición entre los dos tramos, se debe cambiar al valor obtenido experimentalmente y denominado $T_{equilibrio}$***

De las *comparaciones entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas para cada uno de los modelos* se ha deducido que todos los modelos, en general, predicen bien el comportamiento del material en los rangos de temperatura estudiados para cada uno de ellos. Sin embargo, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Pese a haber realizado la corrección en la consideración de las temperaturas M_S y M_f en los modelos de *Liang-Rogers* y *Tanaka*, ***su comportamiento a temperaturas próximas a M_S no se predice adecuadamente.*** Esto es debido a que estos modelos, a una temperatura tan próxima a la temperatura de inicio de la transformación martensítica, suponen un valor de tensión crítico para el inicio de la transformación extremadamente bajo. Sin embargo, ***a mayores temperaturas la predicción de estos modelos es adecuada.***

- **Para todos los modelos**, y a temperaturas superiores a M_s , al obtenerse los parámetros de una relación supuesta lineal entre la tensión crítica y la temperatura, **ha sido difícil obtener un ajuste adecuado de todas las curvas para todos los valores de temperatura**. En algunas temperaturas, los modelos sub-predicen el comportamiento y en otros lo sobre-predicen. Brinson y Auricchio (lineal y exponencial) al haber considerado σ_S^{CR} y σ_F^{CR} como los valores superiores (a temperatura cero) de la relación lineal, sobre-predicen, en general, el comportamiento. De esta forma, una observación muy importante es que se **debe reconsiderar el cálculo de la tensión crítica en los modelos de Brinson y Auricchio (lineal y exponencial), dando el valor crítico de estas tensiones a la temperatura denominada $T_{equilibrio}$** .
- **Para Brinson y Auricchio (lineal y exponencial)**, el ajuste a temperaturas inferiores a M_s podría ser más preciso **si en lugar de considerar una relación constante entre la tensión crítica y la temperatura, se considerara lineal y de pendiente negativa**
- **La aproximación de los módulos elásticos**, para todos los modelos, en general, es **buena en el proceso de carga** (antes de entrar en la zona de transformación) pero no es tan adecuada para el proceso de carga posterior a la transformación, es decir, en la zona donde se espera un comportamiento elástico de la martensita demaada (o martensita monovariante).
- **La aproximación en los procesos de descarga** son adecuados en cuanto a la pendiente (módulo elástico en descarga) puesto que este módulo elástico en descarga es semejante al de carga. No es así en cuanto al concepto de descarga elástica: **todos los modelos suponen que el proceso de descarga es totalmente elástico, apreciándose de forma evidente que no es un proceso elástico pues el camino de descarga es diferente al de carga post-transformación**.
- Para las temperaturas más altas, donde se supone que el proceso es superelástico, los modelos no ajustan bien, pero no por que el modelo sea inadecuado, sino porque el material no presenta un claro comportamiento superelástico, probablemente debido a plastificaciones previas a la transformación martensítica. Esto se confirma con los ensayos de simulación de un actuador.

- **El final del proceso de transformación, marcado por el parámetro e_L (máxima deformación por transformación) es variable con la temperatura.** Esto provoca que las predicciones a determinadas temperaturas sean inadecuadas.
- **Para el modelo de Auricchio Exponencial** el mejor ajuste a los valores experimentales se obtiene para $\beta=100$, es decir, para formas de curvaturas más convexas, pero esto es propio para esta aleación y bajo estas condiciones de tratamiento térmico. El parámetro β debe ajustarse para de cada aleación. El modelo de Auricchio considera diferentes valores de β para los distintos procesos de transformación, lo que dificulta la determinación experimental de todos los valores del parámetro β .
- **En todos los modelos el ajuste en el inicio de la meseta en rango martensítico** no es capaz de reproducir la bajada de tensión producida por la nucleación de la martensita y posterior transformación. Este fenómeno sólo es típico de los primeros ciclos de estas aleaciones, siguiendo luego una transición en la curva más suave.
- **De los ensayos a tensión constante** se deduce también que para temperaturas inferiores a M_S , la tensión de inicio de la transformación no es constante con la temperatura, sino variable y creciente al disminuir la temperatura.
- **En la obtención del parámetro β** se ha observado su escasa repercusión en las previsiones del modelo constitutivo, pues su influencia es mucho menor que la que corresponde a los módulos elásticos.
- **En las simulaciones a tensión constante y del actuador**, opuestamente a los ensayos isotérmicos, las diferencias entre las contrastaciones de los modelos de Tanaka y Liang-Rogers y Brinson y Auricchio no son apreciables. Todos ajustan las curvas experimentales con similar aproximación.
- **La mejor aproximación de todos los modelos** dentro de la zona de transformación, se consigue con la ley de evolución lineal.

Como consecuencia de las divergencias observadas entre los modelos constitutivos analizados y los resultados experimentales en los distintos estados de carga, **se ha presentado una propuesta de modelo constitutivo que subsana esas deficiencias y mejora de manera significativa la aproximación a los resultados experimentales.**

El modelo propuesto está basado en la ecuación constitutiva desarrollada en el modelo Brinson y en las ecuaciones de evolución lineales del modelo de Auricchio. Se han elegido estos dos modelos porque la aproximación al diagrama crítico tensión-temperatura es más adecuado; porque se pueden emplear parámetros constitutivos no constantes con la fracción de martensita; porque la aproximación lineal para las leyes de evolución es la que más se ajusta al comportamiento del material y por su simplicidad conceptual. *El modelo propuesto introduce las siguientes diferencias:*

- Considera, en el intervalo de temperaturas inferiores a M_s , *que las fronteras de activación de la transformación son variables con la temperatura* siguiendo una relación lineal de pendiente negativa de la que se ha deducido su expresión.
- Se ha establecido la *diferencia en el módulo elástico de la martensita multivariante (o inducida por la temperatura) y el módulo elástico de la martensita monovariante (o inducida por la tensión)*. Esta diferencia no solo mejorará la aproximación del modelo propuesto a los valores experimentales en el caso isotérmico, sino que la mejora es sustancialmente mejor en el caso de los ensayos a tensión constante.
- *Se ha considerado la dependencia del parámetro e_L con la temperatura* para temperaturas superiores a la temperatura de equilibrio. La dependencia se ha ajustado como una relación lineal a partir de los resultados experimentales obtenidos para la evolución de este parámetro con la temperatura.

Como consecuencia de *la comparación entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas para el análisis de la viga empotrada a flexión* se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Todos los modelos constitutivos analizados e implementados a flexión ajustan adecuadamente los resultados experimentales a altas temperaturas, siendo mejor la aproximación en los tramos lineales. A bajas temperaturas, sin embargo, los modelos de Tanaka y Liang-Rogers no predicen con adecuación el

comportamiento, siendo más ajustados los modelos de Brinson y Auricchio exponencial y lineal.

- En los tramos inferiores a la tensión crítica de transición los resultados de la simulación presentan valores muy similares a los experimentales presentado menor similitud dentro de la zona de transformación.
- Para todos los modelos, el ajuste en cada temperatura es similar al ajuste que se obtuvo del comportamiento a tracción y, por tanto, en aquellas temperaturas donde a tracción el modelo predecía valores superiores de tensión también produce valores superiores en flexión.
- Para todos los modelos, en aquellas temperaturas a las que el modelo no ajusta bien el módulo elástico a tracción, tampoco predice bien el comportamiento a flexión. Esto se ha corregido con *el modelo propuesto* donde los valores de amplitud de transformación así como las pendientes en los tramos elásticos son más ajustados.
- Las peores aproximaciones se obtienen en las temperaturas dentro de la zona de coexistencia de las dos fases: martensita y austenita. Esto es debido a la gran variabilidad del comportamiento del material dentro de este intervalo de temperaturas.
- A temperaturas inferiores, los resultados de la simulación presentan, a igual valor de fuerza, mayor valor de deformada que los resultados experimentales a flexión. Este comportamiento significa que a flexión se produce una rigidización del material, posiblemente a causa del diferente comportamiento a tracción y compresión. Dado que esta asimetría es más acentuada a temperaturas martensíticas, el ajuste entre los resultados teóricos y experimentales es mayor a temperaturas austeníticas.

6.2. APORTACIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Pese a que existen en la literatura comparaciones previas de los modelos constitutivos macroscópicos, dichas comparaciones no han sido basados en datos experimentales propios. Con este trabajo de investigación es la primera vez que se han *comparado, bajo el mismo conjunto de ensayos experimentales y en las mismas condiciones, los modelos de Tanaka; Liang-Rogers; Brinson y Auricchio.*

Otra contribución esencial ha sido el *desarrollo de los algoritmos adecuados para la implementación numérica de los modelos constitutivos en control por deformación*, utilizando 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 y todo el rango de temperaturas.

Se presenta como aportación *un 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 se manifieste la influencia de la estabilización en la obtención de los parámetros y, en consecuencia, en la posterior contrastación experimental de los modelos constitutivos.

Como consecuencia de la comparación y análisis experimental de los modelos constitutivos seleccionados, *se ha desarrollado un modelo constitutivo propio* que subsana las deficiencias encontradas por los modelos estudiados y complementa la modelización de estos materiales. El modelo propuesto se ha basado en la ecuación constitutiva desarrollada en el modelo Brinson y en las ecuaciones de evolución lineales del modelo de Auricchio. Las razones fundamentales para elegir estos modelos son: por su simplicidad conceptual, su mejor aproximación del diagrama crítico tensión-temperatura y por su mejor ajuste del comportamiento en transformación para el material analizado.

La última aportación importante de este trabajo consiste en 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. En ningún caso existe en la literatura un estudio teórico ni experimental del análisis a flexión con viga empotrada con carga en el extremo basado en la teoría clásica de Euler-Bernoulli.

6.3. PROPUESTAS DE FUTURO

Para finalizar el trabajo, y una vez valoradas y expuestas todas las conclusiones y aportaciones, se cree necesario, a criterio del autor, establecer las siguientes líneas o trabajos futuros:

- Dado que el modelo constitutivo que se ha propuesto está basado en los resultados experimentales obtenidos con unas únicas condiciones de partida del material, sería conveniente verificar el modelo para otros materiales u otras condiciones de partida. Esto sería factible modificando el tratamiento térmico tanto en temperatura como en tiempo.
- En el análisis experimental se ha detectado que el material no presenta un comportamiento superelástico claramente definido a altas temperaturas a causa, probablemente, de una posible plastificación del material. Este comportamiento podría modelizarse completando las ecuaciones constitutivas introduciendo un término en la deformación que tuviera en cuenta dichas plastificaciones. Esto solo es posible con un estudio experimental más profundo del comportamiento en plastificación.
- En la verificación del modelo a flexión se han detectado ciertas divergencias atribuibles a la posible asimetría del comportamiento del material a tracción y compresión. Dado que en el presente trabajo se ha presentado el algoritmo del modelo a flexión teniendo en cuenta esa asimetría, sería adecuado comprobar esta hipótesis si se dispusiera de datos experimentales del comportamiento a compresión para el mismo material.

- El estudio realizado en el presente trabajo sirve como base para la extensión del análisis numérico y experimental de los modelos para el comportamiento en doble memoria de forma, aplicación muy interesante de estos materiales.
- La extensión del trabajo a la implementación numérica y contrastación experimental de los modelos constitutivos al caso bidimensional. En este caso sería interesante el estudio experimental a torsión de tubos de SMA y el estudio de la obtención de los parámetros constitutivos de los modelos en el caso bidimensional.
- Finalmente, y como consecuencia de análisis del caso bidimensional, se pueden extender los algoritmos de control por deformación para su aplicación al Método de los Elementos Finitos.