

Modelado de estructuras reentrantes en un perfil aerodinámico

Ricardo Parga Montemayor, Luis Alberto López Pavón, Luis Arturo Reyes Osorio, Diego Reducindo-Almanza, Octavio García Salazar

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, San Nicolás de los Garza, NL, México
luis.lopezpv@uanl.edu.mx, luis.reyessr@uanl.edu.mx, diego.reducindoa@uanl.edu.mx,
octavio.garciasl@uanl.edu.mx
Autor de Correspondencia: ricardo.pargamnt@uanl.edu.mx

RESUMEN

Las propiedades superelásticas de una aleación con memoria de forma Ti-Zr se evaluaron mediante una estructura auxética reentrante integrada en un perfil aerodinámico, usando elementos finitos no lineales. Se desarrolló un modelo constitutivo para describir la respuesta mecánica del material y se implementó un modelo numérico con elementos tipo viga por su eficiencia computacional. Las configuraciones quirales ofrecieron mayor flexibilidad y capacidad de carga, mostrando desplazamientos elevados con tensiones limitadas. Los resultados numéricos mostraron buena concordancia con datos experimentales, demostrando el potencial de estas aleaciones en perfiles aerodinámicos de deformación suave.

PALABRAS CLAVE

Aleación Ti-Zr, Propiedades superelásticas, Geometrías reentrantes, simulación, perfil aerodinámico.

ABSTRACT

The superelastic properties of a Ti-Zr shape memory alloy were investigated using a re-entrant auxetic core structure embedded within an airfoil, through nonlinear finite element analysis. First, a constitutive model was developed to capture the superelastic mechanical response of the alloy. Subsequently, a numerical model of re-entrant auxetic structures was implemented, employing beam elements for improved computational efficiency. Simple and complex chiral configurations provided enhanced structural flexibility and load-bearing capability, exhibiting large displacements under limited stress levels. The numerical results showed good agreement with experimental data, demonstrating the potential of superelastic auxetic cores as an effective solution for smooth morphing airfoil applications.

KEYWORDS

Ti-Zr alloy, superelastic properties, re-entrant geometries, simulation, airfoil.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones con memoria de forma (SMA, por sus siglas en inglés Shape Memory Alloys) son materiales capaces de experimentar grandes deformaciones reversibles bajo ciclos de carga mecánica. Estas aleaciones metálicas presentan una transformación de fase en estado sólido, reversible y sin difusión, entre la fase austenítica y la fase martensítica. Como resultado de este mecanismo, se manifiestan dos efectos de gran interés tecnológico: (i) el efecto memoria de forma (SME, por sus siglas en inglés), que permite al material recuperar una configuración preestablecida tras ser deformado y posteriormente calentado, y (ii) la superelasticidad, que consiste en la capacidad de soportar deformaciones del orden de varios puntos porcentuales de manera completamente reversible bajo carga mecánica, sin necesidad de un cambio térmico.¹ En este último caso, la transformación martensítica es inducida por la tensión aplicada, lo que en aleaciones convencionales Ni-Ti conduce típicamente a deformaciones recuperables de hasta aproximadamente 8%.

Dentro de las alternativas libres de níquel, el sistema de aleación Ti–Zr–Nb–Sn ha emergido como una opción prometedora, al exhibir propiedades superelásticas a temperatura ambiente.^{2–4} En particular, las composiciones Ti–Zr han demostrado recuperaciones superelásticas cercanas al 7%. La sustitución parcial de Nb por Zr incrementa la deformación asociada a la transformación de fase, manteniendo prácticamente inalterada la temperatura de transformación. Sin embargo, la reducción excesiva del contenido de Nb favorece la formación acelerada de la fase ω , lo cual tiene un efecto perjudicial sobre las propiedades mecánicas. Estudios previos han demostrado que la adición de Sn suprime eficazmente dicha fase, mejorando el desempeño mecánico global de la aleación.⁵ Además, en comparación con las aleaciones Ni–Ti, las aleaciones Ti–Zr presentan una trabajabilidad superior, lo que facilita su conformado en geometrías complejas y amplía su potencial de aplicación estructural.

El comportamiento termomecánico de las SMA es intrínsecamente complejo, debido a la interdependencia entre tensión, deformación y temperatura. La elevada deformación recuperable se atribuye a la transformación reversible entre las fases martensítica y austenítica, lo que ha motivado el desarrollo de modelos constitutivos capaces de describir adecuadamente estas respuestas no lineales. Diversos modelos fenomenológicos y micromecánicos han sido propuestos para predecir el comportamiento superelástico y el efecto memoria de forma.^{6–10} Entre ellos, el modelo de Brinson destaca por incorporar explícitamente la evolución de martensita maclada y des maclada, permitiendo una descripción robusta tanto del SME como de la superelasticidad.¹¹

Paralelamente, las estructuras auxéticas, caracterizadas por presentar un coeficiente de Poisson negativo, han cobrado un interés creciente en el desarrollo de dispositivos avanzados, particularmente en actuadores inteligentes, estructuras de forma variable y dispositivos implantables mínimamente invasivos. Diversos estudios han explorado la integración de geometrías auxéticas con SMA para aplicaciones funcionales. Por ejemplo, Pelton et al.¹² evaluaron geometrías auxéticas en stents expandibles, mientras que Bianchi et al.¹³ demostraron la influencia significativa del efecto memoria de forma en el comportamiento mecánico de espumas auxéticas. Hassan et al.¹⁴ propusieron estructuras funcionales basadas en topologías quirales combinadas con SMA, introduciendo el concepto de celdas inteligentes sólidas.

En el ámbito aeroespacial, se han reportado aplicaciones relevantes de estructuras auxéticas para sistemas desplegados y perfiles aerodinámicos. Jacobs et al.¹⁵ diseñaron y evaluaron experimentalmente una antena desplegable basada en SMA, mientras que Rossiter et al.¹⁶ investigaron estructuras auxéticas con SMA para sistemas desplegados sin mecanismos de actuación externos. Estudios posteriores analizaron el comportamiento mecánico de panales auxéticos con SMA y su influencia en la flexibilidad estructural.¹⁷ Budarapu et al.¹⁸ y Chen et al.¹⁹ demostraron que las geometrías auxéticas integradas como núcleos estructurales en perfiles aerodinámicos permiten grandes desplazamientos con niveles de esfuerzo reducidos, lo que resulta particularmente atractivo para aplicaciones de morphing aerodinámico. Asimismo, Huang et al.²⁰ desarrollaron configuraciones auxéticas reentrantes capaces de soportar grandes deformaciones, combinando alta flexibilidad con resistencia mecánica.

Investigaciones adicionales han abordado la influencia de parámetros geométricos en el desempeño mecánico de estas estructuras, como el espesor de las paredes subcelulares,⁸ el comportamiento bajo compresión uniaxial,²¹ y los mecanismos de deformación dominantes en distintas direcciones de carga.²² Recientemente, se han propuesto diseños auxéticos híbridos y configuraciones embebidas para optimizar la respuesta mecánica mediante análisis teóricos y numéricos.²³

Una característica particularmente relevante de las estructuras auxéticas modernas es su capacidad de actuación activa cuando se fabrican con materiales inteligentes, como las SMA.²⁴ La integración de estructuras auxéticas basadas en SMA dentro de perfiles aerodinámicos permite obtener sistemas altamente flexibles, con capacidad de deformación controlada bajo cargas aerodinámicas, especialmente en regiones críticas como el borde de salida.

En este contexto, el presente estudio establece el modelado de las propiedades superelásticas de la aleación Ti–Zr mediante el modelo constitutivo de Auricchio, validándolo con datos experimentales reportados en la literatura y comparando su respuesta con la de una aleación Ni–Ti convencional. El modelo fenomenológico se implementó inicialmente en Matlab para definir las propiedades del material y aplicar

secuencias de carga controladas. Posteriormente, el modelo constitutivo se integró en el software de elementos finitos no lineales Abaqus para evaluar el comportamiento de estructuras auxéticas reentrantes incrustadas en un perfil aerodinámico. Finalmente, se analizaron comparativamente las respuestas mecánicas y la capacidad de actuación de ambas aleaciones bajo diferentes condiciones de contorno y carga uniaxial.

MODELO CONSTITUTIVO

Los modelos constitutivos consideran que la tensión, la temperatura y la fracción volumétrica de martensita (ξ) están relacionadas mediante una ecuación de estado del tipo $\xi = \xi(\sigma, T)$. De manera general, se asume además la existencia de una relación constitutiva entre el esfuerzo de transformación y la fracción de martensita. En los enfoques termodinámicos, la ecuación de evolución de ξ se deriva a partir de un potencial de disipación. Sin embargo, dicha ecuación no puede integrarse en forma cerrada para obtener una expresión explícita $\xi = \xi(\sigma, T)$, ya que el valor interno actual de ξ depende de la trayectoria de carga seguida en el espacio de estados.

La figura 1 muestra un modelo aplicado a materiales inelásticos con comportamientos complejos, como aquellos que presentan transiciones de fase sólido-sólido.

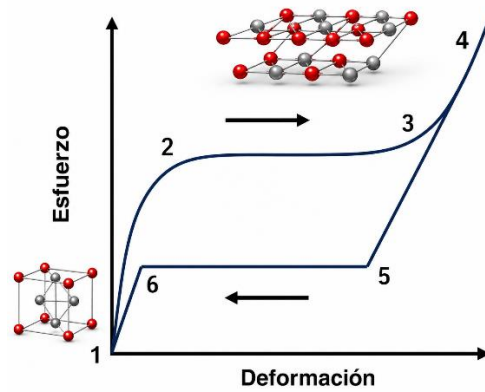


Fig. 1. Representación fenomenológica del efecto superelástico.

La respuesta superelástica se describe fenomenológicamente mediante puntos característicos sobre la curva esfuerzo-deformación: La trayectoria del punto 1 al punto 2 corresponde al módulo elástico de la austenita; los puntos 2 y 3 representan el inicio y el final de la transformación martensítica, respectivamente; la trayectoria del punto 4 al punto 5 define el módulo elástico de la martensita completamente transformada; mientras que los puntos 5 y 6 indican el inicio y el final de la transformación inversa hacia la austenita. El modelo incorpora leyes de evolución de tipo exponencial y lineal, y en el régimen superelástico considera propiedades mecánicas diferenciadas para las fases austenítica y martensítica. Este enfoque ha sido formulado para aplicaciones tanto unidimensionales como tridimensionales.⁹

El modelo de Brinson, derivado de los resultados de Tanaka y Liang-Rogers, define el comportamiento tensional y termoelástico de los materiales con memoria de forma (SMA) en función de la deformación, la temperatura y la fracción de martensita.¹¹ Este efecto se incorpora tanto en los modelos de Brinson como de Auricchio, los cuales establecen dicha relación mediante una regla de mezcla lineal o de Voigt, aunque también puede formularse utilizando la regla armónica o de Reuss. La aplicación de cualquiera de estas reglas produce resultados similares; sin embargo, la regla de Voigt presenta un enfoque más simple.

El modelo de Brinson considera la influencia de la fracción de martensita sobre el tensor de transformación y asume una función constitutiva lineal del material en términos de ξ . La ecuación constitutiva para una SMA con funciones de material no constantes se define como:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi) \varepsilon - D(\xi_0) \varepsilon_0 + \Omega(\xi) \xi_S - \Omega(\xi_0) \xi_{S0} + \theta (T - T_0) \quad (1)$$

donde σ es el esfuerzo uniaxial, ε es la deformación y T es la temperatura. Las magnitudes σ_0 , ε_0 , ξ_{s0} y ξ_s corresponden a las condiciones iniciales del estado del material. T_0 representa la temperatura a deformación térmica nula, D es el módulo de elasticidad, Ω es un factor asociado al cambio de fase y θ es el coeficiente de expansión térmica. Las funciones de material Ω y θ se determinan experimentalmente bajo condiciones de esfuerzo nulo.

El módulo elástico y el parámetro Ω dependen de la fracción volumétrica de martensita según:

$$E(\xi) = E_A + (E_M - E_A) \xi, \Omega(\xi) = -\varepsilon_L E(\xi) \quad (2)$$

donde ε_L es la deformación residual máxima, E_A es el módulo de elasticidad de la austenita y E_M es el módulo de elasticidad de la martensita.

Todos los parámetros de entrada del modelo de Auricchio se obtuvieron a partir de pruebas experimentales previas, con el fin de evaluar la respuesta termomecánica de la aleación Ti-Zr bajo diferentes niveles de complejidad geométrica y condiciones límite de carga. Los resultados del modelo de Auricchio aplicado a la aleación Ti-Zr, así como un estudio comparativo con la aleación con memoria de forma Ni-Ti, se presentan en las secciones siguientes.

METODOLOGÍA

En esta sección se describe la metodología empleada para evaluar la respuesta termomecánica de la aleación Ti-Zr, como se ilustra en la figura 2. El modelo constitutivo y las simulaciones numéricas se desarrollaron a partir de datos experimentales reportados para dicha aleación y, con fines comparativos, para una aleación Ni-Ti en estado superelástico.

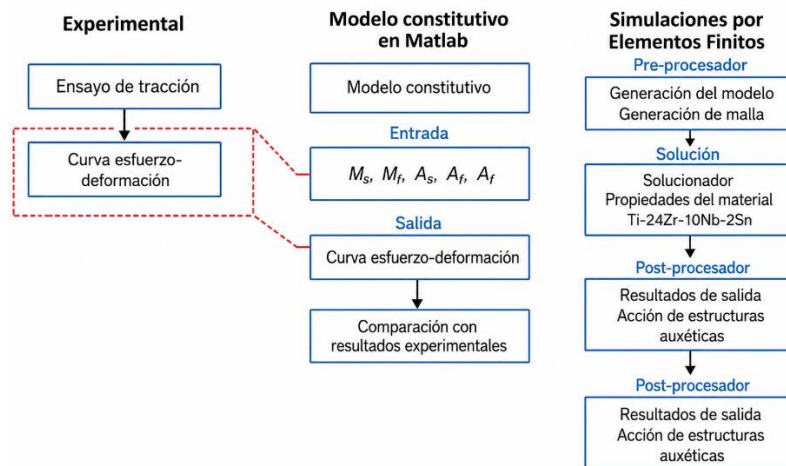


Fig. 2. Metodología para evaluar la capacidad de actuación de estructuras auxéticas de Ti-Zr.

El modelo termomecánico incorpora la transformación de fase mediante las temperaturas críticas M_s , M_f , A_s y A_f , que describen el inicio y final de las transformaciones martensítica y austenítica.¹¹ En primer lugar, se desarrolló un código para reproducir el comportamiento superelástico de la aleación Ti-Zr. Posteriormente, se implementaron modelos numéricos en Abaqus para evaluar la respuesta mecánica de dos configuraciones de estructuras auxéticas.

Se realizó una optimización no lineal ajustando las temperaturas de transformación dentro del rango reportado para aleaciones Ti-Zr, con el objetivo de aproximar las curvas esfuerzo-deformación experimental.³ Las tensiones críticas S_{SCR} y S_{fCR} , así como los coeficientes de esfuerzo C_M y C_A , se determinaron a partir de ensayos de tensión realizados a 30 °C, 37 °C, 47 °C y 57 °C, siguiendo criterios reportados en la literatura.²⁵

Las condiciones de carga consistieron en la aplicación de una carga compresiva mediante un desplazamiento vertical impuesto, considerando contacto sin fricción, para evaluar la respuesta mecánica global de las estructuras auxéticas.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Se fabricaron lingotes de la aleación Ti-24Zr-10Nb-2Sn a partir de elementos de alta pureza mediante el método de fusión por arco bajo atmósfera de argón. Los lingotes se refundieron seis veces con el fin de evitar cualquier segregación química. Los ensayos de tracción se realizaron a temperatura ambiente en probetas con un espesor de 0.115 mm, un ancho de 1.45 mm y una longitud de calibración de 20 mm. Información experimental adicional sobre este material superelástico puede encontrarse en trabajos previos.⁴⁻⁵

Se adaptó un modelo constitutivo empleando el enfoque de Auricchio para evaluar las propiedades superelásticas tanto de la aleación Ti-Zr como de una aleación Ni-Ti.

MODELADO DE LA CELDA AUXÉTICA

Se emplearon estructuras auxéticas reentrantes como núcleo estructural para evaluar su respuesta mecánica bajo cargas axiales. Estas estructuras presentan un coeficiente de Poisson negativo, lo que permite combinar flexibilidad geométrica y capacidad cortante, características particularmente atractivas para aplicaciones de cambio estructural.

La celda unitaria auxética se basa en una geometría reentrante de tipo quiral, compuesta por nodos circulares conectados mediante ligamentos rectos (Ver figura 3).

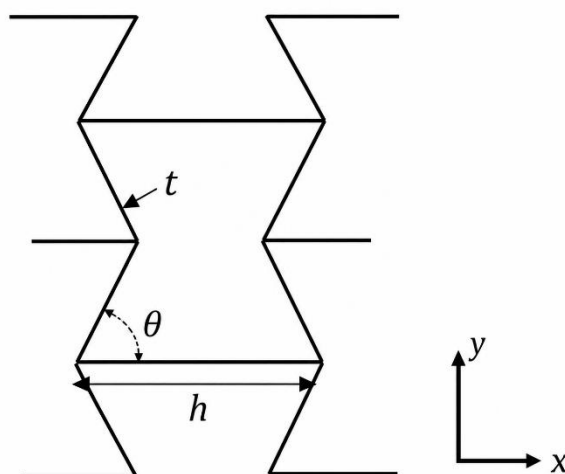


Fig. 3. Celda unitaria auxética reentrante y parámetros geométricos principales.

La sub-celda presenta dimensiones $h = 26$ mm, $t = 1.2$ mm y un ángulo reentrante $\theta = 60^\circ$.

Se consideraron dos configuraciones de núcleo auxético integradas en un perfil aerodinámico Eppler 420: una estructura auxética simple (AAS, por sus siglas en inglés Auxetic Anti-tetra-missing ribs/structure Simple) y una estructura auxética compleja (AAC por sus siglas en inglés Auxetic Anti-tetra-missing ribs/structure Complex), mostradas en la figura 4. Para la configuración AAS se utilizaron dimensiones $R = 30$ mm, $r = 7$ mm y $t = 0.5$ mm, mientras que para la AAC se emplearon $R = 16.5$ mm, $r = 3.5$ mm y $t = 0.25$ mm, lo que incrementa la densidad celular. Como resultado, el perfil aerodinámico contiene 25 celdas en la configuración AAS y 100 celdas en la AAC, manteniendo una relación aproximada de 1:4 entre ambas.

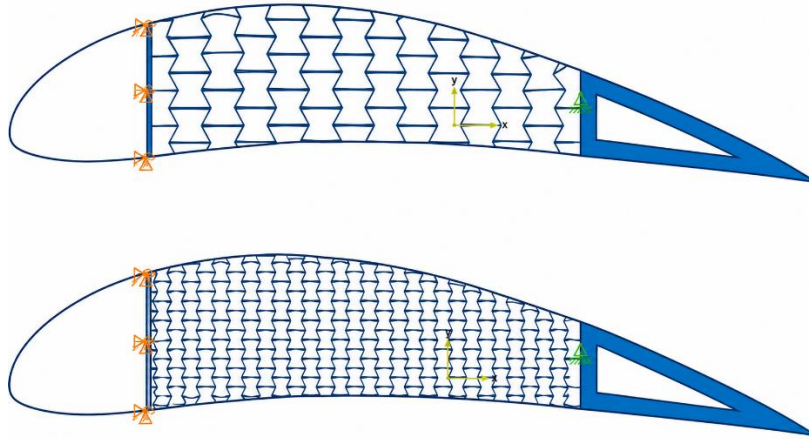


Fig. 4. Modelos de elementos finitos del perfil aerodinámico con núcleos auxéticos.

Los modelos de elementos finitos se desarrollaron considerando un marco estructural externo y un núcleo celular auxético. El borde de ataque se restringió completamente frente a traslaciones y rotaciones, mientras que en el borde de salida se aplicó un desplazamiento impuesto permitiendo únicamente el movimiento en la dirección Y. Las dimensiones globales del perfil fueron $c = 700$ mm, $a = 110$ mm, $b = 235$ mm y un espesor uniforme de 1mm.

La discretización espacial se realizó utilizando elementos C3D8R y elementos tipo viga (CBEAM), empleando aproximadamente 2700 elementos para la configuración AAS y 5200 elementos para la AAC. Se llevó a cabo un análisis de convergencia de malla para garantizar la estabilidad de los resultados. Las propiedades del material se asignaron mediante un modelo constitutivo superelástico basado en el enfoque de Auricchio, utilizando parámetros obtenidos de ensayos de tracción experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelado Constitutivo

La figura 5 muestra las curvas esfuerzo–deformaciones obtenidas a partir de ensayos cíclicos de carga y descarga realizados sobre la aleación Ti-Zr, donde se observa claramente un comportamiento superelástico dependiente del número de ciclos y de la deformación máxima aplicada. Las curvas presentan una secuencia progresiva de ciclos con deformaciones crecientes, alcanzando valores máximos cercanos al 12 % de deformación, acompañados por niveles de esfuerzo que aumentan gradualmente hasta aproximadamente 500 MPa.

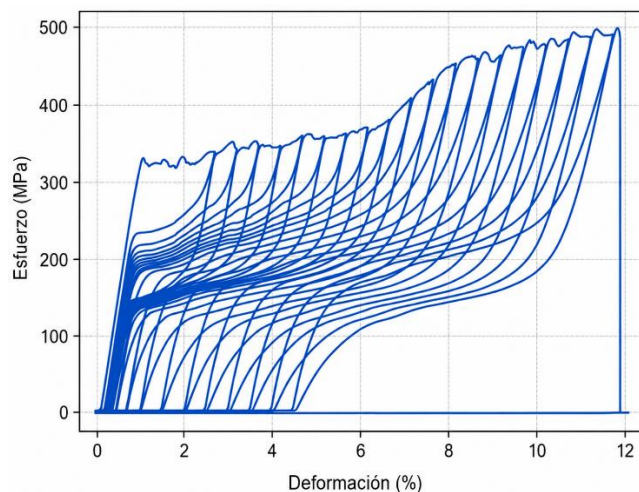


Fig. 5. Curvas esfuerzo-deformaciones obtenidas a partir de ensayos cíclicos.

En los primeros ciclos se identifica una respuesta dominada por la transformación martensítica inducida por esfuerzo, caracterizada por la aparición de una meseta relativamente estable en el rango de 300–350 MPa, seguida de una histéresis pronunciada durante la descarga. A medida que el número de ciclos y la deformación máxima aumentan, se observa un endurecimiento progresivo del material, reflejado en el desplazamiento ascendente de la meseta de transformación y en el incremento de los esfuerzos requeridos para alcanzar la transformación completa. Este comportamiento es consistente con fenómenos de entrenamiento superelástico, comúnmente reportados en aleaciones con memoria de forma, donde la evolución microestructural conduce a una estabilización gradual de la martensita inducida.

Asimismo, las curvas muestran una recuperación de deformación casi completa tras cada ciclo, incluso a elevados niveles de deformación, lo que confirma la alta capacidad superelástica de la aleación Ti-Zr. La anchura de la histéresis y la evolución de las tensiones de inicio y final de transformación sugieren una redistribución interna de variantes martensíticas y una reducción progresiva de la energía disipada por ciclo, aspectos que resultan especialmente relevantes para aplicaciones de actuación cíclica y estructuras de forma variable.

Estos resultados experimentales proporcionan la base para la identificación de los parámetros del modelo constitutivo y permiten evaluar la viabilidad de la aleación en aplicaciones donde se requieren grandes deformaciones reversibles bajo cargas mecánicas repetidas, como es el caso de estructuras auxéticas activas integradas en perfiles aerodinámicos.

A partir del conjunto de curvas esfuerzo–deformaciones obtenidas durante los ensayos cíclicos, se seleccionó un ciclo superelástico representativo con el fin de caracterizar de manera consistente la respuesta termomecánica de la aleación base Ti-Zr. El criterio de selección se basó en identificar un ciclo que presentara una histéresis estable, una deformación máxima cercana al 2.5 %, y una recuperación de deformación prácticamente completa, evitando los efectos transitorios asociados al entrenamiento inicial del material.

La figura 6 muestra la comparación entre el ciclo experimental seleccionado y la respuesta numérica obtenida mediante un modelo unidimensional.

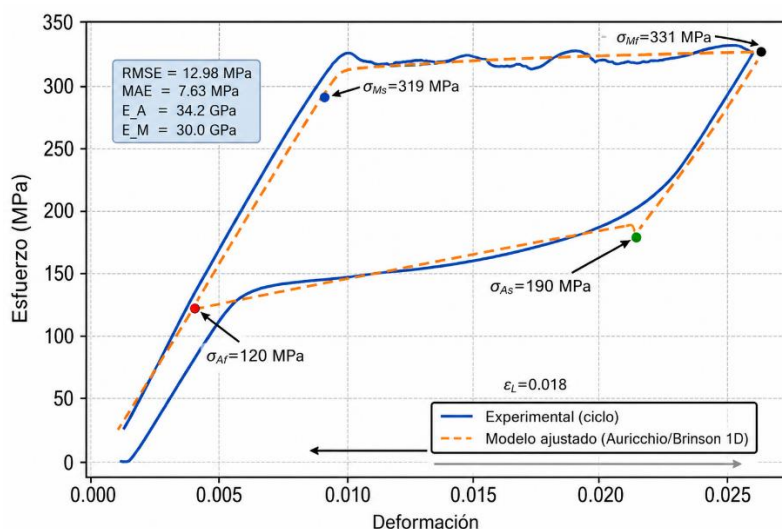


Fig. 6. Comparación del ciclo experimental y modelo constitutivo.

El modelo reproduce adecuadamente las principales características del comportamiento superelástico, incluyendo las pendientes elásticas de las fases austenítica y martensítica, la meseta de transformación inducida por esfuerzo durante la carga y la transformación inversa durante la descarga. La identificación de parámetros se realizó mediante un procedimiento de ajuste no lineal, minimizando el error entre la respuesta experimental y la predicha numéricamente.

Como resultado del ajuste, se obtuvieron un módulo elástico de la austenita de aproximadamente 34.2 GPa y un módulo elástico de la martensita de 30.0 GPa, valores consistentes con los reportados para aleaciones Ti–Zr libres de níquel. Las tensiones características de transformación estimadas fueron $\sigma_{Ms} \approx 319$ MPa y $\sigma_{Mf} \approx 331$ MPa para la transformación directa, así como $\sigma_{As} \approx 190$ MPa y $\sigma_{Af} \approx 120$ MPa para la transformación inversa. La deformación de transformación asociada, $\varepsilon_L \approx 0.018$, concuerda con la deformación recuperable observada experimentalmente.

Desde el punto de vista cuantitativo, el modelo ajustado presenta un error cuadrático medio (RMSE) de 12.98 MPa y un error absoluto medio (MAE) de 7.63 MPa, lo que indica una buena capacidad predictiva considerando la naturaleza simplificada y unidimensional del modelo. Las discrepancias locales observadas en la región de meseta se atribuyen principalmente a irregularidades experimentales y a la evolución microestructural durante la transformación martensítica, fenómenos que no son capturados explícitamente por el modelo fenomenológico empleado.

La tabla I resume los parámetros superelásticos identificados para la aleación base Ti–Zr, junto con valores de referencia reportados para una aleación Ni–Ti convencional.

Tabla I. Parámetros del modelo superelástico ajustados y valores de referencia

Símbolo	Descripción	Ti-Zr(ajustado)	Ni-Ti (referencia)
E	Módulo elástico	34.2 GPa	60 GPa
σ_{Ms}	Esfuerzo al inicio de la martensita	319 MPa	412 MPa
σ_{Mf}	Esfuerzo al final de la martensita	331 MPa	525 MPa
σ_{As}	Esfuerzo al inicio de la austenita	190 MPa	115 MPa
σ_{Af}	Esfuerzo al final de la austenita	120 MPa	81 MPa
ε_L	Deformación máxima de transformación	0.018	0.047

Esta comparación pone de manifiesto que la aleación base Ti–Zr presenta menores tensiones de transformación y una menor deformación de transformación, lo que se traduce en una respuesta superelástica más suave y potencialmente ventajosa para aplicaciones que requieren actuación cíclica con esfuerzos moderados, como las estructuras auxéticas activas integradas en perfiles aerodinámicos.

En conjunto, la selección de un ciclo superelástico representativo, el ajuste constitutivo y la identificación de parámetros superelásticos proporcionan una base sólida para la implementación del modelo en simulaciones por elementos finitos y para el análisis del desempeño mecánico de estructuras basadas en aleaciones con memoria de forma libres de Ni.

MODELO NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS AUXÉTICAS

Se llevó a cabo un estudio numérico para evaluar la capacidad de actuación de núcleos auxéticos reentrantes fabricados con la aleación Ti–Zr. La geometría del perfil aerodinámico Eppler 420, previamente reportada por Martin *et al.*²⁹ se adoptó como configuración de referencia, donde se validó experimentalmente la conformidad estructural de redes quirales. Con fines comparativos, se realizaron simulaciones adicionales utilizando aleaciones Ni–Ti y Al6061, cuyas propiedades mecánicas se tomaron de la literatura.³⁰

Los resultados numéricos correspondientes a la estructura auxética simple (AAS) bajo carga compresiva se muestran en la figura 7.

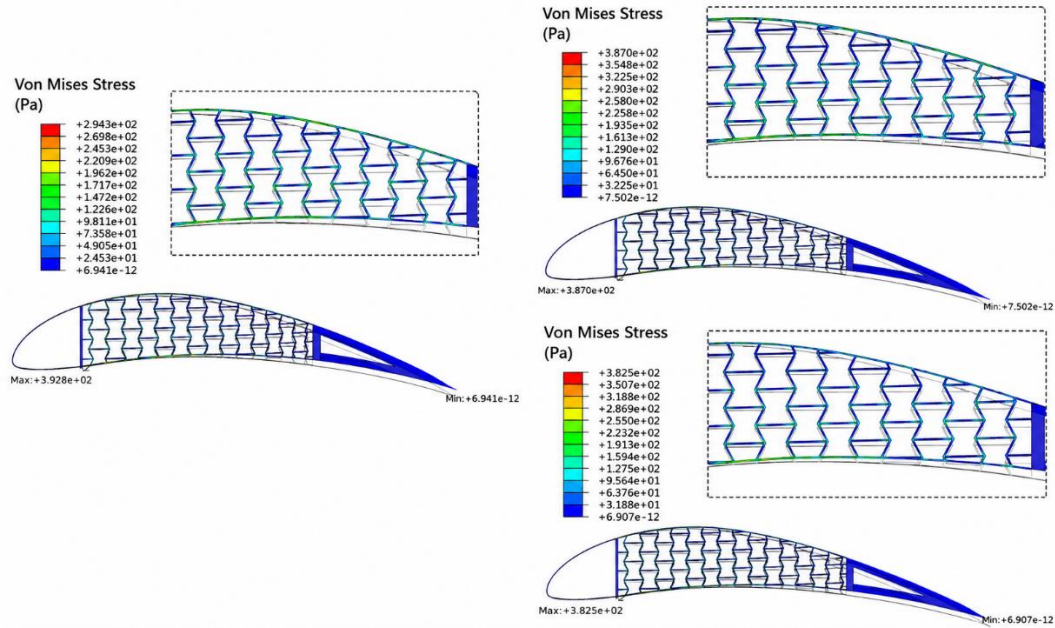


Fig. 7. Resultados numéricos correspondientes a la estructura auxética simple (AAS) bajo carga compresiva.

El perfil aerodinámico auxético fue sometido a un ciclo de compresión con el objetivo de evaluar desviaciones de la respuesta lineal y condiciones locales de deformación. En todos los casos, la tensión equivalente de von Mises máxima se localizó en la región superior izquierda de la pared del núcleo auxético. En comparación con la aleación de aluminio, la configuración AAS empleando aleaciones superelásticas presentó una distribución de tensiones más homogénea, observándose una reducción de la tensión máxima del orden del 12 % para Ni-Ti y del 39 % para Ti-Zr. Por el contrario, las estructuras auxéticas de aluminio mostraron una mayor propensión a la deformación permanente tras el aplastamiento, lo que pone de manifiesto el potencial de las aleaciones superelásticas en aplicaciones auxéticas de estructuras ligeras.³⁰

Los resultados numéricos de desplazamiento y tensión para la configuración auxética compleja (AAC) se presentan en la figura 8, considerando una carga aplicada de 70 N.

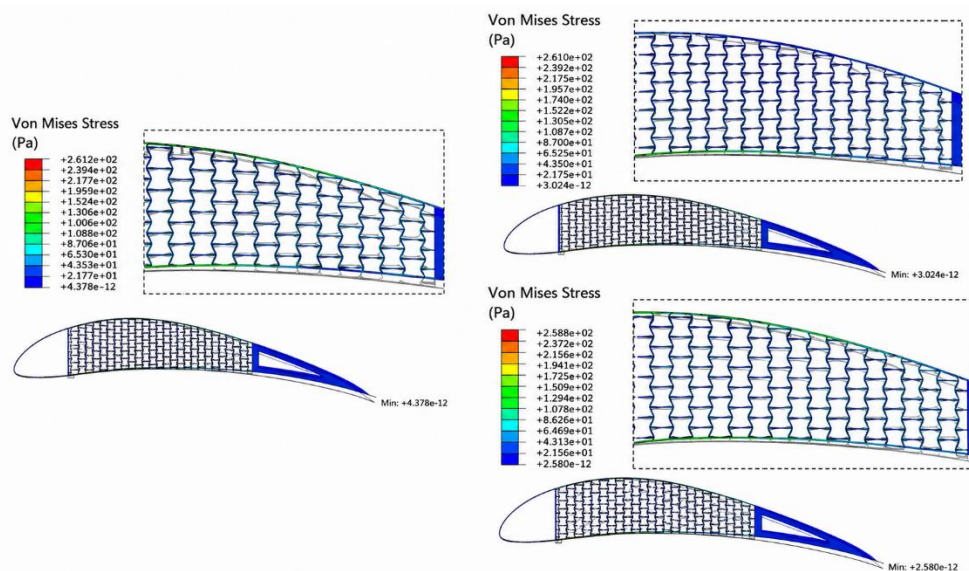


Fig. 8. Resultados numéricos correspondientes a la estructura auxética simple (AAC) bajo carga compresiva.

En las aleaciones Ni-Ti y Al, las tensiones máximas se concentraron principalmente en los nodos circulares y en las paredes de las sub-celdas quirales, mientras que la aleación Ti-Zr exhibió una redistribución de tensiones más uniforme a lo largo de todo el núcleo auxético. Aunque la configuración AAC genera niveles de tensión superiores a los observados en la AAS, la aleación Ti-Zr mostró un mejor desempeño estructural, con incrementos de tensión limitados al 1 % (Ni-Ti) y 18 % (Ti-Zr) respecto al aluminio.

La respuesta carga-desplazamiento sintetizado para todas las configuraciones de perfil aerodinámico se muestra en la figura 9, donde se observan deflexiones significativas del borde de salida.

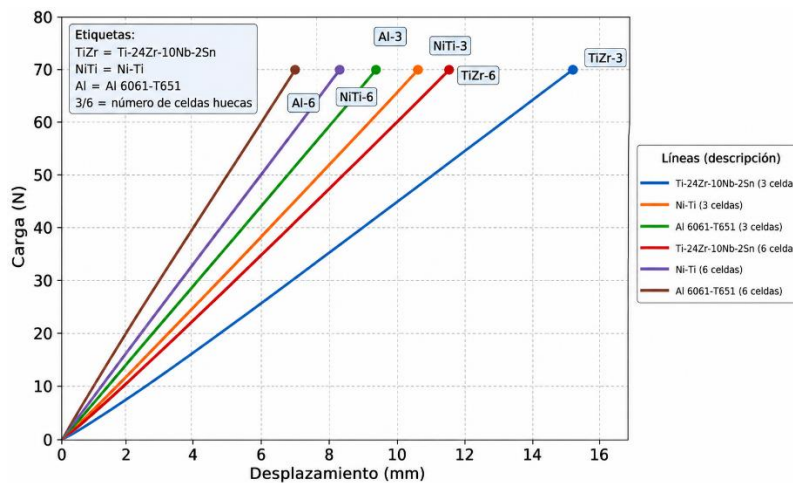


Fig. 9. Resultados numéricos correspondientes a estructuras auxéticas en perfil alar.

El incremento en el número de celdas auxéticas condujo a desplazamientos superiores a 10 mm en la configuración AAC-Ti-Zr, a costa de un aumento en los niveles de tensión de las aleaciones superelásticas. En contraste, la configuración AAS presentó tensiones menores, aunque con un desplazamiento máximo limitado a aproximadamente 11.6 mm para la aleación Ti-Zr. Estas tendencias concuerdan con estudios previos que analizan la influencia de la topología auxética y de la relación geométrica L/R sobre la flexibilidad estructural.²⁸

Los valores máximos de tensión de Von Mises y desplazamiento se resumen en la tabla II.

Tabla II. Valores máximos de tensión de von Mises y desplazamiento para estructuras.

Configuración auxética	Material	Tensión máxima von Mises (Pa)	Desplazamiento máximo (mm)
Reentrante - 3 celdas	Ti-Zr	294.3	15.16
	Ni-Ti	387.0	10.55
	Al 6061	382.5	9.105
Reentrante - 6 celdas	Ti-Zr	261.2	11.45
	Ni-Ti	261.0	8.146
	Al 6061	258.8	7.032

La configuración AAC de aluminio presentó los niveles de tensión más bajos, mientras que la configuración AAC de Ti-Zr mostró las tensiones más elevadas, acompañadas de los mayores desplazamientos recuperables. La respuesta en desplazamiento exhibió un comportamiento prácticamente lineal, asociado a las hipótesis constitutivas adoptadas en el modelo numérico, en concordancia con resultados reportados previamente.³¹

Los valores máximos de deformación fueron del orden de 10^{-2} para la configuración AAS, en acuerdo con estudios previos sobre estructuras reticulares.³³ Estos resultados confirman que las sub-celdas quirales auxéticas pueden acomodar grandes desplazamientos globales manteniendo niveles relativamente bajos de deformación local, lo que las hace especialmente adecuadas para aplicaciones de transformación suave.

Bajo carga compresiva, los nodos circulares aportan la mayor parte de la resistencia estructural, mientras que la flexión y rotación de los ligamentos gobiernan el mecanismo de deformación global.²⁸

CONCLUSIÓN

En este estudio se analizó el comportamiento superelástico de la aleación Ti-Zr y su aplicación como material activo en estructuras auxéticas reentrantes integradas en un perfil aerodinámico Eppler 420, mediante caracterización experimental, modelado constitutivo y simulaciones por elementos finitos. La aleación mostró una respuesta superelástica estable a temperatura ambiente, con deformaciones recuperables del orden de $\varepsilon_L \approx 0.018$, lo que la posiciona como una alternativa viable a las aleaciones Ni-Ti convencionales.

El modelo constitutivo unidimensional reprodujo adecuadamente la respuesta esfuerzo-deformación del ciclo representativo, permitiendo su implementación en análisis numéricos de mayor escala. Las estructuras auxéticas reentrantes demostraron una elevada capacidad de redistribución de tensiones y amplificación de desplazamientos, atribuida a los mecanismos de flexión y rotación de ligamentos y nodos circulares.

En comparación con Ni-Ti y Al 606, la aleación Ti-Zr presentó menores niveles de tensión y mayores desplazamientos recuperables, especialmente al incrementar el número de celdas auxéticas. Estos resultados confirman el potencial de combinar aleaciones superelásticas libres de níquel con núcleos auxéticos reentrantes para el desarrollo de perfiles aerodinámicos de transformación suave, sin necesidad de mecanismos de actuación externos complejos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de este trabajo, así como por las facilidades de infraestructura y recursos académicos proporcionados. Asimismo, se reconoce el respaldo del programa PROACTII, cuyo apoyo fue fundamental para la realización de las actividades de investigación y análisis presentadas en este estudio.

REFERENCIAS

1. Shaw, J. A. (1995). Thermomechanical aspects of NiTi. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43(8), 1243–1281.
2. Fu, J., Yamamoto, A., Kim, H. Y., Hosoda, H., & Miyazaki, S. (2015). Novel Ti-based superelastic alloys with large recovery strain and excellent biocompatibility. *Acta Biomaterialia*, 17, 56–67.
3. Li, S., & Nam, T. (2019). Superelasticity and tensile strength of Ti–Zr–Nb–Sn alloys with high Zr content for biomedical applications. *Intermetallics*, 112, 106545.
4. López, L., Lopez, E., Villalpando, S., Moreno, I., Young, H., & Miyazaki, S. (2018). Effect of heat treatment condition on microstructure and superelastic properties of Ti–24Zr–10Nb–2Sn. *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 893–898.
5. Lopez, L., Young, H., Hosoda, H., & Miyazaki, S. (2015). Effect of Nb content and heat treatment temperature on superelastic properties of Ti–24Zr–(8–12)Nb–2Sn alloys. *Materials Science Division, University of Tsukuba*.
6. Viet, N. T., Zaki, W., Umer, R., & Xu, Y. (2020). Mathematical model for superelastic shape memory alloy springs with large spring index. *International Journal of Solids and Structures*, 185–186, 159–169.
7. Esposito, L., Fraldi, M., Ruocco, E., & Sacco, E. (2021). A shape memory alloy helix model accounting for extension and torsion. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 89, 104281.
8. Harkati, E., Daoudi, N., Bezazi, A., Haddad, A., & Scarpa, F. (2017). In-plane elasticity of a multi re-entrant auxetic honeycomb. *Composite Structures*, 180, 130–139.
9. Auricchio, F., & Taylor, R. L. (1997). Shape memory alloys: Modeling and numerical simulation of the finite strain superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 143, 175–194.

10. Saleeb, A. F., Natsheh, S. H., & Owusu-Danquah, J. S. (2017). Efficiency of finite element analyses of 55NiTi SMA actuators: Solid versus beam and shell modeling. *Finite Elements in Analysis and Design*, 136, 58–69.
11. Brinson, L. C. (1993). One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4, 229–242.
12. Pelton, A., Schroeder, V., Mitchell, M., Gong, X., Barney, M., & Robertson, S. (2008). Fatigue and durability of nitinol stents. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(2), 153–164.
13. Bianchi, M., Scarpa, F., & Smith, C. W. (2010). Shape memory behavior in auxetic foams: Mechanical properties. *Acta Materialia*, 58, 858–865.
14. Hassan, M. R., Scarpa, F., Ruzzene, M., & Mohammed, N. A. (2008). Smart shape memory alloy chiral honeycomb. *Materials Science and Engineering A*, 481–482, 654–657.
15. Jacobs, S., Coconnier, C., DiMaio, D., Scarpa, F., Toso, M., & Martinez, J. (2012). Deployable auxetic shape memory alloy cellular antenna demonstrator: Design, manufacturing and modal testing. *Smart Materials and Structures*, 21, 075013.
16. Rossiter, J., Takashima, K., Scarpa, F., Walters, P., & Mukai, T. (2014). Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness. *Smart Materials and Structures*, 23, 045007.
17. Hassan, M. R., Scarpa, F., & Mohamed, N. A. (2009). In-plane tensile behavior of shape memory alloy honeycombs with positive and negative Poisson's ratio. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, 897–905.
18. Budarapu, P. R., Y. B., S. S., & Natarajan, R. (2016). Design concepts of an aircraft wing: Composite and morphing airfoil with auxetic structures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(4).
19. Chen, Z., Wu, X., Wang, Z., & Shao, J. (2020). Concepts for morphing airfoil using novel auxetic lattices. En Z. Jing (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering 2019 (ICASSE 2019)* (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 622). Springer.
20. Huang, J., Zhang, Q., Scarpa, F., Liu, Y., & Leng, J. (2017). In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design. *Composites Part B: Engineering*, 110, 72–82.
21. Yang, L., Harrysson, O., West, H., & Cormier, D. (2015). Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and Structures*, 69–70, 475–490.
22. Maran, S., Masters, I. G., & Gibbons, G. J. (2020). Additive manufacture of 3D auxetic structures by laser powder bed fusion—Design influence on manufacturing accuracy and mechanical properties. *Applied Sciences*, 10(21), 7738.
23. Fu, M.-H., Chen, Y., & Hu, L.-L. (2017). A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength. *Composite Structures*, 160, 574–585.
24. Sun, J., Du, L., Scarpa, F., Liu, Y., & Leng, J. (2021). Morphing wingtip structure based on active inflatable honeycomb and shape memory polymer composite skin: A conceptual work. *Aerospace Science and Technology*, 111, 106541.
25. Xu, L., Baxevanis, T., & Lagoudas, D. C. (2019). A three-dimensional constitutive model for the martensitic transformation in polycrystalline shape memory alloys under large deformation. *Smart Materials and Structures*, 28, 074004.
26. Bornengo, D., Scarpa, F., & Remillat, C. (2005). Evaluation of hexagonal chiral structure for morphing airfoil concept. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 219(3), 185–192.
27. Heo, H., Ju, J., & Kim, D.-M. (2013). Compliant cellular structures: Application to a passive morphing airfoil. *Composite Structures*, 106, 560–569.
28. Spadoni, A., & Ruzzene, M. (2007). Static aeroelastic response of chiral-core airfoils. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(10), 1067–1075.
29. Martin, J., Heyder-Bruckner, J.-J., Remillat, C., Scarpa, F., Potter, K., & Ruzzene, M. (2008). The hexachiral prismatic wingbox concept. *Physica Status Solidi (b)*, 245(3), 570–577.

30. Shaw, J. A. (2012). Shape memory alloy honeycombs: Experiments and simulation. *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
31. Spadoni, A., & Ruzzene, M. (2007). Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(5), 965–981.
32. Qiu, K., Wang, R., Zhu, J., & Zhang, W. (2020). Optimization design of chiral hexagonal honeycombs with prescribed elastic properties under large deformation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(3), 902–909.
33. Bettini, P., Airoidi, A., Sala, G., Landro, L. D., Ruzzene, M., & Spadoni, A. (2010). Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process. *Composites Part B: Engineering*, 41(2), 133–147.
34. Zhu, Y., Wang, Z.-P., & Poh, L. H. (2018). Auxetic hexachiral structures with wavy ligaments for large elasto-plastic deformation. *Smart Materials and Structures*, 27(5), 055001.
35. Heo, H., Ju, J., Kim, D.-M., & Jeon, C.-S. (2011). Passive morphing airfoil with honeycombs. *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2011-64350)*, 263–271.