

Modelado del estrés termo-mecánico en películas finas de La(Fe,Co,Si)_{13} depositadas en estructuras porosas

Francisco Rodríguez-Méndez¹, Bruno Chiné², Marcela Meneses-Guzmán³

¹Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: frarodriguez@itcr.ac.cr

²Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: bchine@itcr.ac.cr

³Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Email: mameneses@itcr.ac.cr

Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento termo-mecánico de una película fina de material La(Fe,Co,Si)_{13} depositada en una estructura porosa metálica de aluminio diseñada con una geometría esférica uniforme. Para este propósito, se utilizan técnicas de simulación computacional basadas en el análisis de elementos finitos donde se modela el material magnetocalórico La(Fe,Co,Si)_{13} como un material con propiedades visco-plásticas durante un ciclo térmico a temperatura ambiente. Los valores obtenidos para estrés, deformación equivalente y ciclos necesarios para falla del material muestran una importante mejora en la estabilidad mecánica y resistencia a fatiga de la estructura porosa metálica con el recubrimiento de La(Fe,Co,Si)_{13} al ser comparada con una pieza con la misma geometría, pero constituida totalmente del material magnetocalórico. Estos resultados demuestran el potencial que este enfoque puede tener en el diseño y fabricación de regeneradores magnetocalóricos para aplicaciones de refrigeración magnética.

Palabras clave: estrés termo-mecánico, materiales magnetocalóricos, estructuras porosas, simulación computacional.

Abstract

In this paper, the thermo-mechanical behavior of a thin film of La(Fe,Co,Si)_{13} material deposited on a porous metallic aluminum structure with a uniform geometry is studied. For this purpose, computational simulation techniques based on Finite Element Analysis (FEA) are used with the magnetocaloric material La(Fe,Co,Si)_{13} modeled as a material with viscoplastic properties, during a thermal cycle at room temperature. The values obtained for stress, equivalent strain and cycles necessary for material failure show a significant improvement in the mechanical stability and fatigue resistance of the metallic porous structure with the La(Fe,Co,Si)_{13} coating when compared to a piece with the same geometry, but made entirely of the magnetocaloric material. These encouraging results prove the potential that this approach may have in the design and manufacture of magnetocaloric regenerators for magnetic refrigeration applications.

Keywords: thermo-mechanical stress, magnetocaloric materials, porous structures, computational analysis.

1. Introducción

La refrigeración juega un papel crucial en una gran parte de sectores industriales e incluso residenciales, siendo el consumo relacionado a sistemas de gestión térmica alrededor del 30% de la electricidad total producida a nivel mundial [1] [2]. Además de los impactos ambientales asociados con este importante consumo de energía primaria, los sistemas actuales de refrigeración por vapor-compresión contribuyen al calentamiento global significativamente debido a la

liberación de gases contaminantes a la atmósfera, tales como fluorocarburos o dióxidos de carbono utilizados como refrigerantes, demostrando también una pobre eficiencia en el ciclo de Carnot (alrededor del 10%) [3]. Como una alternativa amigable con el ambiente que da respuesta a estos dos problemas, la refrigeración magnética ha atraído el interés científico en los últimos años como una novedosa tecnología que tiene el potencial de alcanzar eficiencias de hasta 60% en el ciclo de Carnot con cero emisiones de gases de efecto invernadero [4] [5].

La refrigeración magnética se basa en el efecto magnetocalórico, el cual es definido como la respuesta que exhibe un material cuando, al aplicar un campo magnético externo, cambia su temperatura. En general, es una propiedad intrínseca presente en los elementos de la serie de los lantánidos y los metales de transición con un comportamiento ferromagnético. Al aplicar el campo magnético, los momentos magnéticos de estos materiales tienden a alinearse paralelamente a él, y la energía térmica liberada en este proceso produce el calentamiento del material. Los momentos magnéticos, después, se orientan de manera aleatoria cuando el campo magnético es retirado, lo que hace el material se enfríe por debajo de la temperatura inicial [6].

Materiales con un efecto magnetocalórico gigante, una transición magneto–estructural de primer orden o una transición elasto–magnética han demostrado el mayor potencial para este tipo de aplicación. Aun así, otras propiedades son de igual importancia y deben ser tomadas en cuenta a la hora de diseñar estos sistemas, características tales como un bajo costo y facilidad de fabricación de los regeneradores magnéticos (RM), pérdidas por histéresis magnética bajas, temperaturas de transición cercanas a la temperatura ambiente, cero toxicidad, excelente resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y una alta relación de su área superficial–volumen que permita una rápida y eficiente transferencia del calor al fluido refrigerante [7]. Al mismo tiempo, una excelente estabilidad mecánica durante los ciclos de refrigeración, así como una buena ductilidad y resistencia, son requerimientos críticos a la hora de desarrollar un RM.

Con el fin de producir regeneradores magnetocalóricos con estas características, investigaciones recientes [7] [8] han utilizado técnicas de manufactura aditiva de metales o impresión 3D para la fabricación de RM más estables, demostrando que conformar la geometría de estos materiales como estructuras porosas uniformes ayuda a maximizar la transferencia de calor entre el refrigerante sólido y el fluido de trabajo, además de que minimiza la caída de presión del fluido, resultando en un regenerador magnético con propiedades térmicas y rendimiento superior.

Paralelamente a estas investigaciones, también se ha estudiado la posibilidad de utilizar películas finas de material magnetocalórico depositadas en diversos sustratos, tales como metalizaciones o polímeros [9] [10] [11]. Se ha demostrado que esta configuración es capaz de conservar las propiedades magnéticas y térmicas propias del material, con una reducción no significativa en el efecto magnetocalórico del RM. A pesar de esto, este enfoque se ha convertido en una opción válida pues tiene el potencial de aumentar la estabilidad mecánica del regenerador magnetocalórico. Aún con los diferentes métodos que se han desarrollado y probado, el asegurar cierto grado de ductilidad y resistencia mecánica, así como estabilidad en fatiga por el ciclo de magnetización–desmagnetización normal del RM sigue siendo un desafío [12].

Por esta razón, como una alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de los RM, manteniendo la relación área superficial–volumen, las características magnetocalóricas y el rendimiento térmico, el objetivo de este trabajo es evaluar el estrés termo–mecánico que sufren películas finas de material La(Fe,Co,Si)_{13} al ser depositadas sobre estructuras porosas metálicas con una geometría uniforme, haciendo uso de métodos de modelación y simulación computacional.

En particular, la aleación de material La(Fe,Co,Si)_{13} posee un efecto magnetocalórico considerable, una temperatura de Curie o de transición manejable en el rango de 250K a 340K, además de una relativamente buena estabilidad mecánica en fatiga [13] [14] [15].

Para la evaluación del esfuerzo termo–mecánico, se utiliza software comercial con el método de análisis por elementos finitos, donde se modela el comportamiento del regenerador magnetocalórico como un material con propiedades visco–plásticas [16] [17]. La resistencia a fatiga (ciclos necesarios para falla) del material se calcula usando el modelo de Morrow para energía disipada en volúmenes definidos.

Bajo esta premisa, se estudian dos escenarios para determinar el comportamiento del RM. En un primer caso, se evalúa el esfuerzo mecánico y la resistencia a fatiga de la estructura como si esta estuviera formada completamente por La(Fe,Co,Si)_{13} . El segundo caso define como una membrana (película fina) al material La(Fe,Co,Si)_{13} y que es depositado sobre una estructura metálica de aluminio, para determinar los esfuerzos mecánicos y los ciclos para falla. Con los resultados obtenidos, se compara el rendimiento del material en ambos enfoques.

2. Método Computacional

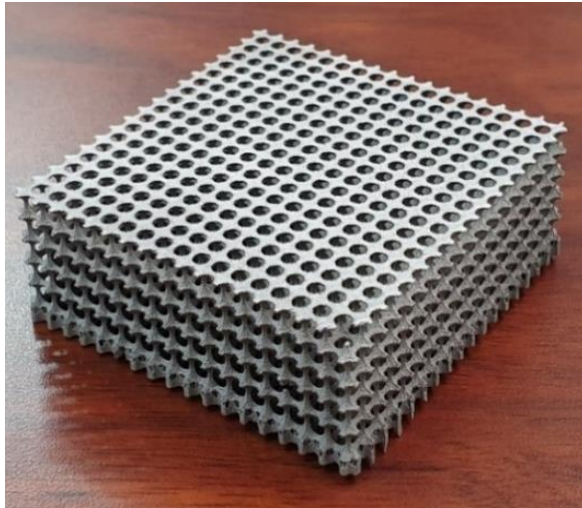
El comportamiento observado durante ensayos de tensión/compresión del material La(Fe,Co,Si)_{13} es falla frágil con formación de múltiples grietas o fisuras durante las pruebas y previas a la falla total. Al analizar la orientación de las grietas con respecto a la dirección de la carga se reconocen dos mecanismos de falla. El primero, fractura por ruptura debido a la tensión de tracción transversal y paralela a la carga aplicada. El segundo, fractura por esfuerzos cortantes creada en un ángulo cercano a los 45° con respecto a la fuerza aplicada. Ambos tipos de fractura son, comúnmente, observados en materiales semi– o frágiles, tales como rocas, cerámicas, granitos, mármol y cemento, donde estos materiales exhiben deformaciones inelásticas dependientes del tiempo [18] [19].

Debido a esta analogía, el comportamiento mecánico de La(Fe,Co,Si)_{13} se puede modelar como un material con propiedades visco–plásticas acopladas con el daño inducido por las grietas [20] [21]. Para este fin, se acoplan los módulos de “*Viscoplasticidad*” y “*Daño*”, parte de la física de “*Mecánica de Sólidos*” disponible en el software COMSOL Multiphysics. Además, el estrés térmico que sufre el material durante el ciclo de

magnetización–desmagnetización es tomado en cuenta al incluir el módulo de “*Expansión Térmica*”. Los ciclos necesarios para la falla del material se calculan en el módulo de “*Fatiga*”. Para el comportamiento de la capa fina de material magnetocalórico se acoplan las físicas anteriores con la de “*Membrana*”.

Para el estudio del estrés termo–mecánico se utiliza el modelo de Chaboche para materiales viscoplásticos, así como un modelo de daño escalar basado en deformación, particularmente el modelo de daño por deformación equivalente por estrés de Rankine. El ciclo de magnetización–desmagnetización se modela como una carga térmica en un rango de 250K a 340K a una frecuencia de 2Hz. La fatiga se calcula con el modelo de Morrow para volúmenes definidos.

El modelo geométrico del material consiste en una estructura celular similar a una espuma con una matriz de esferas distribuidas regularmente, cada una con un diámetro de 5mm y una distancia de separación de 4mm entre sus centros. Las dimensiones totales del material son de $72 \times 72 \times 20 \text{mm}^3$, tal y como se muestra en la Figura 1(a). La película delgada de material magnetocalórico tiene un grosor de 100nm.



(a)

coaxial al tensor del estrés. La función de fluencia dentro de los corchetes Macaulay de la Ecuación (1) está definida como

$$F_y = \phi(\sigma) - \sigma_{ys} \quad (2)$$

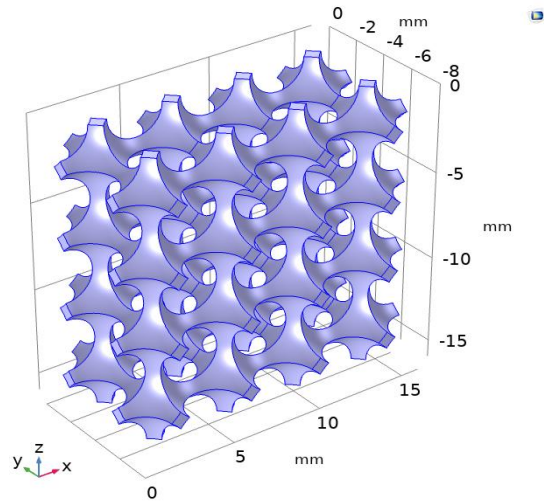
donde el esfuerzo equivalente $\phi(\sigma)$ es la tensión de von Mises. El tensor \mathbf{n}^D es calculado tomando en cuenta el potencial visco–plástico $Q_{vp} = F_y$ cuando se utiliza el esfuerzo equivalente de von Mises

$$\mathbf{n}^D = \frac{\partial Q_{vp}}{\partial \sigma} = \frac{3 \text{dev}(\sigma)}{2 \sigma_c} \quad (3)$$

Dada la propiedad

$$\mathbf{n}^D : \mathbf{n}^D = \frac{3}{2} \quad (4)$$

la tasa de cambio de la deformación visco–plástica está finalmente dada por



(b)

Figura 1. (a) Estructura porosa metálica con una matriz de esferas uniforme, y (b) modelo físico simplificado de la estructura porosa para el análisis computacional. Fuente: elaboración propia.

2.1. Modelo matemático

El tensor de la razón de cambio de deformación visco–plástica del modelo visco–plástico de Chaboche [22] está dado por la relación

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = A \left\langle \frac{F_y}{\sigma_{ref}} \right\rangle^n \mathbf{n}^D \quad (1)$$

donde, A es el coeficiente de la razón de cambio visco–plástico (1/s), n es el exponente de estrés, σ_{ref} es el nivel de tensión de referencia (Pa) y \mathbf{n}^D es el tensor

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{vp} : \dot{\varepsilon}_{vp} = A \left\langle \frac{F_y}{\sigma_{ref}} \right\rangle^n \quad (5)$$

Por otro lado, el modelo de daño de Rankine [23] define la deformación equivalente desde el esfuerzo principal sin daño más grande σ_{p1} como sigue

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\langle \sigma_{p1} \rangle}{E} \quad (6)$$

donde E es el módulo de Young. En esta formulación, los corchetes Macaulay son utilizados para remarcar el

hecho de que solo los esfuerzos en tensión (positivos) pueden causar daño.

Para el modelo escalar de daño es importante definir una ley de la evolución del daño. Para este caso, la ley de ablandamiento por deformación lineal define el daño desde

$$d(\kappa) = \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\kappa}\right) \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}\right) ; \quad \kappa \geq \varepsilon_0 \quad (7)$$

$$d(\kappa) = 0 ; \quad \kappa < \varepsilon_0 \quad (8)$$

donde ε_0 denota el inicio del daño, calculado desde la tensión de rotura σ_{ts} y el módulo de Young E , de modo que $\varepsilon_0 = \sigma_{ts}/E$. El parámetro ε_f se deriva de otras propiedades del material, tales como la tensión de rotura, el tamaño característico de elemento h_{ch} y la energía de fractura por unidad de volumen g_p , como sigue

$$\varepsilon_f = \frac{2g_p}{\sigma_{ts}h_{ch}} + \frac{\varepsilon_0}{2} \quad (9)$$

La expresión de Morrow para fatiga es una relación exponencial dada por

$$\Delta W_d = W_f'(2N_f)^m \quad (10)$$

donde ΔW_d es el rango de la densidad de energía disipada durante un ciclo, N_f es el número de ciclos hasta la falla del material, y W_f' y m son constantes propias del material. Dado que la viscoplasticidad es un proceso inelástico, la densidad de energía disipada W_d debe ser obtenida al integrar la densidad de energía visco-plástica disipada, la cual está dada por

$$\dot{W}_{vp} = \sigma : \dot{\varepsilon}_{vp} \quad (11)$$

2.2. Condiciones iniciales y de frontera

Si se asume que la carga térmica aplicada sobre el RM es uniforme a lo largo de todo el sólido, el modelo

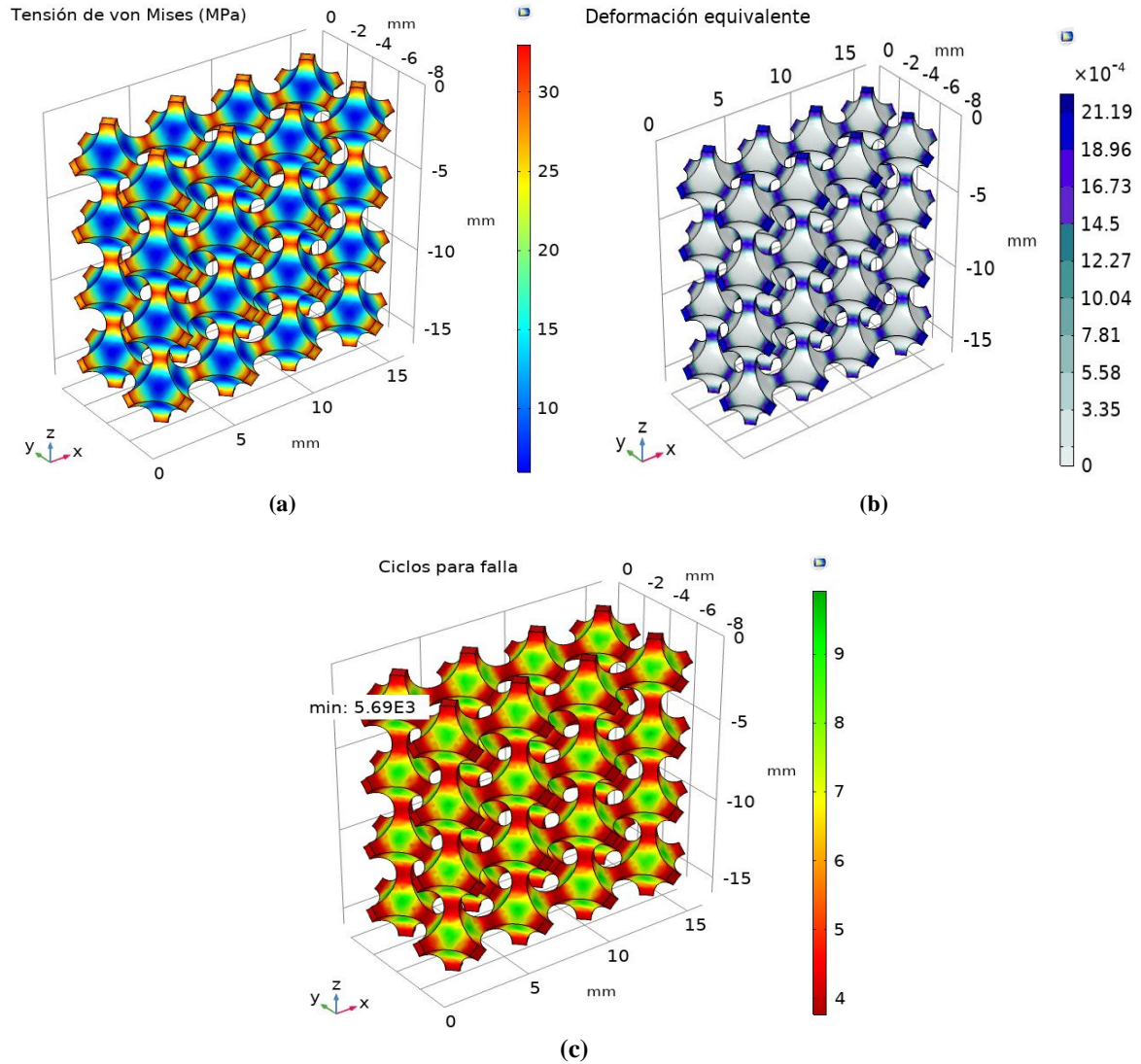


Figura 2. (a) Tensión de von Mises, (b) deformación equivalente, y (c) ciclos para falla obtenidos para la estructura de material magnetocalórico $\text{La}(\text{Fe},\text{Co},\text{Si})_{13}$. Fuente: elaboración propia.

físico se puede simplificar al análisis de una porción uniforme que represente fielmente las condiciones del proceso cíclico de magnetización–desmagnetización que sufre el material. De esta manera, la estructura de la Figura 1(a). se puede representar como el arreglo geométrico mostrado en la Figura 1(b)., donde se ha dado una condición de simetría a cada superficie y borde presente en cada una de las caras del modelo y para todas las físicas involucradas (mecánica de sólidos y membrana). Esta condición asegura la repetibilidad tridimensional en el espacio de la estructura como si se estuviera analizando la totalidad del modelo físico propuesto.

Las diferentes propiedades mecánicas y térmicas del material magnetocalórico utilizadas durante el análisis de los esfuerzos termo–mecánicos se resumen en la Tabla 1 [8] [18]. Este estudio es dependiente del tiempo y se corre en el periodo que dura un único ciclo del proceso de magnetización–desmagnetización del regenerador magnetocalórico.

Tabla 1. Propiedades mecánicas generales para el material magnetocalórico La(Fe,Co,Si)_{13} .

Propiedad	Valor
Módulo de Young	97 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad	7240 [kg/m ³]
Coefficiente de expansión térmica	26.1x10 ⁻⁶ [1/K]
Tensión de ruptura	620 [MPa]
Energía de fractura	123 [kJ/m ³]

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Como una medida de comparación de rendimiento en fatiga, el primer escenario de estudio consistió en el análisis del modelo físico de la estructura porosa como

si estuviera constituida totalmente por la aleación de material magnetocalórico La(Fe,Co,Si)_{13} . El esfuerzo por estrés termo–mecánico se muestra en la Figura 2(a)., mientras la deformación equivalente producto de estos esfuerzos se ilustran en la Figura 2(b). De igual manera, los ciclos para falla de la pieza vienen dados en la Figura 2(c).

La concentración de esfuerzos se da en las conexiones entre las diferentes celdas del material, donde el enlace estructural es más delgado (1mm entre una célula esférica y otra). El valor de la tensión de von Mises en estos puntos supera los 30MPa, pero se encuentra aún muy por debajo de la tensión de ruptura (es 20 veces menor, aproximadamente). Este comportamiento se repite en la deformación equivalente, donde la mayor tasa de cambio en el volumen del sólido se da en los mismos puntos, con un valor de 21.19×10^{-4} mm/mm. Por esto, al examinar los puntos de falla en la Figura 2(b)., el material de hecho colapsa en dichas uniones. Por último, los ciclos necesarios para falla son 5690, aproximadamente, lo cual está lejos de los ciclos que deben soportar los diferentes sistemas de refrigeración convencionales durante su vida útil (de manera general, 1×10^6 ciclos [7]).

En el segundo escenario, siendo la estructura porosa metálica conformada por aluminio y recubierta con la capa delgada de material La(Fe,Co,Si)_{13} , los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 3, 4 y 5. En particular, en la Figura 3 se ilustran las deformaciones equivalentes tanto del sólido como de la capa delgada del regenerador magnetocalórico, la Figura 4 muestra la evaluación de la concentración de esfuerzos en estos dos componentes, mientras que en la Figura 5 se aprecia el número total de ciclos necesarios para que el material falle.

Se puede apreciar que, para los valores obtenidos de las deformaciones equivalentes, la estructura porosa sólida sufre un cambio en su volumen en el orden de 28×10^{-6}

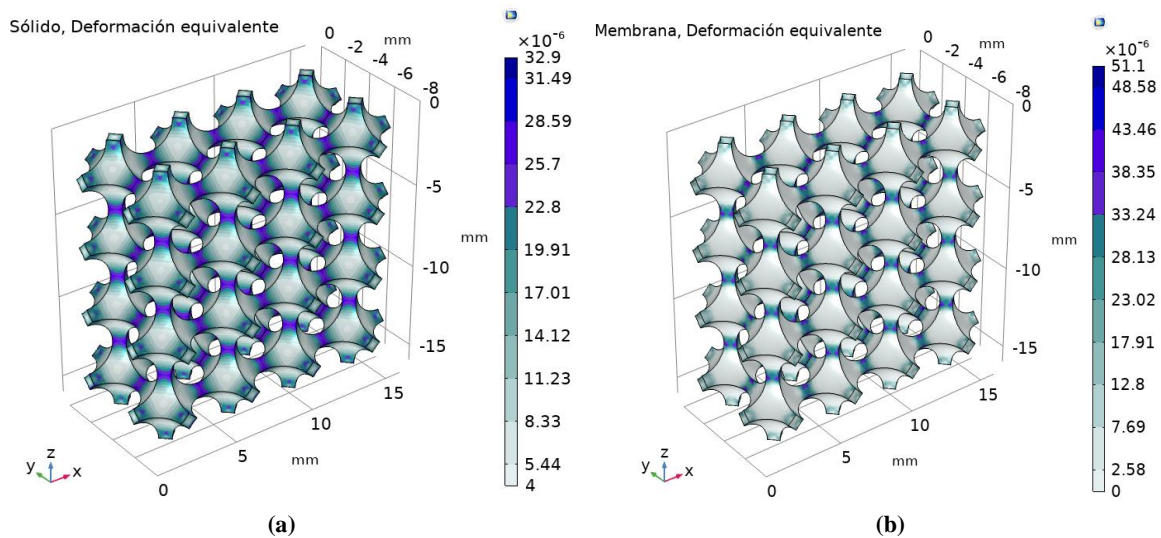


Figura 3. Deformación equivalente para (a) la estructura porosa metálica, y (b) la capa delgada de material La(Fe,Co,Si)_{13} . Fuente: elaboración propia.

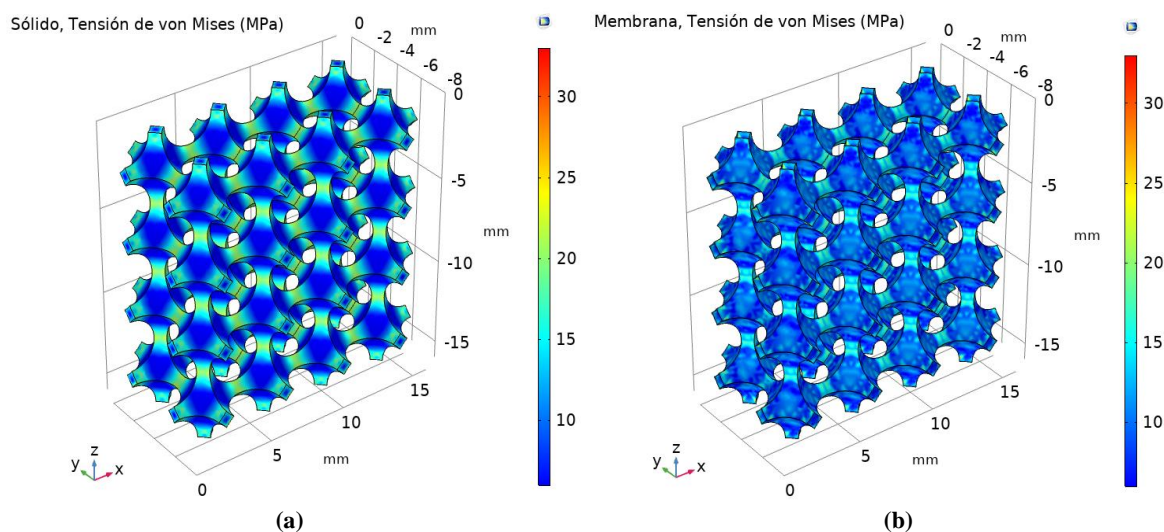


Figura 4. Estrés sufrido por (a) la estructura porosa metálica, y (b) la capa delgada de material $\text{La}(\text{Fe},\text{Co},\text{Si})_{13}$. Fuente: elaboración propia.

mm/mm (Figura 3(a)), mientras que la membrana se deforma un poco más (alrededor de 48×10^{-6} mm/mm, según la Figura 4(b)), en los puntos donde se encuentra la mayor concentración de esfuerzos. Esta similitud en la deformación equivalente hace que, durante el ciclo magnético, el fenómeno de expansión–contracción que sufre tanto el sólido como la capa delgada de material magnetocalórico, y que es causada por el cambio de temperatura, no se convierta en una fuente de esfuerzos en tensión–compresión significativa, pues la tasa a la cual cambian sus volúmenes se mantiene relativamente cercana una de la otra, lo cual es una consecuencia directa de los valores en sus respectivos coeficientes de expansión térmica (24×10^{-6} 1/K del aluminio base y 26.1×10^{-6} 1/K del material $\text{La}(\text{Fe},\text{Co},\text{Si})_{13}$).

Al evaluar las concentraciones de esfuerzos tanto en el sólido como en la membrana, se puede notar que en la

estructura porosa base (Figura 4(a)) la tensión de von Mises no supera los 15MPa en los puntos de mayor esfuerzo, que vuelven a ser las uniones entre las celdas del material. Para los mismos puntos, pero de la capa delgada de $\text{La}(\text{Fe},\text{Co},\text{Si})_{13}$, los valores de la tensión de von Mises rondan también los 15MPa. Por último, los ciclos necesarios en fatiga para la falla de la pieza completa superan los 200.000 (Figura 5.), siendo la membrana la estructura que sufre la ruptura, pues se puede notar que la estructura metálica conserva su integridad prácticamente intacta.

Al comparar los resultados obtenidos en los escenarios de estudio, se puede notar que la deformación que sufre la membrana o capa delgada de material $\text{La}(\text{Fe},\text{Co},\text{Si})_{13}$ es menor que la deformación sufrida por la estructura porosa constituida completamente por este mismo material. Esta diferencia se debe a que la estructura de

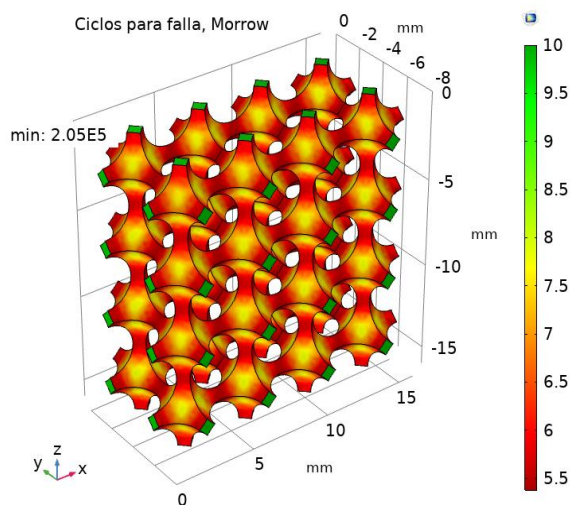


Figura 5. Ciclos mínimos necesarios para falla de la estructura porosa. Fuente: elaboración propia.

aluminio impone sobre la membrana, en gran medida, su comportamiento mecánico frente a la deformación equivalente por estrés térmico.

Este comportamiento dominante de la base metálica de la estructura porosa sobre la capa delgada de material La(Fe,Co,Si)_{13} no solo afecta la tasa de cambio de volumen del material magnetocalórico, sino que se refleja también en la concentración de esfuerzos de la pieza. Si se examinan las tensiones de von Mises para ambos casos y a lo largo de sus superficies, tanto para los puntos de mayor fluencia (uniones entre celdas) como en los cuerpos centrales de la pieza, se nota una disminución importante en el valor de dicho estrés, pues se pasa de un valor de 30MPa para la estructura constituida por únicamente La(Fe,Co,Si)_{13} a 15MPa, aproximadamente, para la película fina del mismo material magnetocalórico, pero en la estructura porosa metálica.

Por último, esta reducción de aproximadamente 50% en el estrés acumulado en la capa delgada de material La(Fe,Co,Si)_{13} se refleja directamente en el aumento de la cantidad de ciclos mínimos necesarios para falla de la pieza con este material depositado sobre la estructura metálica. De una resistencia a fatiga de poco más de 5 mil ciclos de la pieza constituida por únicamente el material magnetocalórico, se pasó a más de 200 mil ciclos de vida útil. A pesar de que es una gran mejora, queda aún por debajo del rendimiento de los procesos convencionales de refrigeración (más de 1×10^6 ciclos de vida promedio), permitiendo que este enfoque sea considerado como una alternativa viable a la hora de diseñar e implementar regeneradores magnéticos con buenas propiedades y estabilidad mecánica.

4. Conclusiones

En este trabajo se evaluó el comportamiento termo-mecánico y en fatiga que sufre una capa delgada o película fina de material La(Fe,Co,Si)_{13} depositado en una estructura porosa metálica de aluminio. Con este propósito se plantearon dos diferentes escenarios; el primero supone que toda la pieza está constituida con el material magnetocalórico La(Fe,Co,Si)_{13} , mientras en el segundo se tiene una base metálica de aluminio y un recubrimiento con un grosor de 100nm de material La(Fe,Co,Si)_{13} . Para estos dos casos se obtuvieron los valores de esfuerzo, deformación equivalente y ciclos necesarios para la falla de la estructura. Los resultados obtenidos en ambos estudios fueron luego comparados para determinar si existe diferencia en el rendimiento mecánico y en fatiga entre una estructura conformada completamente por La(Fe,Co,Si)_{13} y otra con una base metálica y un capa delgada de La(Fe,Co,Si)_{13} .

Los resultados de esta comparación demuestran que la estructura con base metálica y un recubrimiento de material La(Fe,Co,Si)_{13} poseen una mayor estabilidad mecánica y resistencia a fatiga con respecto a la pieza constituida totalmente de La(Fe,Co,Si)_{13} , pues el valor de los esfuerzos en los puntos de mayor concentración

de estrés decaen en hasta un 50% para la membrana de material magnetocalórico. Este comportamiento se refleja también en la deformación equivalente, siendo este parámetro menor en la pieza con recubrimiento que en la estructura porosa de solo La(Fe,Co,Si)_{13} . Por último, los ciclos necesarios para falla del material crecen en casi 40 veces más para la pieza con la capa delgada de material La(Fe,Co,Si)_{13} , comparada con la pieza conformada completamente del mismo material. Este desenlace muestra el potencial de crear RM's con bases metálicas con geometrías uniformes y capas delgadas de materiales magnetocalóricos, convirtiendo este enfoque una opción factible para su desarrollo en sistemas de refrigeración magnética.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda financiera brindada por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través del proyecto 5402-1351-2301.

6. Referencias

- [1] D. J. Silva, J. Ventura y J. P. Araújo, «Caloric devices: A review on numerical modeling and optimization strategies,» *International Journal of Energy Research*, vol. 45, n° 13, pp. 18498-18539, 2021. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/353374728>
- [2] G. Porcari, K. Morrison, F. Cugini, J. Turcaud, F. Guillou, A. Berenov, N. v. Dijk, E. Brück, L. Cohen y M. Solzi, «Influence of thermal conductivity on the dynamic response of magnetocaloric materials,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 59, pp. 29-36, 2015. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/282626424>
- [3] V. Chaudhary, X. Chen y R. Ramanujan, «Iron and manganese based magnetocaloric materials for near room temperature thermal management,» *Progress in Materials Science*, vol. 100, pp. 64-98, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007964251830094X>
- [4] M. Balli, O. Sari, L. Zamni, C. Mahmed y J. Forchelet, «Implementation of $\text{La(Fe,Co)}_{13-x}\text{Six}$ materials in magnetic refrigerators: Practical aspects,» *Materials Science and Engineering B*, vol. 177, pp. 629-634, 2012. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/257341880>
- [5] U. Legait, F. Guillou, A. Kedous-Lebouc, V. Hardy y M. Almanza, «An experimental comparison of four magnetocaloric regenerators using three different materials,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 37, pp. 147-155, 2014. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/259509106>
- [6] H. R. Bouchekara y M. Nahas, «Magnetic Refrigeration Technology at Room Temperature,» de *Trends in Electromagnetism – From Fundamentals to*

- Applications*, Research Gate, 2014, pp. 225-250. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/221924035>
- [7] J. D. Moore, D. Klemm, D. Lindackers, S. Grasemann, R. Träger, J. Eckert, L. Löber, S. Scudino, M. Katter, A. Barcza, K. P. Skokov y O. Gutfleisch, «Selective laser melting of La(Fe,Co,Si)₁₃ geometries for magnetic refrigeration,» *Journal of Applied Physics*, vol. 114, 2013. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/257975485>
- [8] A. Mohamed, M. Jeong, R. S. Sheridan y M. M. Attallah, «Enabling high efficiency magnetic refrigeration using laser powder bed fusion of porous LaCe(Fe,Mn,Si)₁₃ structures,» *Additive Manufacturing*, vol. 51, 2022. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/357772168>
- [9] R. L. Hadimani, J. Silva, A. M. Pereira, D. L. Schlögel, T. A. Lograsso, Y. Ren, X. Zhang, D. C. Jiles y J. P. Araujo, «Gd₅(Si,Ge)₄ thin film displaying large magnetocaloric and strain effects due to magnetostructural transition,» *Applied Physics Letters*, vol. 106, 2015. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/271134440>
- [10] M. Hamad, O. Hemedat, H. R. Alamri, A. Mohamed y M. E. Harb, «Strong tailoring magnetocaloric effect in highly 001)-oriented La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ thin films,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 1356-1361, 2021. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/349379644>
- [11] M. Krautz, A. Funk, K. P. Skokov, T. Gottschall, J. Eckert, O. Gutfleisch y A. Waske, «A new type of La(Fe,Si)₁₃-based magnetocaloric composite with amorphous metallic matrix,» *Scripta Materialia*, vol. 95, pp. 50-53, 2015. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135964621400390X>
- [12] J. H. Belo, A. L. Pires, J. P. Araújo y A. M. Pereira, «Magnetocaloric materials: From micro- to nanoscale,» *Materials Research Journal*, 2018. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1557/jmr.2018.352>
- [13] J. Lyubina, R. Schäfer, N. Martin, L. Schultz y O. Gutfleisch, «Novel Design of La(Fe,Si)₁₃ Alloys Towards High Magnetic Refrigeration Performance,» *Advanced Materials*, vol. 22, pp. 3735-3739, 2010. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/44639989>
- [14] F. Schcibel, T. Gottschall, A. Taubel, M. Fries, K. P. Skokov, A. Terwey, W. Keune, K. Ollefs, H. Wende, M. Farle, M. Acet, O. Gutfleisch y M. E. Gruner, «Hysteresis Design of Magnetocaloric Material - From Basic Mechanisms to Applications,» *Energy Technology*, vol. 6, pp. 7397-7428, 2018. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.201800264>
- [15] B. Rosendahl Hansen, L. Kuhn, C. Bahl, M. Lundberg, C. Ancona-Torres y M. Katter, «Properties of magnetocaloric La(Fe,Co,Si)₁₃ produced by powder metallurgy,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, pp. 3447-3454, 2010. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885310004385>
- [16] T. Gasch y A. Ansell, «Cracking in Quasi-Brittle Materials Using Isotropic Damage Mechanics,» de *COMSOL Conference*, Munich, 2016. Disponible en: <https://www.comsol.com/paper/modeling-cracking-in-quasi-brittle-materials-using-isotropic-damage-mechanics-40301>
- [17] S. Shahrooi, I. H. Metselaar y Z. Huda, «Evaluation of cyclic plasticity models of multi-surface and non-linear hardening by an energy-based fatigue criterion,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, n° 6, pp. 1255-1260, 2010. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/245040134>
- [18] O. Glushko, A. Funk, V. Maier-Kiener, P. Kraker, M. Krautz, J. Eckert y A. Waske, «Mechanical properties of the magnetocaloric intermetallic LaFe_{11.2}Si_{1.8} alloy at different length scales,» *Acta Materialia*, vol. 165, pp. 40-50, 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418309145>
- [19] Y. Pan, Y. Liu, Z. Cui, X. Chen y Q. Yang, «Fracture Analysis of Brittle Materials Based on Nonlinear FEM and Application in Arch Dam with Fractures,» *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, 2013. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/258396764>
- [20] H. Zhou, Y. Jia y J.F. Shao, «A unified elastic-plastic and viscoplastic damage model for quasi-brittle rocks,» *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 45, pp. 1237-1251, 2008. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160908000142>
- [21] B. Yin, I. Zreid, D. Zhao, R. Ahmed, G. Lin y M. Kaliske, «Thermomechanical fatigue life prediction of metallic materials by a gradient-enhanced viscoplastic damage approach,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 123, pp. 2042-2075, 2022. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/357711763>
- [22] A. Ambroziak y P. Klosowski, «The elasto-viscoplastic Chaboche Model,» *TASK QUARTERLY*, vol. 10, n° 1, pp. 49-61, 2007. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/228699800>
- [23] ComsolAB, COMSOL Multiphysics – Structural Mechanics Module, User’s Guide, Version 5.6. (2020). Disponible en: <https://doc.comsol.com/5.6/docserver>