Análisis del módulo de corte dinámico en materiales compuestos comparando los modelos de la regla de las mezclas y Halpin-Tsai.

LAMBRI, Fernando Daniel[1]; BONIFACICH, Federico Guillermo[1,2]; LAMBRI, Osvaldo Agustín[1]; PÉREZ, Santiago[1]; PÉREZ-LANDAZÁBAL, José Ignacio[3] ; RECARTE, Vicente[3]; SÁNCHEZ-ALARCOS, Vicente[3]; ZELADA, Griselda[1]; LAMBRI, Melania Lucila[1].

[1]Laboratorio de Extensión e Investigación en Materiales, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR-CONICET
[2]Consejo de Investigaciones – CIUNR-UNR
[3]Departamento de Ciencias, Universidad Pública de Navarra and Institute for Advanced Materials and Mathematics (INAMAT2), España

Palabras claves: Materiales compuestos inteligentes; Espectroscopía mecánica; Transformación martensítica; Regla de las mezclas; Halpin-Tsai.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones metamagnéticas con memoria de forma (MSMA) han captado la atención de los investigadores debido a sus capacidades de modificar sus dimensiones o su capacidad de amortiguamiento, controlado por un campo magnético externo. Estas aleaciones presentan demasiada fragilidad y se comenzaron a elaborar y estudiar materiales compuestos donde las MSMA estuvieran embebidas en forma de micropartículas en un matriz mucho menos frágil como polímeros. Aquí surge la importancia de la relación de módulos entre matriz y micropartículas en la eficiencia de estos materiales compuestos, debido a que es una matriz demasiado blanda, los cambios de dimensión de las micropartículas de MSMA se verá atenuada por la matriz. En cambio, si la matriz es demasiado dura, podría directamente inhibir los cambios de dimensión de las micropartículas.

OBJETIVOS

En el presente trabajo se lleva a cabo el estudio y la aplicación de modelos de la regla de las mezclas y Halpin-Tsai sobre los módulos de corte dinámicos de materiales compuestos de matriz de policaprolactona (PCL) con micropartículas de MSMA (12% vol) de composición $Ni_{45}Mn_{36.7}In_{13.3}Co_5$ embebidas en ella.

MATERIALES Y MÉTODOS

Hilos de los materiales compuestos PCL/MSMA se obtuvieron mediante extrusión a 356 K de una mezcla de PCL y micropartículas obtenida por inversión de fase. Esos hilos fueron utilizados para fabricar placas de donde luego se obtuvieron las muestras para los ensayos de espectroscopía mecánica (MS).
De los ensayos de MS se obtuvieron el amortiguamiento y la frecuencia de oscilación en función de la temperatura. El módulo de corte dinámico se obtuvo a partir de la relación

$$G' = \frac{(2\pi)^2 f^2 l\, I}{k\, a^3 b}$$

Regla de las mezclas $G_C = \quad (1 \quad _R =$

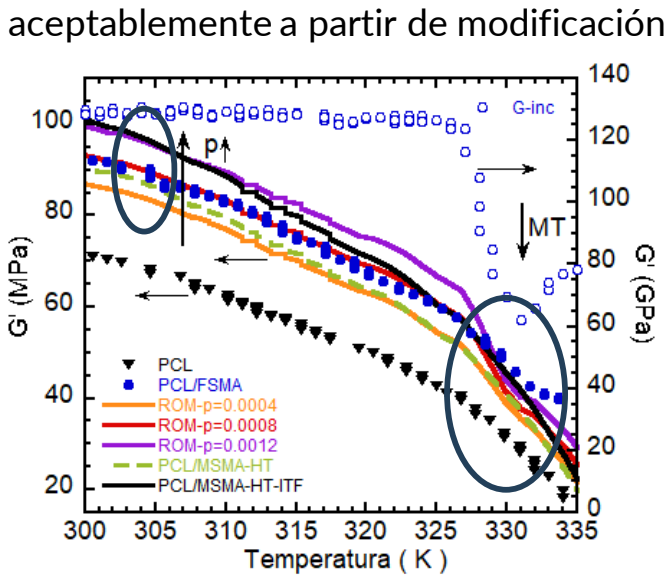
$$p(f v_i G_i + f v_m G_m) + (1-p)/(f v_i/G_i + f v_m/G_m)$$

Halpin-Tsai $G_C = G_m \frac{1+\xi_i \eta_i f v_i + \xi_{if} \eta_{if} f v_{if}}{1-\eta_i f v_i - \eta_{if} f v_{if}}$; $\eta_{i,if} = \frac{G_{i,if} - G_m}{G_{i,if} + \xi_{i,if} G_m}$; $\xi_{i,if} = 1 + 40 f v_{i,if}^{10}$

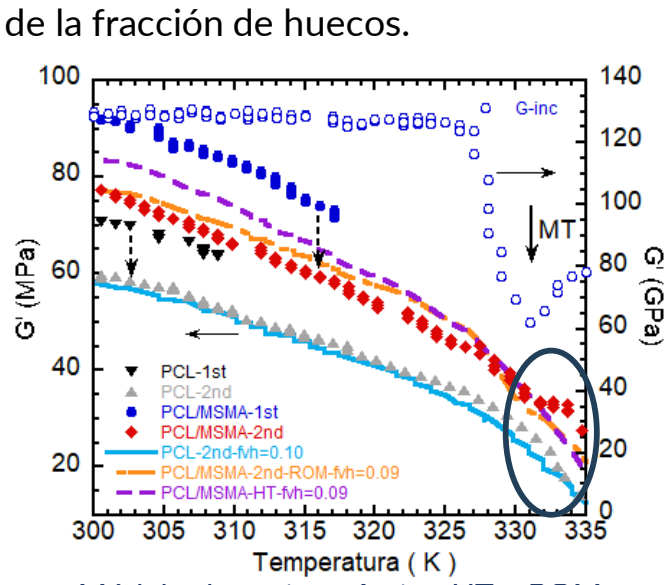
$$G_C = G_m \frac{1 - f v_h}{1 + f v_h/\xi_h}$$

RESULTADOS y DISCUSIÓN

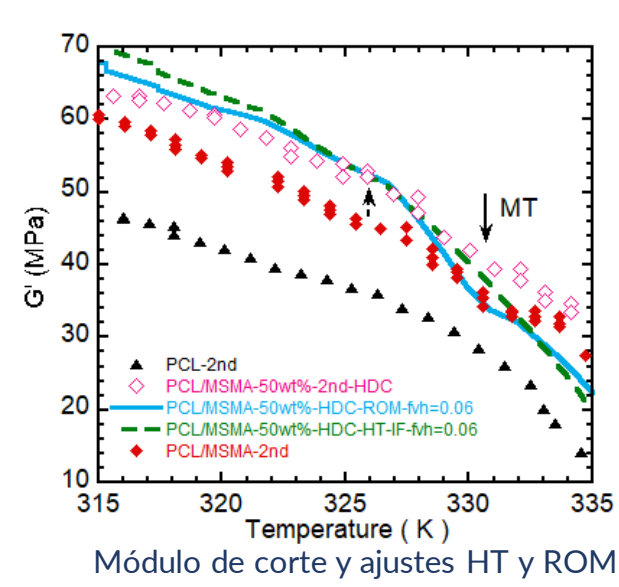
Los ensayos de MS se realizan durante dos ensayos consecutivos a las muestras PCL puro y dos ensayos sin y con campo magnético aplicado en las muestras PCL/MSMA hasta 335 K. El ajuste de las curvas de los módulos con ambos modelos fue bueno en prácticamente todo el rango de temperatura explorado y permitió una correcta descripción de los cambios mesoestructurales producto del flujo molecular y del ablandamiento producto de la MT. El apartamiento de la curva teórica respecto a la experimental en la zona de alta temperatura se debió al límite de aplicabilidad del modelo debido a la cercana temperatura fusión del polímero. Además, el menor flujo molecular producto de la aplicación del campo pudo ser descripto aceptablemente a partir de modificación de la fracción de huecos.



Módulo de corte y ajustes HT y ROM 1er calentamiento



Módulo de corte y ajustes HT y ROM 2do calentamiento



Módulo de corte y ajustes HT y ROM 2do calentamiento con HDC

CONCLUSIONES

Los modelos de la regla de las mezclas y Halpin-Tsai lograron describir correctamente el comportamiento del módulo dinámico en materiales compuesto PCL con micropartículas de $Ni_{45}Mn_{36.7}In_{13.3}Co_5$. El ajuste de las curvas de los módulos con ambos modelos fue bueno en prácticamente todo el rango de temperatura explorado, solamente se observó un apartamiento de la curva teórica respecto a la experimental en la zona de alta temperatura. El modelo de ROM logró un ajuste mejor que el modelo de HT, no obstante el modelo ROM depende de parámetros empíricos que lo vuelven muy sensible.

REFERENCIAS

F. D. Lambri, et al. Comps Sci Techh 265 (2025) 111153. F. D. Lambri, et al. Mater Sci Forum 1198 (2026) 29-42.

AGRADECIMIENTOS y FINANCIAMIENTO

PID-UNR 80020220700026UR (2023–2026), PPCT-UNR 80020220600018UR (2023–2026) y PIP-CONICET 11220210100073CO (2022–2024), Convenio de Cooperación Internacional Interuniversitaria entre la UNR y la UPNA Res. C. S. 3812/2021 (2021–2026) and Res. C. S. 5357/2026 (2026-2027).