



**Metodología para el Estudio de la Cinética de Precipitación en Materiales Compuestos  
Híbridos de Matriz de Aluminio**

**Convocatoria de Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera 2022 Modalidad: Paradigmas y  
Controversias de la Ciencia. Proyecto No. 321019**

**Cinética de Precipitación en Materiales Compuestos Híbridos de Matriz de Aluminio  
Responsable técnico. Dr. Raúl Pérez Bustamante**

## Contenido

Resumen.....	2
1. Introducción .....	3
2. Procedimiento experimental.....	5
Preparación de polvos.....	5
Consolidación y envejecimiento artificial .....	5
Caracterización de materiales.....	6
3. Resultados y discusión .....	6
Análisis térmico.....	6
Endurecimiento por envejecimiento .....	7
Microestructura .....	10
4. Conclusiones.....	10
Agradecimientos .....	11
Referencias.....	11

## Resumen

El siguiente documento muestra los procedimientos y técnicas de caracterización empleadas en el estudio de la cinética de precipitación en materiales compuestos base aluminio empleando como base del compuesto subproductos metálicos de procesos de maquinado. Esto es debido a que el interés científico en el reciclaje de materiales se acelera cada año; tan solo en relación a la última década. Los beneficios del reciclaje de materiales metálicos representan una contribución positiva al medio ambiente y la economía local, cuando los materiales de desecho metálicos, comúnmente obtenidos como subproductos durante la operación de fabricación sustractiva, se reutilizan ahora en la fabricación de materiales compuestos (MMC). La amplia disponibilidad de materiales reforzantes que existen hoy en día, ha permitido analizar de manera individual su efecto en diversas matrices metálicas. Sin embargo, el refuerzo híbrido es otra estrategia novedosa y que, como paradigma, plantea un mejor aprovechamiento de los conocimientos actuales empleados en diseñar y fabricar MMC avanzados. La idea central de esta ruta es agregar una variedad de refuerzos híbridos en la matriz de metal, y confiando en los refuerzos híbridos para ejercer sus respectivas ventajas para lograr efectos sinérgicos, lo que lleva a excelentes rendimientos. La presente investigación abarca el estudio de la cinética de precipitación, mediante la caracterización, mecánica y microestructural de materiales compuestos híbridos de matriz metálica empleando como fases reforzantes, carburos y nanotubos de carbono (NTC) como uno de los alótropos del carbono, así como matriz del material compuesto, polvo metálico procesado a partir de viruta metálica de aleaciones de aluminio-zinc, obtenidas de procesos de reciclaje mecánico. Esta metodología representa una contribución al estado del arte en relación a la elucidación de los mecanismos de reforzamiento presentes en materiales compuestos híbridos de matriz metálica (MMCH) en

condiciones de trabajo efectuadas a diversas temperaturas, así como los mecanismos de reforzamiento existentes bajo diferentes condiciones de procesamiento y diferentes temperaturas en compósitos sintetizados a partir de una aleación susceptible a endurecimiento por precipitación. Por lo tanto, se ha investigado la evolución de la microestructura, el comportamiento de envejecimiento, así como la microdureza de la aleación de Al 7075 puro y los compuestos con TiC y NTC preparados mediante molienda de bolas de alta energía a diferentes tiempos. La precipitación de la fase  $\eta'$  comienza a mayor temperatura con la presencia y cantidad de TiC añadida, mientras que con la adición de NTC se minimiza el efecto mencionado y  $\eta'$  precipita a menor temperatura.

## 1. Introducción

El considerar tecnologías de reciclaje, sustituyendo nuevos materiales por materiales reciclados con el fin de minimizar la cantidad de residuos, deriva en una reducción en gastos de producción en su implementación y al mismo tiempo no plantea problemas particulares a la hora de aplicarlos en práctica industrial [1-3]. En la síntesis de nuevos materiales, particularmente de matriz metálica surge la oportunidad de considerar tecnologías de reciclaje en la síntesis de materiales compuestos con alto potencial para reemplazar una gran cantidad de materiales utilizados en las industrias automotriz, aeroespacial, electrónica, de energía y de fabricación, donde está aumentando la necesidad de piezas ligeras y de alta resistencia [4, 5]. La posibilidad de combinar diferentes materiales (metal-cerámica-no metal) brinda la oportunidad de cambiar las propiedades de los compuestos de matriz metálica, que están determinadas principalmente por las propiedades de los materiales componentes y que, con la amplia disponibilidad de agentes reforzantes, dan paso a una generación de materiales compuestos de matriz metálica [6].

Los compuestos de matriz metálica (MMC) exhiben una mayor resistencia específica y módulo de elasticidad específico que sus homólogos monolíticos [7]. Además, con un cuidadoso control de la composición, también pueden exhibir alta conductividad térmica, alta conductividad eléctrica, buenas dimensiones estabilidad, alta capacidad de amortiguación y excelente resistencia al desgaste [8-10]. Para tener en cuenta que la extensa investigación realizada sobre MMC en los últimos cuatro décadas ha permitido superar algunos paradigmas desafiantes tales como procesamiento rentable, diseño de materiales, caracterización y control interracial de refuerzo de matriz [11, 12].

El amplio uso de MMC también provocó más investigaciones para un mayor avance en su diseño, síntesis y aplicaciones [13, 14]. Los MMC convencionales reforzadas con fibras o partículas puede lograr una resistencia ultra alta y un módulo elástico mejorado con alto contenido de refuerzos, mientras que la ductilidad y la tenacidad cae drásticamente con el aumento del volumen cantidad de refuerzos debido a la tradicional compensación entre resistencia y ductilidad [15, 16]. Recientemente, los investigadores han demostrado que la adición de nano-refuerzos podría mejorar la fuerza y módulo de aleaciones de matriz metálica sin deteriorar la ductilidad y tenacidad [17]. Además, los nano-refuerzos tienen mucho mayor eficiencia de refuerzo que sus homólogos en la escala micrométrica [18-21]. Sin embargo, la dispersión uniforme de alto contenido de nano-refuerzos en MMC es demasiado difícil debido a la acción de fuertes fuerzas de Van der Waals y la incompatibilidad intrínseca entre los nano-refuerzos y la mayoría de las aleaciones de matriz metálica.

Las aleaciones de aluminio 7075 se han utilizado en muchos campos como la industria aeroespacial, automotriz y marina como elemento estructural debido a su alta resistencia a la corrosión y elevadas propiedades mecánicas obtenidas del envejecimiento artificial manteniendo la resistencia al desgaste y baja densidad [22-24]. Es imprescindible continuar investigando en este tipo de materiales debido al constante aumento de la demanda de materiales avanzados para aplicaciones especiales. Hoy en día, los compuestos de matriz metálica híbrida que agregan refuerzos no cerámicos están recibiendo una atención importante debido al excepcional rendimiento mecánico y las propiedades físicas imposibles de obtener mediante aleaciones monolíticas [25, 26]. Hay varias rutas para producir estos materiales, como la fundición por presión, la fundición por agitación, la superficie compuesta por láser y la pulvimetalurgia (PM) [27, 28]. PM involucra algunos pasos para obtener una muestra consolidada, desde la preparación de polvos por molienda mecánica que es un proceso de no equilibrio para materiales híbridos, hasta la sinterización de las muestras por calentamiento en hornos convencionales. Actualmente existen trabajos sobre compuestos de matriz de metales híbridos 7075 reforzados con SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, grafito, NTC, MoS<sub>2</sub> y TiC obteniendo un aumento significativo en la respuesta mecánica [29-33], sin embargo, la cinética de precipitación y la interacción de los compuestos preparados con la adición de TiC/NTC no se habían estudiado ampliamente. En este trabajo, se preparó con éxito mediante pulvimetalurgia un material híbrido con dispersión uniforme de TiC/NTC en matriz 7075 para estudiar en detalle la cinética de precipitación.

Por lo tanto, el contenido limitado de nano-refuerzos siempre resulta en aumento de la resistencia en la mayoría de los nano-compuestos de matriz metálica (MMNC) que restringen el espectro de aplicaciones de las MMC en ingeniería y sectores biomédicos. El refuerzo híbrido es otra estrategia novedosa y significativa para diseñar y fabricar MMC avanzadas [34-36]. La idea central de esta ruta es agregar una variedad de refuerzos híbridos en la matriz de metal, y confiando en los refuerzos híbridos para ejercer sus respectivas ventajas para lograr efectos sinérgicos, lo que lleva a un excelente rendimiento. El enfoque de refuerzo híbrido es más conveniente y promete producir MMC a granel, porque se basa en la selección del tipo, contenido y proporción adecuados de los refuerzos híbridos para lograr un alto rendimiento [37, 38]. Además, la combinación de excelentes propiedades mecánicas, buena resistencia al desgaste y otras propiedades físicas (como la conductividad térmica y eléctrica) pueden también obtenerse mediante una selección juiciosa de refuerzos híbridos. Por lo tanto, el desarrollo de compuestos híbridos tiene el potencial para allanar el camino para expandir de manera efectiva el alcance de la aplicación de MMC [39, 40].

Este estudio contempla el uso de tratamientos térmicos en función de la cinética de precipitación, su alteración y estudio de los mecanismos de precipitación, a partir de la síntesis de materiales compuestos híbridos de matriz metálica, reforzados con carburos y alótropos de carbono. En tal propósito, se emplea como matriz una aleación de aluminio-zinc, la cual es procesada por medios mecánicos para su transformación en viruta metálica, que sirva como base para la síntesis de los compósitos. Esta estrategia es derivada de las crecientes demandas en el uso de metodologías de reciclaje para el reaprovechamiento de los materiales de aplicaciones estructurales, de tal manera que presenten un mayor tiempo de vida, no solo a temperatura ambiente, sino bajo diferentes temperaturas. Se selecciona una matriz de aluminio en la síntesis de materiales avanzados debido a que representan un avance científico y tecnológico en el uso y manipulación de materiales reforzantes a partir de diferentes nanopartículas.

Aunque se sabe que la presencia de partículas reforzantes no afecta la secuencia de precipitación, si se presentan alteraciones en la cinética de precipitación, la cual se ve alterada en función de un

agente reforzante [41, 42]. Sin embargo, se presenta una competitividad con la presencia o la adición de una segunda fase reforzante y por consecuencia diferentes mecanismos de reforzamiento toman lugar en función de la temperatura y tiempo de envejecimiento empleados en tratamientos térmicos de aleaciones aluminio-zinc.

## 2. Procedimiento experimental

### Preparación de polvos

TiC (polvo de carburo de titanio (IV),  $<4 \mu\text{m}$ ,  $\geq 99\%$  (Ti)) y NTC, se utilizaron como partículas de refuerzo para ser incorporadas a virutas de Al7075 mediante molienda de bolas de alta energía. Los compuestos se prepararon al 0, 1 y 2% en peso, además, se agregaron mezclas de TiC y NTC (50-50%) al Al7075 en las mismas concentraciones (1 y 2% en peso). El proceso de incorporación se llevó a cabo en un molino SPEX 8000M de alta energía bajo atmósfera inerte de Ar durante 0,5, 1 y 2 h. Se utilizaron bolas de acero endurecido como medio de molienda manteniendo la relación de peso de 5:1 (medio de molienda: polvo) y se agregó heptano como agente de control del proceso para evitar la aglomeración de Al7075. Los materiales de inicio se presentan en la Fig. 1.

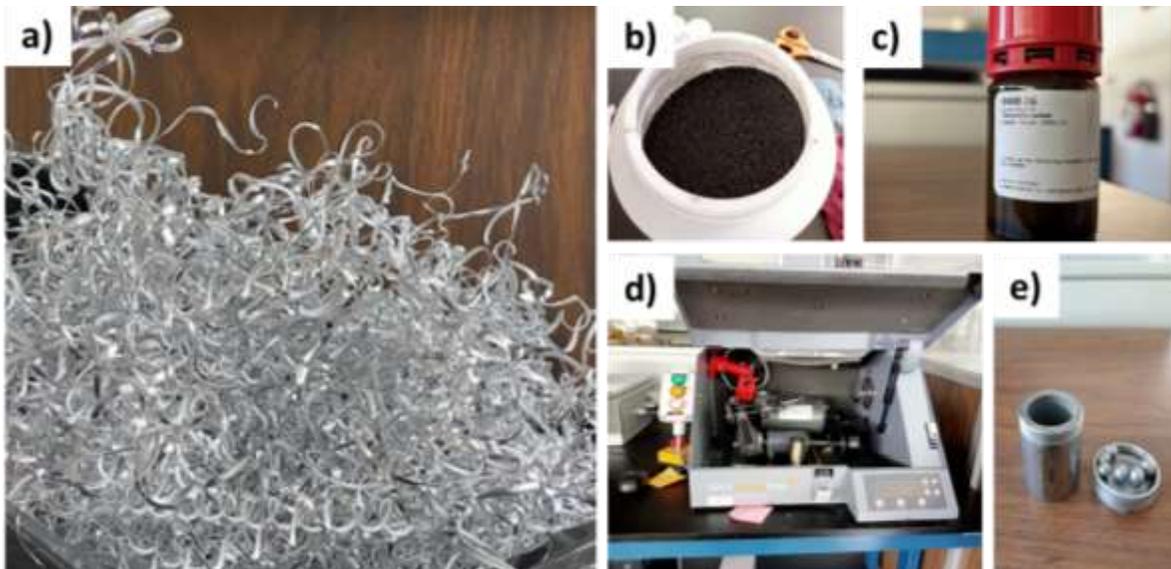


Figura 1. a) Viruta de la aleación Al7075. b) NTC, c) TiC, d) Molino Spex 8000M y e) Vial y medio de molienda para la síntesis de compósitos.

### Consolidación y envejecimiento artificial

Los polvos obtenidos se compactaron en frío en un tinte de acero cilíndrico endurecido a 750 MPa. Posteriormente, los cilindros obtenidos (mm\*mm) se sinterizaron en un horno tubular a 520°C durante 3 h en atmósfera de argón para evitar la oxidación. Después de eso, para obtener muestras homogeneizadas, la aleación 7075 pura y los compuestos se solubilizaron a 480 °C durante 0,5 h. El siguiente proceso de envejecimiento artificial se llevó a cabo a 110 °C en diferentes períodos. 3.1.

## Caracterización de materiales

La microestructura resultante se examinó usando un microscopio óptico. La dureza Vickers se midió en muestras pulidas mediante un dispositivo Vickers de microdureza y los resultados se compararon con análisis por simulación empleado ANSYS en su versión académica. Los análisis térmicos se llevaron a cabo en instrumentos DSC modelo TA Q200, se colocaron 30  $\mu\text{g}$  de muestra sinterizada en bandejas de Al y se calentaron en una atmósfera de Ar fluyente a una velocidad de calentamiento constante de 10  $\text{min}/^\circ\text{C}$ ; se usó una bandeja Al vacía como referencia.

## 3. Resultados y discusión

La aleación 7075 pura sinterizada y solubilizada y los compuestos se estudiaron mediante DSC para observar su comportamiento térmico, pruebas de microdureza para obtener su endurecimiento por envejecimiento y microscopía óptica para analizar su microestructura resultante.

### Análisis térmico

Los termogramas DSC (Fig. 2) se obtuvieron a partir de polvos con diferente composición y tiempo de molienda para analizar sus reacciones térmicas, conteniendo picos endotérmicos y exotérmicos para la disolución y formación de fases, respectivamente. La secuencia de precipitación del sistema Al-Zn-Mg para el reforzamiento por envejecimiento es: Solución sólida sobresaturada  $\rightarrow$  Zonas de Guiner Preston  $\rightarrow$   $\eta'$  fase metaestable ( $\text{MgZn}_2$ )  $\rightarrow$   $\eta$  fase metaestable ( $\text{MgZn}_2$ ), siendo  $\eta'$  la principal fase de reforzamiento para este tipo de aleaciones.

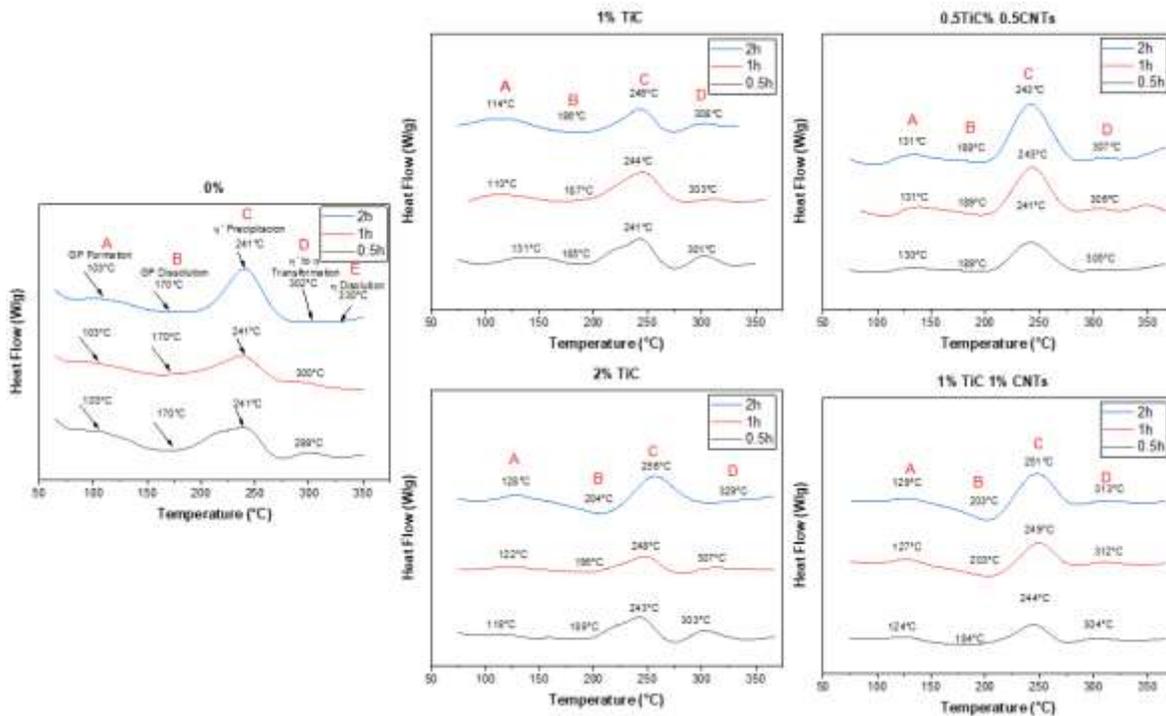


Figura 2. Termogramas DSC de 7075 puro (0%) y compuestos (1% TiC, 2% TiC, 0,5% TiC 0,5% CNT y 1% TiC 1% CNT preparados con polvos molidos a las 0,5, 1 y 2 h.

Se observa en los termogramas de aleación base 7075 (0%) cinco reacciones principales que ocurren cuando se aumenta la temperatura: formación de GP (A), disolución de GP (B), precipitación de  $\eta'$  (C),  $\eta$  Transformación de  $\eta'$  a  $\eta$  (D) y disolución de  $\eta$  (E). En la muestra molida a las 0,5 h, aparece un hombro en el pico "C", atribuido a una mezcla de reacciones de formación de fases metaestables  $\eta'$  y equilibrio  $\eta$ . La ampliación de este pico "C" a medida que aumenta la intensidad de la molienda se atribuye a la cantidad de energía de deformación almacenada en el material suministrado por la molienda de bolas de alta energía. Se sabe que el área bajo los picos es la entalpía de reacción relacionada con la fracción volumétrica de las fases precipitación o disolución, siendo observables cambios en los picos "A" y "C" en el 1% TiC, 2%TiC 0.5%TiC 0.5 %NTC y 1% TiC 1%NTC. El pico "A" en los compuestos redujo su intensidad debido a que la fracción de volumen de las zonas GP disminuye, mientras que el pico "B" se hizo más grande debido al aumento en la fracción de volumen de la precipitación  $\eta'$ . Se han reportado diferentes efectos en la cinética de precipitación para diferentes adiciones de elementos: la adición de Ag, Sn y NTC aceleran las tasas de cinética de precipitación, mientras que TiC tiene el efecto contrario, la retarda. En el termograma de adición de 1%TiC los picos "C" aparecen a diferente temperatura a medida que aumenta el tiempo de molienda, esto probablemente sucede porque con el aumento de la intensidad de molienda el TiC se encuentra más disperso en la matriz formando precipitados  $\eta'$  a mayor temperatura. Además, con 2%TiC, la formación de precipitados  $\eta'$  es a mayor temperatura en comparación con 1%TiC debido a la mayor cantidad de TiC. Por otro lado, en las mezclas 0.5%TiC 0.5% NTC y 1%TiC 1%NTC, se nota un ligero corrimiento a mayor temperatura en el pico "C" esto se debe a que el TiC tiene el aporte de retardar la reacción, mientras que la NTC tiene el efecto positivo, de acelerarlo.

### Endurecimiento por envejecimiento

Los ensayos de microdureza se realizaron en la aleación pura molida 1 h para obtener el pico de máxima dureza a las 20 h de envejecimiento artificial (Fig. 3, Aleación pura). Posteriormente, la aleación pura y los compósitos fueron envejecidos de 18 a 22 horas para determinar el tiempo para obtener con mayor exactitud la máxima dureza en cada sistema evaluado.

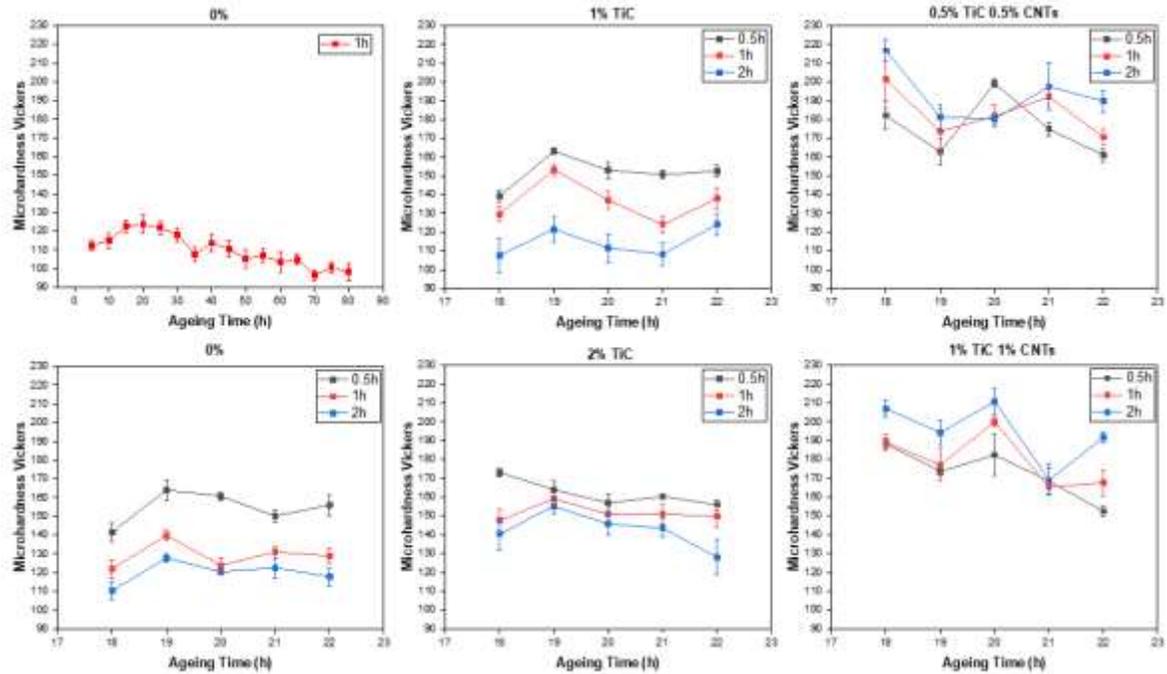


Figura 3. Resultados del ensayo de dureza para diferentes concentraciones de TiC y NTC

Al que el análisis comparativo mostrado en la Fig. 4, empleando análisis por elemento finito, en el sistema sin partículas de refuerzo (0%) el pico de valores más altos de microdureza se obtuvo a las 19 horas y muestras preparadas con polvos molidos a diferentes intensidades (0.5, 1 y 2 h). Por otro lado, se puede observar que a medida que aumenta el tiempo de molienda de los polvos, la dureza de las muestras es menor posiblemente causado por microporosidades en las muestras.

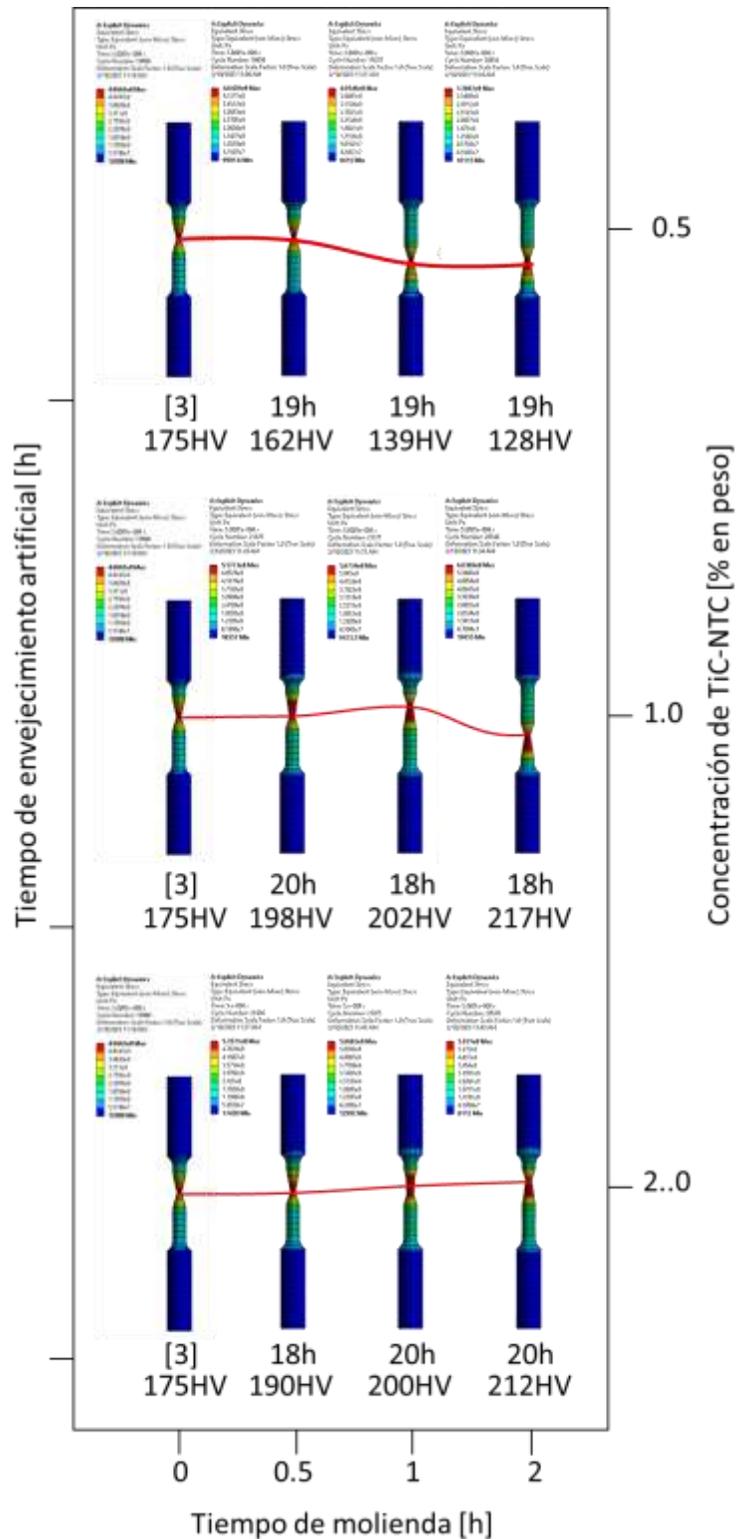


Figura 4. Análisis comparativo del comportamiento de dureza de los materiales reforzados 0.5, 1.0 y 2% en peso de TiC-NTC, en función del punto de fractura simulado mediante análisis de elemento finito.

El estudio de la cinética de precipitación en materiales compuestos híbridos de matriz de aluminio, muestran que los agentes reforzantes contribuyen al endurecimiento de la aleación, aun después de que la aleación es sometida a condiciones de sobreenvjecimiento. Estos resultados abren un nuevo paradigma en el uso de aleaciones de aluminio para aplicaciones a temperaturas trabajo superiores a la temperatura ambiente. Comúnmente las aleaciones de aluminio no son empleadas en operaciones de trabajo que superen la temperatura ambiente. Sin embargo, la adición de agentes reforzantes de diferente naturaleza, hace posible extender el intervalo en la temperatura de trabajo del aluminio y sus aleaciones

## Microestructura

El estudio microestructural se realizó en muestras sinterizadas en la condición de pico máximo de microdureza, la microestructura resultante de cada sistema se puede ver en la Fig. 5. Se observa en la aleación 7075 pura (0%) el aumento de la porosidad a medida que aumenta el tiempo de molienda esto se relaciona con una posible oxidación excesiva de los polvos que inhibe la difusión entre partículas resultando en un aumento de la porosidad y microporosidad. El mismo comportamiento se observa en los compósitos con 1% TiC y 2% TiC, a medida que aumenta el tiempo de molienda se incrementa la porosidad.

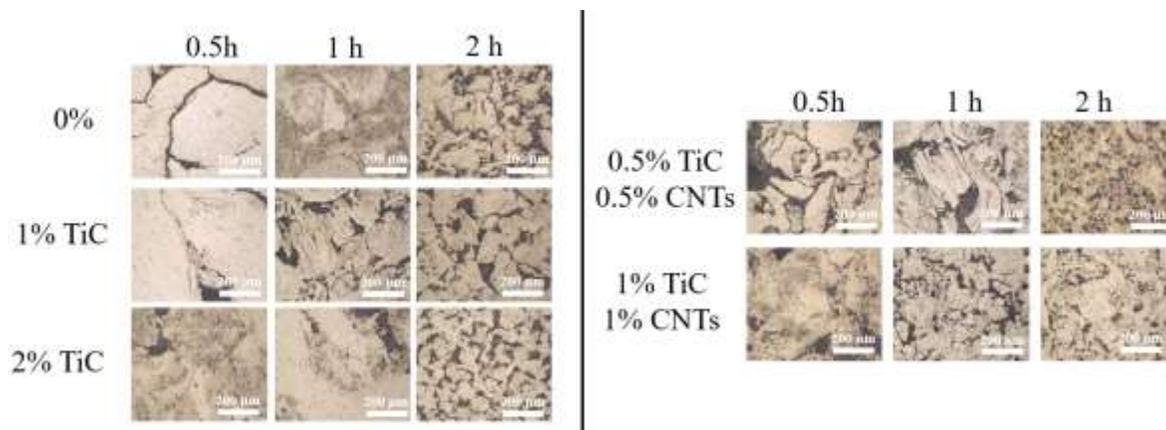


Figura 5. Resultados del análisis microestructural llevado a cabo mediante microscopía óptica, en compósitos de aluminio reforzados con TiC y NTC

## 4. Conclusiones

Como resultado de la investigación se llevó a cabo el estudio de la cinética de precipitación en materiales compuestos híbridos de matriz de aluminio empleando rutas no convencionales de metalurgia de polvos y aleado mecánico. En tal propósito se utilizaron como material reforzante nanotubos de carbono de pared múltiple y carburo de titanio. El resultado del desempeño mecánico de los materiales fue comparado con los datos obtenidos en investigaciones localizados en diversos repositorios y publicaciones en los cuales se aborda el uso de agentes reforzantes simples para el desarrollo de materiales compuestos. Es importante mencionar que en el desarrollo de los materiales de estudio se empleó aluminio obtenido de procesos de maquinado, lo que representa su reuso y reaprovechamiento en la posterior síntesis de nuevos materiales.

Se observó, que en los materiales compuestos sintetizados a partir de aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación se produjo un sobre envejecimiento que derivó en un detrimento en las propiedades mecánicas de los compósitos a partir de las 21 horas de tiempo de envejecimiento artificial. Para los tiempos de 18, 19 y 20 horas, se encontraron las condiciones óptimas en el comportamiento mecánico de compósitos reforzados con NTC y TiC. Este desempeño mecánico se presentó a diferentes tiempos de envejecimiento lo que indica la alteración en la cinética de precipitación debida a la presencia de obstáculos en la red cristalina y a los procesos previos de procesamiento. La desactivación del mecanismo de endurecimiento por precipitación se vio compensada por la presencia de agentes reforzantes que minimizaron la caída en los picos de dureza, lo que comprueba la hipótesis planteada al inicio de la propuesta.

En relación a las predicciones establecidas en el comienzo de la investigación se observó que para la aleación de aluminio sin reforzamiento y sometida a procesos de endurecimiento por precipitación se produjo un deterioro en sus propiedades mecánicas en función de su exposición a diferentes temperaturas de envejecimiento artificial. Sin embargo, la adición de agentes reforzantes en la aleación para la síntesis de compósitos híbridos de matriz de aluminio sintetizado por los métodos anteriores, mostró que hay variación en las propiedades mecánicas del material resultante a lo largo de tiempos crecientes de exposición a la temperatura de envejecimiento. Esta variación en el comportamiento mecánico de los materiales compuestos se puede observar con altibajos en los picos de dureza en función del tiempo de envejecimiento. Este comportamiento deriva una el cumplimiento parcial de la segunda predicción establecida al principio de la investigación y a partir de la cual se abre una oportunidad de investigación para estudiar el efecto de los parámetros de sobre-envejecimiento en materiales compuestos híbridos de matriz de aluminio.

## Agradecimientos

El responsable técnico, Investigador por México (Cátedras CONACYT, Proyecto 850), agradece CONACYT por el apoyo para llevar a cabo el desarrollo del Proyecto número 321019 denominado “CINÉTICA DE PRECIPITACIÓN EN MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ DE ALUMINIO”.

Adicionalmente, y gracias al apoyo otorgado por el fondo, se sometieron a publicación dos documentos de carácter científico. El primero está relacionado con la cinética de precipitación de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con un único agente reforzante. El segundo contempla el estudio de la cinética de precipitación en materiales híbridos de matriz de aluminio considerando dos agentes reforzantes.

## Referencias

1. Dipaola, C., *Design, fabrication, and control of an autonomous sorting system for non-ferrous metal recycling*. 2019, The State University of New Jersey: Repository The State University of New Jersey.
2. Muñiz Lerma, J.A., *Recycling of Aerospace Aluminum Components into New Valuable Products*. 2016, McGill University, Montreal, QC: Repository University of Montreal, CA.

3. Srivastava, A. and A. Meshram, *On trending technologies of aluminium dross recycling: A review*. Process Safety and Environmental Protection, 2023. **171**: p. 38-54.
4. Baghbanaghaie, N., *Characterisation and modeling of precipitation kinetics and yield strength in variously treated 7000-series aluminum alloys*. 2021, University of Waterloo: Repository University of Waterloo.
5. Reyes Ruiz, C.A., *Estudio microestructural y mecánico de una aleación de aluminio 6061-t6 sometida a un proceso de extrusión angular en canal de sección constante (ECAP)* 2016, Universidad Nacional Autónoma de México: Repositorio UNAM.
6. Islas Mascareñas, J.A., *Estudio de la aleación de aluminio reforzada con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz* 2013, Universidad Autónoma de Nuevo León: Repositorio UANL.
7. Lal, S., R. Sehrawat, and N. Sharma, *A short review on the developments of aluminium matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 2023.
8. Singh, H., et al., *A comprehensive review of dry sliding wear on aluminum matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 2022. **58**: p. 886-894.
9. Ashrafi, N., et al., *Microstructural, thermal, electrical, and magnetic properties of optimized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-SiC hybrid nano filler reinforced aluminium matrix composite*. Materials Chemistry and Physics, 2021. **258**: p. 123895.
10. Guo, Y., et al., *Effect of copper coating on interfacial properties, interfacial thermal resistance, microstructure evolution and mechanical properties of aluminum matrix composites*. Journal of Alloys and Compounds, 2022. **917**: p. 165376.
11. Fallahi, H., O. Kaynan, and A. Asadi, *Insights into the effect of fiber-matrix interphase physiochemical- mechanical properties on delamination resistance and fracture toughness of hybrid composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023. **166**: p. 107390.
12. Vijayalakshmi, K. and G. Bhanodaya Reddy, *Experimental study on mechanical properties of Al5083/ZrO<sub>2</sub>/B4C hybrid aluminum metal matrix composites*. Materials Today: Proceedings, 2023.
13. Xi, L., et al., *Microstructure formation and mechanical performance of micro-nanoscale ceramic reinforced aluminum matrix composites manufactured by laser powder bed fusion*. Journal of Alloys and Compounds, 2023. **939**: p. 168803.
14. Sun, K., et al., *Preparation and quasi-static compression properties of hybrid aluminum matrix syntactic foam reinforced with glass cenospheres and silicon carbide nanowires*. Materials Characterization, 2023. **195**: p. 112496.
15. Lin, Z., et al., *Configuration effect and mechanical behavior of particle reinforced aluminum matrix composites*. Scripta Materialia, 2023. **224**: p. 115135.
16. Olhan, S., V. Khatkar, and B.K. Behera, *Novel high-performance textile fibre-reinforced aluminum matrix structural composites fabricated by FSP*. Materials Science and Engineering: B, 2023. **289**: p. 116265.
17. Wang, X., et al., *Synergistic enhancing effect of tungsten-copper coated graphite flakes and aluminum nitride nanoparticles on microstructure, mechanical and thermal properties of copper matrix composites*. Materials Science and Engineering: A, 2022. **857**: p. 143987.
18. Dhulipalla, A., et al., *Synthesis and machining characteristics of novel TiC ceramic and MoS<sub>2</sub> soft particulate reinforced aluminium alloy 7075 matrix composites*. Manufacturing Letters, 2020. **24**: p. 82-86.
19. Nyanor, P., et al., *Improved ductility of spark plasma sintered aluminium-carbon nanotube composite through the addition of titanium carbide microparticles*. Materials Science and Engineering: A, 2020. **795**: p. 139959.

20. Hua, A., et al., *Fabrication, microstructure characterization and mechanical properties of B<sub>4</sub>C microparticles and SiC nanowires hybrid reinforced aluminum matrix composites*. *Materials Characterization*, 2022. **193**: p. 112243.
21. Tan, Z., J. Li, and Z. Zhang, *Experimental and numerical studies on fabrication of nanoparticle reinforced aluminum matrix composites by friction stir additive manufacturing*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021. **12**: p. 1898-1912.
22. Bahloul, A., A.B. Ahmed, and C. Bouraoui, *Probabilistic fatigue crack growth assessment of Al 7075-T6 aerospace component*. *Procedia Structural Integrity*, 2017. **5**: p. 430-437.
23. Lee, S.-k., et al., *Fracture simulation of cold roll forming process for aluminum 7075-T6 automotive bumper beam using GISSMO damage model*. *Procedia Manufacturing*, 2018. **15**: p. 751-758.
24. Jian, W., et al., *Anticorrosion and antibiofouling performance of in-situ prepared layered double hydroxide coating modified by sodium pyrithione on aluminum alloy 7075*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2022. **113**: p. 419-430.
25. Mobasherpour, I., A.A. Tofigh, and M. Ebrahimi, *Effect of nano-size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying*. *Materials Chemistry and Physics*, 2013. **138**(2): p. 535-541.
26. Prashanth, M., et al., *An exploration on microstructural observation and mechanical behavior of nanocrystallite Al 7017 alloy via mechanical alloying and uniaxial hot pressing*. *Materials Characterization*, 2021. **171**: p. 110803.
27. Novák, P., et al., *Aluminum alloys with natural ratio of alloying elements manufactured by powder metallurgy*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023. **931**: p. 167440.
28. Khanna, V., et al., *Fabrication of efficient aluminium/graphene nanosheets (Al-GNP) composite by powder metallurgy for strength applications*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023. **22**: p. 3402-3412.
29. Ojeda Ramirez, B., *Endurecimiento por precipitación en aleaciones de aluminio*. 2016, Universidad Nacional Autónoma de México: Repositorio UNAM.
30. Robles Martínez, D.P., *Estudio cinético de la precipitación de fases en aleaciones Al-4%Cu-0.3%Mg-X (X=0.5 y 2.0 %Ag)*. 2016, Instituto Politécnico Nacional: Repositorio IPN.
31. Assadiki, A., *Modelling precipitation hardening in an A356+0.5Cu cast aluminum alloy*. 2020, Université PSL (Paris Sciences & Lettres): Repository Université PSL (Paris Sciences & Lettres).
32. Bahrami, A., *Modeling of Precipitation Sequence and Ageing Kinetics in Al-Mg-Si Alloys*. 2010, Sharif University of Technology, Tehran, Iran: Repository Sharif University of Technology.
33. Balaji, M., et al., *Studies on wear behavior of hybrid aluminum alloy (7075) reinforced with B<sub>4</sub>C and BN*. *Materials Today: Proceedings*, 2023. **72**: p. 2581-2585.
34. Liu, S., et al., *Tribological properties of cold-sprayed 7075Al coatings reinforced with hybrid nano-TiB<sub>2</sub>/micro-SiC particles*. *Surface and Coatings Technology*, 2023: p. 129323.
35. Harish, R.S., M. Sreenivasa Reddy, and J. Kumaraswamy, *Mechanical behaviour of Al7075 alloy Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/E-Glass hybrid composites for automobile applications*. *Materials Today: Proceedings*, 2023. **72**: p. 2186-2192.
36. Gangadhar, T.G., D.R. Shankara, and B.C. Adarsh, *Wear and heat treatment studies on Al7075 alloy hybrid composites*. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
37. Moona, G., et al. *Microstructure and Wear Study of Al 7075-T6/Eggshell/SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Hybrid Composites*. in *Recent Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Singapore: Springer Singapore.

38. Subramaniam, B., et al., *Investigation on mechanical properties of aluminium 7075 - boron carbide - coconut shell fly ash reinforced hybrid metal matrix composites*. China Foundry, 2018. **15**(6): p. 449-456.
39. Sivasankaran, S., et al., *Effect of TiB<sub>2</sub>/Gr Hybrid Reinforcements in Al 7075 Matrix on Sliding Wear Behavior Analyzed by Response Surface Methodology*. Metals and Materials International, 2021. **27**(6): p. 1739-1755.
40. SuryaKumari, T.S.A. and S. Ranganathan. *Investigation of Process Parameters on Sliding Wear Behaviour of Aluminium 7075 Hybrid Nanocomposite Analyzed Using Response Surface Methodology-Part I*. in *Advances in Materials and Manufacturing Engineering*. 2021. Singapore: Springer Singapore.
41. Sha, W., *Evaluation of aging precipitation kinetics and potential in aluminum alloys using indiscriminately integrated peak areas in calorimetry curves*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004. **35**(9): p. 3012-3015.
42. Quainoo, G.K. and S. Yannacopoulos, *The effect of cold work on the precipitation kinetics of AA6111 aluminum*. Journal of Materials Science, 2004. **39**(21): p. 6495-6502.