

Microdureza de compuestos de matriz de aluminio reforzados con grafeno

Dionathan A. Campanelli, Cristian P. Meinhardt, Jacson W. Menezes, Chiara Valsecchi, Luis E. G. Armas

Universidade Federal do Pampa-Campus Alegrete, Av.Tirajú 810, Bairro Ibirapuitã, Alegrete-RS, Brazil

Recibido el 14 de junio del 2025, Aceptado el 21 de junio del 2025. Publicado el 2 de julio del 2025

<https://doi.org/10.33017/RevECIPeru2025.0003/>

Resumen

Los estudios enfocados en el desarrollo de compuestos de matriz metálica reforzados con materiales 2D han sido el foco de diversas investigaciones a nivel mundial. Materiales como el grafeno se presentan como un refuerzo alternativo para mejorar las propiedades mecánicas de los metales. El grafeno tiene aplicaciones en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería, debido a sus propiedades como: alta conductividad térmica y eléctrica, alta resistencia mecánica, flexibilidad y transparencia. Actualmente, el aprovechamiento de residuos de procesos mecánicos se ha vuelto cada vez más necesario; en vista de esto, el presente trabajo busca utilizar residuos de aluminio para producir compuestos de matriz de aluminio reforzados con grafeno. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia del grafeno en la microdureza de compuestos de matriz de aluminio mezclado con grafeno (Al-Graf). Para esta finalidad, los compuestos de Al-Graf fueron reforzados con 0,2% y 0,7% de grafeno en peso de Al. Para ello, se produjeron residuos de aluminio, mediante un proceso de reducción mecanizado, los cuales se mezclaron con grafeno y se prensaron para su posterior fusión. Resultados de este trabajo mostraron un aumento en la microdureza a medida que aumenta el porcentaje de grafeno. Este aumento fue mayor para 0.7% de grafeno, llegando a ~ 11%, con respecto a la matriz de aluminio puro. Este trabajo muestra que, la utilización de residuos de aluminio en la producción de compuestos de matriz de aluminio con grafeno ofrece diversos beneficios, como reducción de costos, disminución de impacto ambiental, mejora de las propiedades mecánicas y del funcionamiento del material resultante.

Descriptor: *Compuestos de matriz de aluminio, grafeno, microdureza*

Abstract

Studies focused on the development of metal matrix composites reinforced with 2D materials have been the focus of various research projects worldwide. Materials such as graphene are presented as an alternative reinforcement to improve the mechanical properties of metals. Graphene has applications in diverse areas of science and engineering due to its properties such as high thermal and electrical conductivity, high mechanical strength, flexibility, and transparency. Currently, the utilization of waste from mechanical processes has become increasingly necessary; in view of this, the present work seeks to use aluminum waste to produce graphene-reinforced aluminum matrix composites. Therefore, the main objective of this work is to study the influence of graphene on the microhardness of aluminum matrix composites mixed with graphene (Al-Graf). For this purpose, Al-Graf composites were reinforced with 0.2% and 0.7% graphene by weight of Al. To this end, aluminum waste was produced through a mechanized reduction process, mixed with graphene, and pressed for subsequent fusion. The results of this work showed an increase in microhardness as the percentage of graphene increased. This increase was greatest for 0.7% graphene, reaching ~11%, relative to the pure aluminum matrix. This work demonstrates that utilizing aluminum waste in the production of graphene-aluminum matrix composites offers several benefits, such as cost reduction, decreased environmental impact, and improved mechanical properties and performance of the resulting material.

Keywords: *Aluminum matrix composites, graphene, microhardness*

1. Introducción

El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono, aislada por Geim y Novoselov en 2004 mediante el método de clivaje micromecánica. Sus excelentes propiedades, como la resistencia mecánica, la alta conductividad térmica y eléctrica, y la gran área superficial, lo hacen ideal para el desarrollo de compuestos de matriz de aluminio con un rendimiento superior, cuando comparado con otros materiales. Si bien una capa de grafeno es el material más delgado conocido, también es la más resistente. Es hasta 300 veces más resistente que el acero, tiene una estructura más dura que el diamante y es un mejor conductor térmico que el cobre [1, 2].

Actualmente, se necesitan nuevas tecnologías de materiales compuestos y nuevas técnicas de fabricación. No solo por razones económicas, sino también ambientales, ya que es necesario reducir y controlar las emisiones de gases. Nuevas aleaciones o compuestos surgen como una solución para reducir el peso en equipos/máquinas que utilizan combustibles fósiles como combustible principal. Por esta razón, la incorporación de grafeno como material de refuerzo ha demostrado recientemente ser prometedora para mejorar aún más las propiedades del aluminio (Al).

El Al posee características que lo distinguen de otros metales, como su alta resistencia a la corrosión, baja densidad, buena conductividad térmica y eléctrica, y buena estabilidad. Hasta la fecha, numerosos estudios indican una influencia positiva del grafeno en las propiedades mecánicas de los compuestos de matriz metálica/grafeno [3,4]. Sin embargo, el rendimiento de estos nuevos materiales depende fundamentalmente del método de fabricación, ya que la dispersión homogénea del grafeno en la matriz metálica y la calidad de la interfaz Al-Carbono son factores determinantes en las propiedades mecánicas finales del compuesto [13]. Entre las principales técnicas de producción destacan la pulvimetalurgia, la mezcla de molienda de alta energía, los procesos de fundición y las técnicas basadas en deposición [14,15].

Yolshina et al. (2016) informaron de un aumento del 50 % en la resistencia a la tracción del aluminio puro al añadir un 2 % en peso de partículas de grafeno. Gao et al. (2016) reportaron un aumento del 30 % en la resistencia a la tracción al añadir un 0,3 % en peso de óxido de grafeno. Shin et al. (2015) observaron un aumento del 71,7 % en el límite elástico utilizando un 0,7 % de grafeno de pocas

capas. Estos trabajos demuestran que el grafeno influye en las propiedades mecánicas del aluminio. De hecho, se ha explorado la aplicación del grafeno como refuerzo en compuestos de matriz de aluminio (CMA). Sin embargo, uno de los principales problemas que limitan su aplicación en CMA es la baja humectabilidad entre el grafeno y el aluminio [3, 5, 6]. Otro problema que puede presentarse es la deficiente dispersión del grafeno en la matriz; la dispersión del grafeno ha demostrado ser mucho más difícil que la de otros refuerzos [3]. Diversos estudios utilizan técnicas, como la colada agitada, el fresado mecánico o métodos especiales, para dispersar el grafeno de forma homogénea en la matriz [3, 4, 7]. Por lo tanto, se puede concluir que la producción de CMA reforzados con grafeno representa un reto a ser superado.

Por lo tanto, el objetivo principal de la presente investigación fue fabricar un compuesto de matriz de aluminio utilizando residuos de aluminio y grafeno. Se utilizó el proceso de fundición para producir CMA con 0,2 % y 0,7 % de grafeno en peso, y posteriormente se midió su microdureza para compararla con la del aluminio puro.

2. Metodología

2.1 Producción de residuos de Al e pastillas de Al+ grafeno

Para producir los residuos de Al, fue necesario torneear una barra de Al con un diámetro de 19,05 mm con una pureza del 97,66%. Primeramente, la barra fue cortada en pedazos de ~ 150 mm para producir los residuos. Posteriormente, los pedazos fueron torneados, dando origen a pequeños residuos, los cuales fueron molidos (en una licuadora) para reducir su tamaño y facilitar su mezcla con grafeno industrial, el cual fue donado por la empresa Graphene Amazonas. En la figura 1 (a) se muestra imágenes de pedazos de la barra de Al y en (b) los residuos de Al (b) después de pasar por la licuadora.

Posteriormente, los residuos, mostrados en la Fig. 1(b), fueron colocados en un mortero junto con el grafeno, para ser mezclados. Se coloca 10 % en peso de residuos de Al junto con el porcentaje de grafeno en peso (0.2 % o 0.7 %), con respecto al peso de Al. Los materiales se maceran durante 30 minutos para lograr una buena mezcla. En la Figura 2(a)-(b), se muestra el grafeno comercial y el mortero utilizado para mezclar el Al + grafeno. La mezcla, con los 0.2 o 0.7% de grafeno, se coloca

dentro de un molde de acero, de forma cilíndrica, con un diámetro interno de 20 mm y una altura de 50 mm. En seguida, mediante el uso de un pedazo sólido de acero, se somete a un proceso de prensado usando una carga de ~ 5 toneladas durante 5 min. Como resultado de este proceso de prensado se producen las pastillas de Al+grafeno, las cuales son mostradas en la Fig. 2(d). Para fines de repetibilidad de resultados, fueron preparadas 6 pastillas con 0.2% y 6 con 0.7% de grafeno en peso de Al.

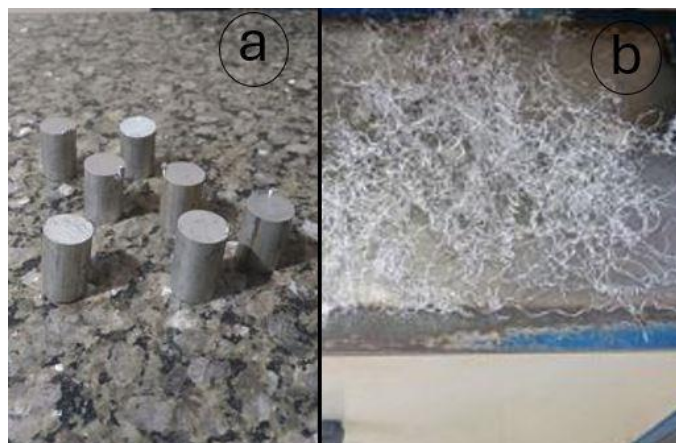


Figura 1: (a) Imagen de la barra de aluminio; (b) residuos de Al.

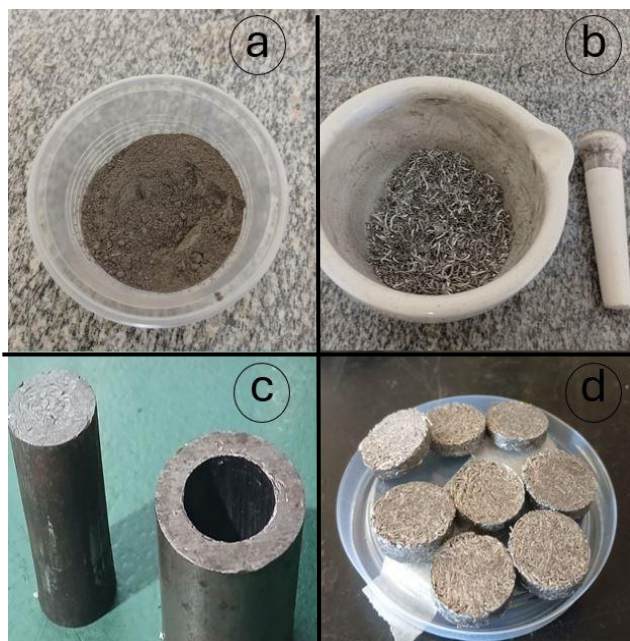


Figura 2: (a) Imagen de grafeno comercial; (b) mortero de cerámica; (c) molde y pasador sólido (d) compuesto Al- Graf.

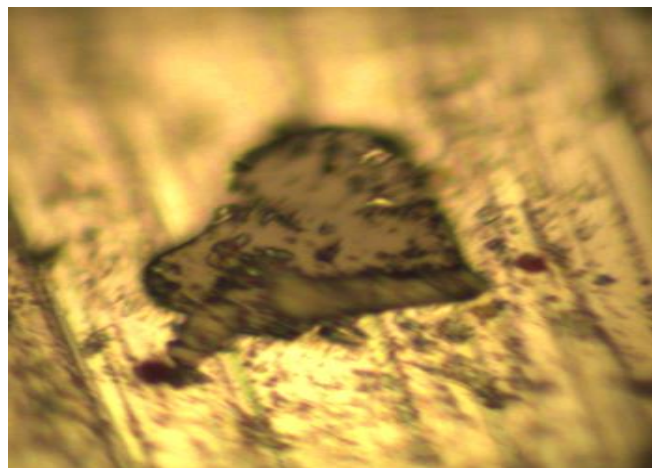


Figura 3: Imagen óptica del grafeno adherido al residuo de aluminio después de ser mezclados.

En la Figura 3, se observa una imagen óptica de una muestra de grafeno unida al residuo de aluminio (Al+grafeno), luego de la mezcla, lo que demuestra que hubo una buena mezcla entre los materiales.

2.2 Producción de la matriz aluminio-grafeno (Al-Graf)

Para la producción de la matriz de Al-Graf, primeramente, fue fundido 35 mm de la barra de Al puro, dentro de un crisol, a una temperatura de 800 °C durante un tiempo de 40 min, en un horno mufla. Después de pasados los 40 min, se retira del horno, el crisol con el Al fundido (Al-fun) y se coloca dentro las pastillas de Al+grafeno, y rápidamente se procede a mezclarlos. Esta mezcla se coloca nuevamente dentro del horno a una temperatura y tiempo de 800 °C y 40 min. Pasados los 40 min, esta mezcla se vierte dentro de un molde de acero, de formato cilíndrico, (mostrado en la Fig. 4(a), para que tomen forma. Tras enfriarse, el compuesto de Al-Graf se extrae del molde para realizar las pruebas de microdureza. Es compuesto es mostrado en la Fig. 4 (b).

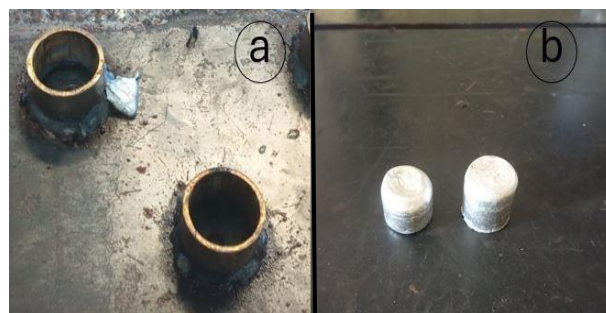


Figura 4: Imagen del molde (a) y del compuesto A-Graf (b).

3. Resultados

A continuación, se presentarán los resultados de espectroscopia Raman y de microdureza de los compuestos Al-Graf con 0,2% y 0,7% de grafeno.

3.1. Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman es un método esencial para la caracterización y análisis de compuestos, ya que puede evaluar la calidad del grafeno, ayudar en el estudio de la dispersión en el compuesto, ayudar en el análisis de tensiones e interacciones en la interfaz aluminio-grafeno y el efecto del procesamiento [10, 16]. En este caso, se utilizó la espectroscopia Raman para demostrar que los compuestos de Al-Graf producidos contienen grafeno. En la Figura 5, se muestra una imagen óptica de dos regiones diferentes del compuesto Al-Graf, donde es posible observar la presencia del grafeno, el cual es verificado con su correspondiente espectro Raman (flechas rojas).

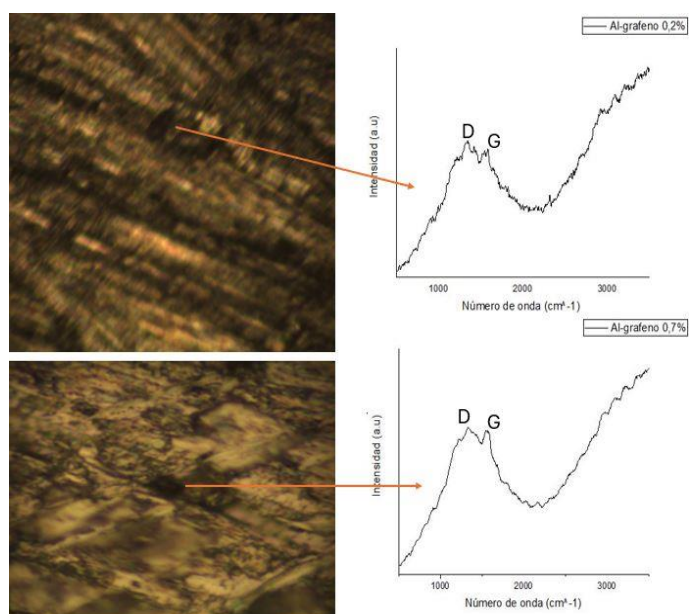


Figura 5: Imagen óptica del grafeno contenido en los compuestos de Al-Graf con su espectro Raman.

En la Figura 5 se observan las bandas D ($\sim 1367 \text{ cm}^{-1}$) y G ($\sim 1614 \text{ cm}^{-1}$) presentes en ambos espectros. La banda D se refiere al desorden y a los defectos, mientras que la banda G es la banda característica del grafito, y se refiere a la ligación carbono-carbono en hibridación sp^2 [10]. En general, la relación de intensidades entre las bandas D y G (I_D/I_G) se utiliza para indicar el grado de defectos en las capas de grafeno [11].

3.2. Microdureza

En la Figura 6 se muestra la comparación de los resultados de microdureza (HV) de las muestras de Al-Graf con 0,2 % y con 0,7 % de grafeno en peso. Para obtener los valores de microdureza, se realizaron 15 mediciones en diferentes puntos de las muestras, con el fin de obtener una mayor precisión en los resultados. Con los valores obtenidos, se calculó el valor medio con su desviación estándar, con la finalidad de construir el gráfico de barras, tal como mostrado en la Fig. 6. Donde se puede observar que la microdureza aumenta a medida que aumenta la proporción del grafeno.

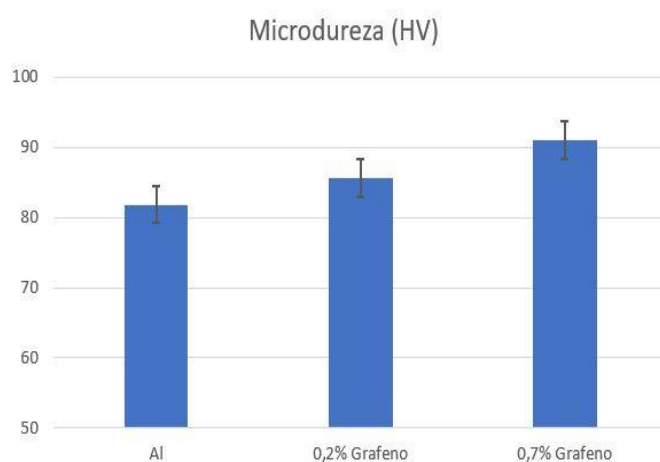


Figura 6: Comparación de la microdureza de los compuestos de Al-Graf y Al puro.

En la Tabla 1 se muestran los valores de microdureza (HV) y el incremento porcentual, en relación a las muestras de aluminio puro.

Con los resultados de microdureza, se observó que incluso al tomar medidas en diferentes puntos de la muestra, no hubo discrepancias en los resultados, haciendo que la desviación estándar sea baja.

Los resultados presentados en la Figura 6 y la Tabla 1 muestran un aumento en la microdureza de los compuestos de Al-Graf con 0,2% y 0,7% de grafeno, en comparación con el aluminio sin adición de grafeno. El compuesto de Al-Graf con 0,7% de grafeno destaca por presentar un aumento en la microdureza del 11% en comparación con el Al sin grafeno. La muestra con 0,2% tuvo un aumento del +5%, pero teniendo en cuenta lo reportado en algunos estudios, donde se considera que para compuestos con un aumento inferior al 10%, los resultados no tienen mucha relevancia práctica, este resultado es insignificante. Los resultados podrían no haber sido mejores debido a la baja

dispersión o aglomeración, ya que el grafeno no es un material con alta mojabilidad.

Tabla 1: Comparación de valores de microdureza (HV).

Muestra	Promedio (HV)	%Microdureza
<i>Al</i>	$\sim 82 \pm 3$	-
<i>O,2% grafeno</i>	$\sim 86 \pm 4$	+5
<i>O,7% grafeno</i>	$\sim 91 \pm 4$	+11

El aumento de la microdureza puede deberse a que el grafeno actúa como un refinador de la microestructura granular en matrices metálicas, debido a su naturaleza bidimensional (2D) que promueve la nucleación de granos heterogéneos durante la solidificación debido al gradiente de propiedades termofísicas en la interfaz grafeno-metal, el grafeno también puede funcionar como un amortiguador de los movimientos de dislocación a través del llenado eficiente de poros y defectos en la estructura metálica [11].

4. Conclusiones

Los resultados presentados muestran un aumento de la microdureza debido a la adición de grafeno al compuesto. Además de este aumento, la espectroscopia Raman también demuestra la presencia de grafeno en el compuesto con un 0,2 % y 0,7 % de grafeno.

Dado que el grafeno aumenta la microdureza del compuesto, es necesario realizar más investigaciones utilizando diferentes porcentajes de grafeno, junto con residuos, para observar su comportamiento. Además, se deben realizar otros tipos de ensayos mecánicos (tracción, compresión, impacto, etc.) para observar su comportamiento.

Agradecimientos

Quisiera agradecer ante todo a Dios por el conocimiento, la salud y la sabiduría que hicieron posible este trabajo. A mi asesor, el Prof. Dr. Luis Enrique Gómez Armas, por creer en mí y en mi trabajo. A la Universidad Federal de Pampa – Unipampa por proporcionar el equipo para realizar este trabajo.

Referencias

- [1] S, enel MC, Gürbüz M, Koc, E. Engineer & the Machinery Magazine 2015.
- [2] Neto AC, Guiné F, Peres NM, Novoselov KS, Geim AK. Rev Mod Phys 2009;81:109.
- [3] SF Bartolucci, J. Paras, MA Rafiee, J. Rafiee, S. Lee, D. Kapoor, N. Koratkar, Mater. Ciência. Eng., A 528, 7933 (2011)
- [4] M. Rashad, F. Pan, A. Tang, M. Asif, M. Aamir, J. Alloy. Comp. 603, 111 (2014)
- [5] R. Perez-Bustamante, D. Bolanos-Morales, J. Bonilla-Maetinez, I. Estrada-Guel, J. Alloy. Comp. 615, S578 (2014)
- [6] CH Jeon, YH Jeong, JJ Seo, HN Tien, ST Hong, YJ Yum, SH Hur, KJ Lee, Int. J. Preciso. Eng. Fabrico. 15, 1235 (2014)
- [7] B. Lee, MY Koo, SH Jin, KT Kim, SH Hong, Carbon NY 78, 212 (2014)
- [8] L.A. Yolshina, R.V. Muradymov, I.V. Korsun, G.A. Yakovlev, S.V. Smirnov, Novel, J. Alloy. Compd. 663 (2016) 449–459.
- [9] X. Gao, H. Yue, E. Guo, H. Zhang, X. Lin, L. Yao, B. Wang, Mater. Des. 94 (2016) 54–60.
- [10] Haak, M. S., Caracterização de grafeno obtido por diferentes métodos utilizando espectroscopia Raman. Dissertação de Mestrado -Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, Porto Alegre, 2017.
- [11] Perumbilavil, S., Sankar, P., Priya Rose, T., & Philip, R. (2015), Applied Physics Letters, 107(5).
- [12] S.E. Shin, H.J. Choi, J.H. Shin, D.H. Bae, Carbon 82 (2015) 143–151.
- [13] Geng, L., & Wu. K(2017), Composite Materials Engineering, Volume 2, 305-487.
- [14] Chawla, K. K. (2012), Composite Materials, 197-248.
- [15] Pramanik, S., Cherusseri, J., Baban, N. S., Sowtharya, L., & Kar, K. K. (2016), Composite Materials, 369-411.
- [16] Ferrari, A. C. (2007), Solid State Communications, 143(1-2), 47-57.