Universidad Tecnológica Nacional
SEPTIEMBRE - DICIEMBRE 2026 / Año 24 - Nº 57

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933
licencia de Creative Commons - Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional

Fabricación y caracterización de espumas metálicas de aleación de Al-Cu reciclado mediante pulvimetalurgia, utilizando $NaHCO_3$ como agente espumante

Fabrication and characterization of recycled Al-Cu alloy metal foams by powder metallurgy using $NaHCO_3$ as a foaming agent

Presentado: 17/05/2026

Aprobado: 07/09/2026

Publicado: 09/10/2026

Ofelia J.S. Canteros
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, Argentina.
jessicanteros@ca.frre.utn.edu.ar

Leonardo G. Barabas
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, Argentina.
leonardogbarabas@hotmail.com

José M. Espasandin
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, Argentina.
josemanuelespasandin@gmail.com

Franco J.P. Teruel
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, Argentina.
franteruel01@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se evaluó la factibilidad de obtención de espumas metálicas de aleación aluminio-cobre a partir de materiales reciclados, empleando bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) como agente espumante alternativo mediante la técnica de pulvimetalurgia. Se utilizaron polvos de aluminio y cobre obtenidos por mecanizado mecánico y molienda, con

NOTA EDITORIAL: Este artículo cuenta con una fe de erratas publicada el 11/11/2026 en el N.º 57, disponible en: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.71.2026

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

partículas finales del orden de los 150 µm a 500 µm. Los polvos se mezclaron, se prensaron en frío y se introdujeron en un horno a 900 °C durante un corto tiempo. Las muestras obtenidas fueron caracterizadas mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y determinación de densidad relativa. Los resultados evidenciaron la formación de estructuras porosas con distribución heterogénea de poros, densidades relativas entre 0,29 y 0,31 y presencia de fisuras, observándose una mejora en la homogeneidad estructural en muestras fabricadas con polvos sometidos a molienda mecánica. Resultando el $NaHCO_3$ una alternativa técnica y económicamente viable.

Palabras claves: espumas metálicas, aluminio (Al), cobre (Cu), bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), pulvimetalurgia.

Abstract:

This study evaluated the feasibility of obtaining aluminum-copper alloy metal foams from recycled materials, using sodium bicarbonate ($NaHCO_3$) as an alternative foaming agent via powder metallurgy. Aluminum and copper powders obtained by mechanical machining and milling were used, with final particle sizes ranging from 150 µm to 500 µm. The powders were mixed, cold-pressed, and placed in an oven at 900 °C for a short time. The resulting samples were characterized by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and relative density determination. The results showed the formation of porous structures with a heterogeneous pore distribution, relative densities between 0.29 and 0.31, and the presence of cracks. An improvement in structural homogeneity was observed in samples made with powders subjected to mechanical milling. $NaHCO_3$ is thus a technically and economically viable alternative.

Keywords: metallic foams, aluminum (Al), copper (Cu), sodium bicarbonate ($NaHCO_3$), and powder metallurgy.

1. Introducción

Las espumas metálicas constituyen materiales celulares porosos de creciente interés tecnológico debido a sus propiedades físicas y mecánicas, principalmente debido a su baja densidad y elevada relación rigidez-peso. Sus mayores aplicaciones se dan en la absorción de energía de impacto en el sector automotriz, intercambiadores de calor, filtros, paneles sándwich en la construcción, entre otros (Fernández et al., 2009). Para su obtención el material base empleado es el aluminio, el metal más empleado en la industria después del acero. En este contexto, la reutilización de residuos metálicos y el empleo de materiales reciclados representan una alternativa de interés para disminuir costos de producción y favorecer estrategias de economía circular.

Durante el proceso de obtención de las espumas metálicas, empleando aluminio puro o aleación de aluminio y cobre como en este caso, se requiere la incorporación de un agente espumante responsable de la generación de gases durante el espumado. Al utilizar la técnica de pulvimetalurgia, este agente espumante debe ser un polvo, siendo el más empleado el hidruro de titanio (TiH_2). Sin embargo, el TiH_2 presenta desventajas asociadas a su elevado costo y a la necesidad de tratamientos térmicos previos para modificar su comportamiento de descomposición (Gergely et al., 2003).

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

Debido a estas limitaciones, diversos trabajos propusieron el empleo de agentes espumantes alternativos de menor costo y mayor disponibilidad comercial, entre ellos el carbonato de calcio ($CaCO_3$) y el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Particularmente, el empleo de $CaCO_3$ en espumas metálicas presenta antecedentes que demuestran su efectividad como agente espumante. Byakova et al. (2017) y Bryant et al. (2008) evidenciaron que el $CaCO_3$ favorece la formación de estructuras celulares al entrar en contacto con el aluminio en estado líquido. Asimismo, estudios previos desarrollados por el grupo de investigación permitieron obtener muestras de espumas metálicas utilizando este agente espumante (Espasandin et al., 2022).

Por otra parte, el bicarbonato de sodio presenta una descomposición térmica asociada a la liberación de dióxido de carbono y vapor de agua, según la reacción:

$$2NaHCO_3(s) \rightarrow Na_2CO_3(s) + CO_2(g) + H_2O(g) \quad (1)$$

Sin embargo, existen escasos antecedentes relacionados con la fabricación de espumas metálicas Al-Cu recicladas mediante pulvimetalurgia utilizando bicarbonato de sodio como agente espumante, principalmente en relación con la influencia del tamaño de partícula, la compactación y el procesamiento mecánico sobre la estabilidad estructural y la morfología celular obtenida.

En este contexto, el presente trabajo evalúa la obtención de espumas metálicas Al-Cu recicladas mediante pulvimetalurgia utilizando $NaHCO_3$ como agente espumante alternativo, analizando la influencia del procesamiento de los polvos y de las condiciones de espumado sobre la estructura celular y los defectos internos obtenidos.

Como objetivos específicos se plantearon:

- Presentar el método de fabricación de espumas metálicas mediante la técnica de pulvimetalurgia, utilizando polvos obtenidos de una aleación reciclada Al-Cu como metal base y bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) como agente espumante.
- Analizar la influencia del procesamiento mecánico de los polvos sobre la estructura celular obtenida.
- Caracterizar meso y microestructuralmente las espumas metálicas fabricadas.
- Evaluar la presencia de defectos externos e internos y la distribución de poros en las muestras obtenidas.

2. Desarrollo experimental

2.1. Polvos empleados

Los polvos empleados como base se obtuvieron a partir de aluminio y cobre reciclado de cables conductores de alta pureza. Los elementos se introdujeron en un crisol de hierro (Fe), en una relación en peso de 93% de Al y 7% de Cu. Se llevó la mezcla dentro del horno a una temperatura de 700 °C y se mantuvo por 24 h a temperatura constante. Al emplear una aleación de aluminio-cobre (Al-Cu), el cobre actúa no solo como un elemento de refuerzo mecánico, sino también para modificar las temperaturas de sólido y líquido de la matriz, lo cual es vital para sincronizar el proceso de espumado.

Del bloque macizo se obtuvieron inicialmente finas virutas mediante mecanizado

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

convencional que luego se redujeron a polvo con una molienda manual y mecánica.

El grado de pureza de estos polvos precursores se determinó mediante un análisis de difracción de rayos X en un equipo PANalyticalEmpyrean, utilizando radiación de Cu Kα, una tensión de 40 kV, una intensidad de 30 mA y un paso de 0.026 º cada 2 s.

Para el caso del agente espumante, el bicarbonato de sodio en polvo ($NaHCO_3$), se empleó el de uso comercial de fácil adquisición en el mercado y con un costo económico.

Al polvo obtenido de la aleación metálica se lo sometió a un análisis mediante difracción de rayos X para determinar la calidad del mismo. En la figura 1 se observa el difractograma en el cual se encontró la formación de CuAl2 precipitado del proceso de difusión. El resto de los picos no indexados corresponden a óxidos de Fe y debido a que el crisol utilizado fue del primer material. Del análisis, la altura relativa de los picos de estos óxidos indica que se encuentran en proporciones que en principio se podrían despreciar.

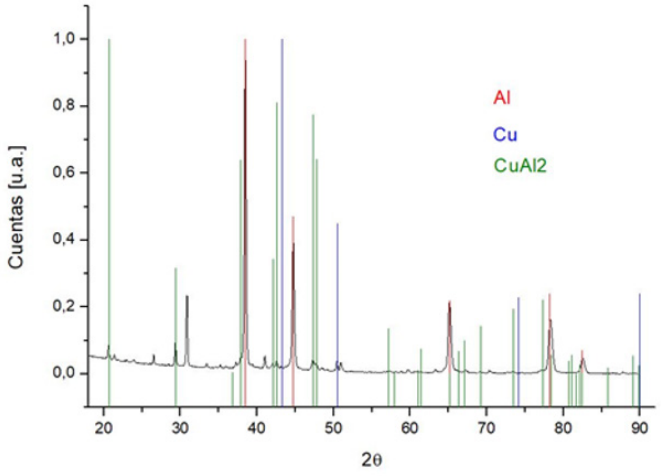


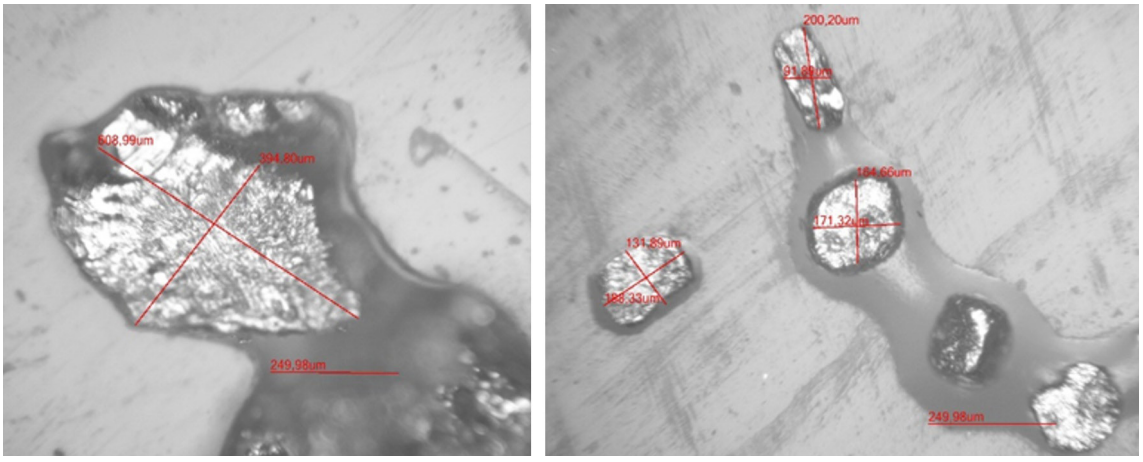
Figura 1. Difractograma de aleación $CuAl_2$.

2.2.Preparación de los polvos para las muestras

Con el bloque macizo obtenido de aluminio y cobre reciclado se generaron finas virutas mediante mecanizado convencional, que luego se redujo a partículas más pequeñas con molienda manual. Las partículas laminares obtenidas fueron del orden de los quinientos micrones (500 µm). Parte de las virutas se sometió a molienda de bolas por 24 h; esto redujo el tamaño de partícula a unos 150 µm y favoreció una forma más esférica.

Las virutas se sometieron a una molienda previa en mortero con el fin de alcanzar la granulometría adecuada para la alimentación del molino de bolas. También se realizó el análisis y caracterización de la distribución del tamaño de las partículas iniciales introducidas en el molino y las finales obtenidas luego de la molienda. Este procedimiento se efectuó mediante observación microscópica. En la figura 2, a y b, se observan los tamaños de partículas obtenidos de modo manual y mecánico.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933



a b

Figura 2.a) Imagen de microscopio en 100X de las partículas obtenidas de molienda manual b)Imagen de microscopio en 100X de las partículas después de moler en molino de bolas.

El polvo de Al-Cu de tamaño de partícula del orden de los 500 µm fue el empleado en la mezcla con el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) para la obtención de once muestras y el de 150µm para otras dos más.

2.3.Proceso de obtención de las espumas metálicas

Se empleó aluminio y cobre reciclado, el cual fue fundido y sometido al proceso mecánico detallado con anterioridad. Inicialmente se utilizó el polvo obtenido del orden de los 500 µm (sin tratar en el molino de bolas) como metal base al cual se le incorporó, en un 33,3 % en peso del total de la muestra, $NaHCO_3$ como agente espumante.

La mezcla de polvos se trató mediante molienda manual por un periodo de diez minutos con la finalidad de homogeneizar la dispersión de los polvos, metodología seguida para cada muestra. Esta luego se volcó en la matriz de acero de Ø 15 mm para la elaboración de once muestras denominadas AlCu con numeración, ver tabla N°1. Tras la mezcla, el material se sometió a una compactación mediante prensado uniaxial en frío, para obtener un precursor o "compacto en verde" con una densidad relativa superior al 98% (Rodinger et al., 2024). Se efectuó un prensado en frío de 5 a 7 min ejerciendo una presión de 166 MPa a 278 MPa. El espumado se llevó a cabo mediante la introducción de las muestras en su estado verde en el horno a una temperatura de 900 °C, considerando el tiempo de liberación de gases de aproximadamente 1 a 5 min.

En el horno el verde se calienta a una temperatura cercana o superior al punto de fusión del metal. Al calentarse, el agente espumante se descompone y libera gas, esto provoca la expansión del metal y la formación de celdas porosas.

Igual procedimiento se llevó a cabo para la obtención de dos muestras denominadas AlCu-M1 y AlCu-M2, en donde se utilizó el polvo base AlCu del orden de los 150 µm, es decir sometido a un proceso de molienda en el molino de bolas.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

MUESTRA	PRENSADO EN FRÍO		HORNO	
Metal Base/Espumante AlCu/$NaHCO_3$	t (min)	P (MPa)	Temp. (°C)	t (min)
AlCu-3	5	166	900	5
AlCu-4	5	166	900	2
AlCu-5	7	166	900	2
AlCu-6	7	166	900	3
AlCu-7	7	166	900	2
AlCu-8	7	166	900	4
AlCu-9	7	166	900	3
AlCu-10	7	166	900	2
AlCu-11	5	278	900	3
AlCu-12	7	166	900	1
AlCu-13	7	166	900	4
AlCu-M1	7	166	900	3
AlCu-M2	7	166	900	3

Tabla Nº 1. Parámetros de muestras.

3. Resultados y discusión

3.1 Espumas obtenidas

En la figura 3 puede observarse una de las muestras denominada compacto verde antes del espumado (a), y luego del mismo (b) (muestra AlCu-5). Se observa una expansión del material en todas sus direcciones, lo que evidencia la formación del espumado con la reducción de la densidad total, y una estructura firme al tacto.

Estas muestras se desarrollaron con bicarbonato de sodio como único agente espumante y el empleo del polvo sin ser sometido a molienda mecánica mediante el molino de bolas.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

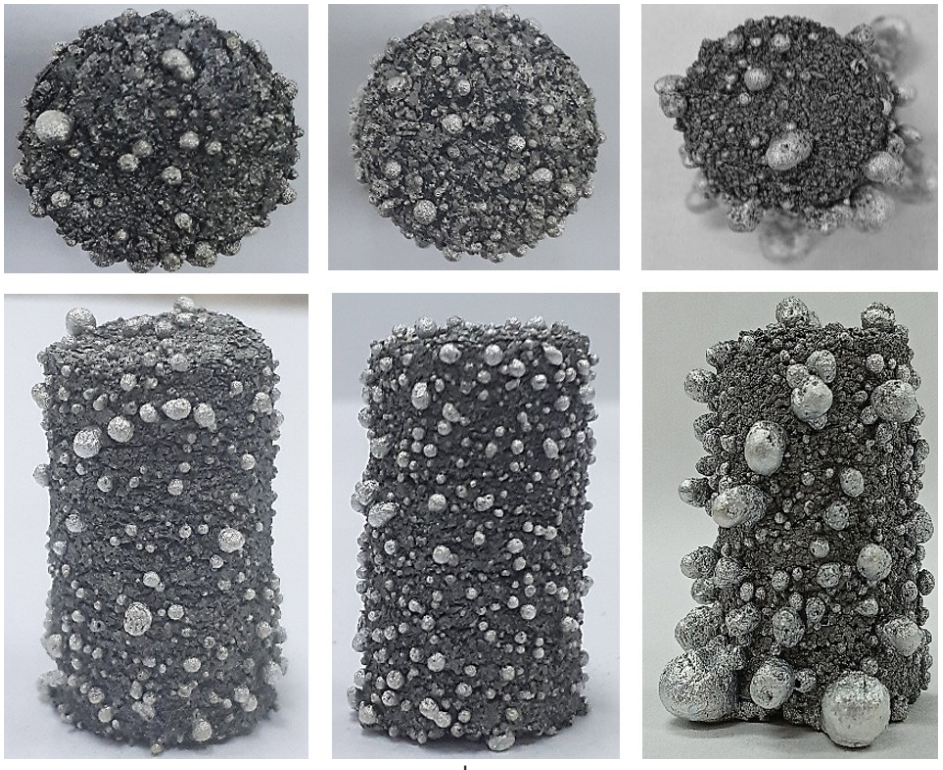


Figura 3. Muestra AlCu-5 antes del espumado y luego del mismo.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del uso de agentes espumantes alternativos de bajo costo en la fabricación de espumas metálicas recicladas, constituyendo una alternativa potencial para aplicaciones donde se requieran materiales livianos y estructuras porosas.

Muestras posteriores realizadas con partículas de polvos sometidos a molienda también evidenciaron un espumado con mejoras estructurales.

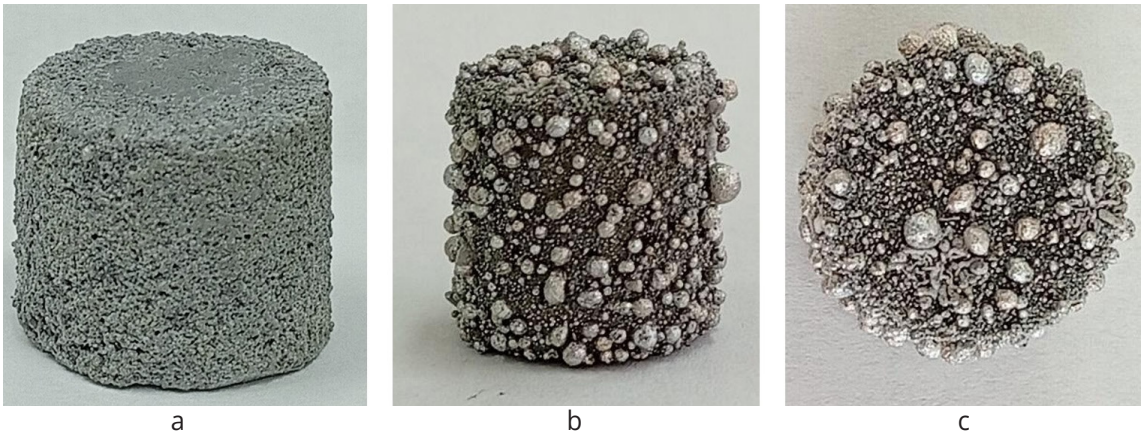
En las figuras 4, a, b y c, pueden observarse las espumas obtenidas con las muestras AlCu-5, AlCu-6 y AlCu-13. En el caso de las figuras 5, a, b y c, las espumas corresponden a las muestras AlCu-M1 y AlCu-M2.



a b c

Figura 4. Vista superior y frontal de espumas; a) Muestra AlCu-5; b) Muestra AlCu-6 y c) Muestra AlCu-13.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933



a b c

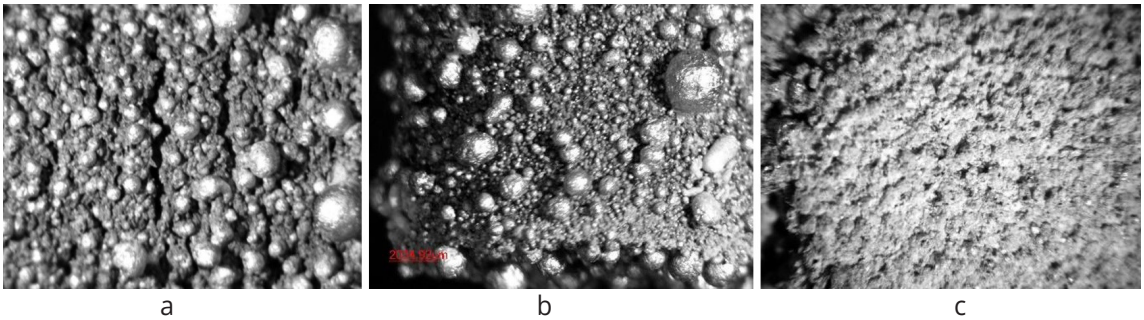
Figura 5. a) Muestra AlCu-M1 sin material superficial excedente; b) Muestra AlCu-M2, vista frontal y c) Muestra AlCu-M2, vista superior.

3.2 Caracterización de las espumas

La caracterización macro, meso y microestructural de las espumas se llevó a cabo mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). La observación microscópica, previo tratamiento de desbaste y pulido, se realizó con el microscopio óptico marca Micoba M410 con Cámara digital Micoba 500, que nos permitió observar las muestras con el ocular del microscopio y captar las imágenes en un monitor de computadora.

El desbaste se realizó con papel de desbaste de hasta 1000 mesh y el pulido con pasta de diamante de 9 a 1 µm en una pulidora metalográfica marca/modelo M P-1 Variable.

En la etapa de observación inicial se utilizó un microscopio óptico para identificar las diferentes fases presentes en las paredes de celda de las espumas. Se obtuvieron evidencias de la presencia de fisuras en la superficie de las muestras, así como pequeñas esferas (Figura 6, a). Estas fisuras no se presentaron en las muestras AlCu-M1 y AlCu-M2, en donde el polvo fue sometido previamente a molienda mediante bolas de acero (Figura 6, b y c).



a b c

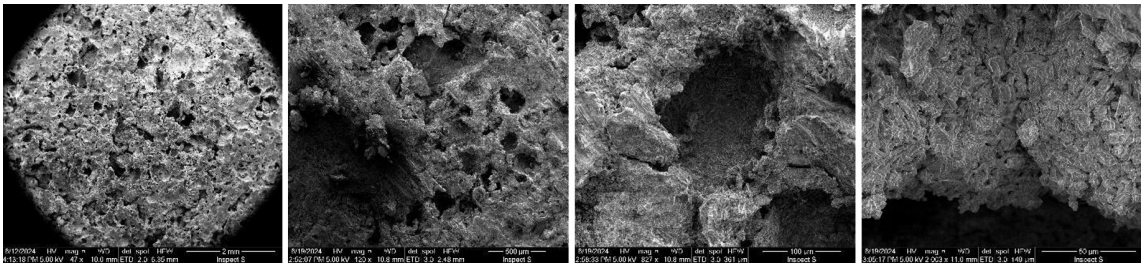
Figura 6. a) Muestra AlCu-13 con fisuras (10x); b) Muestra AlCu-M1 sin fisuras (10x); c) Muestra ALCu-M1 pos desbaste (20x).

La microscopía electrónica de barrido (SEM) se llevó a cabo mediante un microscopio electrónico de barrido marca FEI Inspect S (S50).

Las imágenes obtenidas de las muestras AlCu-03 a la AlCu-13 revelaron la presencia de poros en el interior de la estructura (figura 7, a). Se observó una distribución heterogénea de dimensiones que varían desde los 100 µm a los 400 µm. Esto es un indicativo de la distribución

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

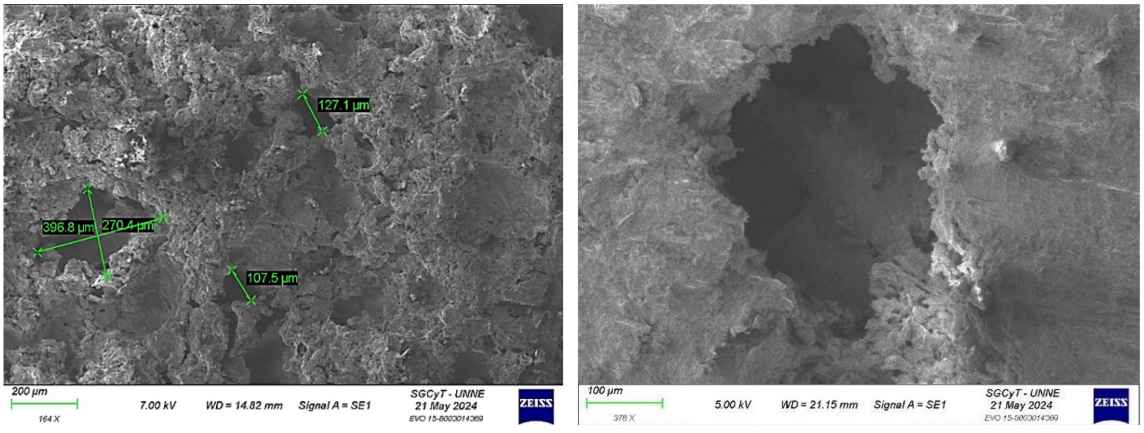
del agente espumante en el proceso de mezclado de los polvos y de la efectividad de la reacción del mismo en todo el volumen de la muestra. Es posible que la heterogeneidad de la distribución de poros también se deba a que la expansión de la muestra se produce en dirección vertical, en el sentido longitudinal de la misma, por lo que el gas producido por el bicarbonato de sodio tiende a escapar por la cara superior. Estos poros podemos considerarlos como macroporos por su dimensión (figura 7, b, c y d).



a b c d

Figura 7. a) y b) Distribución de poros en la espuma de AlCu y $NaHCO_3$, c) Macroporos, d) Microporos

También se realizaron imágenes de algunas muestras para contrastar los resultados y realizar la medición de los poros; figura 8, a y b. Se empleó en esta ocasión un microscopio electrónico de barrido (EVO 15, fabricado en 2023; Carl Zeiss, Cambridge, Inglaterra) de modo ambiental y presión variable, con detectores de electrones secundarios y retrodispersados, digitalizador de imágenes y detector de rayos X detector de rayos X (Ultim Max 40 mm^2, fabricado en 2023; Oxford Instruments, High Wycombe, Reino Unido), con software AztecLiveLite UM40 para análisis elemental mediante energía dispersiva.



a b

Figura 8. a) Medición de poros en la Espuma de AlCu y $NaHCO_3$ en el SEM,
b) Observación SEM de uno de los poros en 100 µm.

3.3 Análisis de la meso y microestructura

La observación en el microscopio óptico reveló la presencia de fisuras horizontales (figura 6, a).

El $NaHCO_3$ comienza a descomponerse térmicamente a temperaturas relativamente

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

bajas (entre 50 °C y 300 °C), liberando dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua y carbonato de sodio sólido como residuo. Posiblemente, en este rango de temperaturas los polvos Al-Cu aún no alcanzaron un estado semisólido o un grado de sinterización suficiente para deformarse plásticamente. Como consecuencia, los gases liberados quedarían atrapados entre las partículas metálicas, generando presiones internas capaces de superar la resistencia mecánica del compacto en verde y provocar la separación entre capas del material precursor.

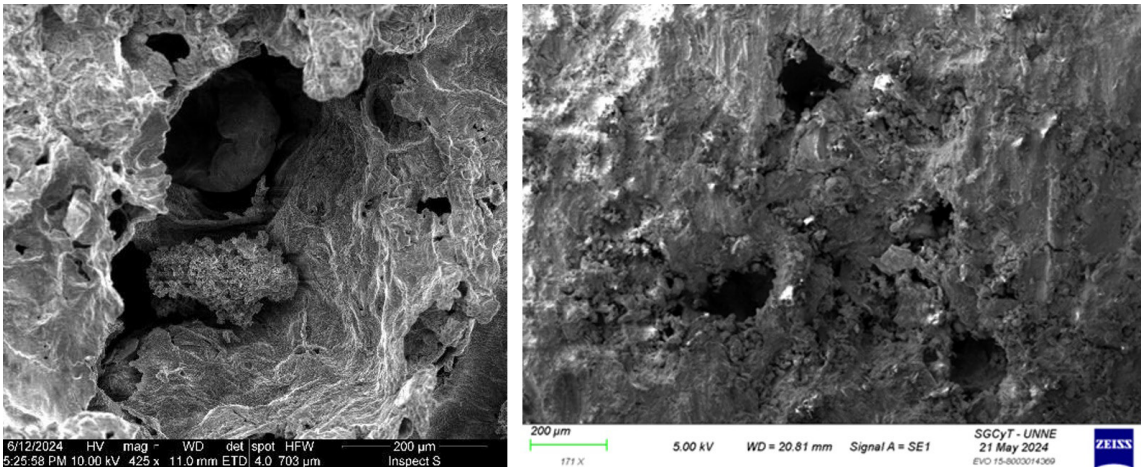
La formación de fisuras durante el espumado puede atribuirse a la generación de gradientes locales de presión asociados a la liberación no uniforme de gases durante la descomposición del agente espumante. Asimismo, la baja cohesión interparticular presente en determinadas regiones de la muestra y la compactación insuficiente del precursor favorecen la aparición de trayectorias preferenciales de expansión y escape gaseoso. Este comportamiento produce concentraciones locales de tensiones que derivan en la formación de grietas y colapso parcial de la estructura celular (Gergely et al., 2003; Kevorkijan et al., 2011). La orientación preferencial de algunas fisuras, principalmente normal a la dirección de compactación, sugiere además una respuesta anisotrópica durante la expansión térmica y el espumado del precursor.

Además, la presión uniaxial aplicada durante la compactación en frío puede generar planos preferenciales de debilidad perpendiculares a la dirección de prensado. La resistencia mecánica del compacto en verde depende principalmente de la deformación plástica de las partículas y de la formación inicial de uniones mecánicas entre ellas. En sistemas base aluminio, la presencia de óxidos superficiales (Al_2O_3) puede dificultar la difusión y reducir la cohesión interparticular, favoreciendo la formación de fisuras durante la expansión gaseosa inicial (Kennedy, 2002; Sachanandani & Lombardo, 2011).

Las imágenes logradas de las muestras con la microscopía electrónica de barrido revelaron una arquitectura porosa, pero con una distribución de tamaño de poros heterogénea e irregular (figura 7 y 8). Se puede notar macroporos, algunos alcanzando diámetros cercanos a los 400 µm; y microporos ya que se observan cavidades mucho más pequeñas en las paredes de los ligamentos. Esta configuración podría resultar favorable en aplicaciones donde se busque maximizar el área superficial y permitir el flujo de fluidos, aunque la irregularidad de los poros podría causar una respuesta mecánica no lineal bajo cargas de compresión. La presencia de pequeñas irregularidades y huecos en las paredes de las celdas indica una alta porosidad total, lo que contribuye a una reducción significativa de la densidad del material.

Posterior al estudio SEM, las muestras se sometieron a una limpieza por ultrasonido para mejor observación en el tomógrafo de rayos x, sin embargo, algunas de estas se desintegraron. La posible causa sería la presencia de moléculas de carbonato de sodio, resultante de la descomposición por agregado de calor, que quedan como[A3.1] residuo en la aleación Al-Cu. Estas se alojan en los poros y en los espacios intergranulares de las muestras obtenidas (figura 9, a y b). Estas impurezas en exceso, alojadas en los espacios intergranulares, producen una interacción débil entre granos del metal; tal que al realizar el proceso de limpieza por vibración ultrasónica se produce la separación de la muestra en nuevas partículas, mostrando deficiencia mecánica. El fenómeno puede asociarse a un exceso de agente espumante, pero la masa determinada a adicionar al polvo metálico para el prensado inicial en frío es la mínima posible para la obtención del espumado. Cantidades menores no fueron capaces de formar espumas. Este comportamiento impidió la observación en el tomógrafo de rayos x.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933



a b

Figura 9. a) Imagen SEM que evidencia la presencia de pequeños cúmulos o fragmentos de material dentro de las cavidades (visibles en el centro del poro), atribuible a posibles restos del agente espumante de moléculas del carbonato de sodio; b) Imagen SEM con presencia de zonas blancas, residuos de carbonato de sodio.

Con las partículas Al-Cu de molienda mecánica se obtuvieron nuevas muestras con una distribución más homogénea de poros/células (muestras AlCu-M1 y AlCu-M2), las que presentaron una estructura más estable mediante observación con microscopio óptico (figura 5, b y c). Además, un espumado mayor en dirección horizontal con ausencia de fisuras, posiblemente asociado a una mejora en la compactación y cohesión entre partículas luego de la molienda mecánica. Estas no fueron sometidas a observación en el SEM, pero serán motivo de estudios futuros ya que presentan una mejora significativa.

Este comportamiento puede asociarse a una mejor distribución granulométrica y a un aumento del área de contacto entre partículas, favoreciendo el empaquetamiento y la compactación del material precursor. Asimismo, la distribución más uniforme del agente espumante dentro de la matriz metálica contribuye a una liberación más homogénea de gases durante el espumado, reduciendo la formación de zonas localizadas de expansión excesiva y mejorando la estabilidad estructural de la espuma (Kevorkijan et al., 2011).

Las partículas de menor tamaño y geometría más regular favorecen una distribución más homogénea del agente espumante y reducen la presencia de planos preferenciales de debilidad. Asimismo, el incremento de puntos de contacto entre partículas mejora la resistencia mecánica del compacto en verde y favorece una expansión más uniforme durante el espumado. Estas condiciones contribuyen al refinamiento de la estructura celular y reducen la coalescencia prematura de poros de gran tamaño, los cuales pueden actuar como iniciadores de grietas.

3.4 Densidad relativa de las espumas

En ningún caso fue posible determinar si la porosidad es abierta o cerrada por métodos tradicionales de desplazamiento de líquido, debido al tamaño de los poros y la mesoestructura obtenida, ya que la tensión superficial entre el agua y el material de la muestra impidieron el ingreso del líquido en todo el volumen de la muestra.

Las espumas obtenidas presentaron densidades relativas comprendidas entre 0,29 y 0,31 respecto de la densidad teórica de la aleación base. Estos valores evidencian una reducción significativa de densidad asociada a la formación de estructuras celulares durante el

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

espumado. La densidad relativa se determinó obteniendo el volumen aproximado y el peso de la muestra.

Estos resultados son comparables con valores reportados en bibliografía para espumas metálicas de aluminio fabricadas mediante pulvimetalurgia utilizando agentes espumantes alternativos, que indican un límite de 0,3.

No obstante, las diferencias observadas entre muestras indican que las condiciones de compactación y el tamaño de partícula influyen significativamente sobre el volumen final de poros y la estabilidad estructural de las espumas.

4. Conclusiones

- Los resultados obtenidos permiten considerar al bicarbonato de sodio como una alternativa viable y de bajo costo para la fabricación de espumas metálicas. Los métodos experimentales utilizados en conjunto con la aleación de Al y Cu reciclado y el agente espumante alternativo, bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) de uso comercial, nos permitieron obtener espumas con una expansión volumétrica en todas sus direcciones.
- La caracterización mediante microscopía óptica reveló fisuras en los planos normales a la dirección de compresión ejercida para la obtención de la muestra en su estado verde. Esto puede deberse a la dirección de liberación del gas del agente espumante, la liberación del gas cuando el aluminio está todavía en estado sólido, a la formación de óxido natural (Al_2O_3) en la superficie de las partículas de aluminio, o a una presión de prensado deficiente.
- Imágenes de SEM revelaron una arquitectura porosa, pero con una distribución de tamaño de poro heterogénea e irregular. Con presencia de macroporos, algunos alcanzando diámetros cercanos a los 400 µm, y microporos.
- La presencia de pequeñas irregularidades y huecos en las paredes de las celdas indica una alta porosidad total, lo que reduce drásticamente la densidad del material, con densidades relativas próximas al 0,3 según cálculos.
- Algunas muestras se desintegraron ante la exposición a una limpieza por ultrasonido. La posible causa sería la presencia en exceso de moléculas de carbonato de sodio resultante de la descomposición, que queda como un residuo que afecta las propiedades mecánicas de las espumas.
- Muestras realizadas con el polvo de Al-Cu sometido a molienda en el molino de bolas dieron como resultado una espuma con una estructura más estable dada por una distribución de poros más homogénea y sin fisuras superficiales, indicando que el tamaño y distribución de partículas influyen significativamente sobre la estabilidad de la espuma. Estas requerirán mayores estudios a futuro.

5. Agradecimientos

- A OUTOKUMPU FORTINOX SA por los cilindros de acero de alta resistencia.
- Taller Rojo y Verde por los trabajos de mecanizado. Villa Ángela, Provincia de Chaco.

Revista Tecnología y Ciencia
DOI: https://doi.org/10.33414/rtyc.57.36-48.2026 - ISSN 1666-6933

Referencias

Bryant, J. D., Crowley, M. D., Wilhelmy, M. D., Kallivayalil, J. A., & Wang, W. (2008). Development of Alcoa aluminum foam products. In Porous Metals and Metallic Foams (Metfoam 2007) (pp. 27). DEStech Publications, Inc.

Byakova, A. V., Gnyloskurenkoy, S. & Nakamura, T. (2017). Effect of CaCO3 Foaming Agent at Formation and Stabilization of Al-Based Foams Fabricated by Powder Compact Technique. Materials Transactions, 58 (2), 249-258. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016314

Espasandin, J. M., Canteros, O. J. S., Barabas, L. G., & Malachevsky, M. T. (2022). Obtención de espumas metálicas utilizando como metal principal aluminio comercial y reciclado con diversos agentes espumantes, Revista Tecnología Y Ciencia, (43), 19–35. https://doi.org/10.33414/rtyc.43.19-35.2022

Fernández, P., Cruz, L. J. & Coleto, J. (2009). Proceso de fabricación de metales celulares. Parte II: vía sólida, disposición de metales, otros procesos. Revista de Metalurgia de Madrid, 45(2), 124-142. https://doi.org/10.3989/revmetalm.0806

Gergely, V., Currand, D. C. & Clyne, T. W. (2003). The FOAMCARP process: Foaming of aluminium MMCs by the chalk–aluminium reaction in precursors. Composites Science and Technology, 63(16), 2301–2310.

Kennedy, A. (2002). Effect of compaction density on foamability of Al–TiH2 powder compacts. Powder Metallurgy. 45(1). 75-79. https://doi.org/10.1179/003258902225001579.

Kevorkijan, V., Skapin, S., Paulin, I., Sustarsic, B., Jenko, M. & Lazeta, M. (2011). Influence of the foaming precursor's composition and density on the foaming efficiency, microstructure development and mechanical properties of aluminium foams. Materials and Technology, 45(2), 95-103. http://mit.imt.si/izvodi/mit112/kevorkijan.pdf

Rodinger, T., Ćorić, D. & Kováčik J. (2024). The Effect of Foaming Agents on the Thermal Behavior of Aluminum Precursors. Materials (Basel). 2024 Feb 1; 17(3):710. https://doi.org/10.3390/ma17030710

Sachanandani, R. & Lombardo, S. (2011). Modeling of green body strength, internal pressure, and stress in porous ceramic bodies during thermal debinding. Journal of Ceramic Processing Research. 12(1), 5-11.

Contribución de los Autores

	Colaboración Académica													
Nombres y Apellidos del autor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ofelia Jessica Soledad Canteros	x		x	x	x	x	x	x	x	x			x	
Leonardo Gastón Barabas	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	
José Manuel Espasandin		x	x			x	x		x			x	x	x
Franco Juan Pablo Teruel					x		x	x						x

1-Administración del proyecto, **2**-Adquisición de fondos, **3**-Análisis formal, **4**-Conceptualización, **5**-Curaduría de datos, **6**-Escritura - revisión y edición, **7**-Investigación, **8**-Metodología, **9**-Recursos, **10**-Redacción - borrador original, **11**-Software, **12**-Supervisión, **13**-Validación, **14**-Visualización.