

## LAS VIBRACIONES MECÁNICAS COMO HERRAMIENTA DE MEJORA EN LA FABRICACIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Tovio Daniel Oscar, Cozzarin Ana Laura, Feloy Lucas, Ruiz Diaz Fernando, Lacoste Juan Leon, Alvarez Cecilia, Maffia Ernesto Gustavo

UIDET ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería.

Universidad Nacional de La Plata.

ernesto.maffia@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCION

La fundición es uno de los métodos de fabricación de piezas y componente de máquinas más antiguos que se conoce. Si bien es ampliamente utilizada, las piezas y componentes fabricados con esta técnica muestran algunos inconvenientes. Por ejemplo, se observa escasa resistencia a los desgarros en caliente y también aparecen problemas de contracción, porosidad y segregación. Para superar estos aspectos negativos se busca disminuir el tamaño de grano. Esta modificación microestructural se logra aumentando la velocidad de nucleación a través del control de la temperatura de colada y conductividad del molde o, multiplicando los granos (esto último se consigue rompiendo las dendritas en crecimiento para formar semillas de cristales adicionales). Si bien la multiplicación de granos ocurre naturalmente y sin control en la mayoría de las operaciones de fundición, existen métodos artificiales para que se desarrolle uniformemente en toda la pieza fundida. Entre los más utilizados, encontramos a las vibraciones forzadas, campos magnéticos alternos, vibraciones ultrasónicas, entre otros (1,2). Lo más sencillo y ventajoso, es aplicar vibraciones mecánicas.

Varios trabajos de investigación han informado acerca de los efectos benéficos que genera la utilización de energía vibratoria en el proceso de solidificación. Estas perturbaciones, cuando tienen la frecuencia y la amplitud adecuadas, logran modificar el tamaño de los granos, disminuir la porosidad, operar sobre la morfología de las fases secundarias metálicas y no metálicas y también minimizar la macro y micro segregación. Estos cambios en la estructura producen una mejora de las propiedades finales del material (3)

Ahora, ¿Qué sucede dentro de la masa fundida, cuando se aplican vibraciones mecánicas? La respuesta está en que la energía vibratoria fuerza a que parte de las dendritas en crecimiento se desprendan y se conviertan en nuevos núcleos que aumentan la tasa de nucleación del material solidificante, generando una fina microestructura de granos equiaxiales. Otros trabajos confirman este refinado de la estructura granular, como es el caso de Shusen Wu et al. Estos investigadores demuestran que, si se permite que un líquido metálico solidifique sin vibraciones, los núcleos dentro de la masa fundida subenfriada se convertirán en granos alargados, de crecimiento dendrítico. Por el contrario, si se emplean vibraciones para agitar al líquido, la temperatura y la distribución de solutos en todas las direcciones alrededor de las partículas primarias de Al serán mucho más uniformes por causa de la convección del líquido y estos núcleos tendrían casi la misma velocidad de crecimiento en todas las direcciones, por lo que, serán esféricos (4) Otros han encontrado que la combinación de vibración mecánica y velocidad de enfriamiento, afectan la morfología de la fase primaria y la fase de silicio eutéctico, de muestras obtenidas del proceso de fusión y colado convencional. Tal es el caso de Wenming Jiang y colaboradores, quienes demostraron que hay una evolución microestructural beneficiosa para las propiedades, al aplicar

vibraciones mecánicas en la estructura de colada consiguen que las dendritas más gruesas sean más finas. (5) El trabajo de Farshid Taghavi et al, demuestra que el efecto de la vibración mecánica prolongada produce el refinamiento del grano de la fase primaria de Aluminio y también influye en la densidad de la aleación de aluminio A356; aumentar el tiempo de vibración hasta 15 min y la frecuencia de vibración hasta 50 Hz produce la disminución en el tamaño de la fase primaria de Al, lográndose un 53% de refinamiento del grano y un aumento la densidad del 2,68 g/l (6). Hong-min GUO et al demuestran que la vibración mecánica proporciona enfriamiento localizado al extraer calor del interior de la aleación fundida. Aseguran que la velocidad de enfriamiento depende, en gran medida, de la aceleración de la vibración (7)

En la lectura de los trabajos revisionados, se puede notar que el refinado de la estructura de colada utilizando vibraciones mecánicas es una opción para mejorar la estructura de colada y así, las propiedades mecánicas de las piezas fundidas, fácil de aplicar y a muy bajo costo. Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar los efectos que produce la aplicación de vibraciones mecánicas durante la solidificación de un metal.

### PARTE EXPERIMENTAL

Los ensayos iniciales se realizaron utilizando un metal comercialmente puro, en nuestro caso fue aluminio. Este metal se fundió en un horno a gas natural con crisol de carburo de silicio. La influencia de la vibración en la estructura granular del material se evalúa a través de la interpretación de macro y micrografías obtenidas a través de lupa y de un microscopio óptico (MIKOPA). El reactivo de ataque utilizado fue Keller diluido



Para los ensayos de vibración, se utilizó una mesa vibratoria, que tiene incorporado un moto vibrador (Oli) que aplica una onda vibratoria de frecuencia constante (50Hz) y amplitud variable (0,4mm maximo).

Los ensayos de solidificación bajo aplicación de vibraciones mecánicas fueron realizados con un molde de cobre unido a la mesa por sistema de sujeción (ver Fig 1), por lo que la perturbación fue aplicada al conjunto molde-liquido.

Los parámetros utilizados en el caso de aluminio de pureza comercial fueron: temperatura de colada de 800°C.

En el caso de la aleacion, la temperatura de colada utilizada fue 700°C, temperatura del molde fue 25°C y 300°C, con la máxima vibración de la mesa

Fig 1. Mesa vibratoria y el molde

Para los ensayos de vibración con una aleación, se utilizó scrap de aleación 2219. Esta es una aleación de aluminio y cobre (Su composición química es: Aluminio: 91.5 a 93.8% Cobre: 5.8 a 6.8% hierro: 0.3% max. Magnesio: 0.02% max.). La fusión se realizó en horno a gas, sin atmosfera de protección; el líquido se vació a la temperatura de 700°C en molde de cobre a temperatura ambiente y 300°C. Se realiza el proceso de fusión sin flux de protección y sin desgasificación, para que el aluminio líquido absorba hidrogeno libremente y así analizar si las vibraciones inciden en el nivel de porosidad

## RESULTADOS Y DISCUSION

**Ensayos con Aluminio de pureza comercial.** Se realizo la primera fusión y colada sin aplicar vibración al sistema molde-mesa. La muestra así obtenida, se utiliza como referencia para compararla con las demás condiciones de multiplicación de granos. Lo siguiente es calentar el aluminio fundido a la temperatura de 800°C y vaciarlo en el molde de cobre, el que se encuentra a temperatura ambiente. En la figura 2 se observa en la macrografía de la derecha, el efecto que produce, en la microestructura, las vibraciones: se observa que la zona central del lingote tiene granos equiaxiales.

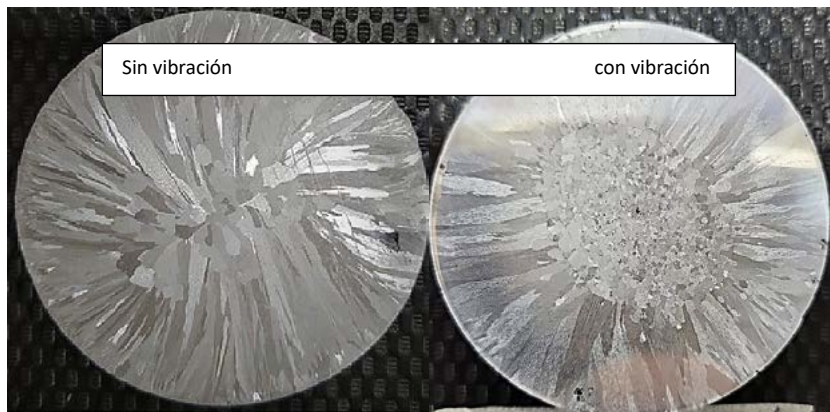


Fig 2 – Las vibraciones generan una zona central de granos equiaxiales (derecha)

Cuando un metal puro o aleación solidifica en un proceso industrial, se ponen en juego distintas variables que influyen en la estructura de solidificación (8). La variable más importante es la temperatura que tiene el metal líquido al momento de ingresar al molde; las particularidades del molde (como ser la temperatura del mismo al momento de vaciar, su conductividad térmica, forma y tamaño) también afectan la velocidad de extracción de calor y establecen, además, gradientes de temperatura en el líquido a solidificar. La conjunción entre la temperatura de colada, la velocidad de extracción de calor y los gradientes de temperatura, establecen la morfología de la estructura final de colada (8,9). Así, si se vacía un molde frío con un metal líquido sobrecalentado, se obtiene una estructura de granos columnares, alcanzando estos el centro del lingote al final de la solidificación. Sin embargo, cuando se aplican vibraciones mecánicas al líquido durante la solidificación, se genera una microestructura de granos equiaxiales en el centro del lingote, lo cual es un resultado que va en dirección opuesta a los principios básicos de nucleación y crecimiento de granos. Esto solo podría suceder si fuese una aleación y este no es el caso. Evidentemente, la vibración mecánica altera, de alguna manera, el crecimiento columnar y en su lugar crea condiciones para que ocurra nucleación y crecimiento de granos equiaxiales.

### Ensayos con aleación de Aluminio 2219

Las micrografías de la figura 3, permiten distinguir claramente la influencia de las vibraciones mecánicas en la macroestructura de solidificación de la aleación 2219 utilizada en este estudio, la cual fue vaciada bajo los efectos de vibraciones mecánicas. La imagen de la derecha muestra claramente la modificación de la morfología de los granos en la región central del lingote.

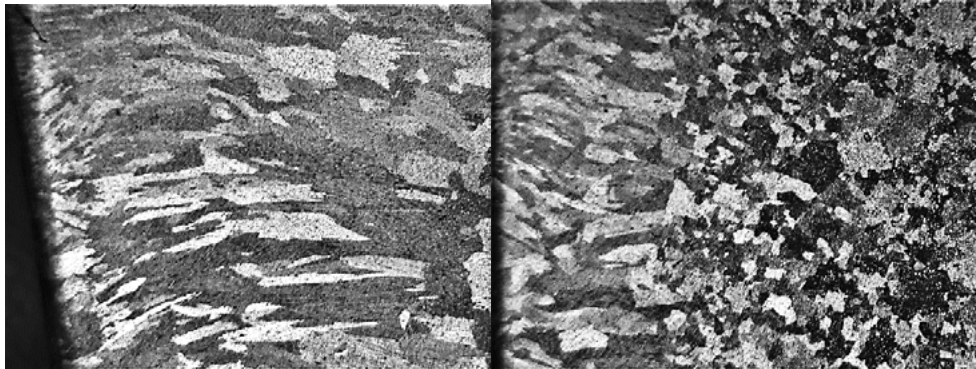


Fig 3. Estructura de granos de la aleación 2219 con aplicación de vibraciones mecánicas (derecha) y sin vibración (izquierda)

Los siguientes resultados (presentados en la figura 4) corresponden micrografías del mismo material, pero realizadas con microscopía óptica. En los materiales originales (no mostrados en esta serie de micrografía) hay una estructura dendrítica dentro de cada grano y abundante segregación interdendrítica. Sin embargo, no es una tarea sencilla delimitar la estructura granular y poner de manifiesto sus verdaderas dimensiones. Por lo tanto, se emplea un recocido a 510°C para eliminar esta fase metaestable que, en el caso de la aleación utilizada en este estudio, es un eutéctico separado. Esta distribución eutéctica interdendrítica enmascara los contornos reales de los granos, por lo que, no se pueden valorar sus dimensiones reales. En conclusión, el recocido permite disolver casi por completo la fase sólida fuera de equilibrio, logrando resaltar los verdaderos límites de grano. Por lo tanto, las muestras de la Fig 4 pasaron por un recocido. Así, el tamaño de grano medido en la muestra vibrada (micrografía b) es de aproximadamente 130 a 180  $\mu\text{m}$ .

Se realizó el mismo ensayo de solidificación con aplicación de vibraciones, pero usando un molde caliente (300°C). La finalidad de esta condición de ensayo es demorar el proceso de solidificación y dar más tiempo a los eventos de multiplicación de grano. La figura (c) muestra este resultado. Se observa una estructura equiaxiada, con un tamaño de grano de 55 a 75  $\mu\text{m}$ .

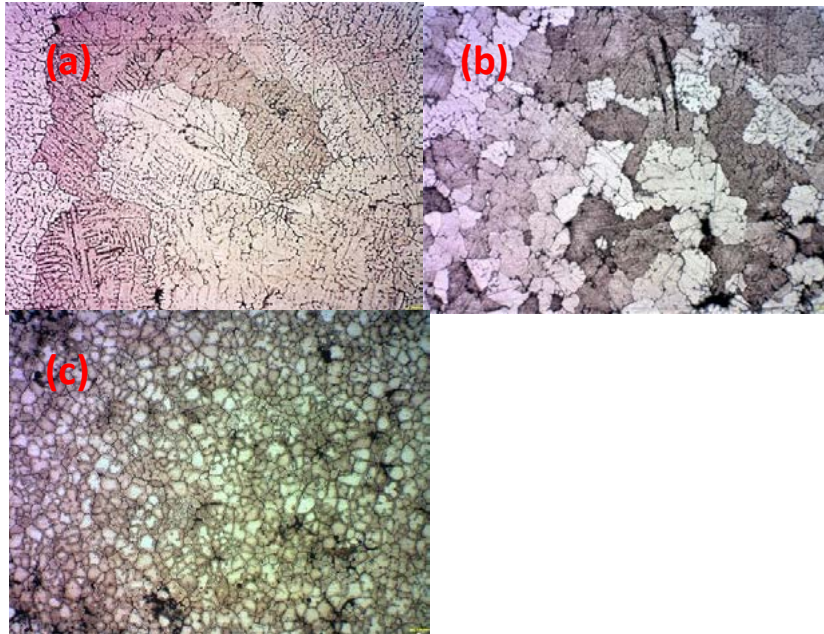


Fig 4. Estructura de granos de la aleación 2219. (a) solidificación normal en molde de alta conductividad térmica, sin vibración (b) solidificación con vibración y molde a temperatura ambiente. (c) solidificación con vibración y molde a 300°C de temperatura

### CONTRACCION SUPERIOR (RECHUPE)

Cuando la densidad del líquido es inferior a la del sólido, como ocurre en la mayoría de los metales, la contracción es un fenómeno inevitable en las piezas fundidas (10). Este evento, forma una depresión en la última región a solidificar siendo su posición y forma, las únicas características que se pueden cambiar. El rechupe depende de la dirección del flujo de calor durante el enfriamiento y de la masa de la pieza o del lingote. Según Brick se pueden obtener morfologías muy pronunciadas, cuando se vacía un líquido sobrecalentado en molde de alta conductividad térmica a temperatura ambiente (8)

En la figura 5, se presentan los rechupes formados durante la solidificación de una aleación; la única diferencia entre ambas muestras, es la aplicación de vibración en la muestra a la derecha. ¿Cuál sería la razón por la cual se forma una contracción tan pronunciada? Los resultados parecen indicar que la vibración aumenta la extracción de calor de las paredes del molde, o sea, aumenta la velocidad de solidificación radial

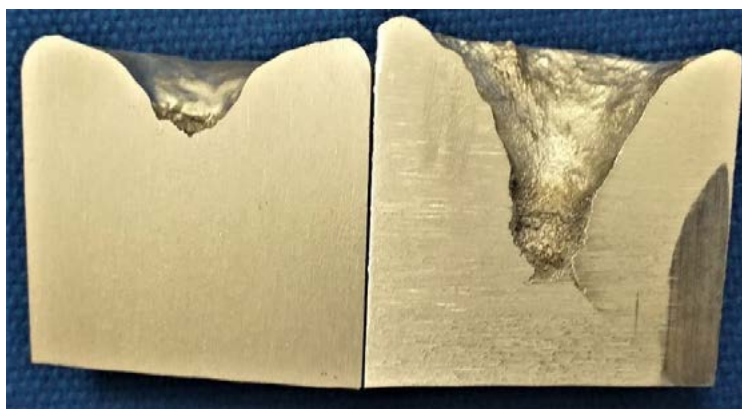


Fig 5. Contracción superior la aleación Al-4%Cu. (a) solidificación sin vibración. (b) con vibración.

## ALGUNAS OBSERVACIONES

Se estudiaron los efectos que producen las vibraciones mecánicas en la estructura de solidificación de un metal.

Los resultados iniciales muestran que (incluso utilizando equipos industriales con limitada variación de frecuencia y amplitud) las vibraciones mecánicas afectan el crecimiento de granos columnares y promueven el crecimiento de granos equiaxiales, tanto en un metal puro como en una aleación, durante el proceso de solidificación. Durante el desarrollo de los ensayos también se observó que las vibraciones mecánicas despegan el lingote del molde. Este resultado facilita la extracción de piezas y evita el uso de pinturas refractarias.

Si bien esta primera etapa de la investigación se hallaron resultados positivos en cuanto a la modificación del tamaño de grano aun no fue posible demostrar fehacientemente en qué medida las vibraciones afectaron el nivel de porosidad.

## BIBLIOGRAFIA

- 1- Principios de metalurgia física, 2da Ed, R.E. Reed-Hill. 4ta edición, 1986
- 2- Effect of the mold vibration on mechanical and metallurgical properties of Al-Cu Alloys. S.S. Mishra, S.S Sahu, V. Ray Gandhi Institute for Technology, Bhubaneswar, India.
- 3- Effect of Mould Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of Casting During Solidification. Rahul Kumar, Md. Salim Ansari, Sudhansu Sekhar Mishra, Amitesh Kumar, National Institute of Foundry and Forge Technology, Hatia, Ranchi- 834003, India.
- 4- Formation of non-dendritic microstructure of semi-solid aluminum alloy under vibration, Shusen Wu, Lizhi Xie, Junwen Zhao and H. Nakaeb)
- 5- Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting. Wenming Jiang, Zitian Fan, Xu Chen, Benjing Wang, Hebao Wu
- 6- Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy, c, Hasan Saghafian, Yousef H.K. Kharrazi
- 7- Grain refinement of Al-5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using melttable vibrating probe. Hong-min GUO, Ai-sheng ZHANG, Xiang-jie YANG, Ming-ming YAN)
- 8- Structure and Properties of Alloys. Robert M. Brick. Robert B. Gordon. Arthur Phillips. Third Edition. McGraw-Hill; 3er edición (1 Enero 1966)
- 9- Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys. Jose Antonio Pero-Sanz Elorz, Maria Jose Quintana Hernandez, Luis Felipe Verdeja Gonzalez. Elsevier
- 10- Heine, R. W., Loper C. R., and P. C. Rosenthal (1967). Principles of Metal Casting.