



# REMETALLICA

Figura: Acero de medio manganeso atacado con nital 3% en volumen, observado con microscopía óptica.  
Artículo N° 5 (47 - 54) | Vol. 39 | N° 27 | 2024-2025





# DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

**EDITADA POR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**Vol. 39 | Nº 27 | 2024-2025**  
**ISSN 0714-291X** Versión Impresa  
**ISSN 0719-8388** Versión Electrónica

## DIRECTOR

**Oscar Bustos Castillo**  
oscar.bustos@usach.cl

## EDITORES

**Rodrigo Allende Seco**  
rodrigo.allende@usach.cl

**Héctor Bruna Rivera**  
hector.bruna@usach.cl

## VIME-METALURGIA / SUPERVISIÓN GENERAL

**José Luis Martínez Salinas**  
joseluis.martinez@usach.cl

**Francisco Rodríguez González**  
francisco.rodriguez@usach.cl

## COMITÉ EDITORIAL

**Francisco Javier Belzunce**  
Universidad de Oviedo, España

**Flavio de Barbieri Boero**  
Universidad Técnica Federico Santa María  
Valparaíso, Chile

**Nelson Garza Montes de Oca**  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Monterrey, México

**Alexis Guzmán Méndez**  
Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

**Miguel Maldonado Saavedra**  
Universidad de Santiago de Chile, Chile

**Alberto Monsalve González**  
Universidad de Santiago de Chile, Chile

**Maritza Páez Collio**  
Universidad de Santiago de Chile, Chile

**Juan Pérez Ipiña**  
CONICET, Argentina

**Yaneth Pineda Triana**  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

**Álvaro Salinas Caona**  
Universidad de Talca, Chile

**Enzo Tesser Díaz**  
Armada de Chile, Valparaíso, Chile

**Paula Zapata Ramírez**  
Universidad de Santiago de Chile, Chile

## DISEÑO, PRODUCCIÓN Y WEBMASTER

**Francisco Rodríguez González**  
francisco.rodriguez@usach.cl



# ÍNDICE

7

**L. E. Jardón-Pérez et al.**

Efecto de la inyección diferenciada sobre la dinámica de fluidos y el mezclado en hornos olla usando las técnicas PIV y PLIF

7-17

19

**Luciano Figueroa Maturana**

Explorando la transformación martensítica en el sistema Cu-Al

19-24

25

**Roberto Molina Viveros**

Gestión Ambiental en Ingeniería Metalúrgica

25-30

31

**Enzo Tesser Díaz**

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval: un vínculo esencial que aporta al desarrollo de Chile

31-45

47

**Dilan Muñoz Vilches**

Ataque químico para el análisis metalográfico

47-54

55

**Manuel Ignacio Azócar**

Historia de la plata: desde el comercio hasta la medicina y la exploración espacial

55-61



# PRESENTACIÓN

---

Con orgullo presentamos una nueva edición de REMETALLICA, revista del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile, reafirmando nuestro compromiso con una divulgación científica rigurosa y accesible. En un contexto de transición energética, sostenibilidad, digitalización y desarrollo de nuevos materiales, compartir conocimiento es clave para impulsar soluciones y colaboración multidisciplinaria. Agradecemos a nuestra comunidad por su constante apoyo e invitamos a seguir contribuyendo desde el aula, el laboratorio o la industria.

En esta edición destacamos seis artículos que abordan temas relevantes para la ingeniería metalúrgica desde diversas perspectivas:

- Jardón-Pérez *et al.* investigan el efecto de la inyección diferenciada en el mezclado de hornos olla mediante modelado físico y técnicas ópticas avanzadas.
- Figueroa y Bustos analizan la transformación martensítica en aleaciones Cu-Al, destacando su potencial en aplicaciones funcionales y estructurales.
- Molina expone como la ingeniería metalúrgica debe integrar la gestión ambiental mediante tecnologías limpias y evaluación de impactos para la producción sostenible.
- Tesser reflexiona sobre el vínculo entre ingeniería metalúrgica y construcción naval, subrayando su importancia para el desarrollo industrial chileno.
- Muñoz y Figueroa revisan el ataque químico en metalografía, proponiendo mejoras didácticas para su uso en docencia.
- Azócar traza la historia tecnológica de la plata, resaltando su uso en medicina, fotografía y exploración espacial.

Esperamos que esta edición contribuya a enriquecer el diálogo técnico y social en torno a los materiales y su rol en el desarrollo del país. Invitamos cordialmente a seguir compartiendo este contenido, recomendarnos entre colegas, y sumarse como autores o lectoras activas de nuestras futuras publicaciones.



**Rodrigo Allende Seco**  
Editor Remetallica



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERÍA**  
**METALÚRGICA**



Artículo de Investigación

# Efecto de la inyección diferenciada sobre la dinámica de fluidos y el mezclado en hornos olla usando las técnicas PIV y PLIF

Effect of differential injection on fluid dynamics and mixing in ladle furnaces using PIV and PLIF techniques

## Autor de Correspondencia

**L. E. Jardón-Pérez<sup>1,2</sup>**

dregwar@gmail.com

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad de México, México

<sup>2</sup>CINVESTAV-Unidad Querétaro  
Querétaro México

**R. Villarreal-Medina<sup>1</sup>**  
**L. E. Jardón-Pérez<sup>1,2</sup>**  
**C. González-Rivera<sup>1</sup>**  
**L. G. Trápaga-Martínez<sup>2</sup>**  
**M. A. Ramírez-Argáez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad de México, México

<sup>2</sup>CINVESTAV-Unidad Querétaro  
Querétaro, México<sup>2</sup>

Artículo Recibido: 5 de diciembre, 2024  
 Artículo Aceptado: 19 de marzo, 2025  
 Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



## RESUMEN

Se estudio la dinámica de fluidos y el mezclado dentro de un horno olla con un modelo de acrílico, usando agua y aceite de motor para representar el acero líquido y la escoria, respectivamente. Se inyectó aire simulando la inyección de argón industrial en dos puntos, variando el ángulo de separación (90° y 180°) y la proporción de flujo (50/50 y 75/25). Se utilizaron las técnicas de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) y Fluorescencia Planar Inducida por Laser (PLIF) para medir los patrones de flujo y los tiempos de mezclado. Los experimentos mostraron que el modo de inyección diferenciada (75/25) reduce el tiempo de mezclado en comparación con el modo igualado (50/50), especialmente cuando los tapones se encuentran a 90°. Los tiempos de mezclado disminuyeron debido a la reducción de las zonas de baja velocidad. La sinergia entre las técnicas PIV y PLIF permite explorar a detalle los mecanismos de mezclado y el comportamiento del flujo dentro del modelo de la olla.

**Palabras clave:** Horno Olla, PIV, PLIF, Modelado Físico

## ABSTRACT

Fluid dynamics and mixing within a ladle furnace were studied using an acrylic model, employing water and motor oil to represent liquid steel and slag, respectively. Air was injected through two points (or plugs) to simulate industrial argon injection, varying the separation angle (90° and 180°) and the flow rate ratio (50/50 and 75/25). Particle Image Velocimetry (PIV) and Planar Laser-Induced Fluorescence (PLIF) techniques were utilized to measure flow patterns and mixing times. The experiments showed that the differential injection mode (75/25) reduces mixing time compared to the balanced mode (50/50), particularly when the plugs are positioned at a 90° separation angle. Mixing times decreased due to the reduction of low-velocity zones. The synergy between PIV and PLIF techniques allows for detailed exploration of mixing mechanisms and flow behavior within the ladle model.

**Keywords:** Ladle furnace; PIV; PLIF; Physical modeling

## Introducción

La refinación secundaria del acero es un paso esencial para su proceso de fabricación. En la mayoría de los casos, la refinación secundaria se realiza en un horno olla. En dicho reactor se presentan tres fases principales: el acero fundido, una capa de escoria fundida que flota sobre el acero y un gas inerte que se inyecta a través de tapones porosos, casi siempre argón grado industrial. Durante este proceso de refinación el acero se desulfura, se remueven los gases disueltos, se ajusta la composición química, se remueven y/o modifican inclusiones y se homogeniza tanto en composición como térmicamente. Todo esto con el objetivo de la aleación final cumpla con las características especificadas por el cliente o por la norma correspondiente.

Los objetivos de la refinación secundaria están gobernados por fenómenos de transporte (transporte de energía, momentum, especies química) por lo que para acelerar la rapidez del proceso se requiere que el baño de metal líquido tenga un correcto grado de agitación. Para cuantificar la eficacia del mezclado en la olla se emplea como indicador el tiempo de mezclado,  $\tau_{mix}$ , el cual depende de las condiciones de operación y de diseño de dicho reactor. El flujo de gas inyectado, la posición y numero de tapones porosos y la relación de diámetro/altura de la olla son algunas de las variables que modifican drásticamente el tiempo de mezclado. La posición de los tapones puede variar en dirección radial ( $r$ ) y se puede cambiar el ángulo entre los tapones,  $\theta$ , cuando hay más de uno. Recientemente, en olla con múltiples tapones se ha estudiado el modo de inyección, el cual puede ser igualado o diferenciado. Igualado quiere decir de la proporción de gas inyectado es igual en todos los tapones, mientras que diferenciado implica que la proporción del flujo es diferente en cada tapón.

El efecto de la posición del tapón sobre el tiempo de mezclado ha sido estudiado extensamente. Para el caso de inyección de gas inerte usando flujo igualado en dos tapones, el menor tiempo de mezclado se consigue situando los tapones a la mitad del radio de la olla y separados  $180^\circ$  entre sí. (Amaro-Villeda et al., 2012; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019). Los estudios disponibles muestran que cuando se cambia la posición y ángulo de separación de los tapones porosos,

dejando fijo el modo de inyección se puede encontrar una condición óptima de tiempo de mezclado; pero cuando se modifica el modo de inyección dejando fija la posición y grado de separación, algunas veces aumenta y en otras disminuye el tiempo de mezclado, sin tener una tendencia clara (Chattopadhyay et al., 2009; Liu et al., 2011; Haiyan et al., 2016; Conejo et al., 2019).

Estudiar un sistema siderúrgico, como es el horno de refinación secundaria, acarrea retos importantes, las mediciones que se pueden hacer en planta son limitadas por la temperatura y opacidad del baño. En los casos que se usan simulaciones numéricas, estas no siempre alcanzan a capturar las complejas interacciones que suceden entre las plumas que se forman dentro del reactor (Liu et al., 2011; Haiyan et al., 2016; Conejo et al., 2019),, mientras que cuando se llevan a cabo estudios del tiempo de mezclado usando modelos físicos de la olla (Chattopadhyay et al., 2009; Amaro-Villeda et al., 2012; Haiyan et al., 2016; Liu et al., 2017; Conejo et al., 2019), las limitaciones de las técnicas intrusivas utilizadas tradicionalmente, como pH-metría o conductimetría, solo arrojan poca información de la fluidodinámica de la olla. Sin embargo, existen técnicas experimentales no intrusivas que pueden ayudar a comprender que es lo que sucede durante la dispersión de solutos dentro de la olla. Por ejemplo, la Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) permite observar visualmente la dispersión de un trazador en un plano completo de un modelo físico de la olla, y con ello calcular tiempos de mezclado en todo un plano del sistema, además de permitir obtener contornos de concentración instantánea para analizar el mezclado en la misma, y que recientemente se ha implementado exitosamente para estudiar modelos físicos de ollas agitadas por gas (Jardon Perez et al., 2018; Jardon Perez et al., 2019a; Jardon Perez et al., 2019b; Thaker et al., 2020). Por otro lado, la Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) se puede usar para medir la fluidodinámica experimental de un modelo físico, permitiendo obtener mapas con la velocidad y turbulencia en un plano completo del sistema. En conjunto, ambas técnicas permiten obtener de una forma sistemática, no intrusiva y con una similitud rigurosa al sistema industrial, como se comparten los distintos mecanismos de mezclado dentro de la olla.

En este trabajo emplean las técnicas PIV y PLIF para estudiar el efecto de la posición de los tapones y el modo de inyección de gas sobre el mezclado de un reactor de refinación secundaria. El estudio se llevó a cabo utilizando un modelo físico de una olla de aceración, con dos tapones colocados a  $0.8R$ . Los dos ángulos de separación considerados son  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , mientras que los modos de inyección de gas considerados fueron 50/50 (flujo igualado) y 75/25 (flujo diferenciado). Los resultados incluyen el cálculo de los tiempos de mezclado, los contornos de concentración instantánea usando la técnica PLIF y los patrones de flujo obtenidos usando la técnica PIV. Se demostró que el uso de inyección diferenciada disminuye los tiempos de mezclado ya que promueve que existan menos zonas muertas dentro de la olla.

### Procedimiento Experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un modelo físico cilíndrico hecho de acrílico, con un radio interior ( $R$ ) de 0.093 m y una altura de 0.214 m, este modelo a escala 1/17 representa un horno olla de 200 toneladas. Se utilizó agua a temperatura ambiente como un material similar al acero ya que su viscosidad cinemática es muy cercana a la del acero a  $1600^\circ\text{C}$ . La escoria se simulo usando aceite de motor por representarla de manera adecuada sin emulsionarse (Liu et al., 2017). El recipiente cilíndrico se llenó de agua destilada hasta una altura del baño ( $H_b$ ) de 0.17 m. Se añadió aceite de motor suficiente para formar una capa del 5% de la altura total del líquido en el modelo, simulando el espesor de la escoria ( $H_s$ ). Para evitar las aberraciones ópticas, el cilindro está inmerso en una caja de acrílico que se llena con agua suficiente para rebasar el nivel de agua del cilindro interior. Este paso es importante para una correcta medición con las técnicas PIV y PLIF. La inyección de argón, usada en el proceso a escala industrial, fue sustituida por inyección de aire en el modelo físico. Los dos puntos de inyección fueron colocados a  $0.8R$ , que es la posición optima reportada por Jardón-Pérez et al. (2018). El primer tapón está colocado en un plano que cruza el centro del modelo de acrílico y es paralelo a una de las caras de la caja de acrílico, como se ve en la Figura N° 1. El segundo tapón tiene un ángulo de separación con respecto al primero de  $90^\circ$  o  $180^\circ$ , que son los dos ángulos utilizados en este trabajo. El flujo de gas utilizado es de  $1.54 \text{ L min}^{-1}$ , que satisface el criterio de similitud dinámica reportado por Jardón-Pérez et al. (2019a). El flujo de gas total es inyectado en los dos modos de inyección, igualado y diferenciado. Cuando se usa el modo igualado, el flujo de gas se divide en una proporción 50/50 en cada punto de inyección, mientras que, para el flujo

diferenciado, la proporción es de 75/25, el tapón con mayor cantidad de flujo es el tapón 1. El flujo de gas inyectado se controló usando un flujómetro ColeParmer® conectado a un compresor neumático marca Powermate®.

Para obtener los patrones de flujo se usó la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV). Se seleccionaron dos planos de medición para poder observar las interacciones entre las plumas cuando se cambia el ángulo entre los tapones, los cuales se muestran en la Figura N° 1. Al agua del modelo se le agregaron esferas de poliamida de  $5 \mu\text{m}$  como partículas trazadoras. Se utilizó como fuente laser el sistema Litron® modelo LDY302. Este modelo produce un plano láser de color verde de 5 mm de espesor, con una longitud de onda de 532 nm, energía de pulso de 15 mJ y una frecuencia de 150 ns. El láser se operó al 45% de su poder total (1800 W). Para capturar el movimiento de las partículas trazadoras, se colocó a  $90^\circ$  del plano de medición una cámara de alta velocidad SpeedSense® M320. La cámara de alta velocidad y el control de la fuente laser se conectaron a un sincronizador a fin de que el pulso laser y la imagen capturada sean sincrónas. Una computadora con el software DynamicStudio® 2015b se utilizó para realizar las mediciones. La computadora está conectada al sincronizador para capturar las imágenes con una frecuencia de 450 Hz. Para obtener mediciones precisas, se capturaron y procesaron 1351 imágenes en cada experimento.

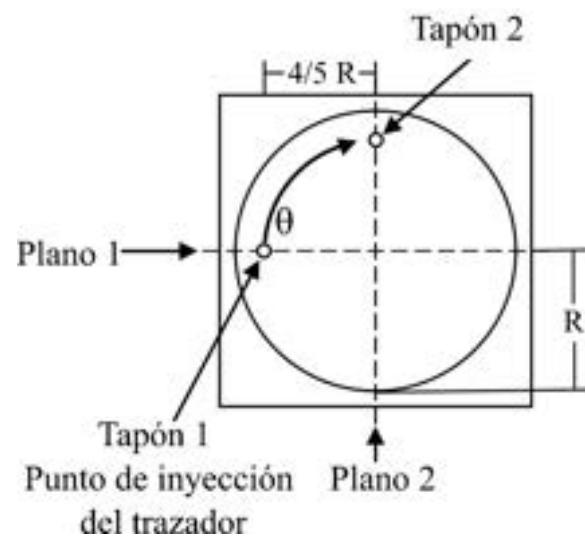


Figura N° 1. Vista superior de los planos de medición usados para obtener los vectores de velocidad con la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y los contornos de concentración con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF).

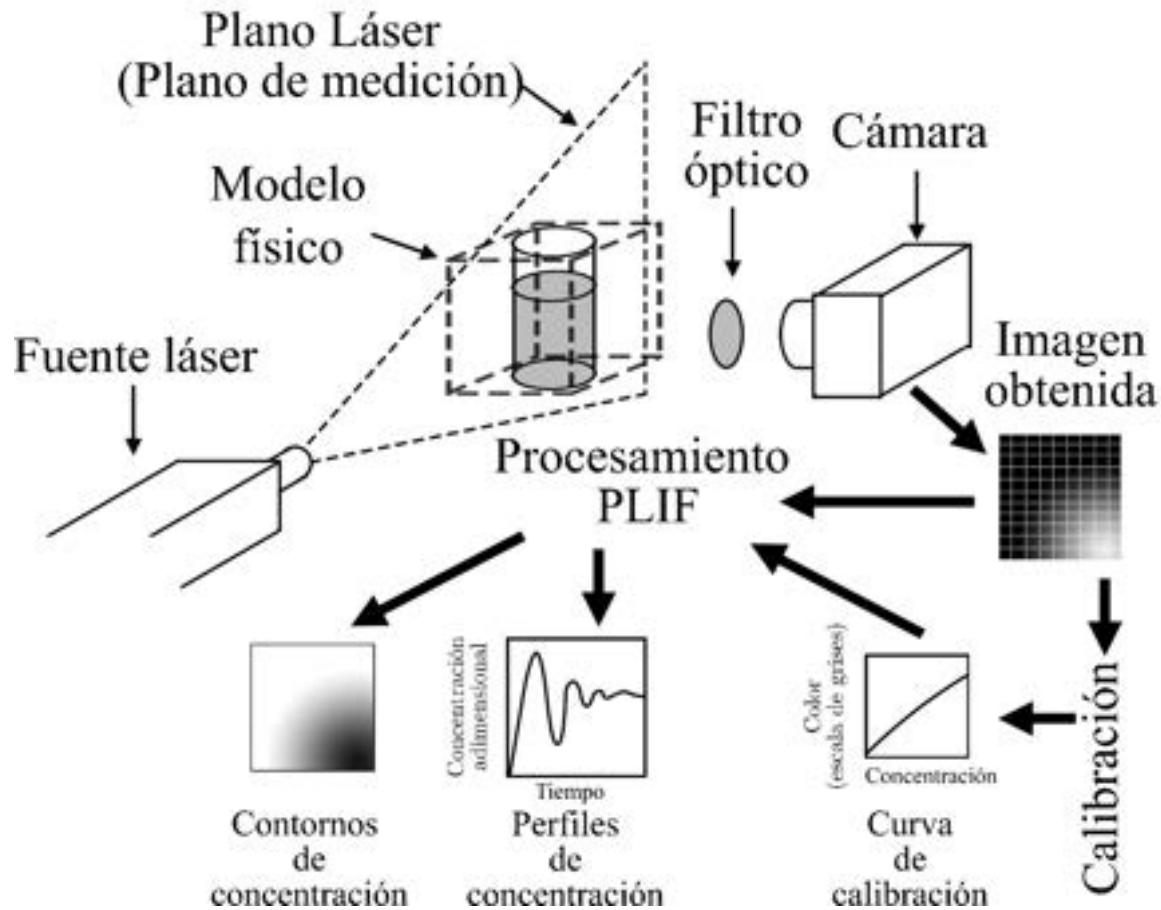


Figura N° 2. Esquema del procedimiento típico para obtener mediciones usando la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF).

La técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) no es tan conocida y aplicada como la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV), algunas publicaciones en donde se usa para medir tiempos de mezclado dentro de reactores metalúrgicos se pueden encontrar en Ascanio (2015) y Jardón-Pérez *et al.* (2019a). La Figura N° 2 muestra un esquema de cómo se realiza comúnmente una medición de tiempo de mezclado usando la técnica PLIF. Como trazador se emplean sustancias fluorescentes, aprovechando la emisión de luz de estas al ser iluminadas con una hoja de luz láser. La cámara para capturar la fluorescencia del trazador tiene un filtro de banda estrecha que permite que solo capture la longitud de onda emitida por el trazador. La luz total capturada por la cámara depende de muchos factores, pero en condiciones controladas se puede hacer que el cambio solo dependa de la concentración del trazador fluorescente, por lo cual se necesita hacer una calibración antes de realizar las mediciones. El objetivo de la calibración es conocer la relación entre la concentración del trazador y la señal (en escala de grises) capturada por la cámara. El procedimiento de calibración consiste en adquirir imágenes a una concentración conocida y homogénea dentro del sistema y medir el color capturado por la cámara a las diferentes concentraciones, obteniendo la curva de calibración en escala de grises contra concentración. Una vez calibrado el sistema para la medición, se puede realizar el experimento para obtener los tiempos de mezclado. Se inyecta el trazador dentro del modelo y los cambios en la concentración se miden hasta que se alcanza una concentración de equilibrio. Al contrario de utilizar técnicas como la conductimetría o pH-metría, la técnica PLIF permite medir la concentración instantánea.

La técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) no es tan conocida y aplicada como la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV), algunas publicaciones en donde se usa para medir tiempos de mezclado dentro de reactores metalúrgicos se pueden encontrar en Ascanio (2015) y Jardón-Pérez *et al.* (2019a). La Figura N° 2 muestra un esquema de cómo se realiza comúnmente una medición de tiempo de mezclado usando la técnica PLIF. Como trazador se emplean sustancias fluorescentes, aprovechando la emisión de luz de estas al ser iluminadas con una hoja de luz láser. La cámara para capturar la fluorescencia del trazador tiene un filtro de banda estrecha que permite que solo capture la longitud de onda emitida por el trazador. La luz total capturada por la cámara depende de muchos factores, pero en condiciones controladas se puede hacer que el cambio solo dependa de la concentración del trazador fluorescente, por lo cual se necesita hacer una calibración antes de realizar las mediciones. El objetivo de la calibración es conocer la relación entre la concentración del trazador y la señal (en escala de grises) capturada por la cámara. El procedimiento de calibración consiste en adquirir imágenes a una concentración conocida y homogénea dentro del sistema y medir el color capturado por la cámara a las diferentes concentraciones, obteniendo la curva de calibración en escala de grises contra concentración. Una vez calibrado el sistema para la medición, se puede realizar el experimento para obtener los tiempos de mezclado. Se inyecta el trazador dentro del modelo y los cambios en la concentración se miden hasta que se alcanza una concentración de equilibrio. Al contrario de utilizar técnicas como la conductimetría o pH-metría, la técnica PLIF permite medir la concentración instantánea.

tánea en todo el plano iluminado por el láser, obteniendo no solo el tiempo de mezclado sino como se mezcla el soluto dentro del modelo de la olla, permitiendo observar cómo se mueve el trazador durante la duración del experimento y con el beneficio adicional de no introducir instrumentos de medición que modifican sensiblemente el patrón de flujo. En este trabajo se sigue el procedimiento de Jardón-Pérez *et al.* (2019b), para medir el tiempo de mezclado. Las mediciones de tiempo de mezclado se realizaron en el plano 2 (ver Figura N° 1); debido a la naturaleza óptica de la técnica PLIF, la hoja láser que incide sobre las burbujas de la pluma crea sombras y reflejos que deben ser sustraídos en la medida de lo posible para lograr mediciones confiables (Jardón-Pérez *et al.*, 2019b). Cuando se usaron 90° como ángulo de separación, fue prácticamente imposible evitar los efectos ópticos de la pluma. Sin embargo, se lograron reducir los errores al máximo utilizando el flujo más bajo posible en el tapón 2 y enmascarando la región de la pluma en las imágenes capturadas antes de realizar las mediciones. El colorante fluorescente usado como trazador fue Rodamina 6G. Se realizó una calibración de 20 puntos antes de realizar las mediciones de los tiempos de mezclado. Los puntos de la calibración se realizaron con soluciones de Rodamina 6G con concentraciones que varían de 0 (blanco) hasta las 4.4 partes por mil millones (ppb). Los experimentos de tiempo de mezclado se realizaron añadiendo 3 mL de una solución con una concentración de 1 ppm de Rodamina 6G directamente sobre el tapón 1 y monitoreando los cambios en la concentración por 90 s con una cámara Canon® EOS Rebel T5 con un filtro óptico de 570 nm. Las imágenes de la calibración y los experimentos fueron preprocesadas con un software convertidor de video a imágenes por lote XnConvert y después procesados en MATLAB para obtener los tiempos de mezclado y los contornos de concentración instantánea. Cada experimento se realizó por triplicado.

Considerando los dos ángulos de separación y los dos modos de inyección, se propuso realizar un diseño de experimentos factorial completo de dos niveles con dos factores. Por lo tanto, se realizaron 22 experimentos. La Tabla N° 1 contiene el diseño de experimentos realizado con los valores bajos y altos de cada factor y la nomenclatura utilizada. En todos los casos se midió la fluidodinámica con la técnica PIV y se midió el tiempo de mezclado con la técnica PLIF para las condiciones de operación mostradas en la Tabla N° 1.

## Resultados y Discusión de Resultados

### Patrones de Flujo

La Figura N° 3 muestra los patrones de flujo obtenidos con la técnica PIV en el plano 1 para los cuatro experimentos realizados. El tapón 1, que es el que aporta la mayor cantidad de gas en el modo de inyección diferenciado, está siempre presente. La Figura N° 3a muestra una zona de alta velocidad del lado derecho, que comienza desde el mismo lugar que el punto de inyección de gas. Este movimiento es causado por la boyanteza de las burbujas que cuando ascienden, arrastran el agua que entra en contacto con ellas. Esta región que tiene un flujo mezclado de aire (en forma de burbujas) y agua se le llama pluma. La velocidad de la pluma se incrementa conforme la burbuja acelera debido a la fuerza boyante. Cerca de la superficie superior del modelo, la velocidad disminuye debido a la disipación de energía causada por la presencia de la capa de aceite. La pluma tiene una forma cónica debido a la fuerza de dispersión turbulenta. Una vez que la pluma llega a la superficie superior del modelo, el agua no puede continuar su trayectoria y se desvía lateralmente hacia la superficie del modelo de acrílico formando diferentes estructuras de flujo. La estructura del flujo depende de las fuerzas que afectan su movimiento. En este caso, como el tapón está cerca de la pared, el movimiento de la pluma está restringido por la pared misma, haciendo que el flujo de agua se dirija hacia el centro del modelo. En esta misma Figura N° 3a se puede observar del lado izquierdo la presencia de una zona de recirculación. Esta zona de recirculación tiene forma de un toroide y cubre solo la parte superior izquierda del plano de medición, mientras que el resto del plano son zonas con baja velocidad.

La Figura N° 3b presenta los patrones de flujo para el experimento B en el plano 1. La diferencia entre el experimento A y el B es el modo de inyección. En el plano 1, el experimento B presenta una cantidad mayor de flujo que el experimento A. También se puede observar que el experimento A y B tienen un comportamiento similar en el plano de medición 1. Aun así, el experimento B tiene una mayor velocidad en la pluma y una zona de recirculación más extensa que el experimento A, debido a la mayor cantidad de gas inyectada en tapón 1 del experimento B.

El ángulo de separación es la variable que cambia entre el experimento A y C. Esto se observa en el número de plumas que muestran las mediciones de la técnica PIV en el plano 1. El experimento A solo muestra una pluma, mientras que el experimento C (Figura N° 3c) muestra dos plumas. En el experimento C, la presencia de las dos plumas genera zonas de velocidad alta, una en cada lado del plano 1 y cada pluma genera recirculaciones en lados opuestos de las paredes de acrílico. Dado que la cantidad de gas inyectado en cada tapón es igual en el experimento C, ambas plumas tienen una velocidad similar. Asimismo, las zonas de recirculación de ambas plumas tienen un tamaño y velocidad casi idénticas, creando un patrón de flujo casi-simétrico, con pequeñas y sutiles diferencias, explicadas por la naturaleza caótica de los flujos turbulentos. La única zona de baja velocidad en el experimento C se encuentra debajo de las zonas de recirculación; esta zona de baja velocidad es sensiblemente más pequeña que en el experimento A.

El experimento D (Figura N° 3d) muestra dos plumas en el plano 1, pero al contrario que el experimento C, las plumas no tienen naturaleza simétrica debido a que se usó flujo diferenciado. Para la inyección diferenciada la pluma derecha es la correspondiente al tapón 1 y la pluma izquierda corresponde al tapón 2. La pluma derecha es más grande ya que es en donde se está inyectando la mayor cantidad de gas. Al ser más grande esta pluma, arrastra un poco la porción superior de la pluma izquierda, separándola un poco de la pared de acrílico. Aunque los patrones de flujo del experimento D no son simétricos, las zonas de baja velocidad tienen una extensión similar a las que muestra en experimento C, pero con una distribución diferente, siendo desplazadas ligeramente al lado izquierdo del plano de medición.

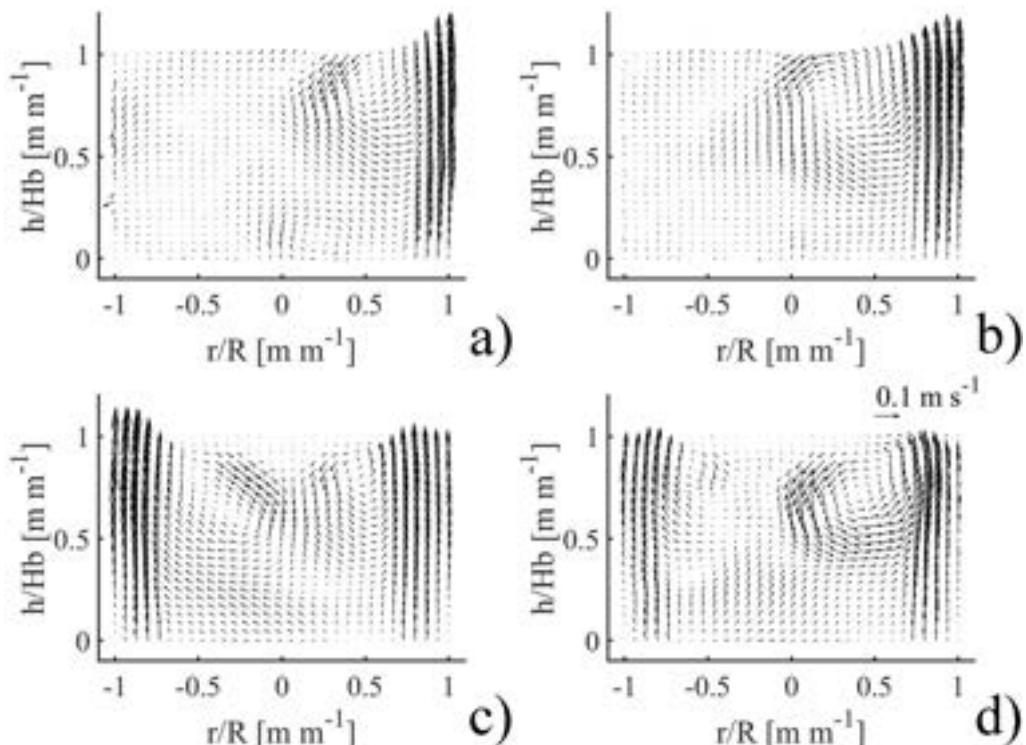


Figura N° 3. Patrones de flujo obtenidos con la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en el plano 1, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Para entender mejor la interacción entre ambas plumas en los diferentes experimentos, se obtuvieron patrones de flujo en un segundo plano de medición (plano 2 en la Figura N° 1). La Figura N° 4 muestra los patrones de flujo obtenidos para los cuatro experimentos de la Tabla N° 1.

El experimento A muestra el mismo comportamiento que en el plano de medición 1 (Figura N° 3a) en el plano de medición 2 (Figura N° 4a) ya que se usa el modo de inyección igualado. Ambas plumas ascienden y generan un flujo radial de agua en la superficie hasta que chocan entre ellas. Esta colisión genera un flujo que desciende y se reincorpora a la pluma original, generando toroides en ambas plumas. Esta interacción entre las plumas es la razón por la cual la zona de recirculación solo cubre la esquina superior izquierda en ambos planos de medición. Dado que ambos tapones tienen el mismo flujo de gas, ambas plumas chocan con la misma fuerza y se abaten mutuamente. Esta colisión disipa la energía de ambas plumas y por lo tanto hay un gran volumen de agua que tiene poco movimiento.

En el plano 2 no está presente ningún punto de inyección en el experimento C (Figura N° 4c), por lo cual los patrones de flujo obtenidos muestran velocidades más bajas que las mostradas en el plano 1 (Figura N° 3c) para el mismo experimento. La mitad superior del plano 2 muestra un movimiento descendente que corresponde al movimiento de las corrientes de recirculación reincorporándose a las plumas del plano 1. La región inferior del modelo muestra las dos regiones de recirculación en ambos lados del modelo, así como zonas de baja velocidad cerca de las esquinas del plano de medición.

Considerando los patrones de flujo para los experimentos A y C en ambos planos, el uso de un ángulo de separación de  $180^\circ$  entre los tapones muestra zonas muertas a una altura menor que para los experimentos con un ángulo de separación de  $90^\circ$  cuando se usa el modo de inyección igualado.

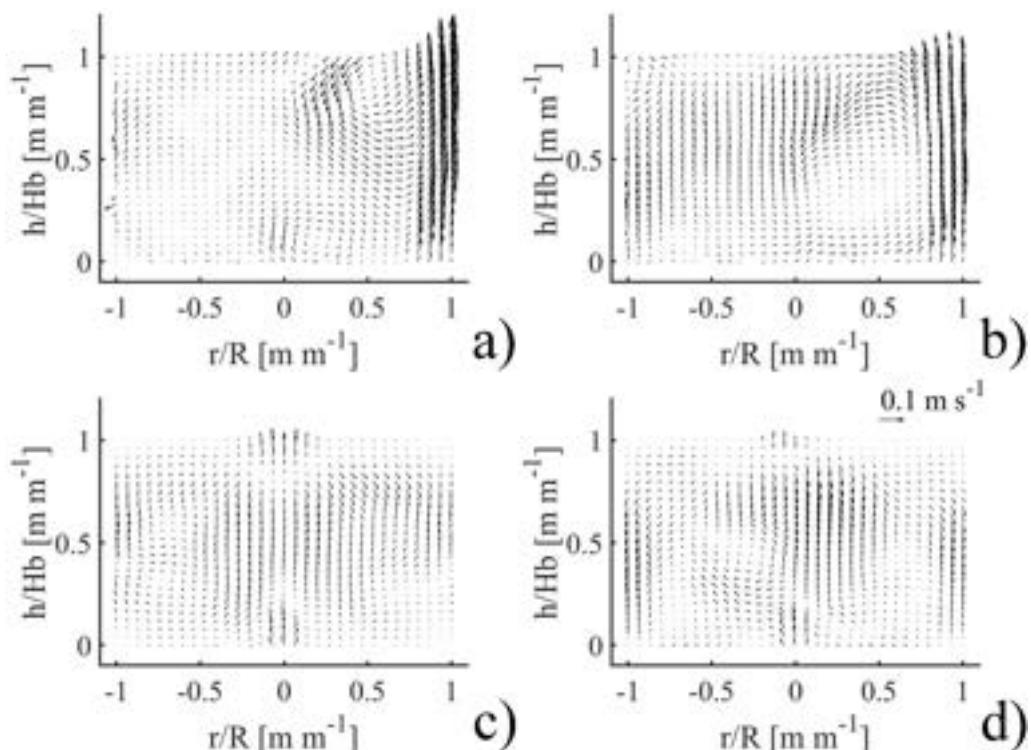


Figura N°4. Patrones de flujo obtenidos con la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) en el plano 2, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Cuando se usa el modo de inyección diferenciado, las mediciones en el plano 2 muestra un comportamiento radicalmente diferente comparado con el patrón obtenido a cuando se usa la inyección igualada. La magnitud de la velocidad en la región de la pluma disminuye cuando se usa inyección diferenciada y las recirculaciones tienen una distribución diferente sobre el plano. En el experimento B (Figura N° 4b) la recirculación cubre casi toda la extensión del plano 2. Solo hay zonas de baja velocidad cerca de la esquina superior y la esquina inferior izquierda. Considerando los patrones de flujo de ambos planos de medición, cuando se usa inyección diferenciada con tapones separados 90°, muy poco volumen de agua presenta poca velocidad cuando se comparan contra inyección igualada. Esto significa que cuando se usa flujo de gas diferente en cada tapón, la colisión entre las plumas no disipa tanta energía como en el caso donde sale la misma cantidad de gas de cada tapón, por lo que en lugar de abatirse mutuamente, se redireccionan ambas plumas.

El experimento D (Figura N° 4d) y el experimento C (Figura N° 4c) muestran patrones de flujo similares en el plano 2, sin embargo, el experimento D muestra velocidades mayores. Esto se debe a que en el modo de inyección diferenciado se modifica la posición y la magnitud de la recirculaciones de ambas plumas, por lo que el plano 2 presenta una mayor velocidad descendente dado que la recirculación más grande tiene mayor velocidad para reincorporarse a la pluma correspondiente.

### Tiempo de mezclado

La Figura N° 5 muestra la evolución de la concentración adimensional del trazador en el tiempo para cada experimento. Todas las curvas fueron obtenidas usando la técnica PLIF en el plano 2. Las curvas de la Figura N° 5 presentan un comportamiento similar a las curvas obtenidas con las técnicas tradicionales de pH-metría y conductimetría en estudios similares (Amaro-Villeda et al., 2012). Justo después de la inyección del trazador al tiempo cero, hay un súbito incremento de la concentración, seguido de oscilaciones alrededor de la concentración de equilibrio hasta que los cambios en la concentración son mínimos y se alcanza la concentración de equilibrio  $\pm 5\%$ . Con las técnicas usuales para obtener los tiempos de mezclado la información del mezclado está limitado a solo un punto dentro del sistema, por el contrario, la técnica PLIF considera todo un plano dentro del sistema, por lo que la información obtenida es representativa de los fenómenos de mezclado dentro del modelo físico. Además, debido a que no es necesario un sensor dentro del sistema, no modifica la fluidodinámica y el comportamiento del trazador durante el mezclado. Estas características justifican el mayor costo, de tiempo y dinero, en comparación a técnicas tradicionales usando sensores para medir el tiempo de mezclado (Jardón-Pérez et al., 2019b).

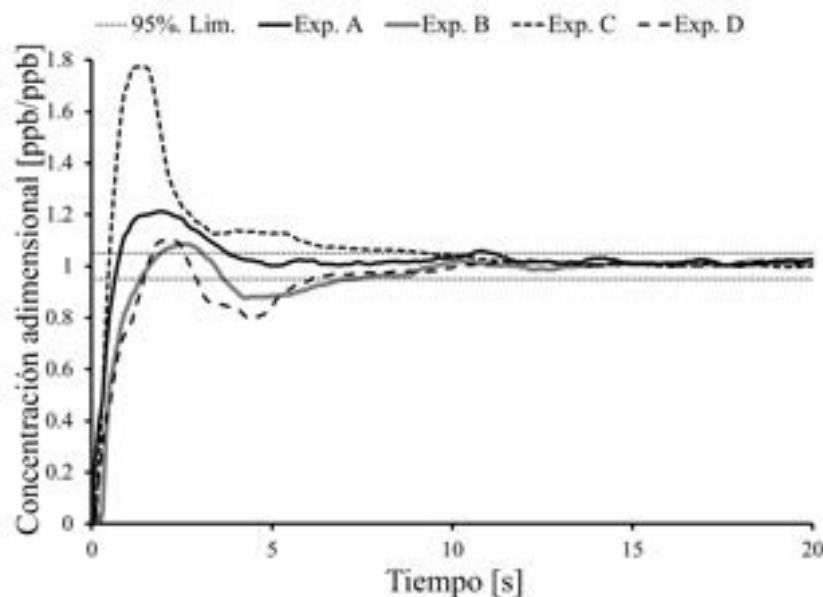


Figura N° 5. Curvas de evolución de la concentración (adimensional) obtenidas con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF). Los cambios en la concentración fueron medidos en el plano 2, para los experimentos: a) A, b) B, c) C, y d) D.

Además de las curvas de concentración contra el tiempo, la técnica PLIF permite obtener contornos de concentración instantánea. Una serie de estos contornos se presenta en la Figura N° 6, donde se presentan los mapas de concentración a tiempos seleccionados de una de las réplicas del experimento B. En dicho experimento se usa una separación de 90° entre los tapones y el modo de inyección diferenciada. Los contornos de concentración se midieron en el plano 2, mientras que la adición del trazador se realizó perpendicular al plano justo sobre el tapón 1, que se encuentra detrás del plano mencionado. Considerando la curva del experimento B en la Figura N° 5 y los contornos de la Figura N° 6, podemos relacionar las oscilaciones en la curva del tiempo de mezclado con la evolución de la concentración del trazador en los contornos observados, que aunado a los patrones de flujo medidos con PIV nos permite conocer la trayectoria y dispersión del trazador dentro del modelo físico.

La Figura N° 6a muestra una concentración homogénea en todo el plano, esta concentración es casi cero ppb. La Figura N° 6b tiene una zona con alta concentración cerca de la superficie del modelo, que

corresponde a la adición del trazador. Esta zona de alta concentración se dispersa a la izquierda del plano de medición, ya que el trazador sigue el patrón de flujo presentado en la Figura N° 3b; el trazador se inyecta cerca de la superficie justo sobre el tapón 1 y también es empujado hacia la izquierda por la inyección de gas visible en el plano 2, siguiendo ahora el patrón de flujo de la Figura N° 4b. La Figura N° 6c presenta un incremento del tamaño del área de alta concentración, cerca de la región superior derecha del plano. El trazador se comporta como una nube de alta concentración que sigue el patrón de flujo descrito previamente. Después de dos segundos a partir de la inyección, el trazador se sigue moviendo como una nube de alta concentración, pero comienza a dispersarse lateralmente debido a la turbulencia como se puede ver en la Figura N° 6d. Después de tres segundos, Figura N° 6e, la nube de alta concentración comienza a dispersarse conforme sigue el patrón de flujo de la Figura N° 4b, pero también se observa que la concentración promedio de la nube baja, ya que se va incorporando al flujo recirculatorio mostrado en la Figura N° 3b, que está detrás del plano de medición. La Figura N° 6f muestra una concentración más homogénea en todo el plano de

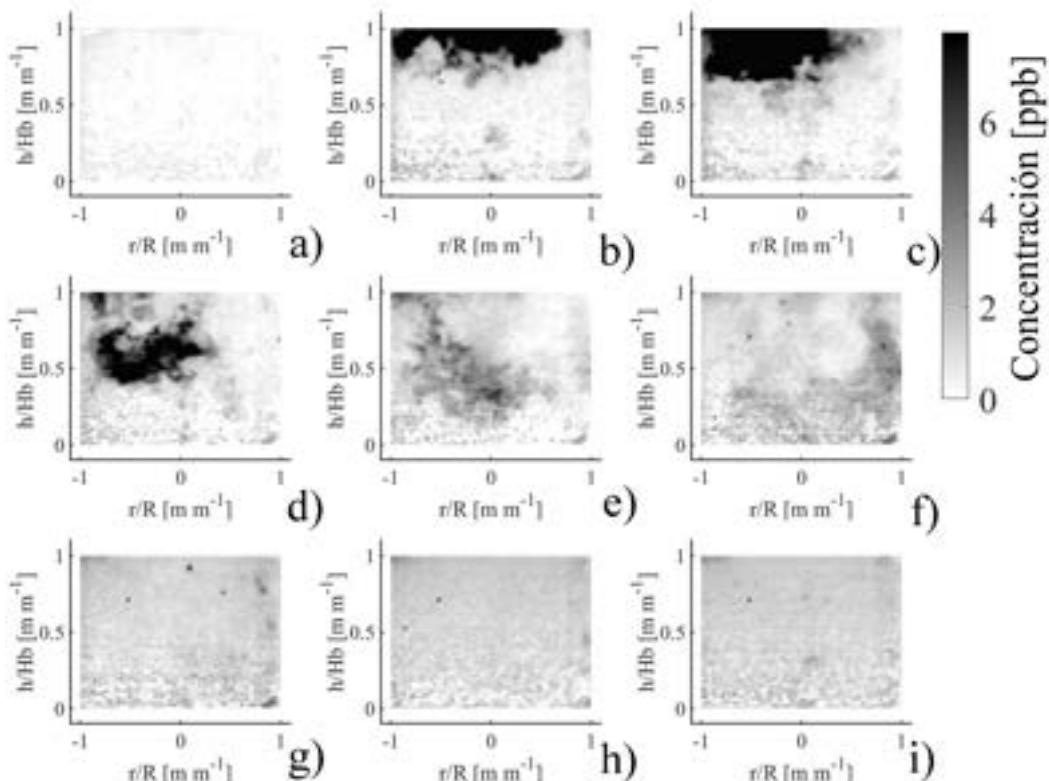


Figura N° 6. Contornos de concentración instantánea del experimento B, obtenidos con la técnica de Fluorescencia Planar Inducida por Láser (PLIF) en el plano 2. Los contornos presentados fueron medidos a los tiempos: a) 0.0 s, b) 0.5 s, c) 1.0 s, d) 2.0 s, e) 3.0 s, f) 5.0 s, g) 7.0 s, h) 9.0 s, and i) 15.0 s.

medición. La esquina superior derecha del plano parece tener una concentración más alta ya que el trazador continua la trayectoria del patrón de flujo descrito anteriormente. Siete segundos después de la inyección del trazador, Figura N° 6g, el plano de medición parece tener una concentración homogénea casi completa. La Figura N° 6h muestra que la concentración es homogénea en todo el plano después de 9 segundos, esta concentración permanece prácticamente sin cambios seis segundos después, como se muestra en la Figura N° 6.

Comparando la Figura N° 6 con la evolución de la concentración adimensional del experimento B en la Figura N° 5, la concentración se incrementa súbitamente cuando se inyecta el trazador, disminuyendo poco después a causa del flujo de recirculante presente en el plano 1, y finalmente la concentración se incrementa hasta alcanzar la concentración de equilibrio en el plano 2.

Este mismo análisis puede realizarse a los demás experimentos que se muestran en la Tabla N° 1. Se puede estudiar a mayor profundidad el mezclado si se consideran los contornos de turbulencia medidos con la técnica PIV.

La Tabla N° 1 muestra los tiempos de mezclado obtenidos para los cuatro experimentos realizados. El tiempo de mezclado fue medido usando el criterio de 95% de la concentración de equilibrio, como se puede ver en la Figura N° 5. La desviación estándar fue de menos de 12% para todos los experimentos. Cuando se usa el modo de inyección igualada y un ángulo de separación de 180° se obtiene un tiempo de mezclado casi un segundo menor a cuando se usa una separación de 90°, lo cual es consistente con

trabajos previamente publicados (Amaro-Villeda et al., 2012; Liu et al., 2017; Liu et al., 2019). Este pequeño decremento se puede explicar considerando que el experimento A tiene zonas de baja velocidad más extensas que el experimento C (Figura N° 3 y Figura N° 4, respectivamente). Por otra parte, cuando se usa inyección diferenciada el tiempo de mezclado para la separación entre tapones de 90° (Experimento B) es casi el mismo que cuando se usa una separación de 180° (Experimento D), mostrando en ambos casos que el tiempo de mezclado disminuye ya que las zonas de baja velocidad son reducidas. La poca extensión de las zonas de baja velocidad en los experimentos B y D son provocadas por las complejas interacciones entre las plumas de diferente flujo de gas. Usando el modo de inyección diferenciado, el tiempo de mezclado disminuye 3.8 s para una separación de 90°. En el mismo modo usando una separación de 180°, el tiempo de mezclado disminuye 2.9 s. El experimento B es que logra disminuir en mayor medida el tiempo de mezclado ya que es el caso con zonas de baja velocidad más reducidas.

Considerando la disminución de los tiempos de mezclado y los cambios en la fluidodinámica de cada sistema, el modo de inyección diferenciada es recomendado para las condiciones de operación revisadas en este trabajo. Se puede realizar un estudio más completo considerando las condiciones de operación ya estudiadas por otros autores (Chattopadhyay et al., 2009; Liu et al., 2011; Haiyan et al., 2016; Conejo et al., 2019). El uso combinado de las técnicas PIV y PLIF ayuda a explicar y aclarar el efecto de los diferentes diseños y variables de operación en ollas agitadas por gas ya que puede obtenerse el comportamiento del flujo y el mezclado al mismo tiempo.

		Experimento			
		A	B	C	D
<b>Angulo de separación, <math>\theta</math> (°)</b>		90	90	180	180
<b>Proporción de flujo, Ra (%/%)</b>		50/50	75/25	50/50	75/25
<b>Tiempo de mezclado, <math>\tau_{mix}</math> (s)</b>		0,54	0,0028	0,192	0,145
<b>Desviación estándar</b>	<b>(s)</b>	1.3	0.8	1.0	0.6
	<b>(%)</b>	11.8	11.0	10.3	8.7

Tabla N° 1. Matriz del diseño de experimentos y tiempos de mezclado medidos en el plano 2 (ver Figura N° 1) para cada experimento realizado.

## Conclusiones

El uso de flujo diferenciado en modelos de horno olla con inyección dual representa una mejora en el desempeño del reactor, ya que cuando se colocan los tapones a 0.8R y 90° de separación, se reduce el tiempo de mezclado a un mínimo de 7.1 s ( $\pm 0.8$  s). Esto se debe a que disminuye la extensión de las zonas de baja velocidad (zonas muertas) dentro del modelo. Cuando se comparan los modos de inyección igualado y diferenciado, los tiempos de mezclado con la posición de los tapones a 90° disminuyen 3.8 s.

El uso de la técnica PIV junto con la técnica PLIF es una herramienta útil para estudiar y analizar a profundidad el efecto del diseño y variables de operación en ollas agitadas por gas. La posibilidad de obtener los patrones de flujo, el tiempo de mezclado y los contornos de concentración instantánea permite comprender el comportamiento de los mecanismos de mezclado que gobiernan la olla. Estas técnicas tienen la ventaja de ser no intrusivas y pueden obtener todo un plano de medición, en vez de mediciones puntuales. Estas mejoras justifican su mayor costo en comparación con técnicas de visualización de flujos tradicionales.

## Agradecimientos

R. Villarreal-Medina agradece a CONAHCYT por recibir una beca doctoral (Número de CVU 1002868). L. E. Jardón-Pérez agradece a CONAHCYT por recibir una beca postdoctoral CVU (Número de CVU 624968).

## Referencias

- Amaro-Villeda AM, Conejo A, Ramírez-Argáez MA. 2012. Effect of slag on mixing time in gas-stirred ladles assisted with a physical model. *MRS Proc* 1485: 101-106.
- Ascanio G. 2015. Mixing time in stirred vessels: A review of experimental techniques. *Chin J Chem Eng* 23: 1065-1076.
- Chattopadhyay K, SenGupta A, Ajmani SK, Lenka SN, Singh V. 2009. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle: a water model study. *Iron-mak Steelmak* 36: 537-542.
- Conejo AN, Mishra R, Mazumdar D. 2019. Effects of nozzle radial position, separation angle, and gas flow partitioning on the mixing, eye area, and wall shear stress in ladles fitted with dual plugs. *Metall Mater Trans B* 50: 1490-1502.
- Haiyan T, Xiaochen G, Guanghui W, Yong W. 2016. Effect of gas blown modes on mixing phenomena in a bottom stirring ladle with dual plugs. *ISIJ Int* 56: 2161-2170.
- Jardón Pérez LE, Amaro-Villeda A, Conejo AN, González-Rivera C, Ramírez-Argáez MA. 2018. Optimizing gas stirred ladles by physical modeling and PIV measurements. *Mater Manuf Process* 33: 882-890.
- Jardón-Pérez LE, González-Morales DR, Trápaga G, González-Rivera C, Ramírez-Argáez MA. 2019a. Effect of differentiated injection ratio, gas flow rate, and slag thickness on mixing time and open eye area in gas-stirred ladle assisted by physical modeling. *Metals* 9: 555.
- Jardón-Pérez LE, Amaro-Villeda A, González-Rivera C, Trápaga G, Conejo AN, Ramírez-Argáez MA. 2019b. Introducing the planar laser-induced fluorescence technique (PLIF) to measure mixing time in gas-stirred ladles. *Metall Mater Trans B* 50: 2121-2133.
- Liu H, Qi Z, Xu M. 2011. Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual plugs. *Steel Res Int* 82: 440-458.
- Liu Z, Li L, Li B. 2017. Modeling of gas-steel-slag three-phase flow in ladle metallurgy: Part I. Physical Modeling. *ISIJ Int* 57: 1971-1979.
- Liu Y, Ersson M, Liu H, Jönsson PG, Gan Y. 2019. A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy. *Metall Mater Trans B* 50: 555-577.
- Thaker AH, Bhujbal SV, Buwa VV. 2020. Effects of sloshing gas-liquid interface on dynamics of meandering bubble plumes and mixing in a shallow vessel: PIV and PLIF measurements. *Chem Eng J* 386: 122036.



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERÍA**  
**METALÚRGICA**



Artículo de Investigación

# Explorando la transformación martensítica en el sistema Cu-Al

## Exploring the martensitic transformation in the Cu-Al system

### RESUMEN

La transformación martensítica en el sistema Cu-Al ha sido estudiada principalmente en el contexto de aleaciones con memoria de forma, donde su capacidad para recuperar la forma original tras la deformación tiene aplicaciones en actuadores y dispositivos médicos. Las aleaciones de Cu-Al, con un contenido de aluminio entre 9% y 14%, experimentan un cambio de microestructura al enfriarse rápidamente desde la fase  $\beta$  de alta temperatura. En ciertos casos, como en composiciones eutectoides, se ha reportado que, para algunos tratamientos térmicos, la perlita en este sistema presenta mayor dureza que la martensita, lo que abre una interesante vía para futuros estudios. Continuar investigando la determinación precisa de la temperatura  $Ms$  y/o  $As$ , junto con la energía libre asociada a esta transformación, permitiría predecir mejor el comportamiento de las aleaciones Cu-Al y expandir su aplicación en diversos campos más allá de las aleaciones con memoria de forma.

**Palabras clave:** Transformación martensítica;  $Ms$ ; Cu-Al; Memoria de forma

### ABSTRACT

The martensitic transformation in the Cu-Al system has been studied primarily in the context of shape memory alloys, where its ability to recover its original shape after deformation finds applications in actuators and medical devices. Cu-Al alloys, with an aluminum content between 9% and 14%, undergo a microstructural change when rapidly cooled from the high-temperature  $\beta$  phase. In certain cases, such as eutectoid compositions, it has been reported that, for some heat treatments, pearlite in this system exhibits greater hardness than martensite, opening an interesting avenue for further studies. Continuing to investigate the precise determination of the  $Ms$  and/or  $As$  temperature, along with the free energy associated with this transformation, would allow for better prediction of Cu-Al alloy behavior and expand their application in various fields beyond shape memory alloys.

**Keywords:** Martensitic transformation;  $Ms$ ; Cu-Al; Shape memory.

### Autor de Correspondencia

**Luciano Figueroa Maturana**  
oscar.bustos@usach.cl  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

**Luciano Figueroa Maturana**  
**Oscar Bustos Castillo**  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 2 de agosto, 2024  
Artículo Aceptado: 10 de octubre, 2024  
Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



## Introducción

Las aleaciones de cobre y aluminio (Cu-Al) se han convertido en un campo de estudio esencial dentro de la ciencia e ingeniería de materiales debido a su combinación de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y capacidad para experimentar transformaciones de fase que pueden ser provechosas en aplicaciones avanzadas. Estas aleaciones, suelen contener un porcentaje en peso de 6% a 14% de aluminio, donde destacan las composiciones con un porcentaje entre 8% a 11%, que son especialmente valoradas por sus aplicaciones en componentes estructurales y marinos.

Dentro de las transformaciones de fase que se presentan en este sistema, la transformación martensítica es de gran interés. Esta ocurre en aleaciones con un contenido de aluminio entre 9% y 14% y se caracteriza por un cambio en la microestructura cuando la aleación es enfriada rápidamente desde la fase beta de alta temperatura. Este proceso da lugar a una microestructura que tiene la capacidad de recuperar su forma original después de una deformación, un fenómeno conocido como efecto memoria de forma.

El efecto memoria de forma es un comportamiento en el cual una aleación, tras haber sido deformada, puede volver a su configuración original al ser calentada por encima de una cierta temperatura. Este fenómeno es aprovechado en una amplia gama de aplicaciones, particularmente en la fabricación de actuadores y sensores, donde la precisión y la capacidad de recuperación son críticas. A su vez, las aleaciones Cu-Al con memoria de forma han encontrado aplicaciones en el campo médico, como en la fabricación de stents, donde la capacidad de expansión controlada dentro del cuerpo humano es esencial.

### Sobre las aleaciones Cobre-Aluminio

En términos generales, el diagrama de fases Cu-Al como se muestra en la Figura N° 1 es similar al del sistema Cu-Zn. Existe cierto porcentaje de solubilidad de Al en Cu y varios compuestos intermetálicos que se forman a mayores contenidos de aluminio, algunos de los cuales tienen la misma estructura cristalina y

estequiométría que los del sistema Cu-Zn. Sin embargo, hay una diferencia significativa en el tamaño atómico, por lo que el efecto endurecedor producto de la distorsión de la red cristalina por parte del aluminio es mayor. Comúnmente hay dos aleaciones comerciales de Cu-Al (5% y 8%Al) que son soluciones sólidas, cuyos tratamientos térmicos solo implican la homogenización convencional de la estructura fundida y el recocido de la estructura trabajada en frío. Cabe destacar que las aleaciones con contenidos de aluminio por encima del 8% están sujetas a la formación de  $\beta$  a alta temperatura, que al enfriarse lentamente da paso a una reacción eutectoide, formándose  $\alpha$  y  $\gamma_2$  (Figura N° 2); esto es lo que ocurre en aleaciones comerciales específicas, cuyas composiciones permiten la presencia de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma_2$  (Brooks, 1982).

La fase  $\alpha$  es FCC, la fase  $\beta$  es BCC, al igual que la fase  $\beta$  en el sistema Cu-Zn, y las fases designadas con  $\gamma$  tienen una estructura BCC compleja, similar a la del latón- $\gamma$ . La composición eutectoide es de 11.8% de Al, y al enfriar lentamente una aleación de esta composición, después de la homogenización en la región  $\beta$ , se forman las fases  $\alpha$  y  $\gamma_2$  con un crecimiento cooperativo, como ocurre con la reacción eutectoide en el sistema Fe-C, donde se forma perlita. Este término también se utiliza para describir la estructura eutectoide del sistema Cu-Al.

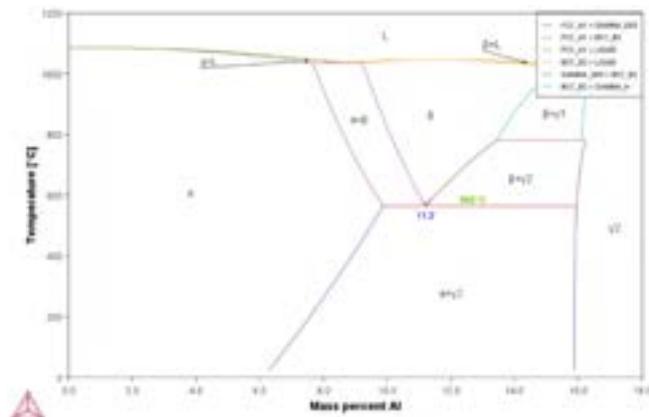


Figura N° 1. Diagrama de fases Cu-Al

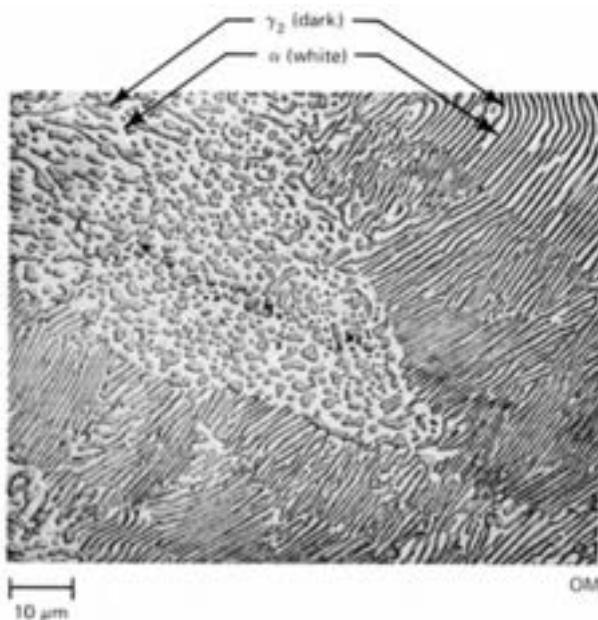


Figura N° 2. Microestructura de una aleación Cu-11.8%Al, homogenizada a 800°C durante 2 horas, luego enfriada lentamente en el horno. La estructura es perlita, compuesta de láminas alternas de  $\alpha$  y  $\gamma_2$

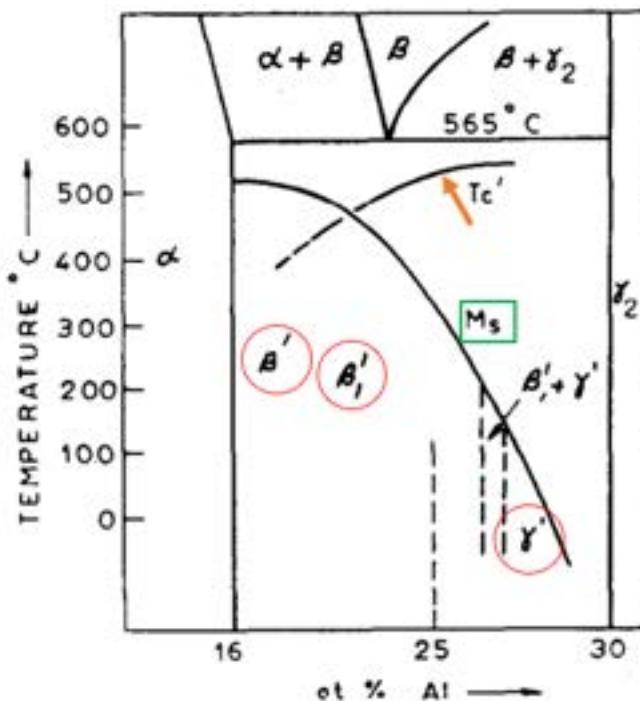


Figura N° 3. Porción del diagrama de fases Cu-Al, donde se destaca la Ms, Tc' y los tipos de martensita

### Transformación martensítica en el sistema Cu-Al

La transformación martensítica en este sistema ocurre cuando la fase  $\beta$  de alta temperatura se enfriá rápidamente, dando paso a una estructura de no equilibrio, que al igual que en sistema Fe-C recibe el nombre de martensita, aunque en este último participan átomos intersiticiales, en el sistema Cu-Al solo lo hacen átomos sustitucionales.

El efecto que conlleva esta transformación sobre las propiedades mecánicas es similar a lo que ocurre en los aceros, pero en menor proporción (Popplewell y Crane, 1971). Dicho efecto estará determinado por la cantidad de aluminio que contenga la aleación, que varía entre 9% a 14%Al (Kwarciak, 1986) y según esto, se tendrá martensita con diferentes morfologías, puesto que su estructura cristalina va variando, presentándose  $\beta'$  (tetragonal),  $\beta_1'$  (tetragonal ordenada) y  $\gamma'$  (ortorrómbica compleja), como se puede ver en la Figura N° 3 (Kulkarnit, 1973).

El término referente a estructura cristalina ordenada viene de la transición orden-desorden  $\beta \rightarrow \beta_1$  (Nakanishi, 1961), la cual fue estudiada en extenso por Wassermann, y en donde determinó que la fase ordenada tiene una estructura tipo DO3 similar a la del Fe3Al, y que la temperatura de orden  $T_c'$  es una función de la composición. Tanto la estimación esta temperatura como la Ms son mostradas en la Figura N° 3.

Es interesante resaltar que la martensita formada hereda la disposición ordenada de la fase madre  $\beta_1$ , dado que la transición orden-desorden no se puede suprimir, incluso con altas tasas de enfriamiento.

Kajiwara en sus experimentos describe fenómenos generales al calentar la martensita  $\beta'$  (Kajiwara y Nishiyama, 1964). Cuando una lámina delgada de martensita es calentada a una velocidad de 15°C/s, al llegar a una temperatura cercana a los 400°C comienzan a aparecer los primeros cristales de  $\beta_1$ , a esto es lo que se le denomina temperatura de transformación martensítica inversa o comúnmente As. La mayoría de los cristales  $\beta_1$  nuclearon en la región interior de la placa de martensita, y crecieron de manera recta y paralela, lo que sugiere que el crecimiento ocurrió a lo largo de un plano cristalográfico en la placa  $\beta'$  (Swann y Warlimont, 1963).

En la micrografía electrónica de transmisión tomada a 450°C (Figura N° 4), los cristales  $\beta_1$  aparecen brillantes. Estas placas  $\beta_1$  tienen una orientación idéntica, y después de alcanzar el límite entre los cristales de martensita  $\beta'$ , comenzaron a ensancharse y finalmente se unieron en un solo cristal (Kajiwara y Nishiyama, 1964).

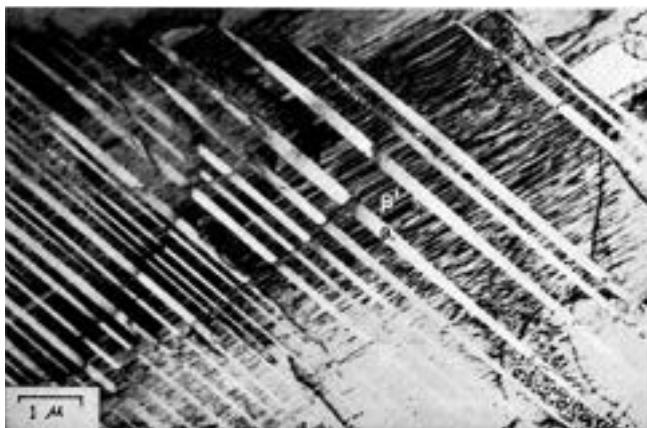


Figura N° 4. Micrografía electrónica tomada a 450°C, mostrando el crecimiento de cristales  $\beta_1$  (placas brillantes) en martensita  $\beta'$  (regiones estriadas).

Tanto la termodinámica de la transformación martensítica como la de la transición orden-desorden han sido estudiadas por algunos autores. A partir de los datos experimentales reportados, se han evaluado parámetros termodinámicos que permiten predecir la temperatura  $M_s$  o  $T_0$  en el sistema Cu-Al (Zhou *et al.*, 1991). Esto se puede apreciar en la Figura N° 5.

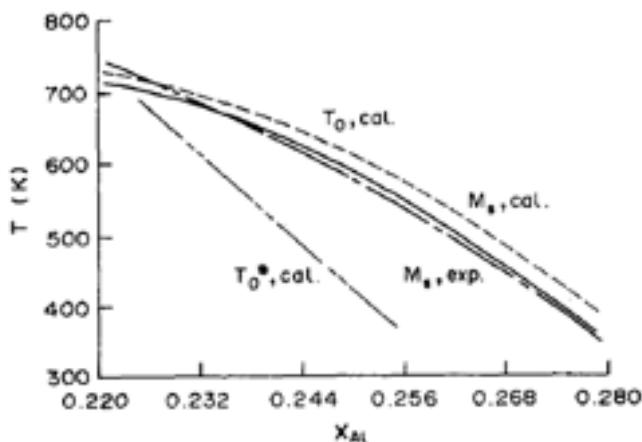


Figura N° 5. Temperaturas  $T_0^*$ ,  $T_0$  y  $M_s$

### Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma (SMA), son materiales funcionales utilizados en sensores y actuadores debido a su capacidad única para recuperar su forma original después de ser deformados (Recarte *et al.*, 1999). Este comportamiento es resultado de la transformación martensítica, un cambio microestructural que es esencial para las propiedades

de memoria de forma. En particular, la martensita termoelástica (Alaneme *et al.*, 2021) es un tipo de martensita que se caracteriza por poder regresar a su fase original de alta temperatura ( $\beta$ ) cuando el material se calienta, sin que la estructura sufra daños permanentes. Este proceso es fundamental para que las SMA puedan “recordar” su forma inicial.

Entre las aleaciones ternarias basadas en Cu-Al, las del sistema Cu-Al-Ni, se destacan por su amplio rango de temperaturas de transformación y su pequeña histéresis (Yildiz y Kok, 2014), lo que las hace alternativas atractivas a las aleaciones Ti-Ni. La adición de elementos como el Fe en Cu-Al-Ni permite modificar las temperaturas de transformación y mejorar las propiedades de estas aleaciones.

A pesar de sus ventajas, las aleaciones con memoria de forma basadas en Cu-Al-Ni presentan ciertos desafíos que han sido objeto de investigación para mejorar su desempeño en aplicaciones tecnológicas. Uno de los principales problemas es la estabilización martensítica, un fenómeno que reduce la reversibilidad de la transformación martensítica con el tiempo o tras ciclos térmicos repetidos, afectando la capacidad del material para recuperar su forma original. Este efecto puede mitigarse mediante la adición de elementos como Fe o Mn, que influyen en la estabilidad térmica y mecánica de la aleación, optimizando su respuesta termoelástica y pseudoelástica.

Además, se ha demostrado que la composición química juega un papel clave en la temperatura de transformación, con concentraciones de Al entre 11 y 14.5% y de Ni entre 3 y 5% siendo las más efectivas para mantener un comportamiento de memoria de forma confiable. Gracias a su capacidad de operar a temperaturas superiores a 200°C, las aleaciones Cu-Al-Ni han sido desarrolladas como alternativas a los sistemas Cu-Zn-Al y Ti-Ni, con aplicaciones en dispositivos de seguridad, sensores térmicos y actuadores inteligentes en sectores como la industria aeroespacial y la automotriz.

### Procedimiento Experimental

A partir de cobre y aluminio de alta pureza, se diseñó una aleación de Cu-11.5%Al, la cual fue solidificada en un molde de arena cilíndrico de 80 mm de largo y 40 mm de diámetro. De este lingote se obtuvieron tres muestras de 10 mm x 5 mm x 5 mm. Una de ellas se analizó en estado as-cast, otra fue homogenizada a 800°C durante 3 horas, enfriada en el horno y la tercera fue homogenizada a 800°C durante 4 horas, seguida de un enfriamiento en agua. La muestra en

estado as-cast y la homogenizada fueron montadas en baquelita, mientras que la última fue montada en resina con la finalidad de no alterar la microestructura con la temperatura. A cada muestra se le realizó un análisis metalográfico, que incluyó un ataque químico con Klemm II. Posteriormente, se realizó una prueba de microdureza Vickers con una carga de 200 gramos (HV 0,2) utilizando el durómetro Vickers ZwickRoell Indentec.

## Resultados y Discusión

La primera micrografía corresponde a la aleación en estado as-cast, donde las fases presentes son  $\alpha$  (zonas claras) y  $\gamma$  (zonas oscuras). Si se compara esto con la Figura N° 7, se puede observar que esta última tiene un tamaño de grano más grande y una microestructura más homogénea, donde destaca aún más la formación de la fase primaria y el producto de la reacción eutectoide. Por otro lado, la Figura N° 8 muestra una microestructura martensítica, donde es posible notar que existe una mezcla de tipos de martensita, siendo probablemente la más fina martensita  $\beta'$  y la más gruesa martensita  $\gamma'$ .

La dureza Brinell obtenida haciendo uso de la ASTM E140 se puede observar en la Tabla N° 1.

Estado	Dureza HB
As-cast	190
Enfriamiento lento	216
Enfriamiento rápido	284

Tabla N° 1. Dureza HB de los distintos estados de una aleación Cu-11,5%Al

En el caso del enfriamiento rápido, que es donde se obtiene la microestructura martensítica, se tiene la mayor dureza, en donde el valor coincide con lo reportado en la literatura. Sin embargo, se hace interesante cuestionarse porqué con un menor tamaño de grano como lo es el estado as-cast, se tiene una menor dureza que con el estado de enfriamiento lento, que posee un mayor tamaño de grano.

El endurecimiento de Hall-Petch es un fenómeno que describe cómo la resistencia de un material aumenta a medida que disminuye el tamaño de grano, pero hay ciertas limitaciones, siendo la segregación química una de ellas y con la cual se puede dar explicación a la diferencia en las durezas.

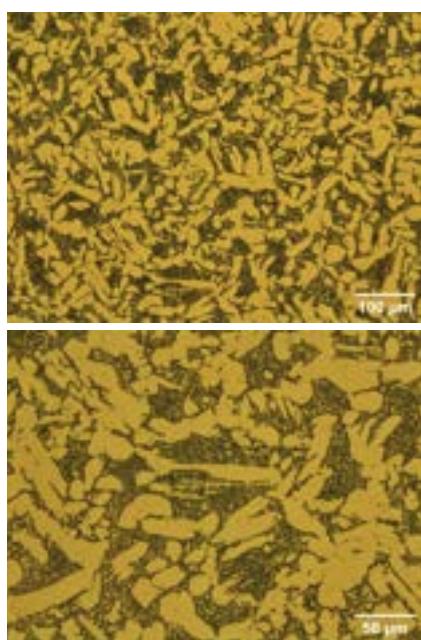


Figura N° 6. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al en estado as-cast

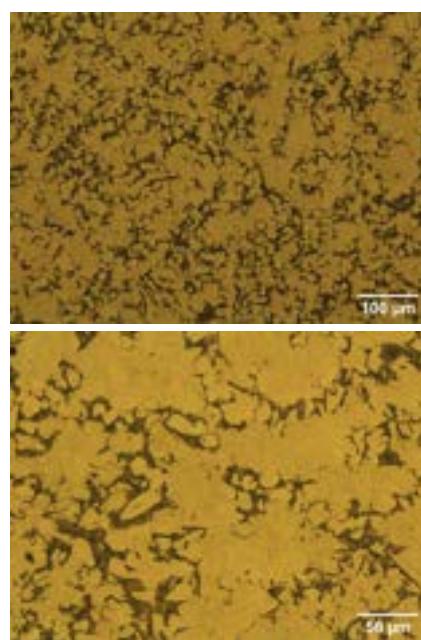


Figura N° 7. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al homogenizada a 800°C durante 3 horas y enfriada en el horno

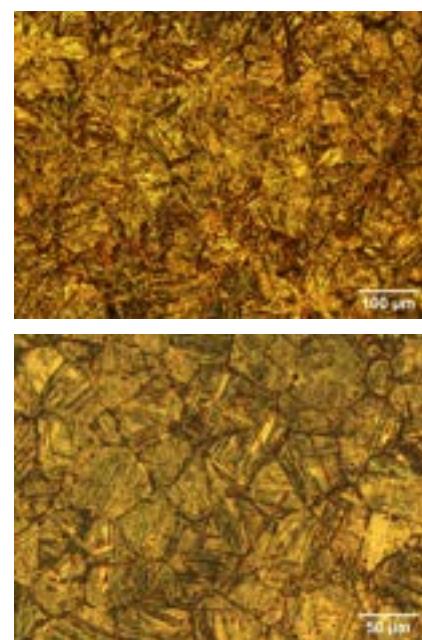


Figura N° 8. Micrografías de una aleación Cu-11,5%Al homogenizada a 800°C durante 4 horas y enfriada en agua

## Conclusiones

Aunque la transformación martensítica en el sistema Cu-Al ha sido estudiada principalmente en el contexto de aleaciones con memoria de forma, existen pocas investigaciones fuera de este ámbito. Este trabajo representa una recopilación de información y una exploración de la transformación martensítica en estas aleaciones, destacando la necesidad de continuar con estudios que complementen la determinación de la  $M_s$  y/o  $A_s$  junto con la energía libre asociada al cambio de fase.

Comprender mejor estos parámetros permitiría predecir la transformación y optimizar las aplicaciones de estas aleaciones en campos más allá de los dispositivos con memoria de forma.

Asimismo, con ciertos tratamientos térmicos para composiciones específicas, como la eutectoide, se ha reportado que la estructura de equilibrio (perlita) posee una mayor dureza que la martensita, lo que abre una vía interesante para futuros estudios. Replicar y validar estos hallazgos tendría gran valor científico.

La continuación de esta investigación es esencial para expandir el conocimiento sobre la transformación martensítica en el sistema Cu-Al y explorar sus potenciales aplicaciones en diversas industrias.

## Referencias

Alaneme KK, Anaele JU, Okotete EA. 2021. Martensite aging phenomena in Cu-based alloys: Effects on structural transformation, mechanical and shape memory properties: A critical review. *Scientific African* 12: e00760 <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00760>

Brooks CR. 1982. Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. American Society for Metal, Library of Congress, Washington, USA.

Kajiwara S, Nishiyama Z. 1964. The orientation relationships and crystal habits in the martensite transformation of a Cu-Al alloy. *Japanese Journal of Applied Physics* 3 (12): <https://doi.org/doi:10.1143/jjap.3.749>

Kulkarni SD. 1973. Thermodynamics of martensitic and eutectoid transformations in the Cu-Al system. *Acta Metallurgica* 21 (10): 1461-1469. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90095-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90095-3)

Kwarcia J. 1986. Phase transformations in Cu-Al and Cu-Zn-Al alloys. *Journal of Thermal Analysis* 31: 559-566. <https://doi.org/10.1007/BF01914232>

Nakanishi N. 1961. The crystal structure of  $\beta'$  Martensite in Cu-Al binary alloys. *Transactions of the Japan Institute of Metals* 2 (2): 79-85. <https://doi.org/10.2320/matertrans1960.2.79>

Popplewell JM, Crane J. 1971. Order-strengthening in Cu-Al alloys. *Metallurgical and Materials Transactions* B 2: 3411-3420. <https://doi.org/10.1007/BF0281162>

Recarte V, Pérez-Sáez RB, Bocanegra EH, Núñez ML, San Juan J. 1999. Dependence of the martensitic transformation characteristics on concentration in Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Materials Science and Engineering*. 273-275: 380-384. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00302-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00302-0)

Swann PR, Warlimont H. 1963. The electron-metallurgy and crystallography of copper-aluminum martensites. *Acta Metallurgica* 11: 511-527. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(63\)90086-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(63)90086-5)

Yildiz K, Kok M. 2014. Study of martensite transformation and microstructural evolution of Cu-Al-Ni-Fe shape memory alloys: Effect of heat treatments. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115: 1509-1514. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3409-4>

Zhou XW, Hsu TY. 1991. Thermodynamics of the martensitic transformation in Cu-Al alloys. *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (6): 1041-1044. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(91\)90190-C](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90190-C)



Artículo de Divulgación

# Gestión Ambiental en Ingeniería Metalúrgica

## Environmental Management in Metallurgical Engineering

### RESUMEN

En el siglo pasado, la relación entre la ingeniería metalúrgica y la sostenibilidad ambiental se veía como algo contradictorio. La idea predominante era "si queremos desarrollo productivo, debemos aceptar los daños ambientales 'inevitables' que ello implica". Así, la ingeniería metalúrgica debía ocuparse de maximizar la productividad, sin preocuparse por los impactos ambientales causados, lo que era materia de otros profesionales. El siglo XXI es, en cambio, la era del "Desarrollo Sostenible" y ello implica que las empresas y los profesionales que diseñan ejecutan y dirigen procesos productivos, deben "gestionar su relación con el medio ambiente". De ello depende hoy no solo la supervivencia de las empresas, que deben cumplir con normas estatales y privadas, así como con presiones del mercado, sino que también la supervivencia de nuestra especie. Así, el Ingeniero del siglo XXI, requiere de conocimientos y actitudes que le permitan desarrollarse eficientemente en un entorno empresarial en el cual la gestión ambiental es un elemento esencial de su funcionamiento.

**Palabras clave:** Ambiente; Sostenibilidad; Educación; Ingeniería; Metalurgia

### ABSTRACT

In the last century, the relationship between metallurgical engineering and environmental sustainability was often perceived as contradictory. The prevailing notion was that "if we want productive development, we must accept the 'inevitable' environmental damage it entails." Metallurgical engineering was thus focused on maximizing productivity, with little concern for the environmental impacts caused—an issue delegated to other professionals. In contrast, the 21st century is the era of "Sustainable Development," which requires companies and professionals who design, implement, and manage industrial processes to actively "manage their relationship with the environment." Today, this is essential not only for the survival of companies—who must comply with both public and private regulations and market pressures—but also for the survival of our species. As such, the 21st-century engineer must possess the knowledge and attitudes necessary to operate efficiently in a business environment where environmental management is a core component of industrial operations.

**Keywords:** Environment; Sustainability; Education; Engineering; Metallurgy

### Autor de Correspondencia

**Roberto Molina Viveros**

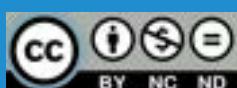
roberto.molina@usach.cl

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 7 de abril, 2025

Artículo Aceptado: 29 de abril, 2025

Artículo Publicado: 10 de junio, 2024



## Introducción

Hasta el año 1972, la propuesta de incluir Gestión Ambiental en el Curriculum de formación de Ingenieros Metalúrgicos habría causado la hilaridad de muchos directorios de empresas metalúrgicas en el mundo y también en muchos centros de formación de ingenieros para esta área.

Desde sus orígenes, la minería, la metalurgia productiva (concentradoras, fundiciones, refinerías, procesadoras de metales etc.), la químico metalurgia y el metal mecánico han sido actividades que han causado impactos ambientales negativos al medio ambiente, en magnitud similar al aporte que estas actividades han hecho para el avance de la humanidad.

El largo camino iniciado hace cinco mil años atrás, (Montero Ruiz y Murillo-Barroso, 2016) con los modestos hornos de arcilla en que se fundía cobre, llevó a luego a la manipulación de las aleaciones (en especial el bronce) y hace tres mil años a la fundición del hierro que generó una fuerte revolución tecnológica, prefigurando a lo que fue posteriormente la gran Revolución Industrial del siglo XVIII, que puso definitivamente a la metalurgia como la piedra angular del desarrollo tecnológico y económico de la era moderna.

Pero mientras que las bendiciones de un mundo con industrias, trenes, aviones, puentes, satélites, sistemas de comunicación etc. se multiplicaban, también se multiplicaron los impactos ambientales causados por la extracción, procesamiento y elaboración de metales: suelos destruidos, pérdida y contaminación de recursos acuíferos, emisiones de gases tóxicos al aire, fuertes emisiones de dióxido de carbono y un largo etcétera de afectaciones a los hábitats en que se ejecutaban estas operaciones productivas (Mercado, 2023).

La industria moderna, en especial desde inicios del siglo XIX, estaba centrada en lograr la más alta producción, por lo que las técnicas y procesos se hicieron masivos, pero sin tomar en cuenta el costo ambiental de ese incremento productivo. Se entendía que una gestión empresarial exitosa era aquella que lograra la mayor rentabilidad del capital invertido, aumentando la productividad y bajando los costos. Y dentro de los “costos” no se incluía el deterioro del ambiente que la actividad causaba.

En un análisis de costos típico de los siglos XIX y XX, se consideraban los costos fijos, los de materias primas, los de mano de obra, etc, pero no existían los costos ambientales, las pérdidas causadas por contaminación, pérdida de biodiversidad, o los impactos al ambiente social de la zona en que se operaba.

Estos costos se catalogaban como “externalidades negativas”, es decir, pérdidas que están fuera o que son “externas” al proceso productivo y al balance de costos de la empresa. En otras palabras, el daño ambiental era una pérdida asumida por la sociedad en su conjunto y no por los dueños de la actividad que los causaba y que obtenían rentabilidad directa por dicha actividad.

Todo ello cambió a partir de 1972. La preocupación por el cuidado del medio ambiente, tema que hasta entonces estaba constreñido a algunos pensadores y teóricos de las humanidades, comenzó a tomar un perfil muy distinto.

Un grupo de líderes políticos, economistas, científicos y líderes empresariales, que formaban el “Club de Roma”, habían encargado un estudio científico nada menos que al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), sobre la relación entre el crecimiento económico, el aumento de la población y la capacidad de la naturaleza para mantener ese crecimiento. El estudio, ejecutado por científicos que utilizaron la metodología de simulación computacional fue concluyente: es imposible mantener un crecimiento económico infinito al interior de un planeta finito. Más aún, las prospectivas indicaban que, de seguir operando ese modelo económico, la calidad de vida de la humanidad e incluso la viabilidad de la especie corría serios peligros debido a las profundas modificaciones que experimentaría el planeta en su globalidad (Meadows & Meadows, 1972).

Ese mismo año, se inicia la gestión ambiental internacional, a partir de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, (llamada también Cumbre de la Tierra), que fue la primera conferencia mundial sobre el medio ambiente, celebrada en Estocolmo, Suecia, del 5 al 16 de junio de 1972, en la que se adoptó la Declaración de Estocolmo y el Plan de Acción para el Medio Ambiente Humano, que comprometían a todos los países miembros de la ONU.

Desde entonces y hasta hoy, la Gestión Ambiental, tanto mundial como nacional, fue creando las condiciones para que la conciencia sobre los impactos negativos de los procesos productivos en el medio ambiente, llegara a ser tan alta que las empresas fueran reguladas en este aspecto, desde la potestad de los Gobiernos, que generaron Tratados, Leyes, Reglamentos, Normas y otros instrumentos de gestión ambiental que apuntaban a impedir o limitar los efectos negativos de los procesos productivos en el medio ambiente.

La creación de normativa obligatoria, hizo que poco a poco, las empresas tuvieran que ir “internalizando” las “externalidades” ambientales negativas que generaban, primero para dar cumplimiento a las exigencias gubernamentales, pero en un segundo espacio, para responder a las exigencias de sus propios clientes, que comenzaron a evaluar este aspecto.

Así en Chile a partir de 1994, en que se promulga la Ley 19300 “Ley de Bases del Medio Ambiente” (Ley N° 19.300, 1994), las empresas debieron someter sus proyectos a Evaluación Ambiental, obtener Resoluciones de Calificación Ambiental aprobatorias, respetar Normas de Emisión, Planes de Descontaminación y Planes de Prevención, y enfrentar la acción supervisora del Estado.

En esta realidad, las empresas chilenas se pliegan a las prácticas que ya existían en el mundo empresarial internacional y empiezan a adoptar sistemas de gestión ambiental, destinados a controlar los impactos de sus procesos productivos.

Surgen así las Gerencias y los Departamentos de Medio Ambiente en el mundo de la minería y la metalurgia. Ya al año 2000 toda la gran empresa metalúrgica tenía estas entidades directivas en su organigrama. Las empresas medianas alcanzan ese desarrollo aproximadamente en el año 2010 y ahora esta tendencia ya está cubriendo incluso a la pequeña empresa.

Colaboró a este proceso, la transformación del Sistema de Gestión Ambiental estatal de Chile, que genera en el año 2010 (Ley 20.417) la transformación de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, en el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), con un Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), una Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), un Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) y la creación de los Tribunales Ambientales.

Esta institucionalidad agregó eficacia a los roles que debe cubrir la gestión ambiental estatal, aumentando rápidamente la cantidad de Normas Ambientales, de Planes de Prevención y de Descontaminación, el Control y Supervisión de los proyectos productivos y las sanciones por incumplimientos.

Las empresas metalúrgicas se encuentran así con tres factores que las motivan a establecer sistemas de Gestión Ambiental en sus sistemas administrativos:

1. El fortalecimiento de las funciones estatales de Normar, Prevenir, Controlar y Sancionar los impactos ambientales no deseados.
2. Las presiones de los inversionistas extranjeros. En efecto, como la mayor parte de las empresas metalúrgicas están vinculadas a inversionistas extranjeros, que deben cumplir con estándares altos en esta materia en sus países de origen, se ven impelidas a formalizar sus propios sistemas de Gestión Ambiental.
3. Las presiones de los clientes. El desarrollo político de la conciencia ambiental de la humanidad, comienza a expresarse en el mercado como un alza en los estándares de exigencias relativas a la sostenibilidad de los procesos que generan productos de consumo, factor que se convierte en elemento de toma de decisiones respecto de la compra de ellos.

Por otra parte, el desarrollo de la Participación Ciudadana en los procesos de toma de decisiones respecto de la evaluación de los proyectos productivos, ha generado la necesidad imperiosa para la empresa, de ser capaz de manejar los criterios de sostenibilidad ambiental desde la planificación de los proyectos productivos, su implementación y su finalización o abandono.

La Gestión Ambiental, como factor determinante de la posibilidad de concreción y desarrollo de un proyecto metalúrgico, se ha visto expresada en Chile en varios eventos, de los que son destacables las sanciones ambientales aplicadas al proyecto minero Pascua Lama, que fue presentado en el año 2001 y tuvo que iniciar su cierre el año 2019, casi sin haber extraído mineral, debido a fuertes errores e incumplimientos de su Resolución de Calificación Ambiental. También las motivaciones ambientales del cierre de la histó-

rica Refinería de Las Ventanas, después de 58 años de operaciones refleja la diferencia entre un Chile que carecía de políticas y normativas ambientales en los años 1961 y 1966 en que se inauguraron la fundición y luego la refinería electrolítica y el Chile actual en el que las emisiones contaminantes de antaño ya no pueden ser permitidas y se aplica un Plan de Descontaminación Atmosférica que les pone fin.

En este Chile del Siglo XXI, desde una mega fundición hasta una fábrica de tornillos o de modestos muebles metálicos, todos deben incluir, en sus etapas de planificación, ejecución, operación y abandono, las consideraciones ambientales de sostenibilidad, tanto obligatorias como voluntarias. En eso consiste la Gestión Ambiental.

En el siglo (y milenio) recién pasado, un proyecto metalúrgico se analizaba fundamentalmente desde tres perspectivas:

- 1. Factibilidad Técnica** (¿Se puede ejecutar con las técnicas y métodos actualmente disponibles)
- 2. Factibilidad Legal** (¿Se puede ejecutar cumpliendo la legislación vigente?) y
- 3. Factibilidad Financiera** (¿Se puede ejecutar con el capital disponible y obteniendo una rentabilidad igual o superior a otras inversiones del mercado? Responder afirmativamente a estas tres interrogantes bastaba para tomar una decisión.
- 4. Factibilidad Ambiental** (¿Se puede ejecutar en el marco de la sostenibilidad fijada por el Estado y por la Política Ambiental de la empresa?)

Como indica la consultora MindCo “En la era moderna, la sostenibilidad y la gestión eficiente de activos han emergido como dos conceptos inextricablemente ligados. Históricamente, la gestión de activos se ha enfocado en maximizar la eficiencia operativa y la rentabilidad. Pero hoy en día, la perspectiva ha evolucionado. Ahora, se considera no sólo la rentabilidad, sino también el impacto ambiental y social de la operación de estos activos. La sostenibilidad emerge, entonces, como un imperativo: se trata de garantizar que las operaciones industriales actuales no comprometan las necesidades de las futuras generaciones chilenas” (Mindco, 2023).

Así, en el siglo XXI las empresas agregan a su estructura, además de la Gerencia de Administración, la de Producción y la de Comercialización, las Gerencias de Medio Ambiente u otros nombres similares.

Esto genera una demanda laboral nueva: los profesionales expertos en esta área eran casi inexistentes en Chile antes del año 2000. Las grandes empresas extranjeras que operaban en Chile traían a sus profesionales ambientales desde Europa, Canadá o USA. La Universidad de la Frontera (UFRO) creó en 1993 la carrera de Ingeniería Ambiental, pero, al igual que las universidades que le siguieron, el enfoque de ella estaba centrado en los recursos naturales renovables, especialmente el recurso forestal y agrícola.

Esto generó una ineficiencia en el ámbito industrial. Los proyectos productivos, diseñados por un Ingeniero industrial o de alguna especialidad (metalúrgico, eléctrico etc.), carecían de las consideraciones ambientales que ahora estaban siendo exigidas por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de manera obligatoria.

Esto implicaba que, una vez diseñado el Proyecto, un Ingeniero o experto medioambiental debía rediseñarlo, esta vez incluyendo dichas consideraciones, lo cual cambiaba el proceso técnico original y modificaba los costos iniciales. Por otra parte, el esquema administrativo de trabajo generalmente consistía en que el proyecto ya diseñado, era enviado a una empresa externa de consultoría ambiental, quien generaba una Estudio o una Declaración de Impacto Ambiental, según lo necesario, sin mucho contacto con el área técnica.

El modelo de externalización de la gestión ambiental de la empresa demostró rápidamente que no era capaz de responder a las demandas cada día más exigentes en esta área, que implicaban un trabajo constante, en todas las etapas de los proyectos productivos. Se requería una estructura interna, de la propia empresa, que se hiciera cargo de esta función cada día mayor.

Pero también esta situación modificó la demanda en la formación de las Ingenierías específicas. No se podía mantener la dicotomía entre los ingenieros “técnicos”, que diseñaban o dirigían sistemas productivos sin conocer ni aplicar las políticas y normativas que apuntan a la sostenibilidad de esos sistemas, y los ingenieros “medioambientales” que, conocien-

do y aplicando esas políticas y normativas, carecían de los conocimientos técnicos específicos referidos a esos sistemas productivos en particular.

Para que existiera un buen diálogo entre ellos, que posibilitara un desarrollo eficiente de los sistemas de gestión ambiental empresarial, se hizo indispensable agregar al perfil formativo de las ingenierías “duras” una base de conocimientos específicos sobre gestión ambiental, además de una acción educativa que propenda a generar una actitud de responsabilidad ambiental en el cumplimiento de sus labores.

Nace así la respuesta afirmativa a la pregunta que da inicio a este artículo: ¿Gestión Ambiental en Ingeniería Metalúrgica? ¡Por supuesto que sí!

Conscientes de que el Siglo XXI impone desafíos totalmente nuevos a los sistemas productivos, en especial en lo que concierne a su sostenibilidad ambiental y habiendo comprobado que la industria metalúrgica tiene una especial demanda a este respecto ya que se encuentra en pleno proceso de desarrollo de sus sistemas de gestión ambiental empresarial, los que le posibilitarán mantener su competitividad en el futuro, ha incluido en su malla curricular la asignatura de “Gestión Ambiental en Metalurgia”, como asignatura obligatoria de la Ingeniería Civil en Metalurgia y como optativo en Ingeniería en Ejecución.

Esta decisión, entrega a nuestros estudiantes una faceta de alto valor en su perfil de egreso: la capacidad de entender y enfrentar, en sus lugares de trabajo, los aspectos de gestión ambiental que les sean requeridos por sus empresas, el desarrollo de capacidades que les permitan “pensar la producción” desde una perspectiva de sostenibilidad y adscribirse rápidamente a los sistemas de gestión ambiental ya implementados en las empresas o colaborar con su desarrollo en aquellas que se están incorporando a este proceso, que hoy se percibe como obligatorio en toda industria que desee mantener su vigencia. Ello también favorece la empleabilidad de nuestros egresados, ya que una de las dificultades que las

empresas enfrentan hoy para la implementación de sus sistemas de Gestión Ambiental ISO 14.001 o los vinculados a la normativa OHSAS, es que deben comenzar por capacitar a su personal desde un nivel elemental, ya que la gestión ambiental es desconocida en el ámbito técnico. Por el contrario, el contar con profesionales que se integran teniendo ya los conocimientos y, fundamentalmente las actitudes, coherentes con el desarrollo de sus sistemas de gestión ambiental y que pueden ejercer liderazgo en ese sentido, les facilita dicho desarrollo.

La comprensión y capacidad de análisis de los impactos ambientales de los procesos que operan, el conocimiento de la normativa e institucionalidad ambiental y, por sobre todo, la capacidad de generar una visión de economía circular y técnicas de producción limpia aplicables a su ámbito de acción, entregan a estos futuros profesionales un sello que les permite hacer frente al mayor desafío de las empresas en el Siglo XXI: generar sistemas de producción sostenibles que aseguren la supervivencia de la humanidad en el planeta.

## Conclusión

El transitar, desde una producción metalúrgica no sostenible, a una que, si lo sea, es una necesidad urgente en la economía de nuestro país, que depende en alto grado de esta área productiva. Por tal motivo, el perfil de egreso de los Ingenieros Metalúrgicos chilenos debe incluir los conocimientos y actitudes que faciliten a sus empresas el desarrollar los sistemas de gestión ambiental que, en su mayoría, ya han incorporado a sus procesos.

Así, la acción curricular de la USACH consistente en incluir la Gestión Ambiental en la malla formativa de los Ingenieros Metalúrgicos no es solo un aporte su empleabilidad y desarrollo profesional, y un aporte a la actividad de las empresas metalúrgicas en este ámbito, sino también un aporte concreto al desarrollo sostenible de nuestro país y al cumplimiento de los Compromisos de Desarrollo Sostenible (CDS) adquiridos por Chile para el año 2030.

## Referencias

Ley N°19.300. 1994. Ley de Bases Generales del Medio Ambiente.  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Ley N° 20.417. 2010. Crea el Ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia del medio ambiente.  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1010459>

Meadows D, Meadows D. 1972. Los límites del crecimiento. Fondo de Cultura Económica, México.

Mercado A. 2023. Impacto ambiental de la metalurgia. En: <https://www.adrianmercado.com.ar/blog/impacto-ambiental-de-la-metalurgia>

MinCo. <https://www.mindco.cl/2023/10/30/la-gestion-de-activos-y-la-sostenibilidad-en-las-industrias-de-chile>

Montero Ruiz I, Murillo-Barroso M. 2016. Los inicios de la metalurgia y el valor social del metal. Menga: Revista de prehistoria de Andalucía 7: 15-29.  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

## Gestión Ambiental



Refinería Las Ventanas en operaciones y posteriormente al haberse aplicado el Plan de Descontaminación Atmosférica.



Artículo de Divulgación

# La ingeniería metalúrgica y la construcción naval: un vínculo esencial que aporta al desarrollo de Chile

Metallurgical engineering and shipbuilding: an essential link that contributes to Chile's development

## RESUMEN

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval están íntimamente conectadas y son esenciales para el desarrollo económico y social de los países. La construcción naval depende de la industria metalúrgica para desarrollar materiales adecuados que cumplan con las exigencias de una industria competitiva, mientras que la industria metalúrgica necesita de la demanda constante de la construcción naval para evolucionar tecnológicamente. La fabricación de partes y piezas de un buque involucra procesos metalúrgico-mecánicos que han avanzado mediante la innovación. La Política Nacional de Construcción Naval impulsa el desarrollo de la industria naval y ofrece una oportunidad de crecimiento y diversificación para la industria metalúrgica. Juntas, estas industrias pueden contribuir significativamente al desarrollo de Chile.

**Palabras clave:** Ingeniería; Metalurgia; Construcción naval; Materiales.

## ABSTRACT

Metallurgical engineering and shipbuilding are closely connected and essential for the economic and social development of countries. Shipbuilding relies on the metallurgical industry to develop suitable materials that meet the demands of a competitive industry, while the metallurgical industry needs the constant demand of shipbuilding to evolve technologically. The manufacturing of ship parts and pieces involves metallurgical-mechanical processes that have advanced through innovation. The National Naval Construction Policy promotes the development of the naval industry and offers an opportunity for growth and diversification for the metallurgical industry. Together, these industries can significantly contribute to the development of Chile.

**Keywords:** Engineering; Metallurgy; Shipbuilding; Materials.

### Autor de Correspondencia

**Enzo Tesser Díaz**  
enzo.tesser@usach.cl  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 26 de marzo, 2025  
Artículo Aceptado: 5 de mayo, 2025  
Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



## Introducción

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval son dos disciplinas tecnológicas estrechamente vinculadas que han facilitado sustancialmente el progreso y desarrollo de las naciones. Durante los últimos tres siglos, desde la revolución industrial hasta la actualidad, la capacidad para construir embarcaciones robustas y duraderas ha dependido en gran medida de los avances en ciencia e ingeniería de materiales, particularmente en ingeniería metalúrgica. Entre estos avances se incluyen el desarrollo de una amplia gama de aceros, la sofisticación de aleaciones no ferrosas resistentes a la corrosión, la producción metálica en grandes volúmenes de productos planos y largos, la mejora de procesos de fabricación como el conformado metálico, la soldadura y las fundiciones, así como la innovación tecnológica emergente. Estos desarrollos no solo han fortalecido la construcción naval, sino que también han impactado diversas áreas productivas, generando sinergias económicas y sociales que se traducen en oportunidades de desarrollo para los países (Till, 2023).

Desde la antigüedad, las civilizaciones que controlaron los espacios marítimos pudieron ampliar sus territorios y establecer rutas comerciales que cambiaron el mundo. Lograron esto navegando distancias cortas a bajas velocidades, en embarcaciones construidas principalmente de madera, utilizando el viento y la fuerza humana como medios de propulsión. Hoy en día, circumnavegar el mundo en buques modernos hechos de acero, impulsados por motores de alta potencia y capaces de resistir diversas condiciones es una tarea común. Sin embargo, la construcción naval sigue teniendo una justificación geopolítica, basada en la necesidad de los estados de globalizar su economía, proteger sus intereses y proyectar su influencia en el ámbito marítimo de diversas maneras (Till, 2009).

Actualmente, la ingeniería metalúrgica ocupa un papel esencial en la evolución del diseño de buques y la construcción naval. La investigación y el desarrollo de nuevos materiales permiten la creación de embarcaciones más ligeras y eficientes, con un me-

nor impacto ambiental, lo cual es fundamental para enfrentar los desafíos contemporáneos, como el cambio climático y la necesidad de transporte sostenible (Bruce, 2020).

Asimismo, la colaboración entre ingenieros metalúrgicos y navales es esencial para la innovación y la mejora continua en el diseño y la fabricación de embarcaciones. La implementación de tecnologías avanzadas, como la fabricación de partes mediante manufactura aditiva metálica y la inteligencia artificial (Joshi *et al.*, 2023), están transformando la manera en que se conciben y construyen los buques, abriendo un universo de posibilidades para el futuro de la ingeniería en su amplio espectro.

Este artículo es solo una pincelada sucinta de temas científico-tecnológicos muy complejos y profundos, enfocado en llamar la atención del capital humano más importante de la Universidad de Santiago de Chile, el alumno. Tiene el propósito de mostrar de manera simple y didáctica la relevancia que poseen las industrias metalúrgica y naval para el desarrollo de los países, explicando sus aspectos más importantes y como se conectan para generar sinergia, revelando al lector los múltiples desafíos y oportunidades que vienen para el futuro del mundo y específicamente de nuestro país.

Cada tema ha sido cuidadosamente seleccionado y desarrollado de manera concisa, con énfasis en aspectos relevantes de la ingeniería metalúrgica. El artículo no incluye conclusiones, ya que se espera que el lector forme su propia opinión y visión del tema, fomentando la discusión a partir de la información proporcionada. Esta publicación se fundamenta principalmente en los conocimientos adquiridos por el autor durante más de 30 años de trayectoria en diversos ámbitos de la ingeniería, así como en su participación en la redacción de la recientemente promulgada Política Nacional de Construcción Naval. El objetivo es suscitar en el lector un interés genuino y una necesidad de profundizar en la investigación, si es que así lo desea.



Fabricación de un bloque del buque antártico Almirante Viel al interior de un galpón dotado con toda la maquinaria adecuada para su confección. Posteriormente, una vez terminado el bloque, se moverá al exterior para su ensamblaje con otras secciones del buque. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

## 2. Conceptos fundamentales de la arquitectura, ingeniería y construcción naval moderna.

La arquitectura, ingeniería y construcción naval moderna se basan en una serie de conceptos fundamentales que han evolucionado a lo largo del tiempo, impulsados por avances tecnológicos y la necesidad de optimizar el rendimiento, la seguridad y la eficiencia de las embarcaciones, entendiéndose ésta como el término genérico que engloba a los buques o barcos civiles y militares (considerando aquí el diseño y desarrollo de submarinos de propulsión convencional y nuclear) de diferentes tamaños, desplazamiento y usos, como también los artefactos navales, muy utilizados en la industria acuícola y petroquímica.

### 2.1. Arquitectura Naval

Al hablar de arquitectura naval, se debe entender como el área que permite primordialmente diseñar embarcaciones, basada en 4 pilares fundamentales: hidrodinámica, estabilidad, diseño de distribución de espacios y resistencia estructural.

- Hidrodinámica: permite estudiar el flujo del agua alrededor del casco para minimizar la resistencia y optimizar la propulsión, determinando el diseño

de formas de casco eficientes para diferentes velocidades y condiciones de navegación, cuidando la laminaridad del fluido, optimizando su futuro rendimiento operacional (Larsson *et al.*, 2010; Lee, 2019).

- Estabilidad: evalúa la capacidad de la embarcación para mantener su posición vertical y recuperarse de inclinaciones, explotando los conceptos de centro de gravedad y el centro de carena para garantizar la estabilidad en diferentes condiciones de carga (Lee, 2019; Moore y Paulling, 2022).
- Diseño de distribución de espacios: es la optimización del espacio a bordo para la tripulación, carga, maquinaria y sistemas, generando espacios seguros y funcionales que cumplan con las normativas y los requisitos de las especificaciones técnicas asociadas a las funcionalidades de la embarcación (Vorus, 2010).
- Resistencia Estructural: es el pilar que permite el diseño de la estructura del casco para soportar las cargas estáticas, hidrostáticas y dinámicas a las que estará sometida la embarcación. De este pilar depende fundamentalmente la selección de materiales y técnicas de construcción para garantizar la integridad estructural en todo el ciclo de vida



Modelo a escala de un buque, el cual se somete a pruebas hidrodinámicas en un canal artificial, con el propósito de evaluar el comportamiento del casco respecto al agua. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

de la embarcación, por lo tanto, es una de las áreas mas relacionadas con la ingeniería metalúrgica. En términos muy simples, el casco de un buque puede ser visto como una gran viga que se somete permanentemente a cargas de carácter estático y dinámico, producto de su propio peso (gravedad), de la acción del mar (olas y corrientes) y el viento. La flexión (arrufo y quebranto) y la torsión, actuando siempre de manera combinada, generan permanentes y complejos estados de esfuerzos normales (tensión y compresión) y cortantes en todas partes, con diferentes direcciones y magnitudes. A su vez, el casco es una estructura, es decir, está compuesto por un sinnúmero de otros elementos estructurales unidos entre si para resistir en forma sinérgica las cargas antes mencionadas (Andrews, 2012). A diferencia de un automóvil detenido o un avión dentro de un hangar, las estructuras de las embarcaciones una vez botadas al agua (casi al final de su construcción) nunca dejan de someterse a las cargas dinámicas, ya que, aunque no navegue y se encuentre en un muelle, la influencia del oleaje y el viento es permanente. Lo anterior, implica mayores exigencias a los materiales, generando efectos y fallas recurrentes, tales como el fenómeno de la fatiga.

## 2.2. Ingeniería Naval

La ingeniería naval es una disciplina que abarca una amplia gama de conocimientos enfocados en el diseño, construcción, pero principalmente en el sostenimiento y operación de embarcaciones y sus sistemas, con el propósito de optimizar su rendimiento y confiabilidad durante todo el ciclo de vida. Generalmente las áreas de conocimiento se enmarcan en la propulsión, sistemas de ingeniería e ingeniería de materiales.

- Propulsión: diseño, selección y operación de sistemas y plantas de propulsión eficientes y confiables, las cuales están integradas por un motor que entrega la fuerza motriz (motores diésel, turbinas a gas, motores eléctricos, reactores nucleares, turbinas a vapor y en algunos casos, la combinación de los anteriores, como son los sistemas de propulsión militar) y sistemas de hélices y transmisión (ejes y descansos) para maximizar la eficiencia y el rendimiento de la propulsión (Kerwin y Hadler, 2010). Los materiales utilizados para la fabricación de los componentes del sistema de propulsión son aleaciones metálicas de diferentes tipos y procesos de fabricación (forja, fundición,

mecanizado, etc.) y muy sofisticadas, destacando la tecnología asociada a las aleaciones ferrosas en todo su espectro como aceros y fundiciones, aleaciones no ferrosas como las de cobre y superaleaciones como las de base níquel, cobalto y hierro.

- Sistemas de ingeniería: diseño e integración de sistemas de generación de energía, refrigeración, tratamiento de agua, comunicaciones, navegación, control automático, electricidad y electrónica. Para el caso de las embarcaciones de carácter militar se agregan los sistemas de armas (misiles, torpedos, cañones), sensores de vigilancia (radares, sonares, antenas de alta potencia, sistemas ópticos) y sistemas no tripulados (aéreos, superficie y submarinos).
- Ingeniería de materiales: selección de los materiales apropiados para cada componente de la embarcación, considerando factores como la resistencia, la corrosión, el peso y el costo. Además, se contempla la aplicación de técnicas de fabricación tradicionales, tales como la soldadura, el conformado y el mecanizado, así como técnicas de manufactura avanzadas, como la manufactura aditiva.

### 2.3. Construcción Naval

La construcción naval es el proceso integral de diseñar, construir, reparar y mantener embarcaciones de todo tipo. Esta actividad abarca desde pequeñas lanchas hasta enormes buques de carga, cruceros y buques de guerra. Principalmente se enfoca en la materialización de los diseños y especificaciones técnicas realizadas por los arquitectos e ingenieros navales, con los estándares requeridos por el armador. Hoy, el proceso de construir es complejo y distingue múltiples áreas de conocimiento, dentro de las cuales destacan: planificación y gestión de proyectos complejos, técnicas constructivas, tecnologías de fabricación, sostenibilidad, seguridad, digitalización (Bruce, 2020).

- Planificación y gestión de proyectos complejos: se planifica anticipadamente lo que se hará según los diseños y especificaciones técnicas realizadas por los arquitectos e ingenieros navales, con los estándares requeridos por el armador, desarrollando planes de construcción detallados. Posteriormente, se produce lo planificado gestionando eficientemente los recursos invertidos para cumplir con los plazos y el presupuesto. De manera transversal se gestiona y garantiza la calidad y seguridad en todos los procesos, aplicando técni-

cas y normas de gestión estandarizadas, las cuales son exigidas por las casas clasificadoras. En términos simples, tanto los procesos, como el personal que lo ejecuta, deben ser sometidos a un escrutinio que los valide en calidad y competencias.

- Técnicas constructivas: bien sabido es que a partir de la Segunda Guerra Mundial se produjo una revolución en lo que respecta a técnicas de construcción de buques, gracias a la visión propuesta para los buques de transporte de carga clase Liberty por el empresario e ingeniero civil estadounidense Henry Kaiser (Anderson, 2017). Introdujo dos grandes innovaciones en beneficio del tiempo y volumen de producción, que en tiempos de guerra era crítico: la construcción modular y el reemplazo de los remaches por la soldadura. Hasta antes de los "Liberty", las embarcaciones de todo tipo se construían íntegramente en un solo lugar físico, que dependiendo de la infraestructura de apoyo que se necesitara (grúas, talleres y maestranzas), podían ser patios de varada, gradas o diques secos, todos ellos en la intemperie. La secuencia de construcción era única, es decir, se podían enfrentar tantas construcciones de buques, como sitios de construcción estuviesen disponibles en el astillero, era como construir una casa o un edificio. La construcción modular implicó que cada pequeña sección, bloque o módulo del buque se podía producir en cualquier parte, con equipos de trabajo diferentes, bajo techo y en paralelo, aumentando exponencialmente la capacidad productiva de los astilleros, ya que en las gradas solo se debían armar los bloques previamente construidos (Bruce, 2020). Si bien, el remachado en aleaciones ferrosas fue un proceso productivo técnicamente seguro y muy probado, su ejecución requería tiempo y mano de obra masculina (debido a lo duro del trabajo de forja), la cual no estaba disponible porque los hombres se encontraban en el frente de combate. La introducción de la soldadura, proceso que requería más precisión que fuerza, implicó aumentar la velocidad para armar los bloques y aprovechar la mano de obra femenina disponible en tiempos de guerra. La construcción modular y la soldadura, como toda innovación, no estuvo exenta de problemas al inicio (fractura, fragilización, diseño, mano de obra, etc.), pero tal como lo dijera el mismo Kaiser en alguna instancia "los problemas son oportunidades vestidas en ropa de trabajo". A partir de estos problemas se dio paso al potenciamiento del área de materiales del Naval Research Laboratory (llegando a ser el más grande del

mundo), desarrollándose los estudios más importantes de la historia en mecánica de la fractura, fatiga e integridad estructural de materiales. Hoy, las innovaciones realizadas por Kaiser son parte de procesos bastante más complejos, avanzados y automatizados, que están muy arraigados y mejorados en el ámbito de la construcción naval.

- **Tecnologías de fabricación:** actualmente para cualquier proceso de fabricación en astilleros modernos se usan tres tecnologías que se complementan entre si para la optimización del proceso productivo: diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computador (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM) (Shrivastava et al., n.d.). Las tres en su conjunto han permitido aplicar robótica y automatización en los procesos de construcción de manera confiable, mejorando la calidad de los trabajos, disminuyendo los tiempos de producción y tecnificando la mano de obra.
- **Sostenibilidad:** la optimización del consumo de energía y la reducción de emisiones, producto de las exigencias impuestas por diferentes acuerdos internacionales, relacionados con las acciones que se deben tomar por el fenómeno del cambio climático, ha gatillado profundas mejoras en el diseño y construcción de embarcaciones, las cuales deben presentar menor impacto ambiental, utilizando tecnologías de propulsión alternativas y materiales sostenibles (Ministry of Defence UK, 2022). Es así, como se han mejorado los diseños de cascos y superestructuras de las embarcaciones para optimizar sus rendimientos, modificación en sus plantas de potencia para la utilización de combustibles carbono neutrales y/o verdes, y desarrollo de tecnologías que prevengan la contaminación del mar por los buques (emisión de sustancias nocivas al mar por causas operacionales y/o accidentales) (UNCTAD, 2023).
- **Seguridad:** diseño y construcción de embarcaciones que cumplan con las normativas de seguridad internacionales y los requisitos de las sociedades y casas de clasificadoras. Implementación de sistemas de seguridad avanzados y procedimientos de emergencia.
- **Digitalización:** uso de gemelos digitales, sensores y análisis de datos para optimizar el diseño, la construcción y el mantenimiento de las embarcaciones. Implementación de sistemas de navegación autónoma y conectividad a bordo.



Modelo CAD de un buque en su etapa de ingeniería de detalle. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

### 3. Requisitos de los materiales metálicos para la construcción naval

Las aleaciones metálicas utilizadas en la construcción naval deben cumplir con una serie de requisitos muy rigurosos, debido a las condiciones extremas a las que se enfrentan en el mar. Hoy, las rutas comerciales que deben seguir los buques mercantes y las operaciones que realizan los buques militares, implican que no sería un caso excepcional que naveguen, por ejemplo, desde el polo norte hasta la Antártida, pasando por diferentes ambientes, temperaturas, salinidades, microbiología, contaminantes, condiciones de mar y meteorología (Tibbitts, 2022). Por lo tanto, los diseños se deben efectuar para soportar toda clase de variables conocidas en el mundo y en las peores circunstancias, con el propósito de mantener la integridad estructural de los materiales y consecuentemente del activo. Es en este punto donde la ingeniería metalúrgica entrega sus mayores aportes a la construcción naval, ya que es la responsable de investigar, diseñar, desarrollar y producir los materiales adecuados para las especificaciones solicitadas. Hasta el día de hoy, los materiales metálicos, debido a su costo competitivo y versatilidad en cuanto a propiedades mecánicas, físicas y químicas, al menos en el ámbito naval (estructural y de sistemas), no han podido ser reemplazados, existiendo aún grandes espacios de investigación para mejorarlo. (Pantelakis y Rodopoulos, 2009)

Es necesario entender que la industria naval y marítima es una gran demandante de aleaciones metálicas, dentro de las cuales, las de más alto consumo en volumen son:

- Aleaciones ferrosas: son las de mayor uso en la construcción naval dada la versatilidad de productos que se pueden fabricar con ellas. Principalmente asociadas a la construcción de cascos, motores, hélices, descansos, líneas de ejes, sistemas de transmisión, gobierno, macizos (tubos de codaste), entre otros. Los materiales más usados son: aceros de baja aleación, aceros aleados y resistentes a la corrosión, aceros tratados térmicamente (QT), aceros fundidos, fundiciones.
- Aleaciones de aluminio: principalmente aleaciones de la serie 5000 para la construcción con soldadura de cascos para embarcaciones de menor peso y/o desplazamiento que las construidas en acero o simplemente para aliviar peso de buques construidos parcialmente en acero.

- Aleaciones de cobre: utilizadas principalmente para la confección de sistemas que deben presentar alta resistencia ante la corrosión, como cañerías de agua salada para sistemas de enfriamiento de plantas de potencia, hélices y sistemas de refrigeración. Las más utilizadas son los broncees y latones en su amplio espectro y las aleaciones Cu-Ni 70-30 y 90-10.

Teniendo clara la principal demanda de materiales, se puede intuir cuáles son los requisitos más importantes que deben cumplir los materiales metálicos asociados a la construcción naval, tanto a nivel estructural como sistemas: tenacidad (tracción, impacto y fractura), resistencia a la fatiga y resistencia a la corrosión.

- Tenacidad: tal como se describió en la sección 2.1, todas las embarcaciones están sujetas a múltiples cargas de carácter estático y dinámico producidas por su propio peso y por la constante acción del viento y del mar. Además, las estructuras del casco en el océano, dependiendo el área de operación, podrían estar sometidas a fuertes impactos y tensiones producidas por el oleaje, rocas de bajo fondo y eventualmente hielo, por lo que los materiales deben ser tenaces, es decir, deben tener la característica de absorber una buena cantidad de energía antes de fracturarse. Por lo tanto, la tenacidad no solo se relaciona con la resistencia del material, sino que también con su ductilidad, la que a su vez es función de la temperatura, la velocidad de deformación y el estado de tensiones al cual está sometido. En este sentido, dependiendo del tipo de carga, estática o dinámica, se pueden distinguir dos tipos de tenacidades, la de tensión y la de impacto. La primera está considerada una carga estática o quasi – estática, donde su velocidad de deformación es muy baja, pudiendo ser medida en el clásico ensayo de tracción y nos sirve para evaluar el comportamiento estático de los materiales o de las estructuras. La segunda, se considera una carga dinámica de alta velocidad de deformación, pudiendo ser medida en el clásico ensayo de tenacidad al impacto (CVN e Izod) y nos sirve para evaluar el comportamiento del material sometido a cargas dinámicas de alta velocidad con geometrías que concentren esfuerzos (George E. Dieter, 1988). Existe un tercer tipo de tenacidad en los materiales, que no se relaciona directamente con la tracción ni el impacto, sino que tiene que ver con la capacidad del material para absorber energía con daños preexistentes,



Buque rompehielos Almirante Viel durante la reciente campaña antártica de verano (2024/2025) efectuando sus pruebas de rompimiento de hielo de hasta 1,2 m de espesor. Esta prueba demuestra la tenacidad que deben tener los aceros utilizados para la construcción del casco de un buque de estas características.

Fotografía cortesía de la Armada de Chile.

esta es la tenacidad a la fractura. En términos muy simples, se evalúa como la resistencia que presenta el material a la propagación de una grieta preexistente, el cual se somete a la acción de una carga estática o quasi – estática (Anderson, 2017). En la práctica, nos sirve para evaluar los tamaños críticos o máximos que pudiesen tener los daños o grietas en un sólido (activo, parte o pieza) sometido a diferentes cargas, antes que la grieta se propague en forma inusitada y se produzca una falla catastrófica, concepto fundamental de las inspecciones no destructivas (NDI: Non Destructive Inspection) efectuadas en estructuras navales, aeronáuticas, cañerías y otras industrias. Dicho todo lo anterior, el acero de baja aleación y bajo carbono, aparte de ser económicamente atractivo y soldable, su combinación de alta tenacidad (tracción, impacto y fractura) y ductilidad, lo hacen el material preferido en la construcción de cascos de buques.

- Resistencia a la fatiga: las estructuras navales experimentan cargas cíclicas debido a las olas y las operaciones normales. Las cargas relacionadas con las olas, corrientes y el viento son consideradas

de alta carga, pero baja frecuencia (bajo ciclo), las que pueden llegar a producir en algunos casos deformación plástica, endurecimiento por deformación, sobrecarga mecánica y ruptura del componente en poco tiempo, obedeciendo a una falla en el diseño y selección del material de fabricación que no se condice a la magnitud de cargas que debe soportar la estructura o el activo. Las cargas relacionadas a las operaciones normales se refieren a vibraciones inducidas por las plantas de potencia (motores), líneas de transmisión, hélices, maquinaria auxiliar, etc., son consideradas de baja carga, pero alta frecuencia (alto ciclo), las que producen cargas cíclicas menores, deformación elástica macroscópica y una vida útil predecible del componente si es bien monitoreado (Vorus, 2010). Bien sabido es que los materiales con estructura cristalina BCC presentan límite de fatiga, no así los FCC, es decir, los BCC por debajo de una cierta carga no nuclearán ni propagarán grietas debido a este fenómeno. Al igual que para el caso de la tenacidad, los aceros de baja aleación y bajo carbono, presentan estructura cristalina BCC y, por lo tanto, se hacen más atractivos para usarlos en la confección de cascos que las alea-

ciones de aluminio de la serie 5000, que poseen estructura cristalina FCC. Sin embargo, debido al mejor mantenimiento de los activos con estructura cristalina BCC, su uso ha aumentado en tiempo y ciclos de carga, por lo que hoy se están analizando e investigando los daños que se generan en materiales con límite de fatiga, pero con ultra-alto ciclo (Pérez Ipiña, 2004).

- Resistencia a la corrosión: la resistencia a la corrosión de los materiales es una propiedad fundamental que determina la capacidad que poseen para resistir el deterioro causado por reacciones químicas o electroquímicas con su entorno. Este deterioro puede manifestarse de diversas formas, como oxidación, picaduras, grietas o pérdida de masa. Los ambientes atmosféricos salinos y el agua de mar son altamente corrosivos, por lo que los materiales utilizados en la construcción naval deben resistir la corrosión para garantizar la vida útil de las embarcaciones durante todo el ciclo de vida programado. Factores como la composición química y microestructura del material, el ambiente, recubrimientos y tratamientos superficiales, pueden ser determinantes en la mitigación de este fenómeno, el cual genera grandes pérdidas en la industria naval.

#### 4. Procesos metalúrgico-mecánicos asociados a la construcción naval

La elaboración de los materiales metálicos, como también las partes y piezas utilizadas para la construcción naval, implican varios procesos metalúrgicos. Entre ellos se encuentran la fundición, la laminación, el tratamiento térmico, la soldadura y el conformado (Williams, 1976).

- Fundición: la fundición es el proceso de verter metal fundido en moldes para crear piezas con formas específicas. Este proceso se utiliza para fabricar componentes estructurales y piezas de maquinaria para diferentes tipos de embarcaciones, cuya geometría es altamente compleja o son de un gran tamaño en volumen, dentro de los cuales destacan los llamados macizos: hélices, ejes, descansos de líneas de ejes, descanso de empuje y tubos de codaste, entre otros. Dadas las exigentes especificaciones técnicas de estos componentes, las fundiciones especializadas en estos trabajos son pocas y sus productos tienen un alto valor comercial, debido a la criticidad que representan en la estructura de un buque de gran tamaño o de alta complejidad.

- Laminación: La laminación es el proceso de pasar el metal a través de rodillos para reducir su espesor y mejorar sus propiedades mecánicas. Las planchas laminadas de acero se utilizan comúnmente en la construcción de cascos y otras partes estructurales de las embarcaciones, por lo que este producto plano es el más demandado en la construcción naval. Países que desarrollan la industria de construcción naval, muchas veces también desarrollan la industria siderúrgica o al revés, ya que la interacción y sinergia entre ellas es directa.
- Tratamiento térmico: el tratamiento térmico, que incluye procesos como el temple y el revenido (QT), se utiliza para mejorar las propiedades mecánicas de los metales. Este proceso es esencial para garantizar que los materiales metálicos utilizados en la construcción naval cumplan con los estándares requeridos de resistencia y durabilidad. Para el caso de los buques, generalmente se utiliza acero al carbono de baja aleación que cumpla la norma ASTM A131, el cual es normalizado, con microestructura ferrítica – perlítica, sin embargo, para el caso de los aceros utilizados en la construcción del casco de submarinos convencionales y nucleares, poseen una composición química diferente y son tratados térmicamente con QT.
- Soldadura: la soldadura es un proceso de unión de materiales, generalmente metálicos, en el cual se produce la unión de las piezas mediante la aplicación de calor, presión o ambos, con o sin el aporte de un material de relleno, utilizando los conceptos metalúrgicos de fusión, difusión atómica y solidificación. Es una técnica fundamental en la construcción naval, ya que permite ensamblar grandes estructuras metálicas de manera eficiente. La calidad de las soldaduras es crucial para la integridad estructural de los buques. Debido al ambiente marino, esta soldadura debe cumplir con requisitos específicos de resistencia a la corrosión y tenacidad, utilizándose en aceros navales especiales, como el AH36 y HY80 que tienen alta resistencia y ductilidad. Se aplican procesos de soldadura que garantizan la calidad de las uniones, como la soldadura por arco sumergido (SAW). Se realizan inspecciones no destructivas rigurosas para asegurar la integridad de las soldaduras, dentro de las cuales destacan el ultrasonido y la gammagrafía.
- Conformado: el conformado metálico es un conjunto de procesos de fabricación que se utilizan



Proceso de soldadura automatizada durante la confección de un mamaparo estructural de un buque en construcción. Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

para dar forma a los metales mediante la aplicación de fuerzas. En la construcción naval, estos procesos son esenciales para la creación de los componentes estructurales de los buques, como el casco, la cubierta y las cuadernas. Dentro de los procesos que destacan están:

- Plegado: se utiliza para crear ángulos y curvas en las planchas de metal. Se realiza aplicando fuerza a la plancha para doblarla alrededor de una matriz.
- Curvado: este proceso se utiliza para crear curvas complejas en las planchas de metal. Se realiza utilizando rodillos o prensas hidráulicas.
- Embutición: se utiliza para crear formas cóncavas en las planchas de metal. Se realiza presionando la plancha sobre una matriz con un punzón.

- Forjado: se utiliza para dar forma a los metales mediante golpes o presión. Se utiliza para crear componentes de alta resistencia, como ejes y hélices.

## 5. Innovaciones y avances tecnológicos

La ingeniería metalúrgica y la construcción naval han experimentado en conjunto numerosos avances tecnológicos que han mejorado significativamente los niveles de calidad, producción, rendimiento y seguridad de las embarcaciones.

- Materiales compuestos: los materiales compuestos, que combinan metales con otros materiales como polímeros y cerámicos, están ganando popularidad en la construcción naval. Estos materiales ofrecen una excelente resistencia específica y resistencia a la corrosión, lo que los hace

ideales para aplicaciones de alto valor tecnológico como son los USV (Unmanned Surface Vehicle), UUV (Unmanned Underwater Vehicle), cascos de embarcaciones de recreo, barcos de pesca, embarcaciones de alta velocidad y buques militares. Se utilizan para construir cubiertas, mamparos y otras estructuras no estructurales, lo que reduce el peso y mejora la estabilidad, como también componentes estructurales como mástiles, timones, hélices y tanques de almacenamiento para hidrógeno verde (H2V). Algunos desafíos y consideraciones son su alto costo, reparación compleja, falta de normativa y estandarizaciones para su uso en construcción naval y su bajo índice de reciclaje, lo que los hace poco atractivos en términos de sustentabilidad.

- Tecnologías de soldadura avanzadas: la soldadura, un proceso fundamental en la unión de materiales, ha experimentado avances significativos en los últimos años en el ámbito de la construcción naval. Las tecnologías de soldadura avanzadas han surgido para satisfacer las demandas de esta industria que requiere precisión, eficiencia y calidad en sus uniones (Mandal, 2017). Algunas tecnologías destacadas son:
  - Soldadura por láser: esta técnica utiliza un haz de luz de alta intensidad para fundir y unir materiales. Ofrece alta precisión, baja deformación térmica y la capacidad de soldar materiales delgados y complejos.
  - Soldadura por fricción-agitación (FSW): un proceso de estado sólido que genera calor mediante fricción y agitación mecánica. Produce uniones de alta calidad sin la necesidad de materiales de relleno. Se utiliza preferencialmente en la fabricación de cascos de aluminio.
  - Soldadura robótica y automatización: la integración de robots y sistemas automatizados en los procesos de soldadura. Aumenta la productividad, la consistencia y la seguridad. Permite ser aplicada en producción masiva y entornos confinados que pueden implicar peligro, como son estanques de buques o cascos de submarinos.
  - Soldadura híbrida láser-GMAW: combina la precisión del láser con la eficiencia de la soldadura por arco metálico con gas (GMAW). Ofrece alta velocidad de soldadura, buena calidad de unión y la capacidad de soldar materiales gruesos.
- Soldadura por haz de electrones (EBW): este tipo de soldadura usa un haz de electrones de alta velocidad en un ambiente de vacío para realizar soldaduras de alta calidad. Es utilizado en aplicaciones que requieran una alta precisión, y en materiales que son difíciles de soldar con otros métodos.
- Innovaciones adicionales en procesos de soldadura: sensores avanzados para monitoreo en tiempo real de los parámetros de soldadura para garantizar la calidad y la seguridad. Control de calidad automático con sistemas que inspeccionan las soldaduras y detectan defectos de forma inmediata. Realidad aumentada que integra simuladores que permiten la capacitación de soldadores en entornos virtuales, reduciendo costos y riesgos (Boekholt, 1996).
- Manufactura avanzada: El desarrollo de nuevas tecnologías digitales relacionadas con la manufactura está facilitando la implementación de la Industria 4.0 y 5.0. Incluye una combinación de técnicas, procesos y tecnologías emergentes que permiten la creación de componentes y estructuras con alta precisión, eficiencia y calidad, con el objetivo de mejorar el producto (Shrivastava et al., n.d.). Entre las técnicas relevantes se encuentran el mecanizado numérico automatizado y la manufactura aditiva metálica.
  - Mecanizado numérico automatizado: El mecanizado tradicional que eliminan material para crear la forma deseada sigue siendo fundamental en la producción de piezas y componentes. Los procesos como el fresado y el torneado se han perfeccionado con la integración de sistemas CNC (Control Numérico por Computadora) y modelos digitales, mejorando la precisión, repetibilidad y calidad de los procesos y productos.
  - Manufactura aditiva metálica: También conocida comúnmente como impresión metálica 3D, está cambiando la manera en la que se podrían producir las piezas complejas o desarrollar su reparación en caso de falla. Esta tecnología permitiría la fabricación/reparación de componentes directamente a partir de modelos digitales, reduciendo los tiempos de producción y los costos. No es una tecnología absolutamente madura en la fabricación, presentando una serie de desafíos asociados al tamaño y calidad de las piezas y componentes. Entre las principales técnicas se encuentran:



Proceso de conformado metálico de curvatura simple una sección del casco de un buque en construcción.  
Fotografía cortesía de Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile, Talcahuano (ASMAR).

Fusión selectiva por láser (SLM), Inyección de aglutinante (MBJ), Deposición de metal aglutinado (BDM), Fabricación aditiva por ultrasónidos (UAM), Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), Cladding, Thermal Spray (Joshi *et al.*, 2023).

## **6. Desafíos y oportunidades para la industria metalúrgica de Chile en el contexto de la Política Nacional de Construcción Naval**

El pasado 10 de enero del 2025, el Presidente de la República, Gabriel Boric Font, en el marco de su gira por la región del Biobío, firmó en los Astilleros y Maestranzas de la Armada (ASMAR) en Talcahuano, la Política Nacional de Construcción Naval. Si bien, esta noticia para algunos puede haber pasado desapercibida, representa un punto de inflexión para la construcción naval en Chile y una oportunidad para la industria nacional, especialmente la metalúrgica.

Tal como fue expresado en los puntos precedentes, la ingeniería metalúrgica representa una de las fuerzas motrices fundamentales para el desarrollo de otras industrias intensivas como la de construcción naval. Siendo más taxativo, sin metalurgia, no hay desarrollo de ninguna otra industria, y muchas veces la decisión pasa por importar la metalurgia y no desarrollarla en el propio país, con el propósito de evitar los costos de implementar una industria pesada de excelencia o por la ausencia de materias primas propias. Pero este no es el caso de Chile, que actualmente posee una industria metalúrgica cautiva y proveedora de la industria minera. Entonces, tal vez, la problemática sea la diversificación y la oportunidad podría estar en la construcción naval.

Históricamente, algunas naciones apostaron su desarrollo tecnológico en industrias similares a la naval, como la automotriz o la aeronáutica, pero todas, en términos económico – sociales, tienen la similitud de

buscar el desarrollo sobre la base de tres vectores: la academia, la industria y el estado (Etzkowitz y Leydesdorff, 1995). Pero ¿cuáles son los elementos diferenciadores de la industria naval para Chile?

La industria naval y marítima juega un papel crucial en la economía global, siendo responsable de transportar más del 90% del comercio internacional de mercancías, de las cuales, más del 70 % corresponden a commodities (minerales, metálicos, combustibles y agrícolas, entre otros). Para un futuro de mediano plazo, se prevé que la revolución tecnológica y económica asociada a la retirada paulatina de los combustibles fósiles, determine que Chile se convierta en uno de los principales productores y exportadores a nivel mundial de vectores energéticos o commodities energéticos avanzados y sustentables, tales como el Litio, Hidrógeno Verde y sus derivados, cuya única manera de ser transportados es por mar, ge-

nerando grandes necesidades de desarrollo naviero e infraestructura portuaria (Gobierno de Chile, 2018). Todo lo anterior determina y le da fuerza a la importancia estratégica de la actividad marítima para el desarrollo del país. Su valor se extiende a diversos aspectos, desde la construcción y el mantenimiento de buques, la operación de puertos, la prestación de servicios logísticos, desarrollo de tecnología, generación de empleos, impulso de la innovación, contribución a un futuro más sostenible, capacidad para facilitar el comercio internacional y contar con personal más calificado (Till, 2023).

Específicamente, la construcción naval presenta un conjunto de oportunidades significativas para el desarrollo nacional, abarcando aspectos económicos, sociales, educacionales, tecnológicos y estratégicos (Till, 2009).



El pasado 10 de enero del presente año, en los Astilleros y Maestranzas de la Armada (ASMAR) de Talcahuano, el Presidente de la República Gabriel Boric Font firmó la Política Nacional de Construcción Naval, en el marco de su gira por la región del Biobío. Fotografía cortesía de Prensa Presidencia, Gobierno de Chile.

Una industria de construcción naval robusta y desarrollada tiene un alto impacto en la economía, generando miles de empleos directos e indirectos, en diversos sectores, de buena calidad, bien remunerados, duraderos y con oportunidades de capacitación para la mano de obra local.

Se estima que, por cada empleo directo en construcción naval, se generan entre 2 y 3 empleos indirectos en otras áreas de la economía, generándose un fortalecimiento de la industria nacional y de la oferta laboral. Esto contribuye al desarrollo social de las comunidades donde se ubican los astilleros impulsando el desarrollo regional, ya que los astilleros suelen generar un efecto dinamizador en la economía local (De la Llera, 2018).

Lo anterior, demandará el ajuste o modificación de planes de estudios en distintas áreas de la Academia, acompañado implícitamente de mayor desarrollo tecnológico e innovación, ya que la construcción naval exige un alto nivel de conocimiento científico, técnico y tecnológico, lo que impulsa la investigación y el desarrollo en diversas áreas. Además, fomenta la transferencia de tecnología y la creación de nuevas empresas de base tecnológica capaces de ampliar su rubro de desempeño. El desarrollo de tecnologías propias permite a los países ganar competitividad en el mercado internacional.

La construcción naval puede convertirse en una importante fuente de exportaciones para un país, generando ingresos de divisas y contribuyendo al crecimiento del PIB, ya que los buques construidos en el Chile pueden ser vendidos a armadores nacionales e internacionales. La exportación de componentes y servicios navales también es una oportunidad para las empresas del sector.

Una industria naval sólida permite a un país construir y mantener sus propios buques militares, lo que aumenta su capacidad de defensa y disuasión. Esto también reduce la dependencia de otros países para la adquisición de armamento y equipos navales. Una fuerte presencia naval es clave para proteger la soberanía marítima y los intereses nacionales.

Claramente, la consolidación de una industria como la de construcción naval, demandará el soporte de una industria metalúrgica robusta y de vanguardia, la cual podría ser extranjera o nacional. Entonces, la gran pregunta es: ¿la industria metalúrgica chilena está dispuesta a tomar el desafío?

## Referencias

- Anderson TL. 2017. Fracture mechanics: Fundamental and Applications. Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Ratón, USA.  
<https://doi.org/10.1201/9781315370293>
- Andrews D. 2012. Choosing the style of a new design - the key ship design decision. International Journal of Maritime Engineering 154 (A2).  
<https://doi.org/10.5750/ijme.v160iA1.1048>
- Boekholt R. 1996. Welding systems and processes used in the fabrication, assembling and building dock. In Welding Mechanisation and Automation in Shipbuilding Worldwide.  
<https://doi.org/10.1533/9780857093196.69>
- Bruce G. 2021. Shipbuilding management. Springer Nature In Shipbuilding Management.  
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-8975-1>
- Dieter GE. 1988. Mechanical metallurgy. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, USA.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(62\)91145-6](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(62)91145-6)
- De la Llera, J. et al. (2018). EVALUACIÓN ECONÓMICA-SOCIAL DE ALTERNATIVAS PARA LA RENOVACIÓN DE LA FUERZA DE SUPERFICIE DE LA ARMADA DE CHILE.
- Etzkowitz H, Leydesdorff L. 1995. The triple helix - University - Industry - Government relations: A Laboratory for Knowledge Based Economic Development. EASST Review 14: 14-19.
- Gobierno de Chile. 2018. Política Oceánica Nacional de Chile. [https://www.acanav.cl/wp-content/uploads/2021/07/poli\\_tica\\_ocea\\_nica\\_nacional\\_de\\_chile\\_ok-1.pdf](https://www.acanav.cl/wp-content/uploads/2021/07/poli_tica_ocea_nica_nacional_de_chile_ok-1.pdf)
- Joshi S, Martukanitz RP, Nassar AR, Michaleris P. 2023. Additive manufacturing with metals: Design, processes, materials, quality assurance, and applications. In: Additive manufacturing with metals: Design, processes, materials, quality assurance, and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-37069-4>
- Kerwin JE, Hadler JB. 2010. The principles of naval architecture series: Propulsion. In: Society of Naval Architects and Marine Engineers. <https://app.knovel.com/kn/resources/kpPNASP004/toc>

- Larsson L, Raven HC, Paulling JR. 2010. Ship resistance and flow. <https://www.rexresearch1.com/BoatShipBuildingLibrary/PrinciplesNavalArchitShipResistanceFlow.pdf>
- Lee BS. 2019. Flotation. In: Hydrostatics and stability of marine vehicles. In: Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping.
- Mandal NR. 2017. Ship construction and welding. In: Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping. <http://www.springer.com/series/10523>
- Ministry of Defence UK. 2022. National Shipbuilding Strategy UK: A refreshed strategy for a globally successful, innovative and sustainable shipbuilding enterprise. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/643873/NationalShipbuildingStrategy\\_lowres.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/643873/NationalShipbuildingStrategy_lowres.pdf)
- Moore CS, Paulling JR. 2022. Intact stability. In: Encyclopedia of Ocean Engineering. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8\\_300387](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8_300387)
- Pantelakis S, Rodopoulos C. 2009. Engineering against fracture. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9402-6>
- Pérez Ipiña J. 2004. Mecánica de fractura. In: Alsina E. (Ed.). Librería y Editorial Alsina. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>
- Shrivastava A, Arora A, Srivastava C, Dhawan N, Singh SS. 2023. New horizons in metallurgy, materials and manufacturing. Springer Nature.
- Tibbitts BF. 2022. Naval surface ships. In: Ship Design & Construction, Volume 2, Chapter 55.
- Till G. 2009. Seapower, a guide for the Twenty-First Century. Ed. Routledge, London, UK.
- Till G. 2023. How to grow a navy: The development of maritime power. In: Taylor & Francis Group, Ed. Routledge, <https://doi.org/10.4324/9781003100553>
- UNCTAD. 2023. Review of maritime transport 2023, towards a green and just transition. United Nations Publications Ed. <https://doi.org/10.18356/9789213584569c006>
- Vorus WS. 2010. The principles of naval architecture Series: Vibration. Published by The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey, USA.
- Williams JD. 1976. Materials for engineers. In: Production engineer (Vol. 55, Issue 4). <https://doi.org/10.1049/tpe.1976.0066>



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERÍA**  
**METALÚRGICA**



Artículo de Investigación

# Ataque químico para el análisis metalográfico

## Chemical etching for metallographic analysis

### RESUMEN

La caracterización microestructural de metales y aleaciones es clave para entender sus propiedades. Una técnica esencial es el ataque químico, que revela detalles microestructurales mediante la reacción selectiva de una solución con las distintas fases del material. Este artículo revisa los fundamentos y aplicaciones del ataque químico en metalografía, explorando sus mecanismos y el contraste generado por la interacción entre reactivos y la superficie metálica. Se describen métodos convencionales, como soluciones acuosas de ácidos, bases y sales, junto con enfoques no convencionales, como ataques electrolíticos y reactivos inusuales. Se presentan ejemplos en aceros al carbono, inoxidables, avanzados y aleaciones no ferrosas, destacando la importancia de seleccionar reactivos y procedimientos adecuados. Un correcto ataque químico permite obtener un contraste óptimo, facilitando la caracterización completa de los constituyentes microestructurales y proporcionando información valiosa sobre la estructura y comportamiento de los materiales.

**Palabras clave:** Análisis metalográfico; Ataque químico; Microestructura; Aceros.

### ABSTRACT

The microstructural characterization of metals and alloys is key to understanding their properties. An essential technique is chemical etching, which reveals microstructural details through the selective reaction of a solution with the different phases of the material. This article reviews the fundamentals and applications of chemical etching in metallography, exploring its mechanisms and the contrast generated by the interaction between reagents and the metallic surface. Conventional methods, such as aqueous solutions of acids, bases, and salts, are described, along with non-conventional approaches, including electrolytic etching and unusual reagents. Examples are presented in carbon steels, stainless steels, advanced steels, and non-ferrous alloys, highlighting the importance of selecting appropriate reagents and procedures. Proper chemical etching enables optimal contrast, facilitating the complete characterization of microstructural constituents and providing valuable information about the structure and behavior of materials.

**Keywords:** Metallographic analysis, chemical etching, microstructure, steels.

### Autor de Correspondencia

**Dilan Muñoz Vilches**

luciano.figueroa@usach.cl

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

**Dilan Muñoz Vilches**

**Luciano Figueroa Maturana**

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 17 de marzo, 2025

Artículo Aceptado: 8 de mayo, 2025

Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



## Introducción

La caracterización microestructural de los metales y sus aleaciones es fundamental para comprender y predecir su comportamiento y propiedades. Una técnica esencial dentro del análisis metalográfico es el ataque químico, el cual revela los detalles microestructurales al reaccionar de manera diferenciada con el reactivo, dependiendo de la composición y estructura de cada fase presente en el material. En la Figura N° 1 se muestra el proceso metalográfico general, que consiste en seleccionar la pieza a estudiar, identificar la zona de interés, cortar dicha zona, montarla en resina o baquelita para facilitar su manipulación, prepararla mediante lijado y pulido, y finalmente aplicar un ataque químico para revelar la microestructura, la cual puede ser analizada con un microscopio metalográfico.

El ataque químico es una herramienta poderosa que permite visualizar y diferenciar las distintas fases,

constituyentes y defectos presentes en la microestructura de los metales (Kehl y Metlay, 1954; Bloor, 1972; Colpaert, 2018; Ayodele, 2024). Mediante la selección cuidadosa de los reactivos químicos adecuados, los investigadores pueden obtener un contraste óptimo que facilita la identificación y el análisis de los componentes microestructurales.

En este artículo, se explorarán los fundamentos teóricos detrás del ataque químico, así como los diferentes enfoques convencionales y no convencionales que pueden aplicarse. Además, se presentarán una variedad de ejemplos que ilustran la eficacia de esta técnica en la revelación de las microestructuras de diversos materiales metálicos, incluyendo aceros al carbono, aceros inoxidables, aceros avanzados y aleaciones no ferrosas.

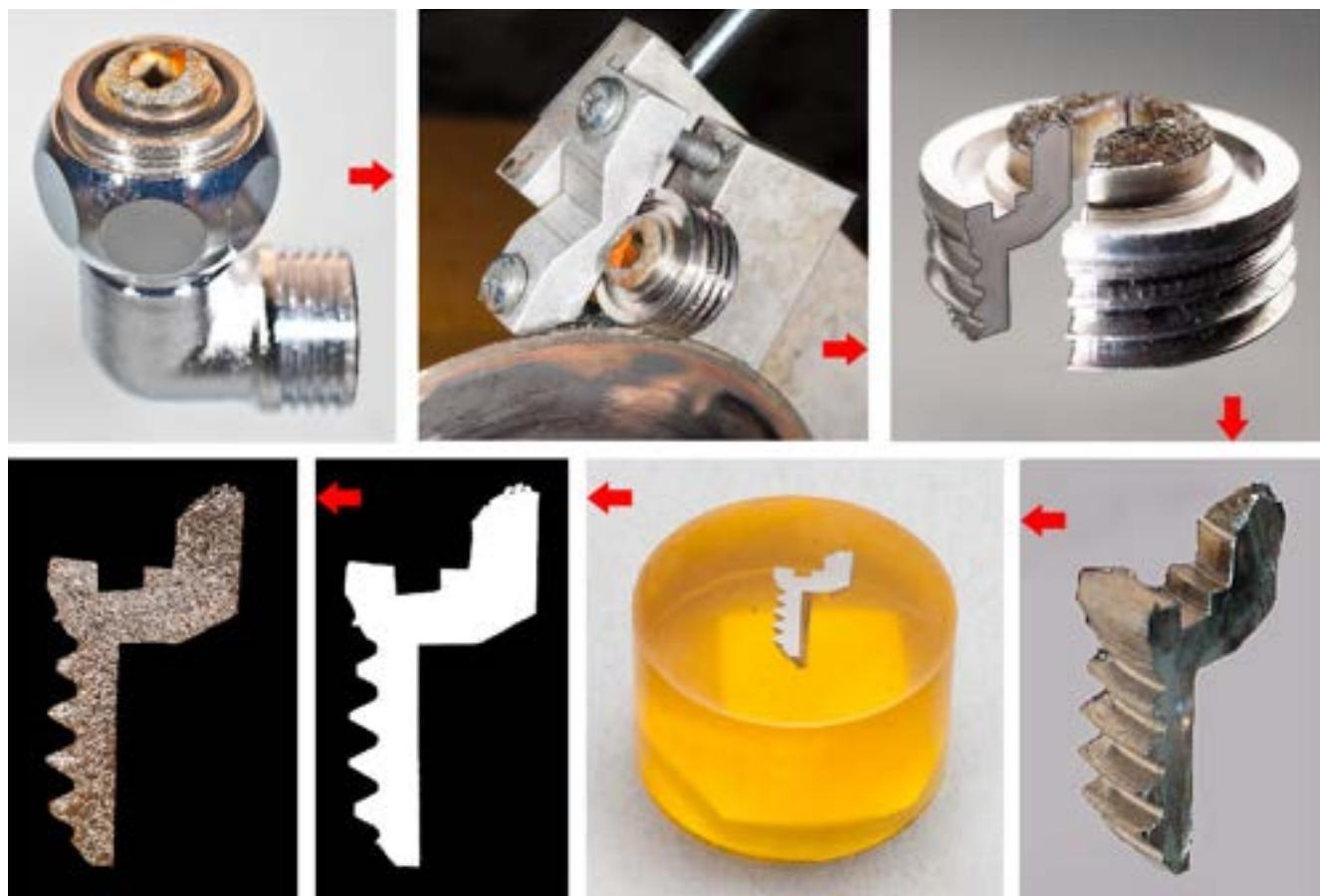


Figura N° 1. El proceso metalográfico (Berkeley Research Company, 2014)

## Fundamentos teóricos del ataque químico

El ataque químico se basa en la generación de contrastes microestructurales mediante la interacción controlada entre los reactivos químicos y la superficie del material. Este contraste se produce principalmente por dos mecanismos:

- Facetado de los cristales: Los reactivos químicos atacan a diferentes velocidades los granos en función de su orientación cristalográfica. Esto genera surcos en los límites de grano y diferencias de reflectividad entre los granos. La Figura N° 2 muestra una representación esquemática de la evolución del facetado por ataque de un grano con orientación (111), basado en el estudio de una chapa de aluminio 99.99% puro atacado con Keller durante 6 minutos (Wang et al., 2020).

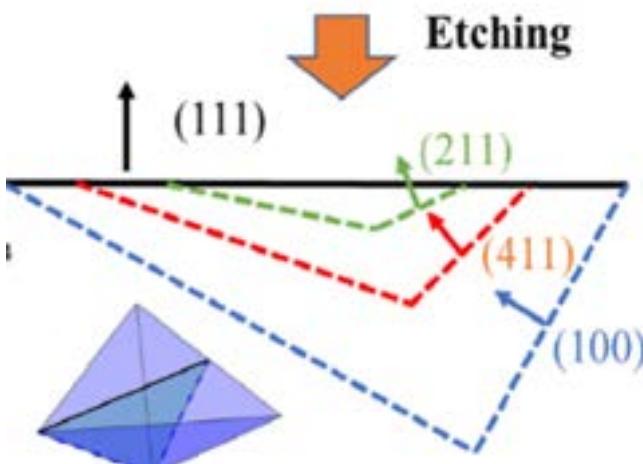


Figura N° 2. Representación esquemática del facetado (Wang et al., 2020).

- Diferencias de potencial electroquímico: En metales puros y aleaciones monofásicas, se generan potenciales entre granos con distintas orientaciones, entre límites de grano y el interior de los granos, o entre impurezas y la matriz. En aleaciones bifásicas o multifásicas, también hay diferencias de potencial entre fases de diferente composición. Estas diferencias de potencial permiten una disolución controlada de los constituyentes microestructurales.

Los reactivos químicos utilizados para el ataque suelen estar compuestos por tres elementos principales (Vander Voort, 1999):

- I. Agente corrosivo: Como los ácidos (clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, acético), son los encargados de

atacar y disolver selectivamente la superficie del material. Estos compuestos reaccionan con los constituyentes microestructurales, provocando su disolución a diferentes velocidades, lo que genera el contraste necesario para revelar la estructura.

- II. Modificador: Como los alcoholes o la glicerina, tienen la función de reducir la ionización del medio de ataque. Al disminuir la constante dieléctrica del agente corrosivo, se dificulta la formación de iones libres en la solución. Esto permite un mayor control sobre la cinética de las reacciones de disolución, evitando un ataque demasiado rápido o agresivo.
- III. Oxidante: Sustancias como el peróxido de hidrógeno, los iones férricos ( $Fe^{3+}$ ) o los iones cúpricos ( $Cu^{2+}$ ), regulan la velocidad de disolución al controlar el proceso de oxidación-reducción. Estos compuestos pueden actuar como aceptores de electrones, moderando la cinética de las reacciones de disolución. Un ajuste cuidadoso del poder oxidante es crucial para obtener un ataque químico óptimo y evitar resultados indeseados.

En algunos casos, un solo componente del reactivo puede cumplir dos funciones, como ocurre con el ácido nítrico en el nital, que actúa tanto como agente corrosivo como oxidante. Asimismo, en los ataques electrolíticos, la corriente aplicada desempeña el papel de oxidante, desencadenando directamente los procesos de disolución selectiva (Vander Voort, 1999). Es fundamental controlar cuidadosamente el poder oxidante del reactivo, ya que pequeñas variaciones pueden afectar significativamente la velocidad de disolución y la calidad del ataque. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto en el agua utilizada para preparar los reactivos puede incrementar la velocidad de disolución, por lo que se recomienda usar siempre agua destilada.

## Tipos de ataques

### Ataques convencionales

Los ataques químicos convencionales se basan en el uso de soluciones acuosas de diversos compuestos, como ácidos, bases y sales. Estos reactivos han sido ampliamente estudiados y utilizados en la práctica metalográfica a lo largo de los años, demostrando ser efectivos para una amplia gama de materiales metálicos.

Cabe destacar que la selección y aplicación de estos ataques químicos, ya sean ataques simples o combinados, deben seguir los lineamientos establecidos en la norma ASTM E407 - Standard Practice for Microetching Metals and Alloys (ASTM, 2023). Esta norma proporciona las pautas y procedimientos recomendados para llevar a cabo los diferentes tipos de ataques químicos de manera estandarizada, reproducible y segura.

Uno de los reactivos más utilizados en metalurgia para el estudio de aceros es el nital, una solución de ácido nítrico en etanol que funciona mediante un mecanismo de disolución selectiva. El ácido nítrico actúa como el agente corrosivo, atacando a diferentes velocidades los granos en función de su orientación cristalográfica (Vander Voort, 1999). Esto genera contrastes microestructurales, como surcos en los límites de grano y diferencias de reflectividad. Además, el ácido nítrico también desempeña un papel como oxidante, modulando aún más los procesos de disolución, mientras que el etanol presente en el nital cumple la función de modificador. Este reactivo se ocupa generalmente en una concentración de 3% en volumen, realizando el ataque con inmersión o frotación de la muestra, desde unos pocos segundos a varios minutos en el caso de ataques profundos.



Figura N° 3. Acero de medio manganeso atacado con nital 3% en volumen, observado con microscopía óptica (Muñoz, 2024).

En la Figura N° 3 se observa la microestructura de un acero de medio manganeso compuesta por regiones de perlita y martensita. Para revelar esta estructura, la muestra fue atacada utilizando una solución de nital al 3% en volumen, aplicada por inmersión durante un período de 7 segundos.

Además de los ataques químicos convencionales, también se pueden aplicar técnicas de ataques com-

binados, donde se utilizan múltiples reactivos de manera secuencial para revelar distintos aspectos de la microestructura. Estos procedimientos permiten obtener una caracterización más completa de los materiales metálicos.



Figura N° 4. Acero de medio manganeso atacado con nital y metabisulfito de sodio, observado con microscopía óptica (Muñoz, 2024).

Un ejemplo de ataque combinado es la secuencia de nital seguido de metabisulfito de sodio. En este caso, el nital inicial revela la estructura general, como granos, límites de grano y fases como perlita y martensita. Posteriormente, el ataque con metabisulfito de sodio resalta selectivamente los bordes de grano, permitiendo una mejor caracterización de la microestructura. En la Figura N° 4 se puede diferenciar este efecto en la microestructura del mismo acero de la Figura N° 3, donde el metabisulfito de sodio resalta con mayor intensidad las láminas de la perlita además de demarcar los límites de las laths dentro de la martensita.

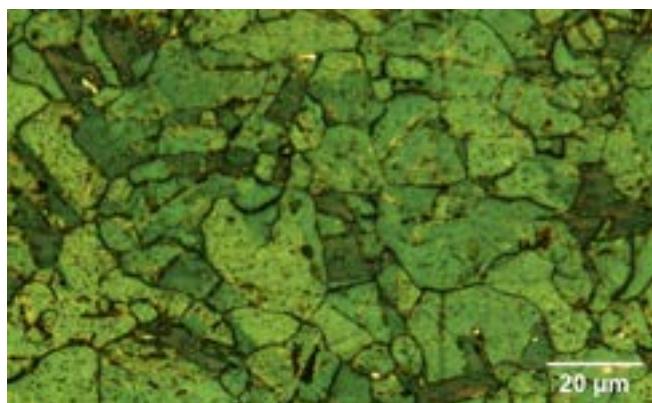


Figura N° 5. Acero inoxidable austenítico atacado con Beraha, observado con microscopía óptica

Los aceros inoxidables austeníticos son una clase de materiales ampliamente utilizados en diversas aplicaciones debido a su excelente resistencia a la corrosión. Sin embargo, esta misma propiedad los hace difíciles de atacar químicamente para revelar su microestructura.

El reactivo de Beraha (Beraha y Shpigler, 1977), una solución que contiene ácido clorhídrico (HCl), metabisulfito de potasio ( $K_2S_2O_5$ ) y agua destilada, es uno de los ataques ampliamente utilizados para revelar la microestructura de los aceros inoxidables austeníticos. El reactivo reacciona selectivamente con los bordes de grano y las maclas de la estructura austenítica, como se muestra en la Figura N° 5, produciendo un intenso color azul en estas regiones. Este efecto diferencial permite una clara visualización de la distribución y morfología de los granos austeníticos, así como la identificación de otras posibles fases presentes, carburos o ferrita delta.

En el caso de las aleaciones no ferrosas, el reactivo nital deja de ser efectivo, por lo que se emplean otros reactivos más adecuados para revelar la microestructura. Entre los más utilizados se encuentran el de Keller y el de Klemm. La Figura N° 6 muestra la microestructura de una aleación Cu-11,5%Al, solidificada en un molde de arena y posteriormente homogenizada a 800°C durante 4 horas, seguida de un enfriamiento en agua. La muestra fue atacada con Klemm II durante 10 minutos. Este reactivo consiste en una solución acuosa que contiene tiocianato de potasio ( $KSCN$ ) y cloruro de cobre (II) ( $CuCl_2$ ). Cuando se aplica el Klemm a una aleación Cu-Al, el tiocianato de potasio reacciona selectivamente con las fases ricas en aluminio. Por el contrario, las fases ricas en cobre no reaccionan de la misma manera y permanecen sin coloración o con un tono más claro. Este contraste pronunciado entre las diferentes fases de la aleación Cu-Al permite revelar la microestructura martensítica. De acuerdo con la literatura, se observa una mezcla de diferentes tipos de martensita, donde la más fina corresponde probablemente a martensita  $\beta'_1$ , mientras que la más gruesa se asocia a martensita  $\gamma'$ .

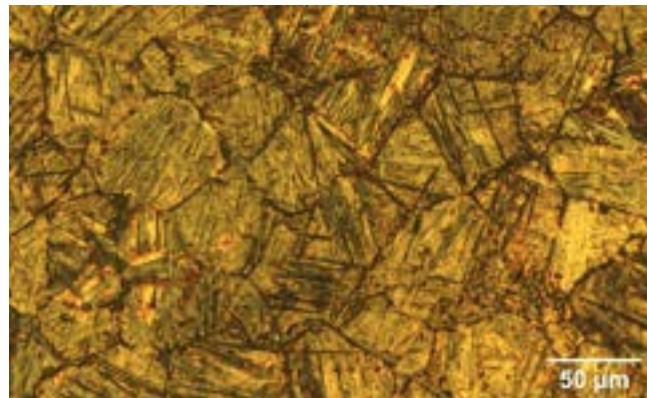


Figura N° 6. Aleación Cu-11.5%Al atacada con Klemm II, observado con microscopía óptica.

Por otro lado, la Figura N° 7 presenta la microestructura de una aleación Zn-27%Al en estado as-cast, solidificada en un molde de grafito. El ataque se realizó con Palmerton, que es una solución que contiene cloruro de cobre y ácido clorhídrico en agua destilada. Cuando se aplica, el cloruro de cobre reacciona selectivamente con los granos de zinc, disolviendo preferencialmente estas regiones. El ácido clorhídrico presente en la solución ayuda a intensificar el ataque sobre los granos de zinc, permitiendo resaltar las dendritas de la fase  $\alpha$ , rica en aluminio, las cuales están generalmente rodeadas por el eutéctico característico de esta aleación.

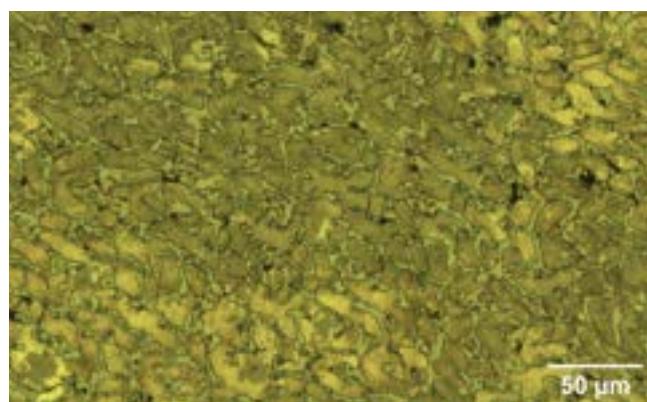


Figura N° 7. Aleación Zn-27%Al atacada con Palmerton, observado con microscopía óptica (Figueroa y Bustos, 2025).

En algunos casos, el ataque químico convencional no es suficiente para revelar la microestructura de manera adecuada. En tales situaciones, el ataque químico profundo es un procedimiento metalográfico que emplea reactivos agresivos y tiempos de exposición prolongados para lograr una mayor revelación de la estructura interna, especialmente en estudios de macroestructura y análisis tridimensional de fases. El primer procedimiento de este tipo en acero fue desarrollado por Waring y Hofamman (Rawdon y Epstein, 1920), utilizando una mezcla de ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y agua. Inicialmente, su aplicación generó controversia debido al uso de ácidos fuertes en componentes altamente solicitados, pero estudios posteriores demostraron su gran utilidad. Sin embargo, el ataque profundo puede alterar la percepción de la microestructura al aumentar el tamaño aparente, la fracción volumétrica y el número de partículas de segunda fase, disminuyendo su espaciamiento. Por ello, aunque es útil para analizar la forma y tamaño de fases, su uso indebido puede llevar a interpretaciones erróneas. La Figura N° 8 presenta un ataque químico profundo con Nital al 30%, empleado para revelar la morfología de los carburos, su disposición en la matriz austenítica y el facetado en un acero Hadfield (Figueroa, 2023)

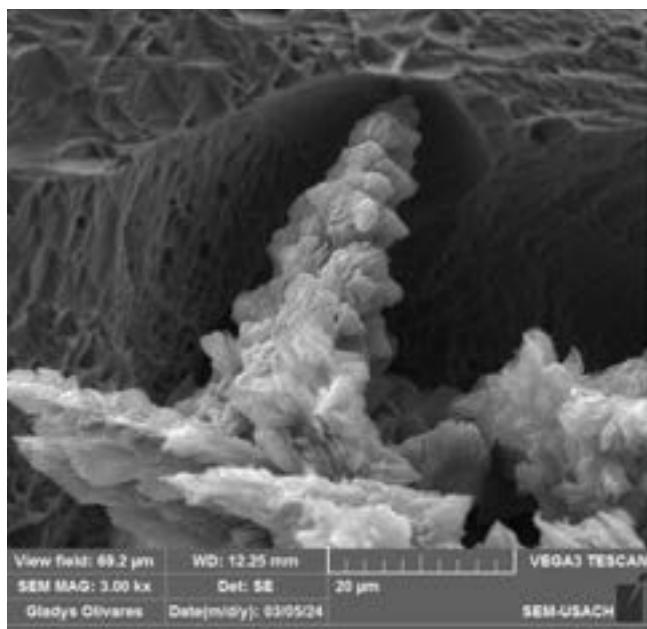


Figura N° 8. Ataque profundo con Nital al 30% a un acero Hadfield observado con microscopía electrónica de barrido. (Figueroa, 2023)

## Ataques no convencionales

A diferencia de los ataques químicos convencionales, los ataques no convencionales emplean métodos alternativos para revelar la microestructura de los materiales metálicos, como el uso de reactivos inusuales, soluciones en medios no acuosos, ataques térmicos o técnicas electroquímicas. Entre estos, los ataques electrolíticos destacan por su capacidad de disolver selectivamente ciertas fases del material mediante la aplicación de una corriente eléctrica en una solución conductora. En este proceso, el potencial aplicado reemplaza al oxidante de un reactivo químico, permitiendo un control más preciso del ataque mediante la regulación del voltaje y el tiempo de exposición. Además, la muestra suele ser el ánodo, aunque en algunos casos se han desarrollado soluciones para ataque catódico.



Figura N° 9. Acero dúplex atacado con ácido oxálico, observado con microscopía óptica.

La Figura N° 9 muestra la microestructura de un acero dúplex atacado con ácido oxálico al 10% durante 20 segundos a 6 V. En ella se distinguen claramente las regiones de ferrita  $\delta$  y las islas de austenita, algunas de las cuales presentan maclas, una característica típica de estos aceros. Por otro lado, la Figura N° 10 presenta el mismo acero, pero atacado con persulfato de amonio durante 10 segundos a 6 V. En esta imagen se identifican tres zonas diferenciadas: el cordón de soldadura, la zona afectada térmicamente (ZAT) y el material base, permitiendo observar los cambios microestructurales inducidos por el proceso de soldadura.



Figura N° 10. Soldadura en acero dúplex atacado con persulfato de amonio, observado con microscopía óptica.

La Figura N° 11 muestra el mismo acero austenítico de la Figura N° 5, pero atacado electrolíticamente con persulfato de amonio durante 40 segundos a 6 V. Este tratamiento resalta principalmente los bordes de grano y las maclas, permitiendo una mejor definición de la microestructura y facilitando su análisis.

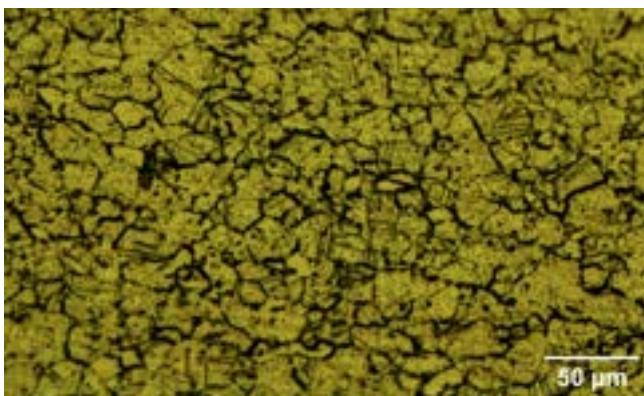


Figura N° 11. Acero inoxidable austenítico atacado con persulfato de amonio, observado con microscopía óptica.

Además de los reactivos convencionales, algunos ataques novedosos y no tradicionales han demostrado ser efectivos en la revelación microestructural de ciertos metales, aprovechando la acción de los ácidos presentes en sustancias de uso cotidiano.

La Coca-Cola, por su contenido de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), puede actuar como un agente corrosivo suave, resaltando límites de grano y zonas de segregación en aceros y aleaciones base hierro. De mane-

ra similar, el jugo de limón y el vinagre, ricos en ácido cítrico y ácido acético, permiten un ataque controlado en materiales como cobre, latón, bronce y plomo, revelando la distribución de fases intermetálicas. Por otro lado, los detergentes industriales, debido a la presencia de agentes alcalinos y surfactantes, pueden generar un ataque selectivo en aleaciones ligeras, eliminando capas superficiales oxidadas y resaltando estructuras internas.

La Figura N° 12 muestra el ataque con Coca-Cola, realizado a 40°C durante aproximadamente 30 minutos a un acero de medio manganeso. En este proceso, la microestructura martensítica junto con el grano austenítico previo se reveló de manera leve. Precisamente, esta baja agresividad del ataque es la razón por la que estos reactivos no son ampliamente utilizados, ya que su efectividad es limitada para ciertos propósitos. Si bien estos métodos pueden ser útiles en estudios preliminares, su reproducibilidad y precisión son limitadas en comparación con los reactivos metalográficos estandarizados, por lo que no hay reportes en la literatura.



Figura N° 12. Muestra de acero de medio manganeso atacada con Coca-Cola a 40°C durante aproximadamente 30 minutos, observado con microscopía óptica (Breton, 2023).

## Conclusión

El análisis microestructural de los materiales metálicos es fundamental para comprender y optimizar sus propiedades y desempeño en diversas aplicaciones industriales. En este contexto, los ataques químicos juegan un papel crucial, ya que permiten revelar la estructura interna de estos materiales de una manera efectiva.

Existe una amplia gama de técnicas de ataque químico, tanto convencionales como no convencionales, que pueden ser empleadas para este propósito. Los métodos convencionales, como el uso de reactivos específicos, se caracterizan por su efectividad comprobada y su amplia aceptación en la comunidad científica y técnica. Sin embargo, en determinados casos, puede ser necesario explorar opciones alternativas, debido a las características particulares del material o los objetivos del análisis.

Es importante tener en cuenta que la selección del método de ataque más adecuado dependerá de factores como la composición y microestructura del material, así como los requisitos y limitaciones del análisis. Asimismo, es fundamental seguir las normas y protocolos de seguridad correspondientes durante la ejecución de estos procedimientos, a fin de garantizar la integridad de las muestras y la seguridad del personal involucrado.

El dominio de diversas técnicas de ataque químico, ya sean convencionales o alternativas, permite a los investigadores y profesionales obtener una comprensión más completa y precisa de la microestructura de los materiales metálicos, lo que contribuye al desarrollo de mejores aplicaciones y soluciones en la industria.

## Bibliografía

ASTM. 2023. Standard practice for microetching metals and alloys. ASTM International.  
<https://doi.org/10.1520/E0407-23>

Ayodele A. 2024. Chemical etching: A comprehensive guide to processes, applications, and techniques. <https://www.wenvolver.com/article/chemical-etch>

Beraha E, Shpigler B. 1977. Color metallography. American Society for Metals, Metals park, California, USA.

Berkeley Research Company. The Metallographic process. 2014. [Berkeleyrc.com](http://www.berkeleyrc.com/metallography.html)

Bloor DW. 1962. Etching with special reference to nickel-chromium-cobalt alloys. Metallurgia 66: 139-142.

Bloor DW. 1972. Electrochemical principles of etching. Met Aust 4: 279-282.

Breton L. 2023. Study of the austenitic grain growth. (Comunicación personal)

Colpaert H. 2018. Metallography of steels interpretation of structure and the effects of processing- ASM International.

Figueroa L. 2023. Efecto de las vibraciones mecánicas de un molde vibratorio en la microestructura y propiedades mecánicas de un Acero Hadfield. Tesis, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Figueroa L, Bustos O. 2025. Explorando la transformación martensítica en el sistema Cu-Al. Remetallica (este mismo número).

Kehl GL, Metlay M. 1954. The mechanism of metallographic etching. Electrochem Soc 101: 124-127.

Lacombe P. 1964. Polishing and etching methods and their applications to optical metallography. Iron Steel Inst., London, Spec. Rep. 80, 1964, pp. 50-120.

Muñoz D. 2024. Tempering-induced carbon partitioning for enhanced mechanical properties in medium manganese steels. Tesis. Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

Rawdon HS, Epstein S. 1920. Metallographic features revealed by the deep etching of steel. Technol Paper of the Bureau Standard, Washington, USA.

Schatt W, Worch H. 1969. The development of metallographic structures by solutions. Neue Huette 14: 685-690.

Vander Voort GF. 1999. Metallography principles and practice. ASM International, Ohio, USA.

Wang X, Gao S, Jain E, Gaskey B, Seita M. 2020. Measuring crystal orientation from etched surfaces via directional reflectance microscopy. Journal of Materials Science 55: 11669-11678.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-020-04734-z>



Artículo de Divulgación

# Historia de la plata: desde el comercio hasta la medicina y la exploración espacial

## History of silver: from trade to medicine and space exploration

### RESUMEN

La plata ha sido un metal de gran relevancia histórica y tecnológica desde la antigüedad, valorada por su belleza, maleabilidad y propiedades antimicrobianas. Civilizaciones como la egipcia, griega, romana y china la utilizaron en monedas, joyas y para conservar agua potable. Su rol se amplificó durante la conquista de América, donde las minas de Potosí y Zacatecas impulsaron la economía global. En la era moderna, la plata ha tenido aplicaciones clave en fotografía, electrónica, purificación de agua y especialmente en medicina. Desde Hipócrates, quien recomendó su uso para tratar heridas, hasta el desarrollo de compuestos como el Argyrol por Albert Barnes, la plata ha demostrado una notable eficacia antimicrobiana. Hoy, se emplea en apósticos, catéteres, prótesis, nanotecnología y sistemas de purificación en hospitales y estaciones espaciales. Su versatilidad y valor científico la mantienen como un recurso estratégico en múltiples disciplinas, destacando especialmente en la prevención de infecciones resistentes a antibióticos.

**Palabras clave:** Plata; Historia de la plata; Uso de la plata; Antimicrobiana

### ABSTRACT

Silver has been a metal of great historical and technological relevance since antiquity, valued for its beauty, malleability, and antimicrobial properties. Civilizations such as the Egyptian, Greek, Roman, and Chinese used it in coins, jewelry, and to preserve drinking water. Its role was amplified during the conquest of the Americas, where the mines of Potosí and Zacatecas fueled the global economy. In the modern era, silver has had key applications in photography, electronics, water purification, and especially in medicine. From Hippocrates, who recommended its use for treating wounds, to the development of compounds such as Argyrol by Albert Barnes, silver has demonstrated remarkable antimicrobial efficacy. Today, it is used in wound dressings, catheters, prostheses, nanotechnology, and purification systems in hospitals and space stations. Its versatility and scientific value maintain it as a strategic resource in multiple disciplines, standing out particularly in the prevention of antibiotic-resistant infections.

**Keywords:** Silver; History of silver; Uses of silver; Antimicrobial

### Autor de Correspondencia

**Manuel Ignacio Azócar**

manuel.azocar@usach.cl

Departamento de Química de los Materiales  
Facultad de Química y Biología  
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 8 de mayo, 2025

Artículo Aceptado: 29 de mayo, 2025

Artículo Publicado: 10 de junio, 2025



# Introducción

## Historia de la plata

El uso de la plata se remonta a más de 4.000 años AC, con evidencias de su extracción en las antiguas civilizaciones de Mesopotamia y Egipto (Sherratt, 2018). Los egipcios la consideraban un metal más valioso que el oro debido a su rareza en esa región. En la antigua Grecia y Roma, la plata se utilizaba ampliamente para la acuñación de monedas, un uso que perduró durante siglos y que consolidó su importancia económica en la historia de la humanidad.



Figura N°1 Denario de plata conmemorativo al retorno de Adriano en 118 d. C.  
foto: Carole Raddato

En la cultura china, la plata también desempeñó un papel relevante en la economía y el comercio. Durante la dinastía Tang (618-907 d.C.), la plata se utilizaba en transacciones comerciales y en la elaboración de piezas ornamentales de gran valor. En la dinastía Ming (1368-1644), se convirtió en la principal forma de moneda utilizada en el pago de impuestos y el comercio internacional, estableciendo una fuerte conexión con el mercado europeo y americano (Bargueño-Gómez y Xiao, 2024).

Durante la Edad Media, se descubrieron importantes minas de plata en Europa, particularmente en Alemania y España, lo que permitió la expansión de su comercio. En este período, la plata fue fundamental en la fabricación de monedas, copas litúrgicas y ornamentos religiosos en la Iglesia Católica. El auge de la minería de plata en Europa consolidó su importancia en la economía feudal y, más tarde, en el comercio entre reinos (Pieper, 2019).

El mayor auge en la producción de plata ocurrió tras la conquista de América por los europeos en el siglo XVI. Las minas de Potosí (actual Bolivia) y Zacatecas (Méjico) se convirtieron en los principales yacimientos de plata del mundo, generando una enorme riqueza para España y facilitando la globalización del comercio de este metal. La plata extraída de América fue enviada en grandes cantidades a Europa y Asia, especialmente a China, donde era utilizada como moneda de cambio en los mercados. Este comercio transoceánico impulsó el desarrollo de nuevas rutas comerciales y fortaleció la primera etapa de la globalización económica (Lane, 2021).

En los siglos XVII y XVIII, la plata continuó siendo un pilar fundamental en la economía mundial. España y otros imperios europeos utilizaron la plata americana para financiar sus guerras, consolidar sus economías y expandir su influencia en ultramar. Durante este período, las monedas de plata como el real de a ocho se convirtieron en una de las divisas más aceptadas en el mundo, estableciendo las bases del sistema monetario global (Bonialian y Hausberger, 2018).

En el siglo XIX, con el desarrollo de nuevas técnicas de minería y refinación, la producción de plata experimentó un nuevo auge. Estados Unidos descubrió en 1859 importantes yacimientos en Nevada, particularmente en la famosa Comstock Lode, lo que reforzó su papel en la economía mundial. Paralelamente, la industrialización y la creciente demanda de plata en la fotografía, la medicina y la electricidad impulsaron aún más su valor y utilidad (Vikre, 1989).

En los siglos XX y XXI, la plata ha mantenido su importancia, aunque su uso en la acuñación de monedas ha disminuido con la adopción del papel moneda y los sistemas financieros modernos. Sin embargo, sigue siendo un activo de inversión en forma de lingotes y monedas conmemorativas. Con el auge de la tecnología, la plata ha encontrado nuevas aplicaciones en la industria electrónica, la energía renovable y la nanotecnología, consolidándose como un material clave en el desarrollo del mundo moderno (Guerrero y Pretel, 2024).

## Aplicaciones de la plata

La plata ha sido utilizada en una gran variedad de aplicaciones a lo largo de la historia, aprovechando sus propiedades físicas y químicas únicas. Entre sus usos más importantes se encuentran:

## Joyería y ornamentación

A lo largo de la historia, diversas culturas han utilizado la plata en la joyería con fines ornamentales y simbólicos. En el antiguo Egipto, las joyas de plata eran consideradas un símbolo de estatus y riqueza, reservadas para la nobleza y los sacerdotes. En la Grecia clásica, la plata se empleaba en la creación de delicadas piezas decorativas y amuletos con inscripciones y símbolos religiosos. En la cultura precolombina de América, las civilizaciones andinas, como los incas, trabajaban la plata con gran destreza, creando impresionantes ornamentos y objetos ceremoniales (Rovira, 2017).



Figura N° 2 Figurilla inca de plata pura perteneciente al reino Chimú (900-1470 DC). La pieza alcanza los 23 cm de altura y la cabeza va tocada con un casquete troncocónico soldado que, a su vez, lleva una tapa, orejones y pene también soldadas.

En la Edad Media y el Renacimiento, la plata se convirtió en un material fundamental en la orfebrería europea, con la creación de intrincadas piezas de joyería y objetos litúrgicos adornados con piedras preciosas. Durante la época victoriana, la plata adquirió una enorme popularidad en la alta sociedad británica, utilizada en la confección de broches, medallones y adornos sofisticados. En el siglo XX, la industria de la joyería experimentó una gran evolución con el desarrollo de técnicas de fabricación en masa, permitiendo que la joyería de plata fuera más accesible para un público más amplio.

En la actualidad, la plata sigue siendo un material altamente demandado en la industria de la joyería,

tan en piezas artesanales como en diseños contemporáneos de alta gama. Su versatilidad permite combinarla con otros materiales como piedras preciosas, esmaltes y metales diversos, ampliando las posibilidades de diseño. Asimismo, la plata se ha incorporado en la joyería sostenible, con prácticas responsables de extracción y producción que buscan reducir el impacto ambiental. Su uso en la moda y el diseño sigue en constante evolución, consolidando su lugar como uno de los metales preciosos más apreciados a nivel mundial.

## Industria fotográfica

La plata desempeñó un papel crucial en el desarrollo de la fotografía desde el siglo XIX hasta finales del siglo XX. Sus compuestos, en especial el nitrato de plata, fueron fundamentales en la creación de emulsiones fotosensibles utilizadas en placas, películas y papel fotográfico. El proceso de revelado químico dependía de la capacidad del haluro de plata para captar la luz y transformarla en imágenes permanentes (Nickel, 2001).

Su uso en la fotografía radica en las propiedades fotosensibles de los haluros de plata, como el bromuro de plata y el cloruro de plata. Estos compuestos experimentan una reacción fotoquímica cuando son expuestos a la luz, formando imágenes latentes que pueden ser reveladas mediante procesos químicos específicos. Esta capacidad para reaccionar a la luz con gran precisión y detalle convirtió a la plata en el material esencial en la captura y reproducción de imágenes durante más de un siglo.



Figura N° 3 Fotografía en gelatina de plata montada en página de álbum.

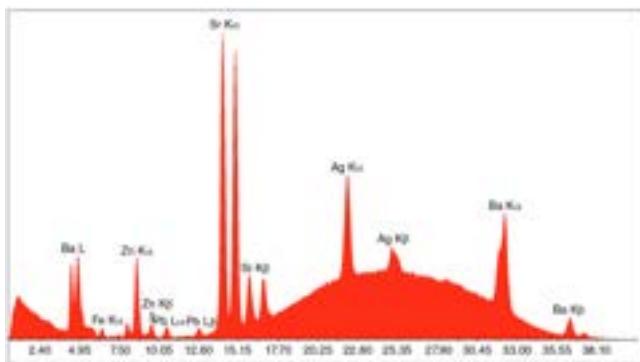


Figura N°4 Espectro XRF (La fluorescencia de rayos X) registrado del área Dmax de la fotografía superior.

Durante el siglo XIX, pioneros como Louis Daguerre y William Henry Fox Talbot utilizaron compuestos de plata para desarrollar las primeras técnicas fotográficas. El daguerrotipo, uno de los primeros métodos exitosos, empleaba placas de cobre recubiertas de plata y tratadas con vapores de yodo para crear imágenes detalladas y de alta calidad. Posteriormente, la fotografía en película utilizó bromuro de plata en emulsiones sobre soportes flexibles, revolucionando la industria y permitiendo la producción masiva de imágenes.

A lo largo del siglo XX, la plata fue indispensable en la fotografía profesional, el cine y la producción de material radiográfico en la medicina. Grandes compañías como Kodak, Fuji y Agfa desarrollaron procesos avanzados de fabricación de películas fotosensibles con plata, lo que permitió el auge de la fotografía

analógica. Se estima que en su apogeo, más del 50% de la plata extraída anualmente se destinaba a la industria fotográfica (Stulik y Kaplan, 2013).

Sin embargo, con la llegada de la fotografía digital a finales del siglo XX y su masificación en el siglo XXI, el uso de la plata en este sector se redujo drásticamente. La tecnología de sensores digitales reemplazó a las películas de haluro de plata, disminuyendo la demanda del metal en esta aplicación. A pesar de ello, la fotografía en película aún mantiene un nicho entre fotógrafos profesionales y entusiastas que valoran la calidad y textura únicas de las imágenes analógicas.

Hoy en día, aunque su papel en la fotografía ha mermado, la plata sigue siendo utilizada en ciertos procesos industriales de impresión y en la restauración de imágenes antiguas. Su legado en la evolución de la imagen y su impacto en la documentación visual de la historia son innegables.

### Electrónica

La plata es un material esencial en la industria electrónica debido a su alta conductividad eléctrica, que es la más elevada de todos los metales. Se emplea en la fabricación de contactos eléctricos, circuitos impresos, teclados de membrana, interruptores y otros componentes esenciales en dispositivos electrónicos. Su capacidad para reducir la resistencia y mejorar la eficiencia energética la convierte en un material indispensable en la producción de dispositivos modernos (Barillo y Marx, 2014).

Material	Resistivity $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) at 20	Conductivity $\sigma$ ( $\text{S}/\text{m}$ ) at 20
Plata (Ag)	$1.59 \times 10^{-8}$	$6.30 \times 10^7$
Cobre (Cu)	$1.68 \times 10^{-8}$	$5.96 \times 10^7$
Oro (Au)	$2.44 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^7$
Aluminio (Al)	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.5 \times 10^7$
Calcio (Ca)	$3.36 \times 10^{-8}$	$2.98 \times 10^7$
Tungsteno (W)	$5.60 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^7$
Zinc (Zn)	$5.90 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^7$
Níquel (Ni)	$6.99 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^7$
Litio (Li)	$9.28 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^7$
Hierro (Fe)	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^7$

Figura N° 5 En la siguiente tabla se pueden apreciar la lista de los 10 metales con más alta conductividad eléctrica.

En los circuitos impresos, la plata se utiliza en forma de pastas conductoras que facilitan la transmisión eficiente de electricidad en dispositivos como teléfonos móviles, tabletas y computadoras. También se encuentra en los contactos eléctricos de interruptores y conectores debido a su baja resistencia al paso de la corriente y su resistencia a la corrosión.

Otro uso importante de la plata en electrónica es en la producción de celdas solares, donde actúa como material conductor en los paneles fotovoltaicos, aumentando la eficiencia en la conversión de la luz solar en electricidad. Además, se emplea en baterías de plata-óxido, que son altamente eficientes y utilizadas en dispositivos médicos, relojes y equipos militares.

Gracias a su papel fundamental en la miniaturización de componentes electrónicos y su capacidad para mejorar la eficiencia energética, la demanda de plata en la industria electrónica sigue en crecimiento. Con el avance de la nanotecnología y la expansión de la electrónica flexible, se espera que la plata continúe desempeñando un papel clave en el desarrollo de nuevas tecnologías (Adams *et al.*, 2008).

## Medicina

El uso de la plata en medicina tiene una larga historia que se remonta a las civilizaciones antiguas. Ya en Egipto, Grecia y Roma, la plata se utilizaba por sus

propiedades antimicrobianas para tratar heridas y prevenir infecciones.

Estas civilizaciones descubrieron que la plata tenía la capacidad de conservar el agua y otros líquidos por más tiempo, evitando su contaminación. Los persas, griegos y romanos utilizaban recipientes de plata para almacenar agua potable, ya que notaban que se mantenía fresca y libre de impurezas durante más tiempo. También, en la Europa medieval, los viajeros y soldados solían colocar monedas de plata en cantimploras y barriles de agua para prevenir enfermedades (Barillo y Marx, 2014; Medici *et al.*, 2019).

En la actualidad, la plata sigue desempeñando un papel crucial en la purificación del agua gracias a sus propiedades antimicrobianas. Muchas empresas incorporan plata en filtros domésticos e industriales para prolongar la vida útil de los sistemas de purificación y reducir la necesidad de productos químicos adicionales, como el cloro. En el ámbito espacial y militar, la NASA y otras agencias como las rusas han implementado tecnologías basadas en plata para garantizar el suministro de agua potable en misiones espaciales y entornos extremos. Dado su éxito en aplicaciones anteriores, la NASA y otras agencias espaciales están investigando el uso de sistemas avanzados de purificación con plata para futuras misiones de larga duración, incluidas las expediciones a la Luna y Marte (Ley *et al.*, 2021).



Figura N° 6 Estación Espacial Internacional (ISS): El segmento ruso emplea un sistema de purificación de agua basado en la liberación controlada de iones de plata. Este método permite una desinfección eficaz sin generar subproductos químicos perjudiciales, como los que pueden producirse con el uso de cloro.

Hipócrates, conocido como el padre de la medicina, fue uno de los primeros en documentar el uso terapéutico de la plata en el siglo V a.C. En sus escritos, describió cómo este metal podía emplearse en el tratamiento de úlceras y heridas abiertas debido a sus propiedades curativas y protectoras. Observó que la aplicación de plata ayudaba a reducir la inflamación y a prevenir infecciones, lo que favorecía la cicatrización de los tejidos dañados. En aquel tiempo, los médicos griegos utilizaban finas láminas de plata o polvo de plata sobre las heridas para acelerar su recuperación y evitar la gangrena, un problema común en heridas infectadas (Barillo y Marx, 2014; Medici *et al.*, 2019).

Además, Hipócrates recomendaba el uso de recipientes de plata para conservar líquidos medicinales, pues se había dado cuenta de que estos se mantenían frescos y sin signos de contaminación por más tiempo. Esta observación empírica sentó las bases para la comprensión de las propiedades antimicrobianas de la plata, aunque su mecanismo de acción no sería científicamente demostrado hasta siglos después. Los discípulos de Hipócrates continuaron empleando la plata en la práctica médica, aplicándola en di-

versas afecciones de la piel y en infecciones externas. El conocimiento transmitido por Hipócrates influyó en la medicina romana y bizantina, donde el uso de la plata para el tratamiento de heridas persistió y se perfeccionó con nuevas técnicas. Se comenzó a emplear en combinación con ungüentos y vendajes de lino impregnados con polvo de plata para maximizar su efectividad. Aunque en aquella época no se comprendía la acción biológica de la plata, la experiencia clínica confirmaba su efectividad en la prevención de infecciones, lo que consolidó su uso en la medicina tradicional durante siglos (Barillo y Marx, 2014).

En la Edad Media, se popularizó el uso de utensilios de plata en la nobleza, no solo por su valor, sino por la creencia de que prevenían enfermedades.

Durante el siglo XIX, el nitrato de plata se convirtió en un antiséptico común en la medicina occidental. Se usaba para tratar heridas y prevenir infecciones en cirugías. A finales del siglo XIX y principios del XX, la plata coloidal comenzó a utilizarse como antibiótico antes de la invención de los antibióticos modernos (Medici *et al.*, 2019).



Albert C. Barnes, químico y empresario estadounidense, fue el creador de Argyrol, un innovador compuesto a base de proteínas y plata que revolucionó la medicina a principios del siglo XX. Desarrollado en 1901, Argyrol era una solución coloidal de plata utilizada principalmente como antiséptico en el tratamiento de infecciones oculares. Su eficacia en el tratamiento de infecciones lo convirtieron en un producto ampliamente utilizado en todo el mundo. Gracias al éxito comercial de Argyrol, Barnes acumuló una gran fortuna, la cual posteriormente destinó a la creación de la Fundación Barnes, una institución dedicada al arte y la educación.

Su popularidad disminuyó con el descubrimiento de la penicilina, pero en las últimas décadas ha resurgido su uso gracias a los avances en nanotecnología. Actualmente, la plata se emplea en catéteres, apóstitos para heridas y recubrimientos antibacterianos en hospitales, ayudando a prevenir infecciones resistentes a los antibióticos convencionales. Gracias a estas innovaciones, la plata sigue siendo un material clave en la medicina moderna, contribuyendo a la seguridad y eficacia de los tratamientos médicos.

## Referencias

- Adams D, Alford TL, Mayer JW. 2008. Silver metallization stability and reliability. Springer, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-027-8>
- Bargueño-Gómez E, Xiao M. 2024. Diseño de joyas de oro y plata en la dinastía Ming (1368-1644). Ardin: Arte, Diseño e Ingeniería 13: 49-92. <https://doi.org/10.20868/ardin.2024.13.5214>
- Barillo DJ, Marx DE. 2014. Silver in medicine: A brief history BC 335 to present. Burns 40: 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2014.09.009>
- Bonialian M, Hausberger B. 2018. Consideraciones sobre el comercio y el papel de la plata hispanoamericana en la temprana globalización, siglos XVI-XIX. Historia Mexicana 68: 197-244. <https://doi.org/10.24201/hm.v68i1.3641>
- Guerrero S, Pretel D. 2024. Silver refining in the New World: A singularity in the history of useful knowledge. History of Science 62: 175-201. <https://doi.org/10.1177/00732753231185027>
- Lane K. 2021. Potosí: The silver city that changed the world (California world history library) (Volume 27). University of California Press, USA.
- Ley SE, Li W, Rodell AJ, Calle LM, Meyer ME, Lersch T, Bunker K, Casuccio G. 2021. Fate of silver biocide on the international space station living environment. 50th International Conference on Environmental Systems. <https://hdl.handle.net/2346/87268>
- Medici S, Peana M, Nurchi VM, Zoroddu MA. 2019. Medical uses of silver: History, myths, and scientific evidence. Journal of Medicinal Chemistry 62: 5923-5943. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.8b01439>
- Nickel DR. 2001. History of photography: The state of research. The Art Bulletin 83: 548-558. <https://doi.org/10.1080/00043079.2001.10786996>
- Pieper R. 2019. Re-presenting silver in early modern Europe. In: Pieper R, de Lozanne Jefferies C, Denzel M. (eds): Mining, money and markets in the early modern atlantic. Palgrave studies in economic history. Palgrave Macmillan, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23894-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23894-0_4)
- Rovira S. 2017. La metalurgia inca: estudio a partir de las colecciones del Museo de América de Madrid. Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines 46: 97-131. <https://doi.org/10.4000/bifea.8155>
- Sherratt S. 2018. Why was (and is) silver sexy? Silver during the 4th-3rd millennia in the Near East and Mesopotamia. In: Armada XL, Murillo-Barroso M, Charlton M. (eds.) Metals, minds and mobility: Integrating scientific data with archaeological theory. Oxbow Books, Oxford, UK.
- Stulik D, Kaplan A. 2013. The atlas of analytical signatures of photographic processes. Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, USA.
- Vikre PG. 1989. Fluid-mineral relations in the Comstock Lode. Economic Geology 84: 1574-1613. <https://doi.org/https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.6.1574>

# NOTICIAS DESTACADAS



## EQUIPO ORGANIZADOR DEL PRIMER ENCUENTRO EMPRESARIAL METALURGISTAS 2024

**E**l pasado 16 de noviembre de 2024, se llevó a cabo el Primer Encuentro Empresarial Metalurgistas, un evento que reunió a destacados profesionales del sector. En la imagen, se observa al equipo organizador del Primer Encuentro Empresarial Metalurgistas. De izquierda a derecha: Alfredo Artigas Abuín, Isa Iribarren Manríquez, Francisco Rodríguez González y José Luis Martínez Salinas. Estos profesionales trabajaron arduamente para hacer posible este evento, que busca fomentar la colaboración y el intercambio de ideas entre los metalurgistas. Durante el encuentro, los asistentes tuvieron la oportunidad de compartir sus experiencias y conocimientos en el campo de la metalurgia. Se discutieron temas relevantes para la industria, como las últimas tendencias y tecnologías en el procesamiento de minerales y la producción de metales.

El evento también contó con la participación de empresas líderes en el sector, lo que permitió a los asistentes conocer las últimas innovaciones y soluciones disponibles en el mercado. El Primer Encuentro Empresarial Metalurgistas fue un éxito rotundo, y se espera que se convierta en un evento anual. Los organizadores ya están trabajando en la próxima edición, que promete ser aún más enriquecedora y productiva para los profesionales del sector de egresadas y egresados de la USACH.

En resumen, el Primer Encuentro Empresarial Metalurgistas fue un evento destacado que demostró la importancia de la colaboración y el intercambio de ideas entre la industria metalúrgica y la academia. Con la participación de expertos y empresas líderes, este evento se consolidó como un punto de encuentro clave para las y los profesionales.

# ESTUDIANTES QUE RINDIERON SU EXAMEN DE GRADO ENTRE ENERO Y JUNIO DE 2024

## INGENIERÍA DE EJECUCIÓN Y CIVIL EN METALURGIA

<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Diego Jesus Zúñiga Montero Perlite in medium manganese Fe-0.5C-5Mn and Fe-0.5C-5Mn-1Co systems. Felipe Castro	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Benjamin Ignacio Montecinos Morales Proyecto de ingeniería de perfil: estudio de factibilidad técnica y económica de una planta de lixiviación de concentrados de cobre. Jaime Simpson
<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Dilan Sebastián Muñoz Vilchez Tempering-Induced carbon partitioning for enhanced mechanical properties In medium manganese steels. Felipe Castro	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Nicolás Matías Pérez Gonzalo Modelos predictivos de transferencia neta de cobre de la planta de extracción por solventes de la compañía Minera Lomas Bayas. Jaime Simpson
<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Ivette Francisca Tapia Silva Caracterización metalúrgica y propuesta operacional para mejoras en las propiedades mecánicas de barras y rollos de refuerzo fabricados en aceros AZA S.A. Rodrigo Allende	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Nicolás Gonzalo Sendra Valenzuela Desarrollo, caracterización y desempeño de una batería de zinc-aire con cátodo modificado con catalizador a base de talocianina de hierro. Federico Tasca
<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Juan Pablo Vergara Meruane Caracterización de una nueva química de espumantes, SYENSQO® TRANSFOAMER™ para procesos de flotación. Miguel Maldonado	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Patricia Libertad Gatica Godoy Impacto de la microestructura en la morfología y cinética de oxidación a altas temperaturas en aceros al carbono. Felipe Castro
<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Macarena Andrea Mendiola Garrido Caracterización metalúrgica y análisis de desgaste de aceros austeníticos al manganeso para aplicaciones de chancado Ricardo leiva	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Ornella Ignacia Contreras Ortega Evaluación y diseño de un protocolo de gestión de calidad metalúrgica para sistema regeneradora de aminas en ENAP CHILE. Rodrigo Allende
<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Matías Ignacio Manquepillan Hernando Proyecto de ingeniería de perfil: estudio de factibilidad técnica y económica de una planta de lixiviación de concentrados de cobre Jaime Simpson	<b>Nombre:</b> <b>Tesis:</b> <b>Profesor Guía:</b>	Katalina Andrea Rojas Valencia Evaluación del efecto de scrap de bolas en la eficiencia de molienda en molinos SAG. Luis Magne



## MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN METALURGIA EXTRACTIVA Y CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

**Nombre:** Carlos Andrés Otárola Martínez  
**Tesis:** reimagining vat leaching: nuevo proceso hidrometalúrgico para la extracción eficiente de cobre desde minerales calcopiríticos.  
**Profesor Guía:** Miguel Maldonado

**Nombre:** Ana Ximena Del Pino Calderón  
**Tesis:** Lixiviación ácida y reductora con sulfato ferroso a óxidos de cobre con presencia de óxidos negros específicamente copper wad.  
**Profesor Guía:** Patricio Navarro

**Nombre:** Felipe Ignacio Varela Canales  
**Tesis:** Estudio del efecto de la adición de metabisulfito de sodio catalizado por sulfato de cobalto en etapa de molienda y flotación.  
**Profesor Guía:** Miguel Maldonado

**Nombre:** Hyder David Mamani Huanuco  
**Tesis:** Desarrollo de una propuesta de un proceso combinado para la recuperación de oro encapsulado en el relave de la etapa de flotación de limpieza.  
**Profesor Guía:** Patricio Navarro

**Nombre:** Álvaro Andrés Navarrete Rosales  
**Tesis:** Numerical and experimental characterization of the biomechanical response of the thoracic aorta to the influence of hypobaric hypoxia.  
**Profesor Guía:** Claudio García

**Nombre:** Alberto Arturo Navarrete Villegas  
**Tesis:** Estudio del comportamiento electroquímico de mof basado en h3btc y nitrato de cobalto ante la incorporación de heterociclos de nitrógeno.  
**Profesor Guía:** Dinesh Pratap Singh

**Nombre:** Alejandro Slavo Bezmalinovic Colleoni  
**Tesis:** Estudio de la respuesta viscoelástica y del daño mecánico anisótropo de arterias sometidas a hipoxia: caracterización experimental y simulación numérica.  
**Profesor Guía:** Claudio García

**Nombre:** Esmeralda López Toro  
**Tesis:** Fibras híbridas de biopolímeros/mesoporoso mediante el método de electrohilado para la recuperación de cobre (cu(II)), plomo (pb(II)) y molibdeno (mo(VI)).  
**Profesor Guía:** Paula Zapata

**Nombre:** Christian Andre Drogue Águila  
**Tesis:** Influencia de la tasa de deformación sobre la existencia a la compresión del hormigón mediante en método smoothed particle hydrodynamics.  
**Profesor Guía:** Erick Saavedra

**Nombre:** María Fernanda Sosa Sosa  
**Tesis:** Efecto de la deformación en frío sobre parámetros acústicos lineales y no lineales en latones alfa.  
**Profesor Guía:** Felipe Castro

## DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

**Nombre:** Carolina Andrea Manquián Villalobos  
**Tesis:** Síntesis y caracterización de metal organic frameworks en base a níquel, y su estudio como material de electrodo para supercondensadores.  
**Profesor Guía:** Dinesh Pratap Singh



VISITA NUESTRO SITIO WEB  
**metalurgia.usach.cl**



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERÍA  
METALÚRGICA**

**SÍGUENOS EN  
NUESTRAS RRSS**



Usach Metalurgia



usachmetalurgia



Usach Metalurgia



Usach Metalurgia