



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.

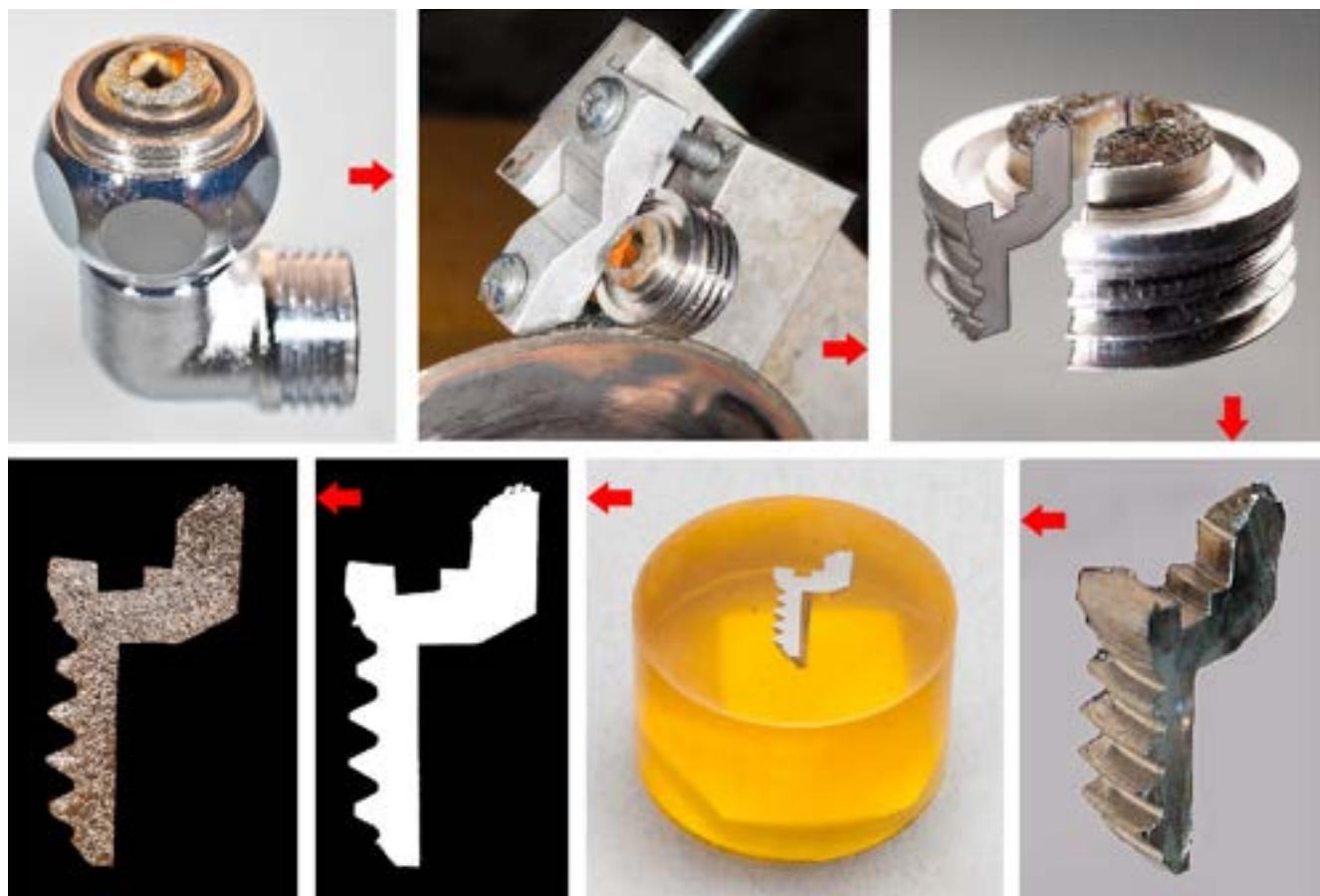


Figura N° 1. El proceso metalográfico (Berkeley Research Company, 2014)

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).

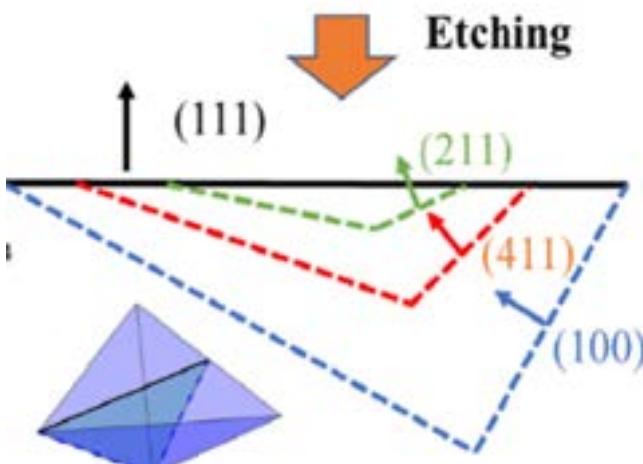


Figura N° 2. Representación esquemática del facetado (Wang et al., 2020).

- 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.

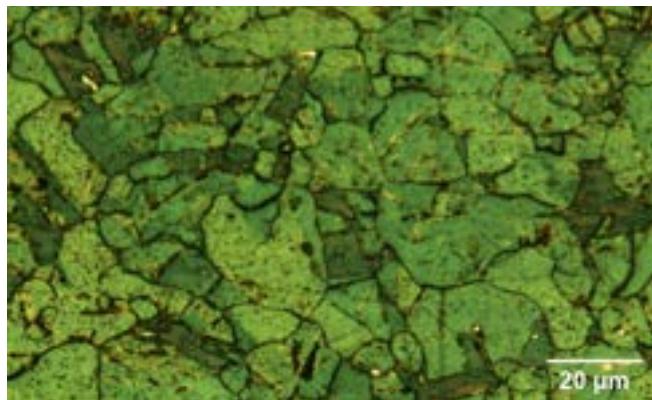


Figura N° 5. Acero inoxidable austenítico atacado con Beraha, observado con microscopía óptica

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 β' , mientras que la más gruesa se asocia a martensita γ' .

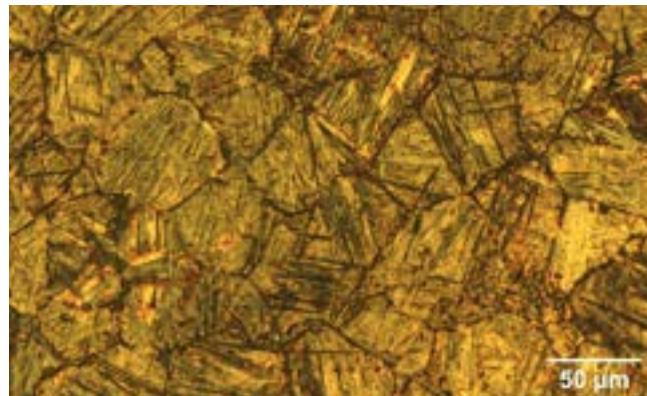


Figura N° 6. Aleación Cu-11,5%Al atacada con Klemm II, observado con microscopía óptica.

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 α , rica en aluminio, las cuales están generalmente rodeadas por el eutéctico característico de esta aleación.

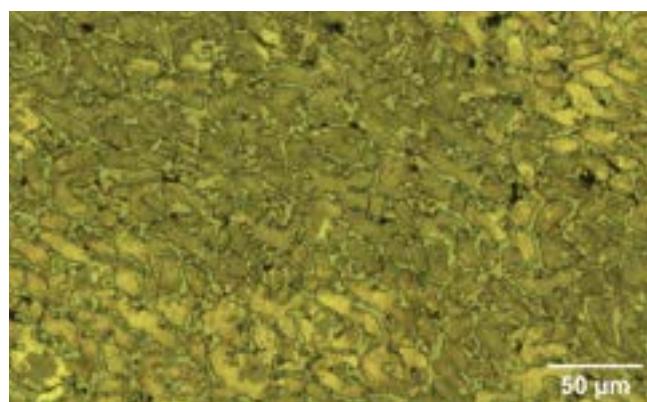


Figura N° 7. Aleación Zn-27%Al atacada con Palmerton, observado con microscopía óptica (Figueroa y Bustos, 2025).

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)

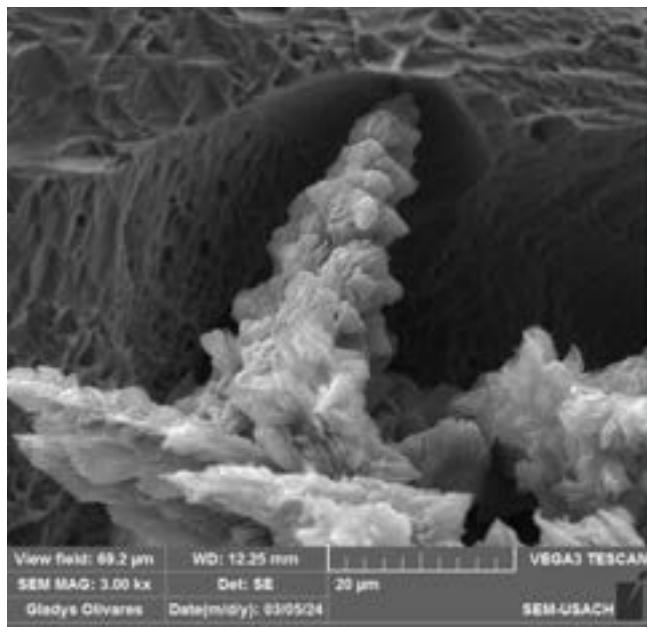


Figura N° 8. Ataque profundo con Nital al 30% a un acero Hadfield observado con microscopía electrónica de barrido. (Figueroa, 2023)

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 δ 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.

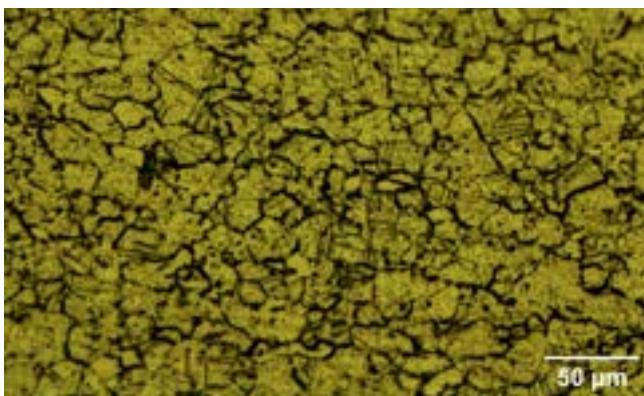


Figura N° 11. Acero inoxidable austenítico atacado con persulfato de amonio, observado con microscopía óptica.

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.

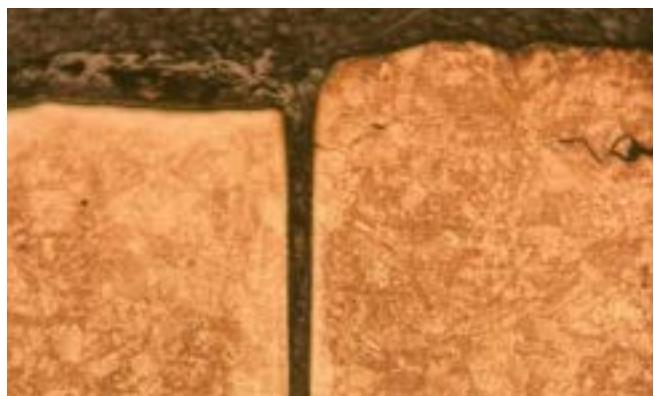


Figura N° 12. Muestra de acero de medio manganeso atacada con Coca-Cola a 40°C durante aproximadamente 30 minutos, observado con microscopía óptica (Breton, 2023).

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>