

## IV. Procesamiento de materiales



Fuente: elaboración propia.

<https://dx.doi.org/10.5209/docm.001.04>

*Laboratorio Integrado*. Raúl Arrabal Durán. © Ediciones Complutense, 2025.



# Práctica 17. Introducción a ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos (END) son procedimientos desarrollados para detectar e identificar defectos o imperfecciones potencialmente críticos, en la superficie o en el interior, sin destruir la pieza ni producir marcas que afecten a la calidad del material. Se clasifican en dos grandes grupos, según se utilicen para detectar defectos superficiales y/o sub-superficiales o para defectos internos. Entre los primeros se encuentran los procedimientos de líquidos penetrantes, partículas magnéticas y corrientes inducidas. Entre los segundos destacan los que utilizan radiaciones ionizantes (rayos X o gamma) y los ultrasonidos. Todos ellos están basados en fenómenos o propiedades físicas de los materiales.

La responsabilidad del personal que participa en ensayos no destructivos se divide en tres niveles:

- Nivel I: tareas de inspección bajo supervisión y siguiendo procedimientos establecidos.
- Nivel II: realizar y evaluar ensayos no destructivos de manera autónoma, interpretar códigos y normas aplicables, y elaborar informes de inspección. Pueden tomar decisiones de aceptación/rechazo.
- Nivel III: supervisan y administran programas de ensayo no destructivos. Están capacitados para capacitar a personal de nivel I y II. Tienen autoridad para tomar decisiones finales sobre aceptación/rechazo y son responsables de garantizar conformidad con normativas y estándares aplicables.

Los requisitos de certificación dependen de la organización certificadora y el método END en cuestión.

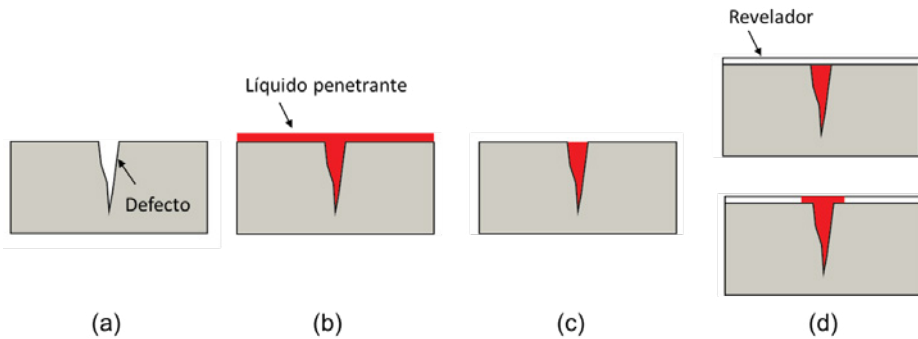
## Líquidos penetrantes

### Introducción

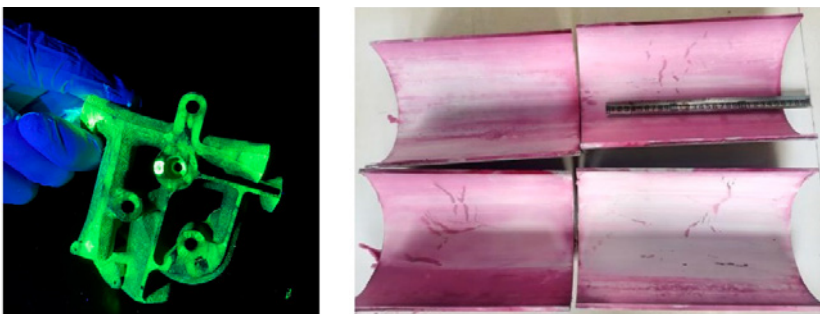
La inspección por líquidos penetrantes es un tipo de ensayo no destructivo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie

de materiales. Generalmente se emplea en aleaciones no férricas, aunque también se puede utilizar para la inspección de materiales férricos cuando la inspección por partículas magnéticas es difícil de aplicar. En algunos casos se puede utilizar en materiales no metálicos.

El procedimiento consiste en limpiar la superficie de la pieza objeto de inspección, cubrirla con un líquido coloreado o fluorescente que penetra por capilaridad. Después de un determinado tiempo, se elimina el exceso de líquido y se aplica un revelador que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades del material. Sobre la capa del revelador se dibuja el contorno de los defectos (Figura 77).



**Figura 77. Etapas de la inspección con líquidos penetrantes: (a) limpieza, (b) aplicación líquido penetrante, (c) eliminación líquido sobrante y (d) aplicación de revelador e inspección. Fuente: elaboración propia.**



**Figura 78. Ejemplos de líquidos penetrantes: fluorescente (color verde, (Arena 2023)) y visible (color rojo, (Song 2023)).**

Los líquidos penetrantes se clasifican en dos categorías. Los líquidos penetrantes fluorescentes o Tipo I, de color verde y que emiten bajo luz UV, y los

líquidos penetrantes visibles o Tipo II de color rojo (Figura 78). La norma UNE-EN ISO 3452 (UNE-EN ISO 3452-1 2022) describe con mayor detalle las características de este tipo de ensayos. Se trata de un procedimiento muy económico, útil para defectos pequeños (hasta 0,1-0,4  $\mu\text{m}$ ), aunque no sirve para materiales porosos y solo permite detectar defectos superficiales.

## Objetivos

Detectar imperfecciones en uniones soldadas mediante líquidos penetrantes.

## Parte experimental

Paso 1. Seleccionar la/s pieza/s a analizar con ayuda del profesorado.

Paso 2. Limpiar la superficie del material a examinar con un cepillo metálico y alcohol.

Paso 3. Aplicar líquido penetrante: puede hacerse por pulverización, inmersión o por aplicación con brocha. El penetrante lleva en suspensión un pigmento de color muy vivo o fluorescente y se mantiene sobre la superficie durante el tiempo suficiente (mínimo 15 minutos) para asegurar que ha llenado las posibles discontinuidades, de acuerdo con su viscosidad. La temperatura de aplicación debe estar comprendida entre 16 y 52 °C.

Paso 4. Eliminar el líquido penetrante de la superficie: los restos de líquido se eliminan mediante el lavado con agua, si es soluble en ella, o por un disolvente, denominado eliminador. Tanto el agua como el eliminador tienen una tensión superficial muy superior a la del líquido penetrante y, por ello, no pueden desalojar a este de la cavidad donde se ha introducido. La pieza se seca al aire.

Paso 5. Aplicar el revelador: se aplica una capa fina y uniforme de revelador sobre toda la superficie, mediante pulverización, a una distancia de 20 a 25 cm. Una vez transcurrido el tiempo de revelado (de 7 a 30 minutos), se procederá a la inspección de la zona a examinar.

## Informe

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### **Resultados y discusión (60%)**

- Fotografías y descripción de los diferentes tipos de imperfecciones observadas, posibles causas y soluciones.

### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**

## **Partículas magnéticas**

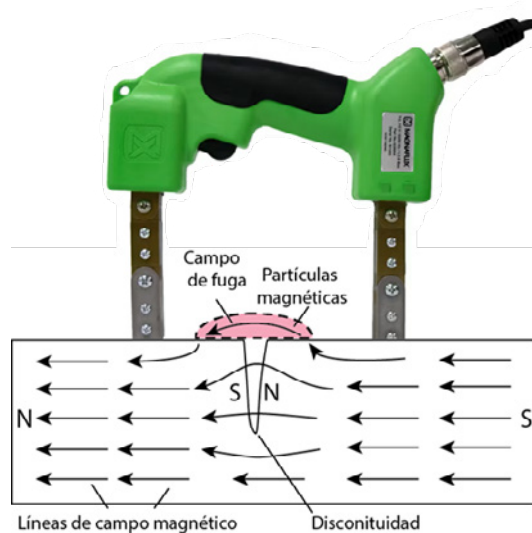
### **Introducción**

El método de inspección por partículas magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Por tanto, puede aplicarse a piezas pintadas o con imprimación bajo ciertas circunstancias. Se aplica frecuentemente en soldaduras para la detección de indicaciones lineales tales como fisuras. Es más rápido que el método de líquidos penetrantes y no requiere de una limpieza tan exhaustiva.

La técnica consiste en la aplicación, bajo la acción de un campo magnético procedente de un yugo o bobina, de finas partículas magnéticas sobre la pieza a inspeccionar. La presencia de zonas discontinuas, como grietas o inclusiones, distorsiona las líneas de flujo creando campos de fuga y dando lugar a la acumulación de partículas en dichas zonas (Figura 79). La magnetización puede realizarse con corriente alterna o directa, dependiendo si la discontinuidad es superficial o subsuperficial, respectivamente.

Se diferencian dos tipos de partículas. i) *Partículas secas*: se aplican por espolvoreado (Figura 80). Destacan por su resistencia bajo condiciones extremas de temperatura y, dependiendo de la aplicación y sensibilidad, pueden utilizarse de tipo no fluorescente, fluorescente o dual, siendo necesario el uso de luz ultravioleta en los últimos dos casos. Su contaminación dificulta la

reutilización. ii) *Partículas de tipo húmedo*: diseñadas para la preparación de suspensiones de base aceite o agua. Pueden aplicarse por aspersión o inmersión, siendo común la reutilización mediante un sistema de recirculación. Por lo general, se consideran más sensibles debido a su menor tamaño.



**Figura 79. Esquema de la inspección mediante partículas magnéticas.**  
Fuente: adaptado de Romero 2022.



**Figura 80. Aplicación de partículas secas (Dolati 2021).**

## Objetivos

Detectar imperfecciones en uniones soldadas mediante partículas magnéticas.

## Parte experimental

Paso 1. Peso muerto: comprobar que el yugo electromagnético es capaz de levantarlo.

Paso 2. Piezas: seleccionar las piezas a analizar con ayuda del profesorado.

Paso 3. Limpieza: limpiar la superficie del material a examinar con un cepillo metálico y alcohol. La superficie debe estar seca antes de continuar.

Paso 4. Verificación dirección de flujo: apoyar los dos extremos del yugo de corriente alterna sobre una superficie plana de una muestra. Colocar entre los dos extremos del yugo, y en horizontal sobre la muestra, el indicador octogonal o tipo «tarta» y con las marcas o secciones mirando hacia abajo. Encender el yugo y espolvorear partículas (#8A Rojo) sobre el indicador octogonal. Se observarán mejor las indicaciones perpendiculares a las líneas de flujo, mientras que las horizontales no serán apenas visibles.

Paso 5. Inspección de la soldadura: con la muestra limpia y desmagnetizada (ver paso 8), apoyar el yugo y con el campo magnético activo, rociar partículas en el área de interés con un dispensador o directamente con ayuda de espátula. Soplar suavemente el exceso de partículas cuando aún se está aplicando la corriente.

Paso 6. Evaluación las indicaciones: toda indicación debe clasificarse en relevante, no relevante o falsa. (Nota: una indicación es la respuesta que arroja un examen no destructivo y que requiere su interpretación para definir si es relevante/no relevante. Se considera relevante si necesita ser evaluada, no relevante si está causada por una condición no rechazable, p. ej. geometría del componente, y falsa cuando está causada por una condición que no es una discontinuidad).

Paso 7. Limpieza: una vez terminada la inspección, recoger las partículas con ayuda del yugo y una brocha para su posterior reutilización (Nota: es más fácil retirar las partículas de la muestra si se desmagnetiza previamente. Ver paso siguiente).

Paso 8. Desmagnetización muestra: comprobar con el indicador de campo residual, también conocido como medidor Gauss o magnetoscopio, que la pieza no está magnetizada (medir en sus extremos). En caso de que así sea, desmagnetizar mediante varios movimientos con el yugo encendido sobre la pieza y sin tocarla. La pieza se considera desmagnetizada para lecturas inferiores a 3 Gauss.

Paso 9. Opcional: con ayuda del profesorado puede realizarse la inspección con partículas húmedas y aplicando previamente el líquido de contraste.

## **Informe**

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### **Resultados y discusión (60%)**

- Fotografías y descripción de los diferentes tipos de imperfecciones observadas, posibles causas y soluciones.

### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**

## **Radiografía**

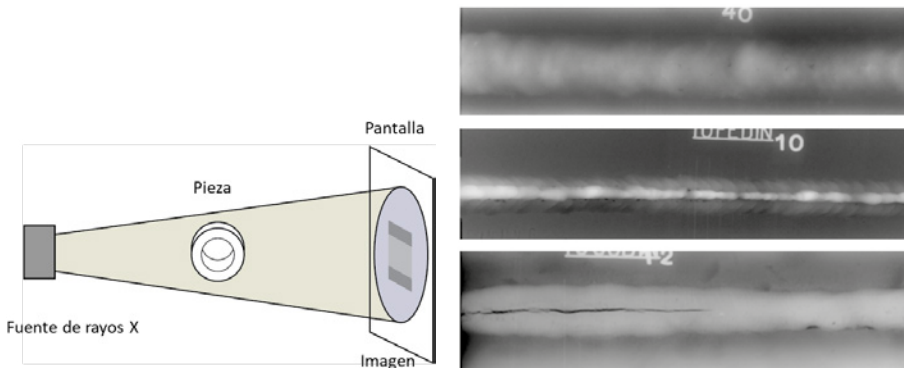
### **Introducción**

Se basa en la mayor o menor transparencia (absorción o transmisión) de los materiales a rayos X o rayos gamma o neutrones, según su naturaleza y espesor. Es junto con ultrasonidos la técnica más adecuada para la detección de defectos internos en materiales. La norma UNE-EN 13068 (UNE-EN 13068-1 2000) describe con mayor detalle las características de este tipo de ensayos.

Consiste en intercalar el material a examinar entre una fuente radioactiva y una pantalla fotosensible a dicha radiación (Figura 81). Los rayos X se producen por excitación de un ánodo de W que recibe electrones acelerados a alto voltaje de un cátodo, también de W, y se dirigen hacia el material. Una pequeña fracción de los rayos X es transmitida y detectada en una película o detector. La intensidad del haz de rayos transmitidos depende del coeficiente de absorción y del espesor del material:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \text{Ecuación 25}$$

$I_0$  es la intensidad del haz incidente y  $\mu$  el coeficiente de absorción lineal del material que es función de la energía del haz y de la composición del material.  $\mu$  generalmente aumenta con el n.º atómico para una determinada energía del haz, de manera que los metales de bajo n.º atómico, como el Al, son relativamente transparentes a la radiación y los metales de alto n.º atómico, como el Pb, son opacos.



**Figura 81. Esquema de la inspección por rayos X (Fuente: elaboración propia) y radiografías con defectos en soldaduras (Say 2023).**

Si hay una discontinuidad en el interior, en esa zona la absorción será menor y la intensidad del haz transmitido mayor (mancha en la película más oscura). La geometría, las propiedades físicas del defecto y los cambios de espesor influyen en la transmisión de los rayos, dejando su huella sobre la película.

Es una técnica muy usada para la detección de defectos internos del material como grietas, poros o impurezas (inclusiones). Está especialmente indicada en el control de calidad de uniones soldadas y de piezas moldeadas. Después del revelado de la película, las diferencias de grosor y de densidad de las imperfecciones se mostrarán más claras o más oscuras. La resolución es del orden de 1 mm. Como desventajas destacar el peligro de irradiación, no poder indicar la profundidad del defecto y requerimiento de acceso a ambos lados de la muestra.

## Objetivos

Detectar imperfecciones en uniones soldadas mediante radiografías.

## **Parte experimental**

Observar las radiografías seleccionadas (entre 10 y 20) correspondientes a uniones soldadas de piezas de acero de la colección International Institute of Welding, prestando especial atención a la información suministrada en las fichas. Fotografiar las radiografías.

## **Informe**

El informe final relativo a la parte 17.3 deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### **Resultados y discusión (60%)**

- Fotografías y descripción de los diferentes tipos de imperfecciones observadas, posibles causas y soluciones.

### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**



# Práctica 18. Inspección por ultrasonidos

## Introducción

La inspección por ultrasonidos es un método no destructivo que se basa en la medición de la propagación de un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia en el material a analizar. Permite la detección de imperfecciones tanto en la superficie como en el interior del material. Se caracteriza por su gran poder de penetración y por su gran precisión en la identificación de forma, orientación y localización de defectos. Por contrapartida, piezas rugosas, irregulares, pequeñas o de bajo espesor son de difícil inspección.

Los ultrasonidos son ondas acústicas de la misma naturaleza que las ondas sonoras, pero con una frecuencia más alta (0,1 - 25 MHz) que el umbral superior de audibilidad humana (el rango audible va de 20 a 20.000 Hz). La capacidad de estas ondas para detectar defectos se basa en la relación entre la longitud de onda y el tamaño de los defectos. La sensibilidad de detección es tanto mayor cuanto mayor sea la frecuencia (menor longitud de onda). Como regla general, una discontinuidad debe medir al menos la mitad de la longitud de onda para poder ser detectada (la relación entre longitud de onda,  $\lambda$ , y frecuencia,  $f$ , viene dada por la expresión  $\lambda=v/f$ , siendo  $v$  la velocidad de propagación en el material estudiado). Sin embargo, un aumento de la frecuencia implica una reducción en el poder de penetración de la medición, debido a que las ondas de sonido tienden a dispersarse con más facilidad a mayores frecuencias.



Figura 82. Ejemplo de aplicación de inspección por ultrasonidos de una soldadura (Lee 2023).

Es el método más común para detectar grietas y otras discontinuidades (fisuras por fatiga, corrosión o defectos de fabricación del material) en materiales gruesos, donde la inspección por rayos X se muestra insuficiente al ser absorbida la radiación X por el material. También se utiliza para detectar defectos superficiales y para la medida del espesor del material (Figura 82). La norma UNE-EN ISO 16810 (UNE-EN 16810 2014) describe con mayor detalle las características de este tipo de ensayos.

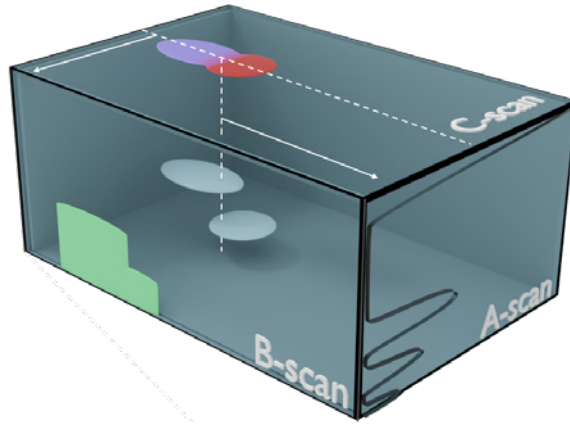
Existen numerosas formas de generar ondas ultrasónicas, siendo el efecto piezoeléctrico el más extendido en este ensayo. El *cabezal*, *palpador* o *sonda* del equipo contiene un elemento piezoeléctrico (cuarzo, sulfato de litio o cerámicas sintéticas), capaz de convertir una señal eléctrica en vibraciones mecánicas (ondas ultrasónicas) y viceversa. La elección del cabezal depende de la aplicación específica (Figura 83).



**Figura 83. Ejemplos de palpadores de compresión, angulares, de transmisión y tipo rueda. (Reproducida con permiso de Tecnitest Ingenieros).**

La información que se obtiene en un equipo de ultrasonidos puede representarse de varias formas (Figura 84):

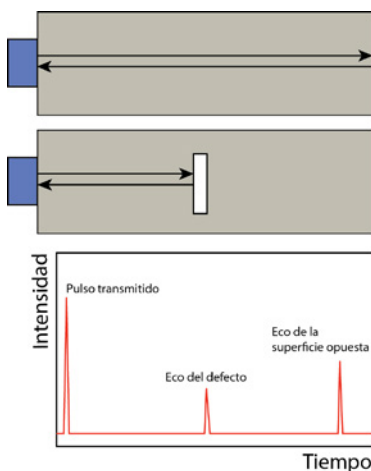
- Tipo A: energía en función del tiempo/distancia.
- Tipo B: posición sobre la pieza y tiempo/distancia.
- Tipo C: imagen del plano analizado.



**Figura 84. Esquema de los barridos tipo A, B y C en ultrasonidos.**

**Fuente: elaboración propia.**

Existen varios procedimientos de ensayo por ultrasonidos (transmisión, eco-pulsado, resonancia, etc.). El método más utilizado es por eco-pulsado. Se basa en la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico ( $>20.000$  Hz) es reflejado por una discontinuidad o una interfase en una pieza de trabajo. El equipo mide el tiempo que transcurre entre la emisión de la señal y la recepción de su eco. Conociendo la velocidad de propagación se sabe la distancia al que está la discontinuidad. En el caso de que no haya discontinuidades, el valor obtenido corresponde al espesor de la pieza (Figura 85).



**Figura 85. Fundamento del método eco-pulsado. Fuente: elaboración propia.**

## **Objetivos**

Familiarizarse con la inspección mediante ultrasonidos.

## **Parte experimental**

### **Medición de espesores**

Paso 1. Seleccionar las piezas a analizar con ayuda del profesorado. Encender el equipo y comprobar que la velocidad de propagación seleccionada corresponde a la del material objeto de estudio (ver manual del equipo).

Paso 2. Aplicar gel acoplante (facilita la transmisión de la onda ultrasónica) en la superficie de la muestra escalonada y comprobar que el equipo está correctamente calibrado. En el momento en el que el palpador bicristal se apoya en la superficie se genera un pulso ultrasónico que se trasmite por el material. Cuando la onda elástica choca con una interfase parte de la onda se refleja y regresa al transductor. El equipo mide el tiempo requerido para que el pulso viaje a través del material desde el transductor hasta la interfase (discontinuidad del lado opuesto) y regrese al transductor. Es decir, se mide el tiempo que transcurre entre la emisión de la señal y la recepción de su eco. Dicha medida permite, si se conoce la velocidad de propagación del ultrasonido en el material, determinar a qué distancia está el defecto o superficie reflectante. Evaluar las piezas seleccionadas.

### **Detección de imperfecciones con el equipo Sonatest D-50 (A-scan)**

Paso 1. Seleccionar las piezas a analizar con ayuda del profesorado.

Paso 2. Limpiar la superficie del material a examinar. La superficie debe estar seca antes de continuar.

Paso 3. Tutorial: seguir las instrucciones disponibles en el laboratorio.

## **Informe**

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### **Resultados y discusión**

- Fotografías y esquemas de las muestras utilizadas para la medición de espesores. Se recomienda hacer los esquemas con *software* tipo Freecad, Blender, etc. para facilitar la interpretación de las medidas. También pueden realizarse gráficas con Excel, Origin o similar para observar mejor las variaciones de espesor (30%).
- Fotografías y descripción de los diferentes tipos de imperfecciones observadas con el palpador recto y angular (30%).

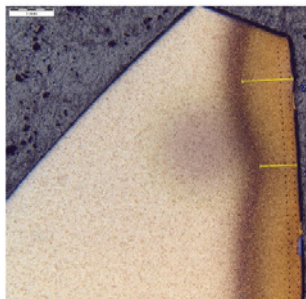
### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**



# Práctica 19. Cementación del acero

## Introducción

La cementación (*carburizing*) es un tratamiento termoquímico que tiene como objeto enriquecer en C (0,7-1,2%C) la superficie de piezas de acero. La profundidad de la capa cementada suele estar comprendida entre 0,1 y 1,5 mm y cuando se combina con un tratamiento térmico posterior de temple y revenido se consiguen piezas con un núcleo tenaz y extraordinaria dureza superficial (60-65 HRC). Este tipo de tratamiento suele aplicarse sobre piezas de acero de bajo contenido en C (<0,2%) que requieren elevada resistencia al desgaste, impacto y fatiga (ejes, engranajes, etc.) (Figura 86).



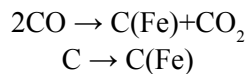
**Figura 86. Ejemplo de engranaje con tratamiento de cementación (Fularski 2021).**

La operación de cementación suele llevarse a cabo en el campo austenítico, a unos 40 °C por encima de la temperatura  $A_3$ , y en presencia de un medio carburante. El control de la temperatura y del medio debe ser riguroso a fin de evitar defectos tales como crecimiento de grano ( $T < 1000$  °C) y exceso de C en superficie. Cuando este último se sitúa por encima del 0,8% se corre el riesgo de obtener durezas anormalmente bajas, debido a un exceso de austenita retenida tras el temple. Asimismo, se corre el riesgo de fragilizar la pieza por formación de cementita en límite de grano. En lo que respecta al medio carburante, este puede conseguirse en sistemas gaseosos, líquidos, sólidos o más sofisticados (vacío, plasma, lecho fluidizado, etc.). A continuación, se describen las principales características de los más comunes:

a) *Cementación gaseosa (gas carburizing)*: se utilizan hornos con atmósfera procedente de combustión controlada de gas natural (metano + CO, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.). Es el método más común y versátil en la actualidad. Permite tratar un gran número de piezas simultáneamente y más rápidamente (x2 o x3 veces más rápido que la cementación sólida). Además, produce menos daño medioambiental que la cementación sólida. Sus principales inconvenientes son los costes de la instalación y los riesgos asociados a la producción de CO. Las reacciones que ocurren son las siguientes:

1. Descomposición del CO en la superficie del acero:  $2\text{CO} \rightarrow \text{C(Fe)} + \text{CO}_2$
2. Descomposición del metano:  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C(Fe)} + 2\text{H}_2$
3. Reacción entre CO e H<sub>2</sub>:  $\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C(Fe)} + \text{H}_2\text{O}$
4. Regeneración de condiciones reductoras:  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$   
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

b) *Cementación líquida (cementación en baño, liquid carburizing)*: se utilizan baños con sales fundidas (cloruros, carbonatos, etc.) y cianuro de sodio (Figura 87). El efecto del N es despreciable y se suele distinguir entre baños de baja (850-900 °C → 0,075-0,75 mm) y alta temperatura (900-950 °C → 0,5-3,0 mm) en función del espesor deseado de capa cementada. La secuencia de reacciones que dan lugar al CO y C a partir de NaCN es compleja. Una vez que se forman estos productos tiene lugar la cementación como tal.



El principal riesgo de este proceso se asocia a las sales de cianuro, por este motivo se están buscando fuentes alternativas de C en la actualidad.



Figura 87. Cementación en baño o líquida. (Reproducida con permiso de Tecma).

c) *Cementación sólida (cementación en caja, pack carburizing)*: se trabaja con hornos y cajas o recipientes que contienen carbón vegetal y un activador (Ej.  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  y/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Figura 88). Es el método más tradicional, sin embargo, presenta una serie de inconvenientes:

- Tiempo prolongado de proceso (1-72 h) y, por tanto, con un consumo elevado de energía.
- Dificil controlar el contenido en C en superficie y ajustar el espesor de la capa cementada ( $\pm 0,25$  mm). Por este motivo suele emplearse para espesores  $> 1$  mm.
- La operación de temple posterior es manual.



**Figura 88. Caja para el proceso de cementación sólida.  
(Reproducida con permiso de Nabertherm).**

Las reacciones que ocurren durante el proceso son las siguientes:

1. Oxidación del carbón vegetal:  $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
2. Descomposición del CO en la superficie del acero:  $2\text{CO} \rightarrow \text{C}(\text{Fe}) + \text{CO}_2$
3. Regeneración de condiciones reductoras:  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$
4. Descomposición del activador:  $\text{BaCO}_3 \rightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$

La capa cementada es aquella con un contenido en C superior al del acero de partida, distinguiéndose habitualmente entre capas finas ( $< 0,5$  mm), medias (0,5-1 mm), semigruesas (1-1,5mm) y gruesas ( $> 1,5$  mm). Adicionalmente, se suele distinguir lo que se conoce como capa dura o capa cementada efectiva ( $> 550$  HV = 52,5 HRC) y que constituye entre el 25 y el 50% de la capa cementada. La determinación de su espesor puede hacerse por vía química, visual o, mejor aún, mediante medidas de dureza (SAE 423, ISO 2639). La Figura 89 muestra un ejemplo de la capa cementada. Existen varias vías para predecir el

espesor de la capa cementada, siendo la Segunda Ley de Fick y aproximaciones de esta las estrategias más comunes (Figura 90).

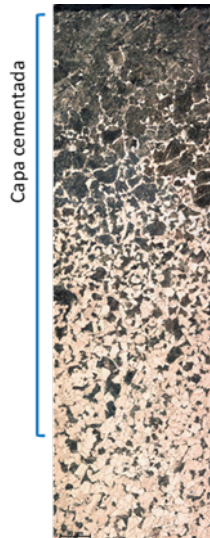


Figura 89. Ejemplo de capa cementada en un acero al carbono.  
Fuente: elaboración propia.

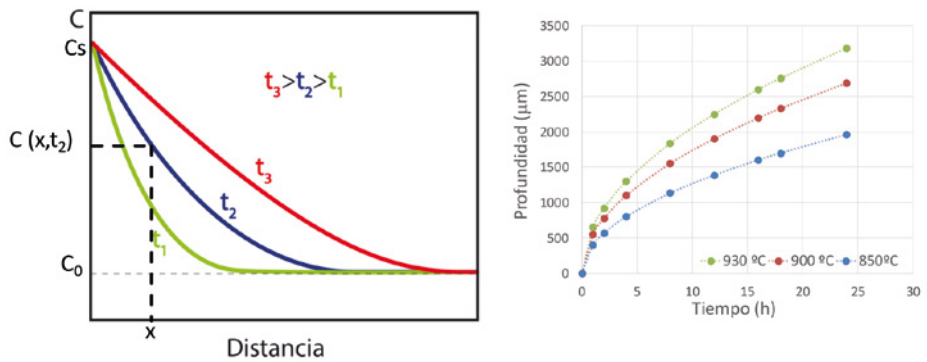


Figura 90. Expresión de la Segunda Ley de Fick y predicción del espesor de la capa cementada en función del tiempo y la temperatura.  
Fuente: elaboración propia.

Solución de la segunda ley de Fick y aproximación:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - f_{\text{err}} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \text{Ecuación 26}$$

$$C_x = \frac{C_s + C_0}{2} \quad \text{Ecuación 27}$$

## Objetivos

Cementar el acero F111 (% C ≤ 0,20, % Mn ≤ 1,40, % P ≤ 0,0045, % S ≤ 0,045). Estimar espesor de capa cementada mediante microscopía óptica y su dureza tras austenización y temple.

## Parte experimental

Paso 1. Preparar la mezcla cementante (60% carbón vegetal triturado en mortero + 40% BaCO<sub>3</sub>). Introducir en un crisol una probeta de acero F111 rodeada de mezcla cementante. Tapar el crisol.

Paso 2. Introducir el crisol en un horno a 900 °C para un tiempo de 3 h (en esta operación utilizar guantes de alta temperatura, careta antitérmica y pinzas).

Paso 3. Sacar el crisol del horno después del tiempo especificado. Esperar a que se enfríe y sacar la muestra de su interior. La probeta se austeniza a 870 °C durante 20 min, se temple en agua y se mide su dureza superficial tras un desbaste a P120 para eliminar el óxido superficial (escala Rockwell C, 5 medidas). Los resultados deben compararse con la dureza del material de partida en estado de recepción.

Paso 4. Examinar en el microscopio óptico probetas cementadas, embutidas y pulidas de la colección del laboratorio. Si fuera necesario, se pulirán y atacarán con nital al 3% (10-15 segundos). Determinar la profundidad de la capa cementada en las micrografías obtenidas.

## Informe

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

**Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

**Resultados y discusión**

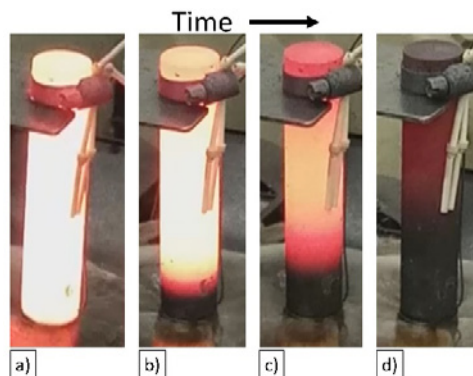
- Micrografías donde se señalen microconstituyentes. Deben describirse con ayuda del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C (40%).
- Gráfica donde se represente la profundidad teórica de cementación (d) en función del tiempo de acuerdo con la Segunda Ley de Fick (citar la fuente consultada para el coeficiente de difusión utilizado) (20%).

**Conclusiones/Bibliografía (10%)**

# Práctica 20. Ensayo Jominy

## Introducción

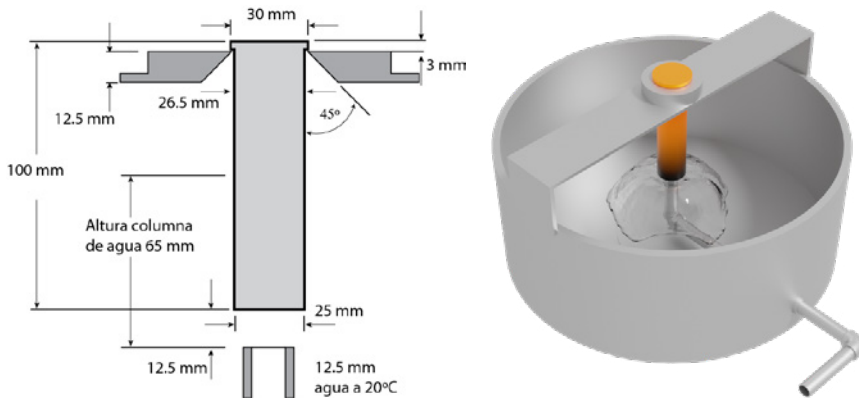
El ensayo Jominy es el método de medida de templabilidad de aceros más extendido. Consiste en enfriar bajo unas condiciones específicas una probeta estándar en forma de barra cilíndrica para posteriormente, mediante medidas de dureza, obtener la curva de templabilidad (Figura 91). Previo al ensayo, la probeta debe someterse a un tratamiento de normalizado. La temperatura de austenización será la especificada en la norma según la composición del acero, debiendo tomar precauciones para evitar que se descarbure u oxide la probeta durante el calentamiento colocándola, por ejemplo, rodeada de viruta de fundición. La probeta deberá mantenerse en el horno durante al menos 30 minutos con objeto de obtener una estructura austenítica uniforme. Dos ejemplos de normas donde se detallan estos aspectos son la ASTM A255 (A255-20a 2020) y la UNE-EN ISO 642 (UNE-EN ISO 642 2000).



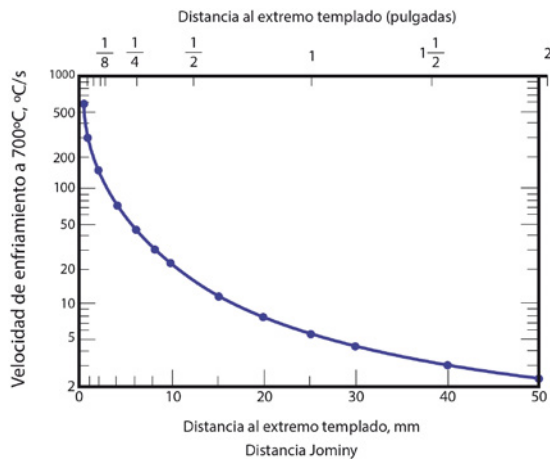
**Figura 91. Enfriamiento de la probeta Jominy tras a) ~0 s, b) 15 s, c) 40 s, d) 120 s (Landgraf 2021).**

El enfriamiento se realiza en una instalación especial donde un extremo de la probeta recibe un chorro de agua a una temperatura comprendida entre 5 y 30 °C y que procede de un orificio con 12,5 mm de diámetro (Figura 93). El caudal de agua se regula de manera que la altura del chorro sea de unos 65 mm

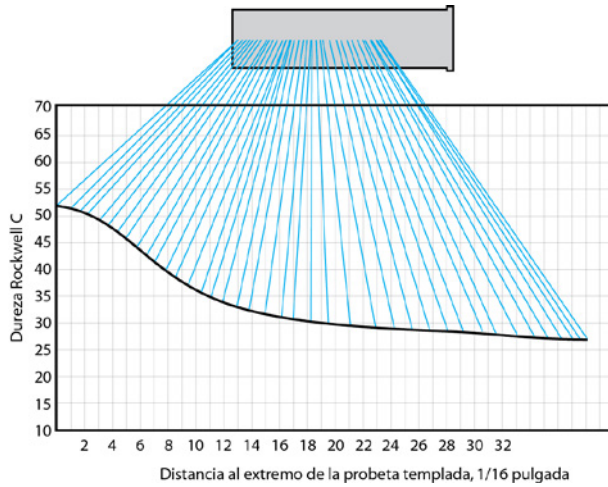
cuando la probeta no está colocada en el soporte. Se obtiene, de esta manera, a lo largo del eje del cilindro, zonas con velocidades de enfriamiento que varían desde un temple en agua en un extremo hasta un enfriamiento lento al aire en el otro (Figura 93). Terminado el ensayo, se mecanizan dos superficies planas en los lados opuestos de la barra, rebajando un mínimo de 0,38 mm (el mecanizado debe realizarse con precaución para evitar el revenido). Finalmente, se mide la dureza HRC a lo largo del eje de la barra y se representan los datos para obtener la curva de templabilidad o curva Jominy (Figura 94).



**Figura 92. Dispositivo experimental para el ensayo Jominy.**  
Fuente: elaboración propia.

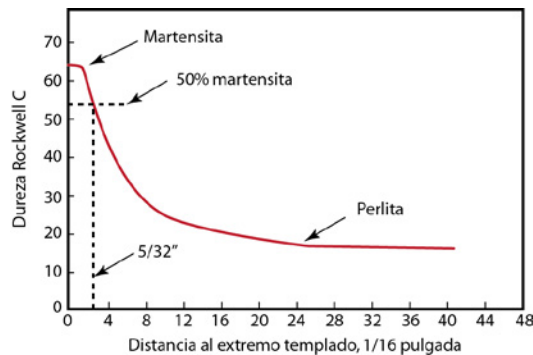


**Figura 93. Velocidades de enfriamiento en función de la distancia al extremo templado.** Fuente: elaboración propia.



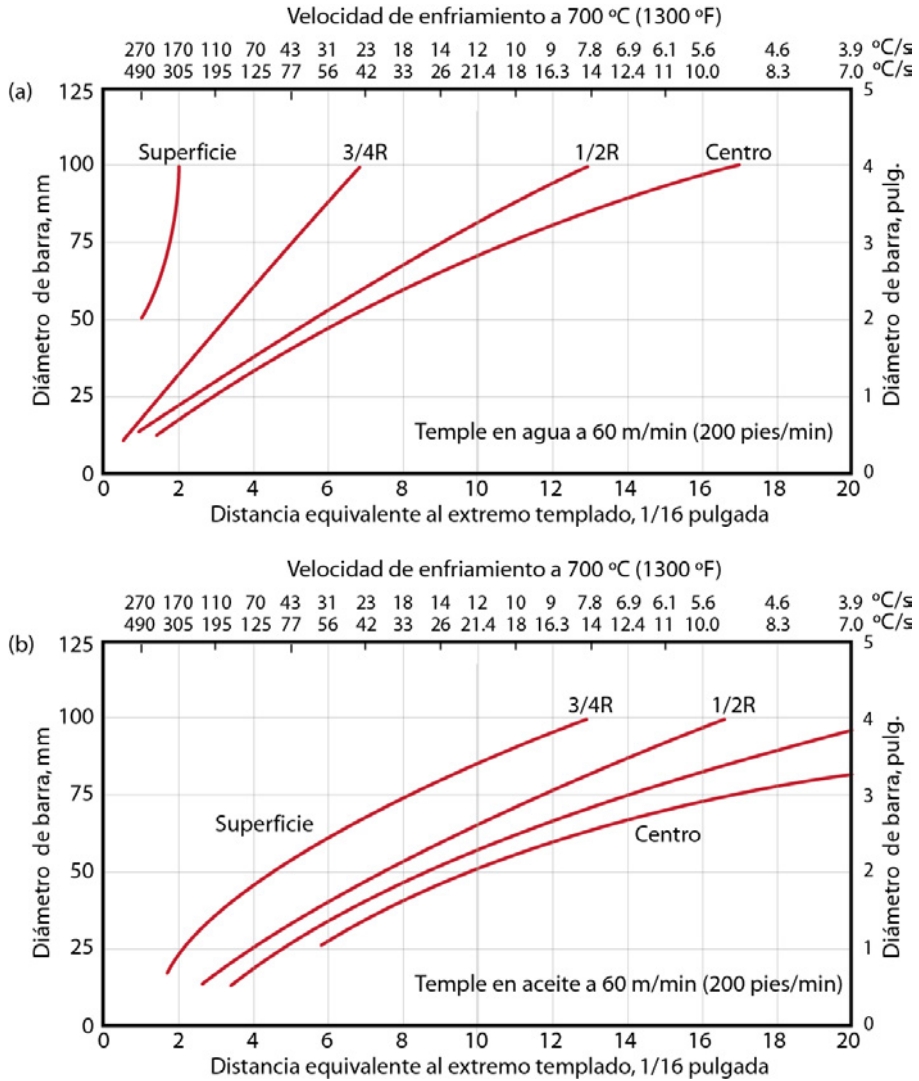
**Figura 94. Ejemplo de curva Jominy para un acero 0,32%C-0,61%Mn, 1,03%Cr y 0,23%Mo. Fuente: adaptado de Apraiz 1949.**

En un solo ensayo se obtiene una curva de templabilidad que permite relacionar la medida de dureza de un acero con la velocidad de enfriamiento y, en consecuencia, con su microestructura a través de los diagramas de enfriamiento continuo. También permite obtener parámetros como el diámetro crítico (diámetro de una barra de acero en el que la microestructura es 50% martensita en el centro de la probeta) a partir de la distancia al extremo templado que presenta la dureza correspondiente a un 50% de martensita y de datos obtenidos con barras de acero en distintos medios de temple (Figura 94 y Figura 95).



**Figura 95. Curva de templabilidad del acero C-54 con un 0,8% C donde se muestra la distancia correspondiente a un 50% de martensita.**

**Fuente: adaptado de Reza Abbaschian 2009.**



**Figura 96. Velocidades de enfriamiento equivalentes para distancias al extremo templado en probeta Jominy y posiciones en barras de diferentes diámetros. (a) Templadas en agua agitada a 1 m/s; (b) templadas en aceite agitado a 1 m/s. Fuente: adaptado de ASM vol. 4 1996.**

### Objetivos

Determinar la templabilidad de un acero mediante el ensayo Jominy.

## Parte experimental

Paso 1. Introducir la probeta Jominy de acero F114 (%C=0,45, %Mn=0,65) en un horno a 850 °C durante 45 min (en esta operación utilizar guantes, careta antitérmica y pinzas).

Paso 2. Poner en marcha el dispositivo experimental del ensayo Jominy. Después de los 45 minutos sacar la probeta Jominy con las pinzas y colocarla en el dispositivo Jominy. No tardar más de 5 segundos en esta operación. Esperar 10 minutos hasta que el proceso termine.

Paso 3. Colocar la probeta Jominy rectificada en el durómetro y medir según norma en las siguientes posiciones: 1.6 – 3.2 – 4.8 – 6.4 – 7.9 – 9.5 – 11.1 – 12.7 – 14.3 – 15.9 – 17.5 – 19.1 – 20.6 – 22.2 – 23.8 – 25.4 – 28.6 – 31.8 – 34.9 – 38.1 – 44.5 – 50.8. Representar los valores de dureza vs. distancia en mm (Curva Jominy o de templabilidad).

Paso 4. Pulir y atacar con nital probetas de una barra ya ensayada. Obtener micrografías en función de la distancia al extremo templado e identificar los distintos microconstituyentes con ayuda del correspondiente diagrama de enfriamiento continuo.

## Informe

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

### Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### Resultados y discusión (40%)

- Resultados con su correspondiente discusión, incluyendo la curva de templabilidad para el acero F114 y las correspondientes microestructuras en función de la distancia al extremo templado (utilizar del diagrama de enfriamiento continuo mostrado en la Figura 97 correspondiente a un acero similar al estudiado).

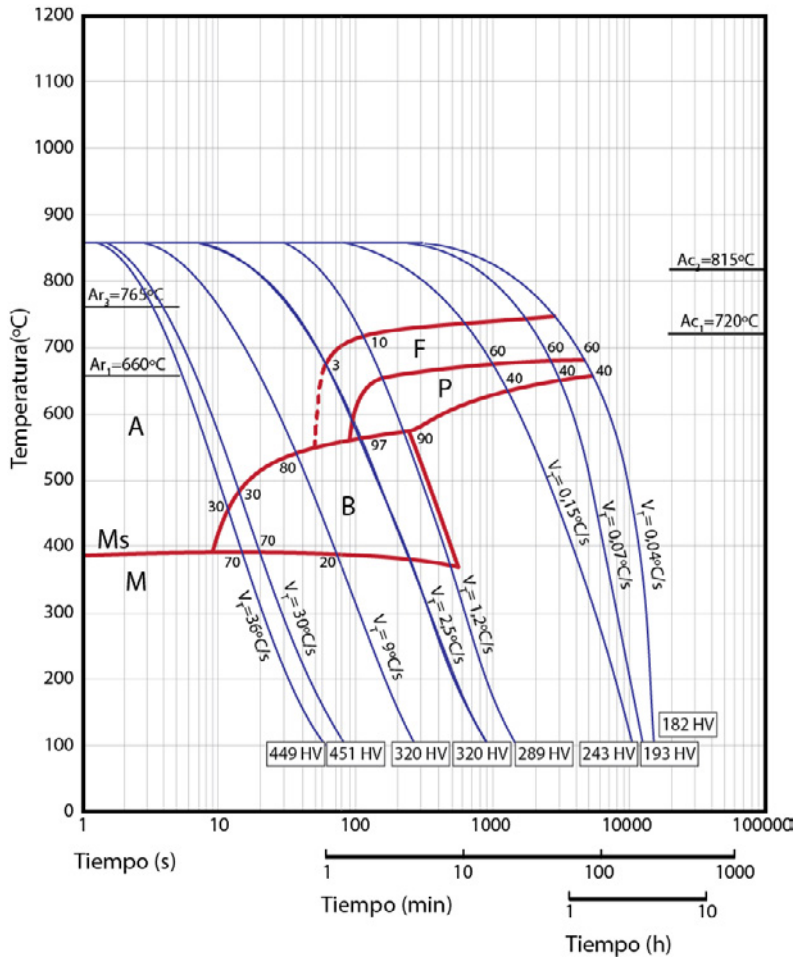


Figura 97. Diagrama de enfriamiento continuo para el acero hipoeutectoide 4130. Fuente: adaptado de SIJ group 2023.

### Conclusiones/Bibliografía (10%)

### Cuestiones (20%)

1. Con ayuda de la Tabla 31, leer en la curva Jominy el valor de la dureza para un 50% de martensita y determinar a qué distancia aparece esta dureza en el ensayo realizado. A partir de ella, determinar el diámetro crítico haciendo uso de la Figura 96a.

**Tabla 31. Dureza de la martensita en función del %C**

%C	Dureza, HRC				
	99%M	95%M	90%M	80%M	50%M
0,10	38,5	32,9	30,7	27,8	26,2
0,20	44,2	40,5	38,2	35,0	31,8
0,30	50,3	47,0	44,6	41,2	37,5

Fuente: elaboración propia.



# Práctica 21. Moldeo en arena y coquilla de aleaciones Al-Si

## Introducción

La mayoría de metales se pueden procesar por moldeo, lo que facilita la obtención de piezas con la forma deseada o muy próxima a ella (*near-net shape*). Existen multitud de métodos para moldear lingotes y partes con geometrías complejas y/o superficies internas. La elección de un método concreto depende de varios factores tales como tamaño, forma y cantidad de piezas y tipo de metal a solidificar. Una clasificación simple de los procesos de fundición se realiza sobre la base del tipo de molde; desechable, permanente y permanente con inyección.

## Molde desechable

El molde puede fabricarse con arena, cerámica, grafito, etc. y ofrece una gran libertad en términos de diseño. En esta categoría se distinguen dos tipos de procesos:

- a) *Modelo permanente*: el molde debe poder separarse en dos mitades para poder extraer el modelo.
- b) *Modelo desechable*: permite reproducir formas más complejas y mejorar la precisión del acabado. Las dos vías más comunes son:
  - *Espuma perdida (lost-foam o modelo evaporativo)*: se añade y compacta arena alrededor de un modelo fabricado en espuma. Durante el moldeo, la espuma se evapora y el metal solidifica en la cavidad resultante.
  - *Cera perdida (por revestimiento, lost-wax o investment casting)*: se aplica y deja endurecer una masilla cerámica alrededor de un modelo desechable fabricado con cera. Posteriormente se elimina la cera y se procede al moldeo sobre el patrón cerámico, el cual se destruye para poder recuperar la pieza.

## Molde permanente

Particularmente útil para altos volúmenes de producción con diseños que posean un espesor razonablemente uniforme y que no tengan geometrías excesivamente complejas. También es posible reproducir geometrías complejas, pero en ese caso se incrementa notablemente el coste del molde. A diferencia del moldeo en arena, presenta mayor reproducibilidad y permite conseguir mejores tolerancias dimensionales y mejores acabados superficiales. Los moldes suelen ser de fundición de hierro o acero y tienen una vida media de 10.000 o 120.000 fundiciones.

### Molde permanente a inyección (*die casting*)

Normalmente limitado a metales de bajo punto de fusión y muy recomendado cuando el número de piezas a producir es elevado. Se suele hacer la distinción entre los procesos que utilizan cámara fría y caliente. En esta categoría se incluye también el proceso conocido como moldeo a presión en matriz, forjado de metal líquido o *squeeze casting*, en el que el metal fundido está sometido a presión durante la solidificación, obteniéndose productos con poca porosidad.

A continuación, se describen las características fundamentales de los procesos a desarrollar en la práctica: molde desechable y molde permanente. También se describen brevemente los defectos más comunes derivados de estos procesos.

## Fundición en arena

El empleo de molde de arena desechable es el proceso más versátil y común, llegando a representar un 75% del mercado actual. Ejemplos de piezas obtenibles por esta vía son bases para máquinas, turbinas, propulsores, accesorios de fontanería, componentes del sector transporte, etc. Sus principales ventajas son:

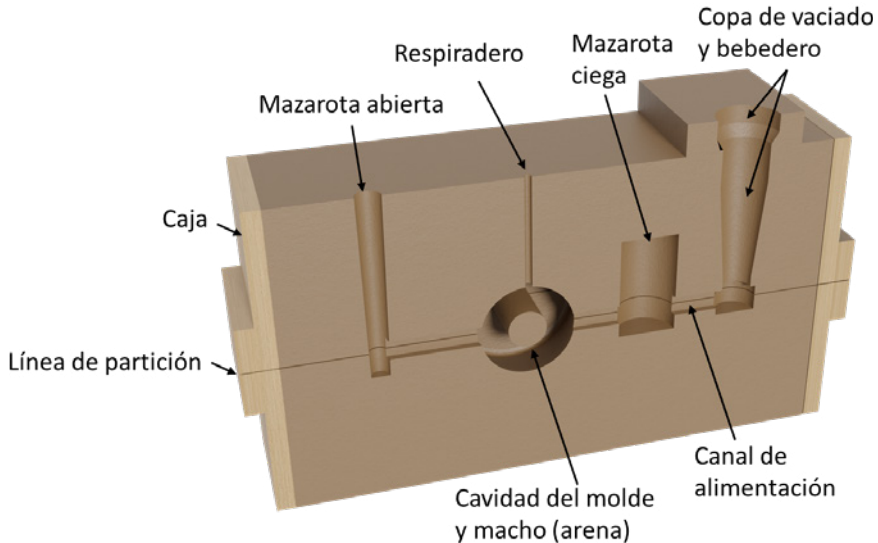
- Se puede trabajar con casi cualquier metal.
- Bajo coste del herramental.
- No hay limitación en el tamaño, forma o peso de la parte.

Como principales limitaciones se encuentran el pobre acabado superficial, las tolerancias amplias y la dificultad para automatizar el proceso.

*Arenas.* Se suele recurrir a arena de sílice sintética por su bajo coste, buen comportamiento a alta temperatura y fácil control composicional. Una granulometría fina permite obtener arenas más compactas y, por tanto, moldes más resistentes y piezas con superficies más lisas, sin embargo, poseen menos permeabilidad, lo que dificulta el escape de gases y vapores. Destaca el moldeo con arena verde, el cual se basa en el uso de arcilla y agua para aglutinar la arena. El término «verde» indica que la arena dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vacía el metal en su interior. A pesar de ser un método económico, no es tan preciso como otras alternativas que utilizan aglutinantes orgánicos o inorgánicos (moldeo de caja fría) o resinas líquidas (moldeo sin cocción).

*Moldes de arena.* En términos generales, se distingue entre moldes de tipo abierto y cerrado (Figura 98). En el molde abierto, el metal se vacía directamente hasta llenar la cavidad abierta, mientras que en el molde cerrado existe una vía de paso o sistema de vaciado que permite el flujo de metal fundido desde fuera del molde hasta la cavidad. Este último es el más común en los talleres de fundición. Las principales partes de los moldes cerrados son:

- *Caja:* soporta el molde. Cuando se utilizan moldes de dos piezas la caja se divide en dos partes, superior e inferior (la unión entre ambas se denomina línea de partición). Cuando se utilizan más de dos cajas para un solo molde se denominan centros.
- *Copa de vaciado (basin):* punto de acceso del metal fundido.
- *Bebedero (sprue):* a través del cual el metal fundido fluye hacia abajo.
- *Canales de alimentación (runner):* permiten el tránsito de metal fundido entre bebedero y cavidad del molde. Las compuertas son las entradas a estos canales.
- *Mazarotas (riser):* suministran metal fundido adicional conforme se contrae el metal en la cavidad del molde. Pueden ser ciegas o abiertas.
- *Machos o corazones:* insertos hechos de arena. Se colocan en el molde para formar regiones huecas o para definir la superficie interior de la fundición. También se utilizan en la parte exterior de la misma a fin de formar características como letras sobre la superficie o cavidades externas profundas.
- *Respiraderos o vientos:* permiten extraer los gases producidos cuando el metal fundido entra en contacto con la arena del molde y el macho. También dejan escapar el aire de la cavidad del molde conforme el metal fundido fluye en su interior.



**Figura 98. Esquema y partes de un molde de arena cerrado.**  
**Fuente: elaboración propia.**

*Modelos.* Sirven como plantilla de la pieza que se quiere obtener. Pueden estar hechos de madera, plástico, espuma o metal y los de tipo reutilizable se recubren de un agente separador para facilitar su extracción. La elección del material depende fundamentalmente del número de fundiciones requeridas, siendo necesario materiales más resistentes cuando más veces se reutilice el modelo. Los modelos de una sola pieza o modelos sueltos o sólidos suelen ser de madera y se utilizan para formas simples y en pequeñas cantidades. Los modelos divididos permiten formas más complejas, ya que constan de dos piezas, de manera que cada una forma una porción de la cavidad del molde. En casos más complejos se puede recurrir a modelos de placa bipartidos y producción rápida de prototipos.

El diseño del modelo constituye un paso crítico en la operación de fundición. Debe considerar factores tales como contracción del metal, facilidad de extracción (ángulo de salida favorable) y facilidad de llenado con el metal fundido.

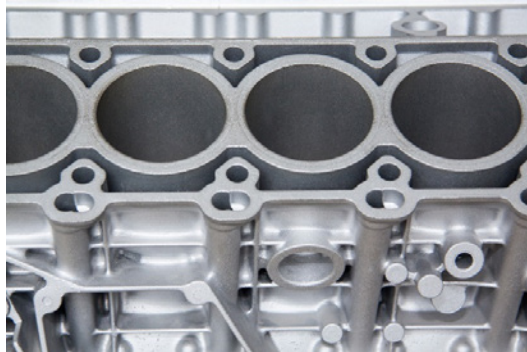
### Fundición en molde permanente

También conocida como fundición en molde duro o moldeo en coquilla. Suele emplearse para la obtención de pistones, cabezas de cilindros, bielas y artículos

de cocina. La cavidad del molde y sistema de alimentación se maquinan en el molde, siendo parte integral del mismo (Figura 99). Al igual que en el moldeo en arena pueden incluirse machos o corazones para reproducir cavidades internas. Con el fin de extender la vida de los moldes, estos se suelen recubrir con un lodo refractario (silicato de sodio y arcilla) o también con grafito. Estos recubrimientos también sirven para tener un mayor control sobre la velocidad de enfriamiento y facilitar la extracción de la pieza. En este tipo de procesos es habitual precalentar el molde entre 150 y 200 °C con objeto de reducir el gradiente térmico al que se somete el molde y, asimismo, facilitar el flujo de material. Las principales ventajas de este proceso son:

- Buen acabado superficial
- Tolerancias dimensionales cerradas
- Propiedades mecánicas buenas y uniformes
- Grandes capacidades de producción

Como principales limitaciones se encuentran el elevado costo del molde y la dificultad para trabajar con piezas complejas debido a la mayor dificultad para su extracción del molde. Por este motivo solo se utiliza para altos volúmenes de producción.



**Figura 99. Ejemplo de motor de fundición de Al-Si. Fuente: Pixabay.**

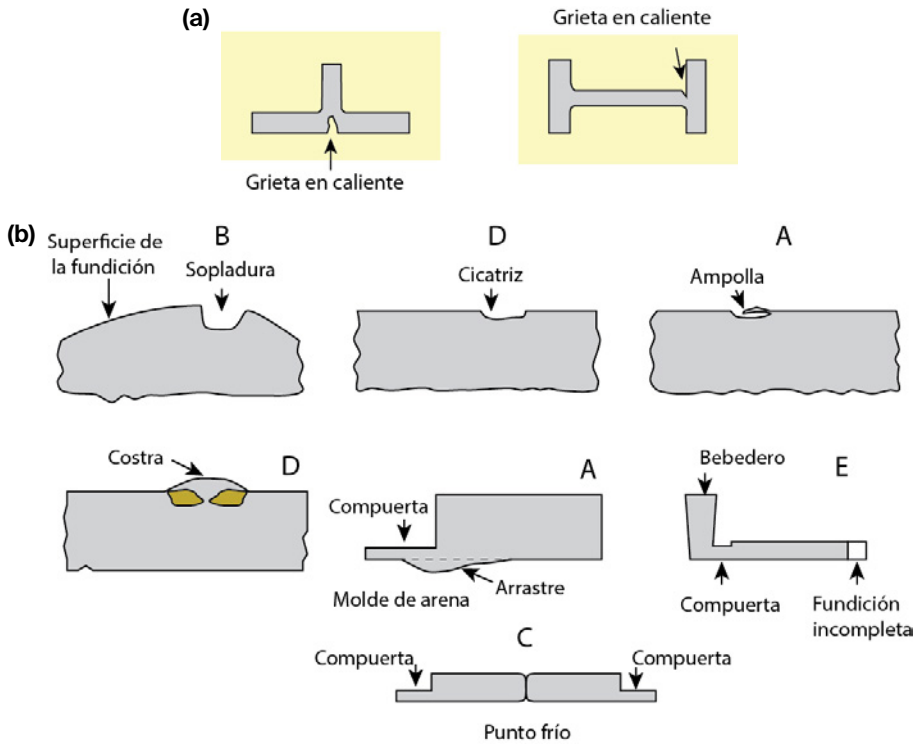
## Defectos

Con objeto de evitar confusiones con la terminología referida a defectos, el International Committee of Foundry Technical Associations ha elaborado una

nomenclatura estandarizada con siete categorías, identificadas con letras mayúsculas (Figura 100):

- A) *Proyecciones metálicas*: consisten en aletas, rebabas o proyecciones, como ampollas y superficies rugosas.
- B) *Cavidades*: consisten en cavidades redondeadas o rugosas, internas o expuestas, incluyendo sopladuras, puntas de alfiler y cavidades por contracción (ver porosidad más adelante).
- C) *Discontinuidades*: como grietas, desgarramientos en frío o en caliente, y puntos fríos. Si no se permite que el metal se contraiga libremente al solidificarse, pueden presentarse grietas y desgarres. Aunque varios factores están involucrados en el desgarramiento, el tamaño grueso del grano y la presencia de segregaciones de bajo punto de fusión a lo largo de los límites de los granos (intergranulares) incrementan la tendencia al desgarramiento en caliente. El punto frío es una interfaz en una fundición que no se funde totalmente debido al encuentro de dos corrientes de metal líquido provenientes de dos compuertas diferentes.
- D) *Superficie defectuosa*: como pliegues, traslapes y cicatrices superficiales, capas de arena adherida y escamas de óxido.
- E) *Fundición incompleta*: como fallas (debidas a solidificación prematura), volumen insuficiente del metal vaciado y fugas (por la pérdida de metal del molde después de haber sido vaciado). Las fundiciones incompletas también pueden provenir de una temperatura muy baja del metal fundido o de un vaciado muy lento del mismo.
- F) *Dimensiones o formas incorrectas*: debido a factores como tolerancia inapropiada para la contracción, error de montaje del modelo, contracción irregular, modelo deformado o fundición alabeada.
- G) *Inclusiones*: se forman durante la fusión, solidificación y moldeo; en general son no metálicas. Se consideran dañinas porque actúan como multiplicadoras de esfuerzos y, por lo tanto, reducen la resistencia de la fundición. Durante el procesamiento del metal fundido se pueden filtrar partículas pequeñas. Las inclusiones se pueden formar durante la fusión, cuando el metal fundido reacciona con el medio ambiente (por lo común oxígeno) o con el crisol o el material del molde; por reacciones químicas entre los componentes del metal fundido; o a partir de escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido. El astillado de la superficie del molde y de los corazones o

machos también puede producir inclusiones, lo que indica la importancia de la calidad de los moldes y de su mantenimiento.



**Figura 100. Ejemplos de defectos comunes en las fundiciones. (a) Ejemplos de grietas o desgarros en caliente debidos a que la fundición no puede contraerse con libertad; (b) ejemplos de defectos comunes.**

Fuente: adaptado de Kalpakjian 2008.

*Porosidad.* La mayoría de metales se contraen durante la solidificación, lo que da lugar a cavidades o rechupes. Estas cavidades pueden ocurrir a nivel microscópico entre los brazos dendríticos, especialmente cuando las dendritas son de gran tamaño (Figura 101). Asimismo, la porosidad puede venir asociada a la presencia de gases (inicialmente disueltos en el metal fundido o formados por reacción con el material del molde).

La porosidad reduce considerablemente la ductilidad de una fundición y también da lugar a un peor acabado superficial, lo que afecta a la estanqueidad o hermeticidad de recipientes presurizados. Las estrategias para combatir la porosidad son variadas. Algunas de las más comunes son:

- Asegurar suministro suficiente de material fundido (empleo de mazarotas).
- Emplear enfriadores internos o externos (aumentan velocidad de solidificación en regiones críticas).
- Emplear moldes con mayor conductividad térmica.
- Emplear sistemas a vacío o con burbujeo de gases inertes para evitar gases disueltos en el metal fundido.

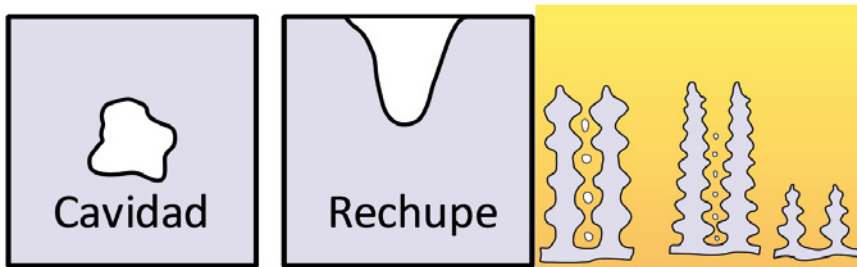


Figura 101. Ejemplos de defectos producidos por fenómenos de contracción.  
Fuente: elaboración propia.

## Objetivos

Familiarizarse con los procesos de fundición trabajando con una aleación comercial Al-Si y varios tipos de molde.

Evaluar defectos en piezas moldeadas.

Comparar microestructuras obtenidas por moldeo en arena y molde metálico.

## Parte experimental

Paso 1. Metal fundido. Poner muestras de tamaño aproximado 25x30mm de aleación Al-Si (A356) en crisoles grandes e introducirlos en una mufla a 800 °C (Figura 102). Nota: en esta operación utilizar guantes de alta temperatura, careta antitérmica y pinzas.

Paso 2. Arena verde. Preparar, si fuera necesario, una mezcla de 89% arena (AFA 105-115, granulometría <0,4), 8% bentonita y 3% agua. La mezcla se debe remover bien humedeciéndola poco a poco. Para saber si la arena está en su punto verde:

- Se toma arena en un puño y se aprieta. Al soltarla, debe quedar una masa compacta con las huellas de los dedos.
- Se rompe en dos por la mitad. Cuando está en su punto, debe quedar con un corte limpio, recto. Si tiene poca agua, el corte no será limpio y se desmoronará un poco. Si tiene demasiada agua, la arena se pegará a la mano.

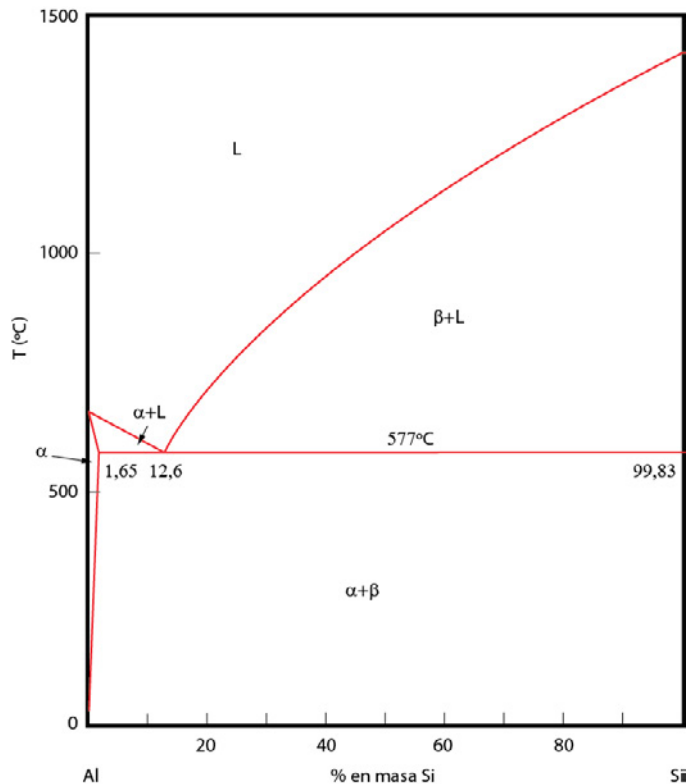


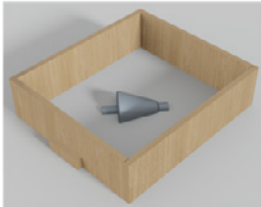
Figura 102. Diagrama Al-Si (Arrabal 2017).

### Paso 3. Molde cerrado para moldeo con modelo permanente

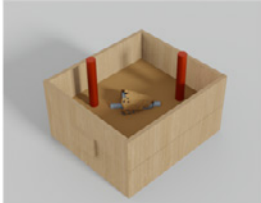
Colocar sobre la mesa la mitad inferior del modelo bocabajo (Figura 103). La semicaja se pone invertida. Sobre el modelo se aplica el *agente separador* (polvos de talco). Se recubre el modelo con arena tamizada, repartiéndola bien con las yemas de los dedos y asegurando que penetra en las partes más complicadas del molde. Cuando la arena (de careo) llegue a la mitad de la caja, se apisona firmemente con un apisonador. Después del apisonado se sigue

vertiendo arena (de relleno), formando capas que se apisonan, una a una, primero en los lados y las esquinas, luego en el centro hasta que se llena. Si el apisonado es excesivo el molde no respirará lo cual impide que salgan los gases adecuadamente, produciendo defectos en el vaciado. Si la arena no se apisona lo suficiente se saldrá del molde al voltearlo. Se enrasa la caja con arena y se nivela la superficie, para que quede plana. Voltear la caja 180° y espolvorear agente separador en toda la superficie.

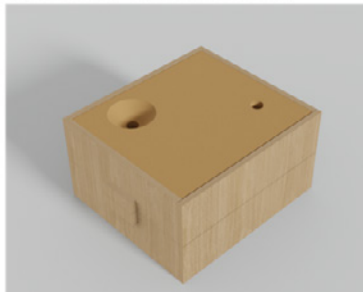
1. Semicaja inferior invertida-Mitad modelo (cubrir con agente separador)
2. Compactación arena
3. Nivelación y retirada de exceso de arena



4. Unión semicajas-Otra mitad del modelo-Agente separador-Bebedero y mazarota-Compactación
5. Retirada de bebedero y mazarota-Nivelación y retirada de exceso de arena
6. Separación semicajas-Creación de canales-Extracción de mitades del modelo-Colocación macho de arena



7. Unión semicajas-Creación copa de vaciado-Operación de colada



**Figura 103. Etapas en la preparación del molde. Fuente: elaboración propia.**

Colocar encima la otra semicaja y encajar la otra mitad del modelo sobre la primera mitad (espolvorearlo con agente separador). Introducir

verticalmente la punta de los tubos de que darán forma al bebedero (conducto por donde entrará el metal líquido al molde) y mazarota de salida, respectivamente. Se aplica el mismo procedimiento que con la semicaja anterior (arena tamizada alrededor del modelo y arena apisonada en capas superiores).

Retirar los tubos de bebedero y salida haciendo un movimiento circular sobre su eje. Separar las semicajas y sacar las dos mitades del modelo (ayudarse de un tornillo para extraer la parte inferior). Con ayuda de una espátula o similar, realizar dos caminos entre la cavidad del molde y el bebedero y la salida. Cerrar las dos mitades del molde y picar la arena con una aguja o varilla sin tocar el modelo para producir avisos (respiradores). Con ayuda de dos tubos y arena crear una copa de vaciado.

#### Paso 4. Operación de colada

Con los EPIs suministrados por el profesorado, sacar del horno los crisoles con el aluminio fundido, retirar la escoria o natas de la superficie y realizar la colada en el molde de arena cerrado y otros moldes preparados previamente. Esperar 30 min a que se enfríen los moldes antes de extraer las piezas.

#### Paso 5. Observación de microestructuras y defectos

Durante el enfriamiento de los moldes, los alumnos adquirirán macro y micrografías de probetas de años anteriores. Las muestras para microscopía óptica deberán pulirse con alúmina alfa y atacarse con la mezcla de ácidos o reactivo 6 durante unos 15-30 s.

#### Paso 6. Limpieza de las estaciones de trabajo

Después de terminar las actividades correspondientes a esta práctica se debe contribuir a la limpieza y orden del lugar y herramientas de trabajo.

## **Informe**

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

## **Resultados y discusión**

- Fotografías del proceso de moldeo, señalando zonas de interés y descripción breve del procedimiento (20%).
- Micrografías de las probetas de la colección, señalando microconstituyentes, y descripción de las mismas (20%).
- Macrografías de las piezas con defectos, señalando el tipo de defecto y su posible justificación (20%).

## **Conclusiones/Bibliografía (10%)**

# Práctica 22. Niquelado y cobreado

## Niquelado

### Introducción

El niquelado produce un recubrimiento metálico de níquel (Figura 104) que puede tener fines decorativos, especialmente cuando se combina con otros recubrimientos (Cr, Au, Cu, etc.), o funcionales (aumento de resistencia al desgaste, corrosión y térmica). Incluso puede servir para producir piezas por electroconformado. Su importancia comercial es notable, con más de 150000 t/año actualmente, siendo la electrodeposición la vía más común para su obtención.

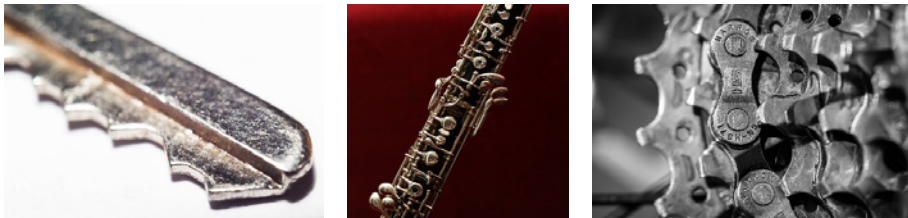
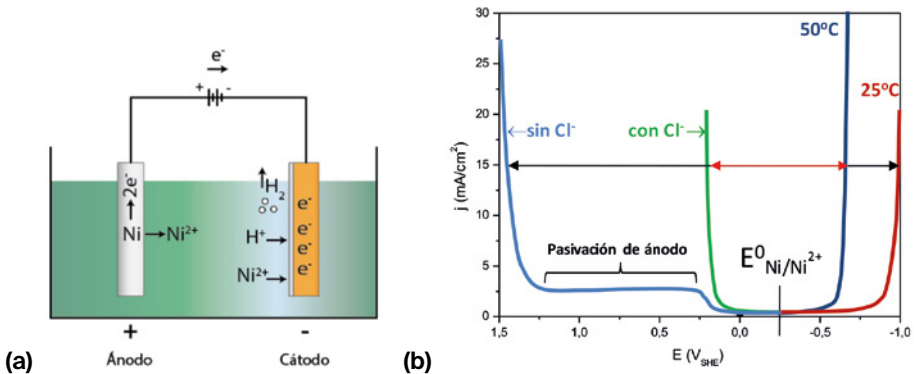


Figura 104. Ejemplos de piezas con niquelado. Fuente: Pixabay.

El níquel presenta un potencial estándar teórico relativamente activo de  $E_{\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}}^{\circ} = -0,25 \text{ V}_{\text{ENH}^{\text{p}}}$  pero habitualmente presenta potenciales más positivos debido a su tendencia a la formación de capas de óxido superficiales pasivas, que le confieren suficiente resistencia a la corrosión atmosférica y a medios alcalinos y algunos ácidos. En el caso de niquelado sobre acero, el níquel actúa como cátodo, por lo que protege al acero siempre y cuando no haya poros. Sin embargo, esta situación es poco común en la práctica siendo más frecuente el uso de sistemas multicapa Cu/Ni/Cr donde la respuesta electroquímica es más compleja.

Los procesos catódico y anódico de niquelado son muy sensibles a la concentración de iones  $\text{H}^+$  (Figura 105), siendo necesario mantener en la práctica un pH entre 2,8 y 5,8. Bajos pHs (1-2) resultan en una disminución del

rendimiento de electrodeposición de Ni hasta 75-85%. A pHs elevados, el rendimiento catódico aumenta (95-96%), sin embargo, el pH en la intercara electrodo/electrolito es siempre mayor que el pH en el seno del electrolito y puede llegar a valores que provocan la formación de hidróxidos y sales básicas de Ni y que se incorporan al recubrimiento, empeorando la calidad del mismo. Por esta razón, los electrolitos de niquelado suelen contener agentes-tampones de pH, tales como ácido bórico.



**Figura 105. Niquelado: (a) configuración de la celda electrolítica y reacciones en los electrodos; (b) efecto de la temperatura y la presencia de cloruros en la polarización anódica y catódica. Fuente: elaboración propia.**

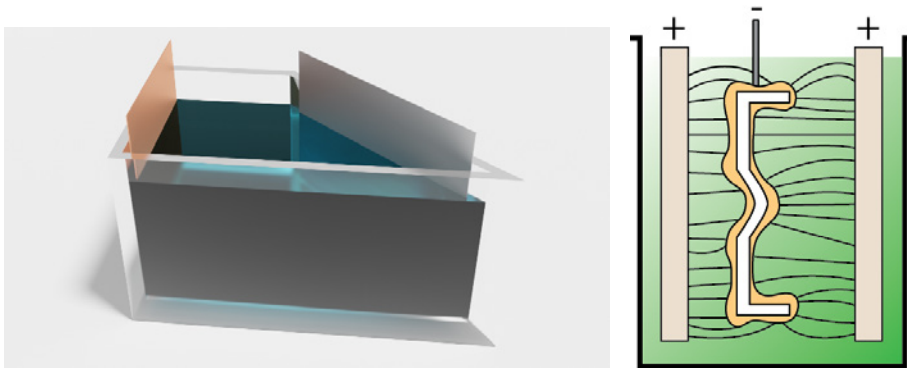
El problema del proceso anódico del niquelado es la pasivación de los ánodos con el aumento del pH en el seno del electrolito, lo que resulta en una elevada tensión o voltaje en la celda y, por consiguiente, en un aumento del consumo energético del proceso. La pasivación se podría eliminar bajando el pH (aunque esto resultaría en la caída del rendimiento catódico), añadiendo iones cloruro al electrolito (como cloruro sódico o cloruro de níquel, Figura 105b) o utilizando ánodos activados que contienen S.

Un aumento de la temperatura del electrolito disminuye la polarización catódica (Figura 105b) lo que permite trabajar a densidades de corriente elevadas con menor consumo energético y aumentar la velocidad del proceso y, por tanto, la productividad del baño de electrodeposición.

El poder cubriente de los electrolitos de niquelado es relativamente bajo para los valores de corriente que habitualmente se utilizan ( $>5 \text{ mA/cm}^2$ ). Esto se debe a que, en piezas con geometría compleja, cualquier pequeño cambio de potencial va a resultar en un cambio significativo de la corriente, dando lugar a diferencias notables en espesor. Las distintas normativas suelen

especificar un espesor local mínimo. La celda Hull se suele utilizar para evaluar el poder cubriente de los baños (Figura 106).

Entre las medidas habituales para mejorar el poder cubriente se encuentran: utilizar bajas densidades de corriente, aumentar conductividad del baño, aumentar distancia ánodo-cátodo, aumentar pH y T y utilizar altas concentraciones de sulfato de Ni. También es común utilizar ánodos auxiliares, pantallas para homogeneizar el espesor y el empleo de aditivos. Estos últimos, además de un potencial efecto nivelador, se utilizan para obtener recubrimientos brillantes, semibrillantes o satinados y de mayor ductilidad.



**Figura 106. Representación de celda Hull (Fuente: elaboración propia) y variación de espesor en un proceso de niquelado. Fuente: adaptado de Nickel Institute 2022.**

La química del baño más utilizada para el niquelado es la conocida como formulación Watts (Tabla 32). Se utiliza desde 1916 para fines decorativos tanto como funcionales. Los recubrimientos son blandos y sin brillo cuando no se emplean aditivos, mientras que con ellos se consiguen acabados brillantes, semibrillantes o satinados y con un mejor efecto nivelador.

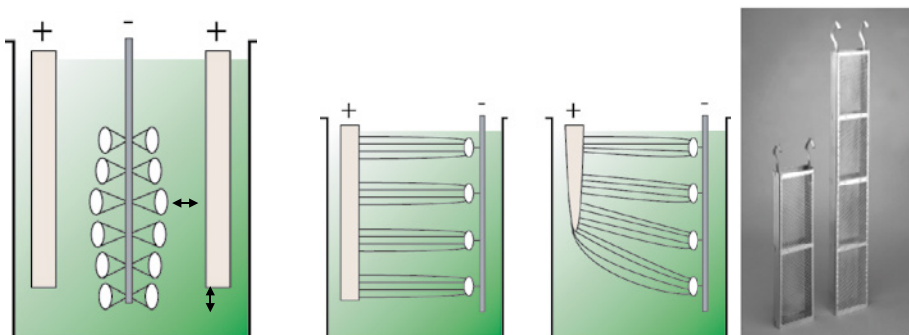
Cuando se quieren obtener recubrimientos con una mayor tasa de deposición ( $25\text{-}180\ \mu\text{m h}^{-1}$ ) y menores tensiones internas y mejores propiedades, se recurre al proceso basado en sulfamato de níquel,  $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , aunque su coste es algo mayor. Las principales diferencias de esta formulación son la mayor solubilidad del sulfamato ( $300\text{-}450\ \text{g L}^{-1}$ ) en comparación con el sulfato ( $240\text{-}300\ \text{g L}^{-1}$ ) y la menor concentración de cloruro de níquel ( $0\text{-}30\ \text{g L}^{-1}$ ), lo que reduce las tensiones internas del recubrimiento.

**Tabla 32. Electrolito y condiciones del niquelado Watts**

Parámetro	Valor	Observaciones
Electrolito		
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	240-300 g L <sup>-1</sup>	Proporciona Ni <sup>2+</sup>
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30-90 g L <sup>-1</sup>	Proporciona Ni <sup>2+</sup> , ↑conductividad, ↓voltaje celda, facilita disolución ánodos
$\text{H}_3\text{BO}_3$	30-45 g L <sup>-1</sup>	Control de pH
Temperatura	40-60 °C	
pH	3,5-4,5	
$i_{\text{cátodo}}$	2-7 A dm <sup>-2</sup>	
Tasa de deposición	25-85 μm h <sup>-1</sup>	

Fuente: elaboración propia.

Otro elemento clave en los procesos de niquelado son los ánodos solubles de Ni. Su finalidad es proporcionar iones Ni<sup>2+</sup> al baño y distribuir la corriente de forma uniforme sobre el cátodo. En líneas generales, se recomienda alinear los ánodos a cada lado del baño, colocando una menor cantidad en los extremos. Asimismo, se recomienda que su profundidad sea inferior a la de la pieza a recubrir y que estén más próximos a la misma en su zona central (Figura 107). Las cestas de Ti con piezas de Ni (99,5%Ni+Co o Ni activado con 0,02%S) suelen ofrecer buenos resultados al no presentar el problema esquematizado en la Figura 107.



**Figura 107. Disposición recomendada de ánodos de Ni. Ejemplo de cambio en la distribución de corriente con el consumo del ánodo. Fuente: adaptado de Nickel Institute 2022.**

## Objetivos

Estudiar el efecto de pH en la eficiencia del proceso y calidad del recubrimiento (porosidad y adherencia).

## Parte experimental

**Tabla 33. Material necesario para el desarrollo de la Práctica 22.1**

Probetas de latón Desengrasado químico Opción (a)* 20 g/L $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 30 g/L $\text{Na}_3\text{PO}_4 \times 12\text{H}_2\text{O}$ 60-80°C, 5-20 min Opción (b) Acetona o alcohol  Activación 30 g/L $\text{H}_2\text{SO}_4$  Electrolito niquelado 280 g/L $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ 50 g/L $\text{NiCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ 30 g/L $\text{H}_3\text{BO}_3$  Disolución para medidas de porosidad 10 g/L $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 20 g/L NaCl	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Granatario + Balanza de precisión</li> <li>- Varilla de vidrio</li> <li>- pH-metro</li> <li>- Lijas P600 y P1200</li> <li>- Kit de adhesión con cuchillas</li> <li>- Fuente de alimentación DC</li> <li>- x2 Cables con pinzas de cocodrilo</li> <li>- Muestras de latón ~5x3 cm</li> <li>- Soporte PVC con ánodos de Ni</li> <li>- Imán agitador</li> <li>- Placa calefactora con agitación</li> <li>- Termómetro</li> <li>- Vasos de precipitado de cristal</li> <li>x2 250 mL,</li> <li>x1 100 mL</li> <li>- Probeta de 50 mL</li> <li>- Pipeta Pasteur</li> <li>- Espátula</li> <li>- Calibre</li> <li>- Placa de Petri o papel para pesar</li> <li>- Pinzas</li> <li>- Gafas de seguridad</li> </ul>
--	--

\* En la industria se utiliza la opción (a) por las razones de (i) seguridad/salud del personal; (ii) facilidad del mantenimiento/reciclado de las disoluciones alcalinas en grandes volúmenes comparado con sustancias orgánicas; (iii) en caso de que las piezas estén muy sucias tras el desengrasado químico a menudo se realiza desengrasado electroquímico en la misma disolución, aplicando la corriente catódica, de manera que las burbujas de hidrógeno facilitan el desprendimiento de la grasa.

Fuente: elaboración propia.

**Paso 1.** Comprobar el material (Tabla 33) y preparar disoluciones si fuera necesario.

**Paso 2.** Preparación de la superficie de los ánodos (níquel) y cátodos (probetas de latón).

*Ánodos:*

Utilizando pinzas, desengrasar con alcohol, secar con corriente de aire.

Importante: manipular las piezas con guantes con el fin de no ensuciarlas.

*Cátodos:*

- a) Lijado. Comenzar con el papel de lija más grueso para terminar con el de grano más fino (P1200). El lijado sirve para (i) quitar la suciedad visible y productos de oxidación, y (ii) desarrollar uniformemente la rugosidad de la superficie de la probeta para aumentar la unión mecánica entre el recubrimiento y el sustrato. En la industria, los productos de corrosión sueltos se eliminan por chorreado con arena y las capas de oxidación compactas se eliminan realizando un ataque químico en ácidos tras una operación de desengrasado y antes de la activación.
- b) Desengrase. Utilizando las pinzas, desengrasar con alcohol, secar con corriente de aire. Importante: manipular las piezas con guantes con el fin de no ensuciarlas.
- c) Activación. Utilizando pinzas, sumergir las probetas en la disolución de activación durante 1 min. Aclararlas primero en agua, luego en alcohol y secar con corriente de aire caliente. La operación de activación es necesaria para eliminar capas finas pasivas que se pueden formar durante las operaciones de preparación superficial. La activación también asegura una buena adhesión del recubrimiento al sustrato.

Paso 3. Masa y área del cátodo y cálculo de intensidad de corriente. Utilizar la balanza de precisión. Con un calibre, medir el área de la parte de la muestra que va a ser sumergida. Calcular la intensidad de corriente,  $I_{\text{aplicada}}$  (A), necesaria para alcanzar una densidad de corriente de  $i = 20 \text{ mA/cm}^2$  (si la probeta se sumerge unos 4 cm el valor de corriente debe estar próximo a 0,45 A).

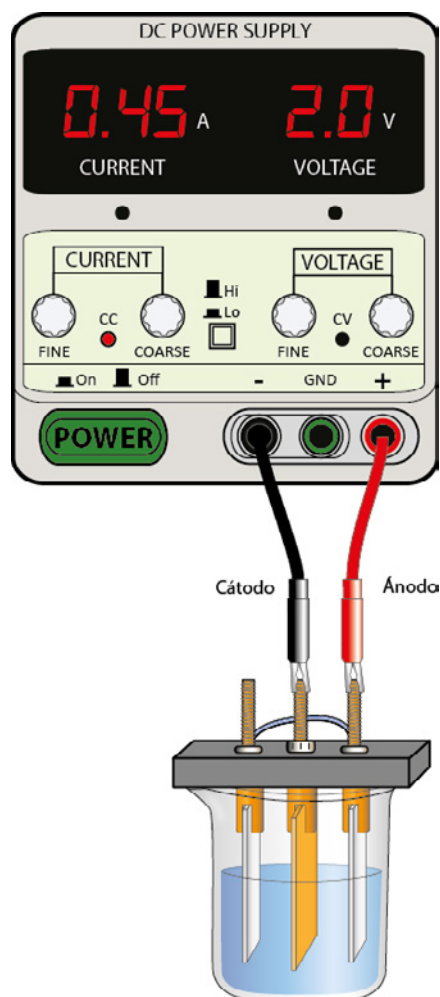
$$A \text{ (cm}^2\text{)} = \frac{I_{\text{aplicada}} \text{ (A)}}{i} = \frac{I_{\text{aplicada}} \text{ (A)}}{20 \text{ mA/cm}^2}$$

**Tabla 34. Condiciones y tiempos de niquelado**

Condiciones	150 mL: 280 g/L NiSO <sub>4</sub> ×6H <sub>2</sub> O / 50 g/L NiCl <sub>2</sub> ×6H <sub>2</sub> O / 30 g/L H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> con agitación V <sub>máx</sub> = ~30 V i = 20 mA/cm <sup>2</sup>			
	Grupo	T (°C)	pH 2	pH 5
			t (min)	t (min)
1-6	T <sub>amb</sub>		10	10

Fuente: elaboración propia.

Paso 4. Niquelado. Cada grupo realizará ensayos de electrodeposición con las condiciones indicadas en la Tabla 34. El pH del electrolito se ajusta utilizando la disolución de 30 g/L  $H_2SO_4$  y pH-metro. El volumen necesario es de aproximadamente 150 mL.



**Figura 108.** Esquema del montaje de niquelado. Es importante colocar las probetas siempre con la misma configuración para asegurar que el área niquelada es la misma en todas ellas. Fuente: elaboración propia.

Colocar los ánodos de Ni y la muestra o cátodo (latón) según se muestra en la Figura 108 y seguir la siguiente secuencia con ayuda del personal docente:

- Con la fuente apagada girar los reguladores *Coarse* y *Fine* de corriente al mínimo y los de voltaje al máximo.
- Encender la fuente (*Power*) y subir la intensidad de corriente hasta el valor  $I_{\text{aplicada}}$  calculado previamente (primero con regulador *Coarse* y posteriormente con *Fine*). Iniciar el cronómetro y observar los procesos que ocurren en cátodo y ánodo.
- Una vez alcanzando el tiempo de niquelado, anotar el valor de voltaje y apagar la fuente (*Power*).
- Sacar el soporte y extraer la muestra. Lavarla con abundante agua y alcohol. Secar con aire caliente. Importante: manipular las piezas con guantes y pinzas con el fin de no ensuciarlas.
- Con el resto de muestras, encender la fuente directamente y ajustar la corriente con el regulador *Fine* si fuera necesario.

Paso 5. Masa del cátodo después del niquelado. Utilizar la balanza de precisión. Calcular la masa del recubrimiento depositado.

Paso 6. Medidas de porosidad. Mojar bien un trozo rectangular de papel de filtro con la disolución de NaCl y  $K_3Fe(CN)_6$ . Aplicar el papel sobre una cara de la probeta niquelada, apretar bien para eliminar burbujas de aire entre el papel y la probeta (puede utilizarse varilla de vidrio), dejar actuar durante 5 min. Contar el número de puntos marrones que aparecen correspondientes a lugares con poros. No contabilizar poros en bordes de muestra.

Paso 7. Medidas de adherencia. En la cara opuesta a las medidas de porosidad realizar las medidas según lo indicado en el Anexo.

Paso 8. Tabla de resultados. Completar la Tabla 35. Para el cálculo del rendimiento de corriente utilizar la Ley de Faraday. Datos:  $M_{Ni} = 58,71 \text{ g/mol}$ ,  $F = 96500 \text{ C/mol}$ ,  $\rho = 8,9 \text{ g cm}^{-3}$ .

**Tabla 35. Resultados del niquelado. G: grupo**

G	I (A)	A (cm <sup>2</sup> )	V <sub>final</sub> (V)	pH 2							
				t (min)	m <sub>inicial</sub> (g)	m <sub>final</sub> (g)	m <sub>Ni-real</sub> (g)	m <sub>Ni-teórico</sub> (g)	% $\eta$	Poros/cm <sup>2</sup>	Adh.
1				10							
2				10							
3				10							
4				10							

G	I (A)	A (cm <sup>2</sup> )	V <sub>final</sub> (V)	pH 2								
				t (min)	m <sub>inicial</sub> (g)	m <sub>final</sub> (g)	m <sub>Ni-real</sub> (g)	m <sub>Ni-teórico</sub> (g)	% $\eta$	Poros/ cm <sup>2</sup>	Adh.	
5				10								
6				10								

G	I (A)	A (cm <sup>2</sup> )	V <sub>final</sub> (V)	pH 5								
				t (min)	m <sub>inicial</sub> (g)	m <sub>final</sub> (g)	m <sub>Ni-real</sub> (g)	m <sub>Ni-teórico</sub> (g)	% $\eta$	Poros/ cm <sup>2</sup>	Adh.	
1				10								
2				10								
3				10								
4				10								
5				10								
6				10								

Fuente: elaboración propia.

## Informe

El informe correspondiente a la parte 22.1 (Niquelado) deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

### Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### Resultados y discusión

- Resultados obtenidos por los distintos grupos incluyendo las fotografías, reacciones y datos del proceso (voltaje, densidad de corriente, rendimiento, etc.) (30%).

- Fotografías y resultados/discusión relativos al ensayo de porosidad (10%).
- Fotografías y resultados/discusión relativos al ensayo de adherencia (10%).

## Conclusiones/Bibliografía (10%)

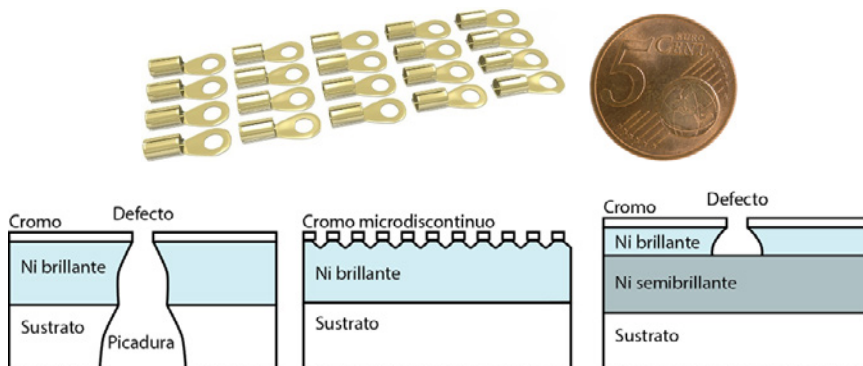
### Cuestiones (10%)

1. ¿Qué significan las siglas «mp» y «mc» en recubrimientos de Cr? ¿Qué características definen a estos acabados?

## Cobreado

### Introducción

El cobreado se utiliza con fines decorativos y en otras aplicaciones como circuitos impresos por su buena conductividad. También puede usarse en procesos de electroconformado. Suele constituir la primera capa en sistemas multicapa Cu/Ni/Cr por su relativo bajo precio, facilidad para recubrirse con distintos metales, su capacidad de nivelado y por su ductilidad y adherencia (Figura 109). La electrodeposición es la vía más común para la obtención de recubrimientos de Cu.



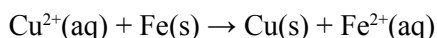
**Figura 109.** Ejemplo de piezas cobreadas (Fuente: Pixabay) y de sistemas multicapa con Cu, Ni y Cr y su respuesta frente a corrosión.

Fuente: adaptado de Nickel Institute 2022.

El cobre es un metal considerado como noble ( $E^{\circ}_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}} = 0,337 \text{ V}_{\text{ENH}}$ ) y por lo tanto no protege al acero frente a la corrosión electroquímica, sino por efecto barrera, con lo cual su capacidad protectora depende de la porosidad del recubrimiento. En los poros, el acero, siendo el ánodo con respecto al cobre, se corroe rápidamente. Sin embargo, esta situación es poco común en la práctica siendo más frecuente el uso de sistemas multicapa Cu/Ni/Cr donde la respuesta electroquímica es más compleja.

La química del baño en los procesos de cobreado suele entrar en uno de los siguientes grupos:

- a) *Electrolitos ácidos base sulfatos*: son baratos y tienen alto rendimiento de corriente. Se recomienda utilizar ánodos de Cu-0.004-0.08%P. Su poder cubriente es muy bajo, por lo que no pueden recubrirse uniformemente piezas de geometría compleja. Además, el Cu, siendo más electropositivo que el Fe, se deposita sobre el Fe por cementación, antes de la aplicación de la corriente externa:



Esto resulta en recubrimientos tipo polvo, con pobre adhesión. Dos métodos permiten evitar la cementación: (i) una conexión eléctrica de las piezas antes de sumergir la pieza en el baño, (ii) una electrodeposición inicial de una subcapa delgada (0,5-1 mm) de Ni o de Cu, esta última en un baño de cianuro, constituyendo lo que se conoce como un «flash». En el baño de cianuro, el complejo cianurado deja una pequeña cantidad de iones  $\text{Cu}^{2+}$  en disolución, reduciendo su potencial de reducción a valores próximos a los del Fe y evitándose así el depósito químico por desplazamiento.

- b) *Electrolitos base cianuros alcalinos*: proporcionan alta polarización catódica de Cu, evitando la cementación y consiguiendo un excelente poder cubriente y adherencia del recubrimiento, pero son muy tóxicos y poco estables (KCN tiende a reaccionar con  $\text{CO}_2$  del aire, desprendiendo HCN). Se suelen utilizar ánodos de cobre de alta pureza libres de oxígeno (*High purity oxygen-free copper*).
- c) *Electrolitos base pirofosfatos ligeramente alcalinos*: ocupan una posición intermedia entre los dos previos en cuanto a características del proceso y del recubrimiento. Destacan por su alto poder cubriente y ductilidad de los recubrimientos obtenidos. No son tóxicos. El

rendimiento catódico se aproxima al 100%. Para evitar la pasivación de los ánodos de Cu se necesita un exceso de  $P_2O_7^{4-}$  en el electrolito. Es frecuente añadir  $NH_4NO_3$  a este tipo de baños. Se suelen utilizar ánodos de cobre de alta pureza libres de oxígeno (*High purity oxygen-free copper*).

## Objetivos

Estudiar el efecto de la densidad de corriente en el rendimiento, porosidad y adherencia de recubrimientos de cobre.

## Parte experimental

**Tabla 36. Material para el desarrollo de la Práctica 22.2**

Probetas de acero Desengrasado químico Opción (a)* 20 g/L $Na_2CO_3$ 30 g/L $Na_3PO_4 \times 12H_2O$ 10 g/L NaOH 60-80°C, 5-20 min Opción (b) Acetona o alcohol  Activación 30 g/L $H_2SO_4$  Electrolito cobreado 80 g/L $CuSO_4 \times 5H_2O$ 350 g/L $K_4P_2O_7 \times 3H_2O$ pH=8,5-9,0  Disolución para medidas de porosidad 10 g/L $K_3Fe(CN)_6$ 20 g/L NaCl	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Granatario + Balanza de precisión</li> <li>- Varilla de vidrio</li> <li>- pH-metro</li> <li>- Lijas P600 y P1200</li> <li>- Kit de adhesión con cuchillas</li> <li>- Fuente de alimentación DC</li> <li>- x2 Cables con pinzas de cocodrilo</li> <li>- Muestras de acero ~5x3 cm</li> <li>- Soporte PVC con ánodos de Cu</li> <li>- Imán agitador</li> <li>- Placa calefactora con agitación</li> <li>- Termómetro</li> <li>- Vasos de precipitado de cristal</li> <li>x2 250 mL</li> <li>x1 100 mL</li> <li>- Probeta de 50 mL</li> <li>- Pipeta Pasteur</li> <li>- Espátula</li> <li>- Calibre</li> <li>- Placa de Petri o papel para pesar</li> <li>- Pinzas</li> <li>- Gafas de seguridad</li> </ul>
--	---

\* En la industria se utiliza la opción (a) por las razones de (i) seguridad/salud del personal; (ii) facilidad del mantenimiento/reciclado de las disoluciones alcalinas en grandes volúmenes comparado con sustancias orgánicas; (iii) en caso de que las piezas estén muy sucias tras el desengrasado químico a menudo se realiza desengrasado electroquímico en la misma disolución, aplicando la corriente catódica, en el que las burbujas de hidrógeno facilitan el desprendimiento de la grasa.

Paso 1. Comprobar el material (Tabla 36) y preparar las disoluciones si fuera necesario.

Paso 2. Preparación de la superficie de los ánodos (cobre) y cátodos (láminas de acero).

*Ánodos:*

Utilizando pinzas, desengrasar en acetona o alcohol, secar con corriente de aire. Importante: manipular las piezas con guantes con el fin de no ensuciarlas.

*Cátodos:*

- a) Lijado. Comenzar con el papel de lija más grueso para terminar con el de grano más fino (P1200). El lijado sirve para (i) quitar la suciedad visible y productos de, y (ii) desarrollar uniformemente la rugosidad de la superficie de la probeta para aumentar la unión mecánica entre el recubrimiento y el sustrato. En la industria, los productos de corrosión sueltos se eliminan por chorreado con arena, las capas de oxidación compactas se eliminan realizando un ataque químico en ácidos tras una operación de desengrasado y antes de la activación.
- b) Desengrase. Utilizando las pinzas, desengrasar en acetona o alcohol, secar con corriente de aire. Importante: manipular las piezas con guantes con el fin de no ensuciarlas.
- c) Activación. Utilizando pinzas, sumergir las probetas en la disolución de activación durante 1 min. Aclararlas primero en agua, luego en alcohol y secar con corriente de aire caliente. La operación de activación es necesaria para eliminar capas finas pasivas que se pueden formar durante las operaciones de preparación superficial. La activación también asegura una buena adhesión del recubrimiento al sustrato.

Paso 3. Masa y área del cátodo y cálculo de intensidad de corriente. Utilizar la balanza de precisión. Con un calibre, medir el área de la parte de la muestra que va a ser sumergida. Calcular la intensidad de corriente,  $I_{\text{aplicada}}$  (A), necesaria para alcanzar una densidad de corriente especificada en la Tabla 37.

$$A \text{ (cm}^2\text{)} =$$

$$I_{\text{aplicada}} \text{ (A)} = i A =$$

Paso 4. Cobreado. Cada grupo realizará ensayos de electrodeposición con distintas condiciones (Tabla 37). El volumen necesario es de aproximadamente 150 mL.

Tabla 37. Condiciones y tiempos de cobreado

Condiciones	150 mL de la siguiente disolución: 80 g/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ / 350 g/L $\text{K}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ pH=8,5-9,0 $V_{\text{máx}} = \sim 30 \text{ V}$ Con agitación			
	Grupo	$i$ (mA/cm <sup>2</sup> )	T (°C)	t (min)
	1	10	50	8
	2	15	50	8
	3	20	50	8
	4	25	50	8
	5	30	50	8
	6	35	50	8

\* Posición 2 en la placa calefactora para mantener constante la temperatura.

Fuente: elaboración propia.

A diferencia del niquelado, la fuente de alimentación tiene que estar encendida antes de sumergir las probetas. Por este motivo es necesario realizar una prueba inicial con un cátodo *dummy* o de prueba y error para ajustar la corriente. Se debe seguir la siguiente secuencia:

- Colocar los ánodos de Cu y la muestra o cátodo (acero) *dummy* en el soporte.
- Con el soporte fuera de la celda, conectar los cocodrilos de salida de la fuente de alimentación (cátodo: acero, ánodos: cobre).
- Con la fuente apagada girar los reguladores de corriente *Coarse* y *Fine* a la mitad de su recorrido y los de voltaje al máximo.
- ¡Cuidado! Llevando guantes sujetar el ensamblaje de electrodos fuera de la celda, solo tocando el útil de plástico, y encender la fuente de alimentación (*Power*). Sumergir las muestras en el electrolito y ajustar la intensidad de la corriente (primero con regulador *Coarse* y posteriormente con *Fine*).
- Apagar la fuente (*Power*).
- Una vez hecho el ajuste con el cátodo *dummy*, proceder a recubrir las muestras ajustando la corriente con el regulador *Fine* si fuera necesario. Una vez alcanzando el tiempo de cobreado, anotar el valor de voltaje y apagar la fuente (*Power*).

- Sacar el soporte y extraer la muestra. Lavarla con agua y alcohol. Secar con aire caliente. Importante: manipular las piezas con guantes y pinzas con el fin de no ensuciarlas.

Paso 5. Masa del cátodo después del cobreado. Utilizar la balanza de precisión. Calcular la masa del recubrimiento depositado.

Paso 6. Medidas de porosidad. Mojar bien un trozo de papel de filtro con la disolución de NaCl y  $K_3Fe(CN)_6$ . Aplicar el papel sobre una cara de la probeta cobreada, apretar bien para eliminar burbujas de aire entre el papel y la probeta (puede utilizarse varilla de vidrio), dejar actuar durante 5 min. Contar el número de puntos azules que aparecen correspondientes a lugares con poros. No contabilizar poros en bordes de muestra.

Paso 7. Medidas de adherencia. En la cara opuesta a las medidas de porosidad realizar las medidas según lo indicado en el Anexo.

Paso 8. Tabla de resultados. Completar la Tabla 38. Para el cálculo del rendimiento de corriente utilizar la Ley de Faraday. Datos:  $M_{Cu} = 63,55 \text{ g/mol}$ ,  $F = 96500 \text{ C/mol}$ ,  $\rho_{Cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabla 38. Resultados del cobreado para un tiempo de 8 min**

G	I (A)	A (cm <sup>2</sup> )	V <sub>final</sub> (V)	50 °C								
				t(min)	m <sub>inicial</sub> (g)	m <sub>final</sub> (g)	M <sub>Cu-real</sub> (g)	M <sub>Cu-teórico</sub> (g)	%η	Poros/cm <sup>2</sup>	Adh.	
1				8								
2				8								
3				8								
4				8								
5				8								
6				8								

Fuente: elaboración propia.

## Informe

El informe correspondiente a la parte 22.2 (Cobreado) deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

### **Resultados y discusión**

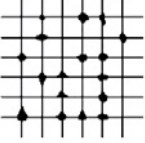
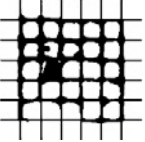
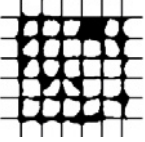
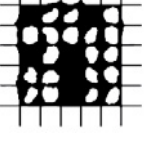
- Resultados obtenidos por los distintos grupos incluyendo las fotografías, reacciones y datos del proceso (voltaje, densidad de corriente, rendimiento, etc.) (30%).
- Fotografías y resultados/discusión relativos al ensayo de porosidad (15%).
- Fotografías y resultados/discusión relativos al ensayo de adherencia (15%).

### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**

### **Anexo. Medida de la adherencia (UNE-EN ISO 2409 2021)**

Utilizando una cuchilla y una plantilla, marcar una rejilla de 6x6 rayas de 20 mm de longitud y una separación de 1 mm. Cortar 75 mm de la cinta adhesiva, aplicarla sobre la probeta posicionando la rejilla en la mitad de la cinta. Asegurar un buen contacto eliminando el aire entre la cinta y la probeta. Retirar la cinta con un movimiento rápido en un ángulo de  $\sim 180^\circ$ . Examinar y clasificarlo según la Tabla 39.

**Tabla 39. Clasificación de la adherencia según norma UNE-EN 2409**

Categoría	Área afectada	Aspecto
0	0%	-
1	<5%	
2	5-15%	
3	15-35%	
4	35-65%	
5	>65%	-

Fuente: elaboración propia.



# Práctica 23. Anodizado y coloreado

## Introducción

### Fundamentos del anodizado

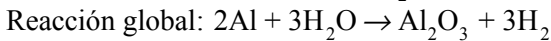
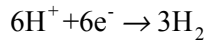
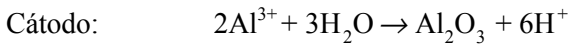
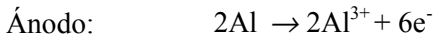
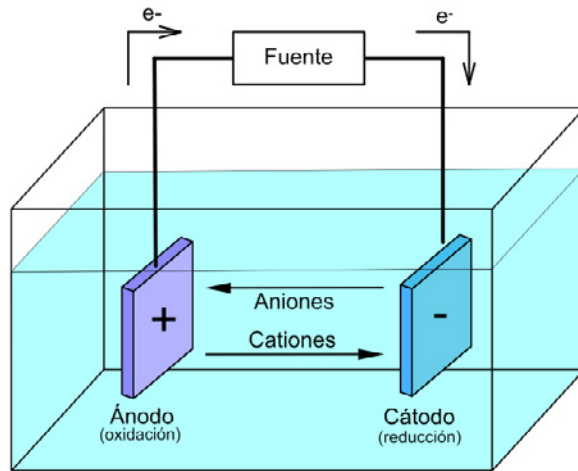
El anodizado es un proceso de conversión electroquímica empleado para aumentar el espesor de la capa de óxido natural presente en aleaciones de Al, Ti, Mg y otros metales. Con este tipo de tratamiento superficial, principalmente utilizado para el aluminio y sus aleaciones, se consiguen una serie de características muy interesantes a nivel industrial (resistencia a corrosión, buena apariencia, base para pinturas, resistencia a la abrasión, uniones adhesivas, condensadores electrolíticos, nanotecnología, aislamiento eléctrico, térmico, etc.).

Previo al anodizado, se requiere de una preparación superficial minuciosa con la finalidad de eliminar restos de grasas y aceites (procedentes de operaciones de corte y pulido) y conferir a la superficie un aspecto decorativo particular (satinado o brillante). Asimismo, suele ser común realizar etapas posteriores de coloreado y sellado con objeto de conseguir el acabado estético y resistencia a la corrosión deseados (Figura 110).



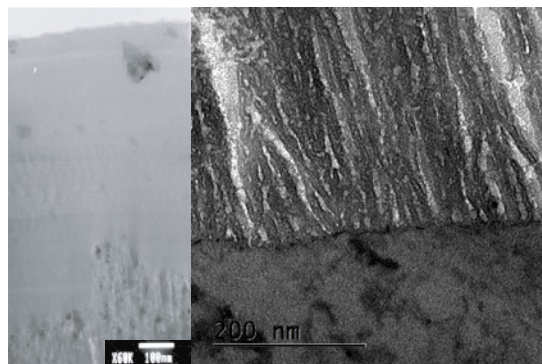
**Figura 110. Etapas en línea de anodizado. Fuente: elaboración propia.**

En la Figura 111 se esquematiza el dispositivo empleado en el anodizado. El sistema consiste en dos electrodos conectados a una fuente de corriente continua y una celda que contiene el electrolito, que suele ser ácido. La muestra de aluminio constituye el ánodo, donde se produce la reacción de oxidación, y para el cátodo se emplea un metal inerte o también aluminio, para cerrar el circuito. Con la muestra en el seno de la disolución, se produce el recubrimiento gracias a que el metal reacciona con los iones del electrolito según el siguiente esquema de reacciones:



**Figura 111. Esquema general del anodizado y reacciones.**  
Fuente: elaboración propia.

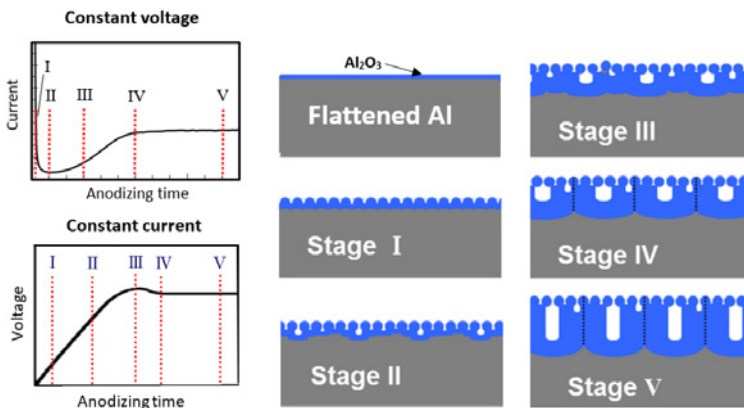
De manera general, el óxido puede crecer de dos maneras diferentes, en forma de capa barrera y en forma de capa porosa (Figura 112). El medio electrolítico empleado es el que controla principalmente la morfología de las películas anódicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Figura 112. Ejemplos de morfologías de capas de anodizado.**  
Fuente: elaboración propia.

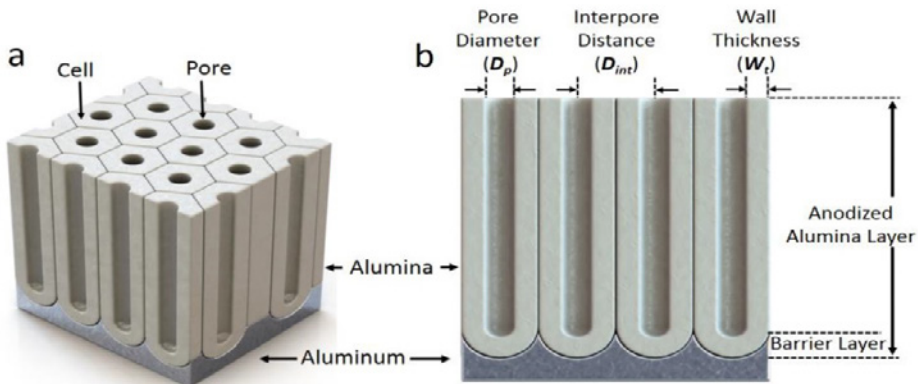
- a) *Películas barrera*: se forman con electrolitos de carácter neutro o próximo a neutro, que no tienen acción disolvente sobre la capa de óxido que se forma. Ej. citratos, boratos, tartratos, molíbdatos, etc.
- b) *Películas porosas*: se forman en medios ácidos principalmente, como sulfúrico, crómico, oxálico y fosfórico, en los que la alúmina es ligeramente soluble. Los iones  $Al^{3+}$  pueden ser expulsados directamente al medio electrolítico sin la formación del óxido en la intercara recubrimiento/electrolito. Este proceso además de disminuir la eficiencia energética, crea la morfología porosa característica de estas capas, que pueden alcanzar espesores de varios micrómetros (5-25  $\mu m$ ). Presentan buena resistencia a la abrasión y a la corrosión. Debido a su naturaleza porosa pueden actuar como base para pinturas y adhesivos, siendo uno de los acabados más comunes en aplicaciones arquitectónicas y en la industria aeroespacial.

Las películas porosas anódicas están constituidas por una delgada capa tipo barrera (espesor de 1.2 nm/V) unida al metal base y una capa exterior porosa (diámetro de poro en el rango entre 10 y 500 nm). La formación de esta morfología está asociada a un mecanismo combinado de oxidación y disolución localizada en la base del poro. En la Figura 113 se muestran las distintas etapas de formación de las capas porosas y la variación del voltaje y la corriente cuando se anodiza a corriente y a voltaje constante, respectivamente.



**Figura 113.** Esquemas con las distintas etapas de anodizado en condiciones de voltaje constante y corriente constante. I: crecimiento de una capa delgada y compacta. II: engrosamiento de la capa y formación de numerosos puntos de ataque. III: formación de poros. IV y V: desarrollo de los poros (Ono 2021).

La estructura porosa se suele definir como una red de celdas hexagonales con microporos, cuyas dimensiones dependen de las condiciones de anodizado, particularmente del voltaje y electrolito empleado (Figura 114).

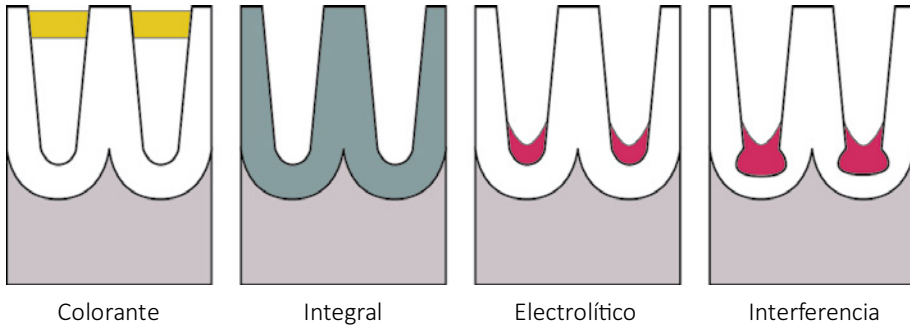


**Figura 114. (a, b) Esquemas de la capa porosa obtenida en medio ácido (Jeong 2023).**

## Fundamentos del coloreado y sellado

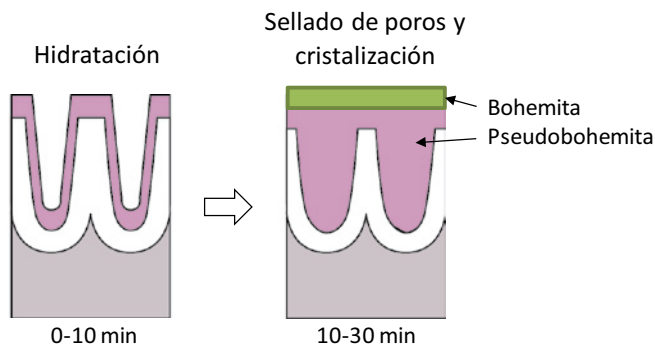
La capa anódica, además de aumentar la resistencia a la corrosión, posee otras propiedades beneficiosas de cara a su uso industrial. Así, por ejemplo, gracias a los poros que la conforman, permite incrementar la adhesión de colorantes y también facilita la aplicación de *primers* y pinturas. Otras ventajas incluyen una mejora en el aislamiento eléctrico y un aumento de la resistencia a la abrasión de la superficie, especialmente en aquellos casos en los que se recurre al *anodizado duro*.

Existen múltiples opciones para conseguir el coloreado de superficies anodizadas (Figura 115). El coloreado por impregnación con colorantes o *dyeing* permite el uso de colorantes de tipo inorgánico u orgánico, siendo los primeros más resistentes en aplicaciones en exteriores, aunque ofrecen menor rango de colores. El coloreado integral o autocolorante se basa en el empleo de ácidos orgánicos u otras estrategias que permiten dan un color característico a la capa de óxido. Por último, se encuentran las estrategias de coloreado más comunes en la actualidad; el coloreado electrolítico y por interferencia. En ambos casos se busca depositar el colorante en la base del poro mediante aplicación de corriente alterna.



**Figura 115. Opciones de coloreado de capas de anodizado en Al.**  
Fuente: elaboración propia.

La operación de sellado suele ser la última etapa en las líneas de anodizado. Con ella se busca mejorar la resistencia a la corrosión y garantizar un acabado estético duradero. El sellado en agua hirviendo o vapor de agua ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $2\text{-}3\text{ min}/\mu\text{m}$ ) ha sido durante muchos años la opción más común debido a su sencillez. Este sellado hidrotermal busca transformar la alúmina en bohemita ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) o pseudoboemita ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $1 < n < 1.5$ ), para la cual se requieren temperaturas superiores a  $96\text{ }^{\circ}\text{C}$  con objeto de evitar la formación de bayerita ( $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ ) (Figura 116). La bohemita es un oxihidróxido de aluminio cuya formación lleva asociada un aumento de volumen o expansión y, por tanto, el sellado de los poros.



**Figura 116. Representación esquemática del efecto del sellado.**  
Fuente: elaboración propia.

Alternativamente al sellado con agua, se han desarrollado otros procedimientos que requieren temperaturas bajas (*cold-sealing*,  $20\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) o medias

(*mid-temperature sealing*, 70-90 °C), lo que repercute en un ahorro económico. Estos procedimientos se basan en el empleo de sales de Ni o Co y su mecanismo de acción parece estar relacionado con la formación de precipitados de estos metales. Conviene mencionar también que existen sellados basados en dicromato para aplicaciones en aeronáutica, aunque las restricciones medioambientales como la europea REACH están regulando cada vez más su uso.

## Objetivos

Realizar el anodizado, sellado y coloreado de una aleación de aluminio comercial.

Estudiar el efecto del espesor de la capa anódica porosa y del sellado de la misma en su resistencia a la corrosión utilizando el método de ácido fosfórico.

## Parte experimental

**Tabla 40. Material para el desarrollo de la Práctica 23**

Probetas de Al 1050 Desengrase NaOH - 20% en masa Alcohol Anodizado H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 24,5 % en masa (164 mL para 1 L) Sellado H <sub>2</sub> O destilada a ebullición 15-30 min Coloreado Azul (Etapa 1) 15 g/L K <sub>4</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> × 3H <sub>2</sub> O (Etapa 2) 15 g/L FeCl <sub>3</sub> × 6H <sub>2</sub> O Negro 10 g/L Supradye Deep Black MLW Preparar con agua destilada caliente. pH 4.2-4.8 corregir con amoníaco Medidas de resistencia a la corrosión 15 min, 38 °C, 35 mL H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> en 1L agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuente de alimentación DC</li> <li>- ×2 Cables con pinzas de cocodrilo</li> <li>- Muestras de Al A1050 con agujero 3×2 cm</li> <li>- Soporte PVC con cátodos de Al</li> <li>- Imán agitador</li> <li>- Placa calefactora con agitación</li> <li>- Termómetro</li> <li>- Vasos de precipitado de cristal ×3 250 mL</li> <li>- Probeta de 50 mL</li> <li>- ×2 Botes de plástico 100 mL</li> <li>- Pipeta Pasteur</li> <li>- Espátula</li> <li>- Calibre</li> <li>- Placa de Petri o papel para pesar</li> <li>- Pinzas</li> <li>- Hilo Nylon</li> <li>- Gafas de seguridad</li> </ul>
---	--

Fuente: elaboración propia.

**Paso 1. Preparación de disoluciones.** Preparar, si fuera necesario, las disoluciones de ácido sulfúrico, hidróxido sódico, coloreado y ensayo de corrosión.

**Paso 2. Desengrase.** Utilizando pinzas, sumergir las probetas de aleación A1050 en la disolución de 20% NaOH durante 4-5 min (en campana extractora).

Enjuagarlas con agua, lavarlas con alcohol y secar con corriente de aire caliente. Si fuera necesario puede realizarse un desbaste previo hasta P600.

Nota: la operación de ataque se realiza para eliminar la capa fina pasiva y/o los productos de corrosión. El ataque alcalino de las aleaciones de aluminio, sobre todo las que contienen silicio, habitualmente resulta en formación de una película superficial oscura de elementos aleantes. Es importante eliminar esa película mediante una operación de *aclarado* con una disolución de 40% HNO<sub>3</sub> durante 15-30 s. El aluminio puro, ej. A1050 no requiere aclarado tras ataque.

Importante: manipular las piezas con guantes y pinzas con el fin de no ensuciarlas.

Paso 3. Utilizando el calibre, determinar el área de la muestra a anodizar (debe estar próximo a ~14 cm<sup>2</sup>). Calcular la intensidad de corriente, I<sub>aplicada</sub> (A), necesaria para alcanzar una densidad de corriente de i = 20 mA/cm<sup>2</sup> (debe estar próxima a 0,28 A).

$$A \text{ (cm}^2\text{)} = \\ I_{\text{aplicada}} \text{ (A)} = i A =$$

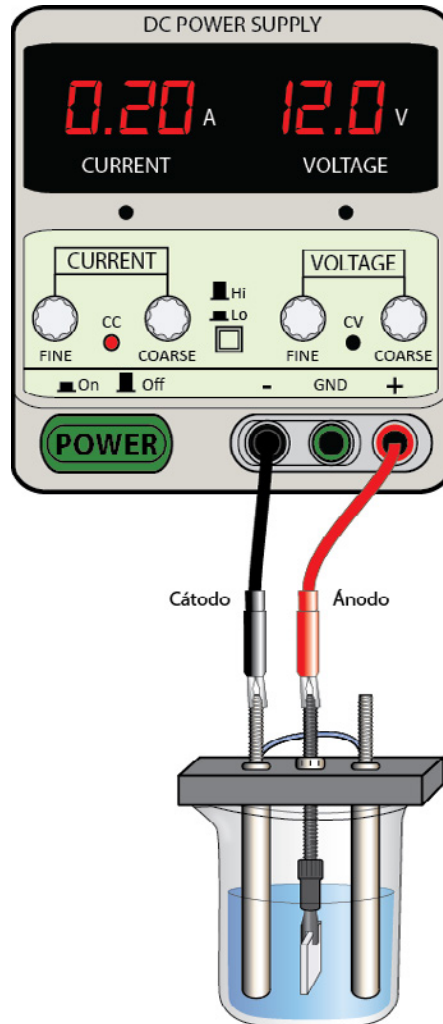
Paso 4. *Anodizado*. Cada grupo anodizará un mínimo de 3 muestras según las condiciones indicadas en la Tabla 41.

**Tabla 41. Condiciones y tiempos de anodizado**

150 mL H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (25,4% en masa) sin agitación V <sub>máx</sub> = ~30 V i = 20 mA/cm <sup>2</sup> T <sub>amb</sub>						
	Muestra 1 Anodizado	Muestra 2 Anodizado + Sellado		Muestra 3 Anodizado + Coloreado		
G	t (s)	Anodizado t (s)	Sellado t (min)	Anodizado t (s)	Coloreado t (min)	Colorante y temperatura
1	120	600	15	800	5+1	Azul T <sub>amb</sub>
2	240	480	15	800	5+1	Azul T <sub>amb</sub>
3	360	360	15	800	5+1	Azul T <sub>amb</sub>
4	480	240	15	800	5+1	Azul T <sub>amb</sub>
5	600	120	15	800	5+1	Azul T <sub>amb</sub>
6	600	120	15	800	15*	Negro 55-65 °C

\* Con el colorante negro debe utilizarse agitación.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 117. Esquema del montaje de anodizado. Es importante colocar las probetas siempre con la misma configuración para asegurar que el área anodizada es la misma en todas ellas. Fuente: elaboración propia.**

Colocar los cátodos de Al en el soporte de PVC y la muestra o ánodo (A1050) en el soporte de Ti Grado 2 según se muestra en la Figura 117 y seguir la siguiente secuencia con ayuda del personal docente:

- Con la fuente apagada girar los reguladores *Coarse* y *Fine* de corriente al mínimo y los de voltaje al máximo.

- Encender la fuente (*Power*) y subir la intensidad de corriente hasta el valor  $I_{\text{aplicada}}$  calculado previamente (primero con regulador *Coarse* y posteriormente con *Fine*). Iniciar el cronómetro y observar los procesos que ocurren en cátodo y ánodo.
- Una vez alcanzando el tiempo de anodizado, anotar el valor de voltaje y apagar la fuente (*Power*).
- Levantar ligeramente el soporte y con ayuda de pinzas extraer la muestra. Lavarla con abundante agua y alcohol. Secar con aire caliente. Importante: manipular las piezas con guantes y pinzas con el fin de no ensuciarlas.
- Con el resto de muestras, encender la fuente directamente y ajustar la corriente con el regulador *Fine* si fuera necesario.

Paso 5. *Sellado*. Sumergir la probeta en agua desionizada a ebullición durante 15 min. Sacar y secar la muestra en aire caliente.

Paso 6. *Coloreado*. En esta práctica, el color azul (azul de Prusia) se consigue por precipitación de compuestos inorgánicos de baja solubilidad dentro de los poros de la capa. Para ello la muestra se sumerge en el reactivo n.º 1 (15 g/L  $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \times 3\text{H}_2\text{O}$ ) y luego en el reactivo n.º 2 (15 g/L  $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ) previo enjuague con agua (Tabla 40). El tinte de color varía dependiendo del tiempo de inmersión en cada uno de los reactivos y del espesor de la capa de anodizado. El otro colorante es un producto comercial que da lugar a tonos negros o negros-azulados por absorción de productos orgánicos. La tonalidad final depende del espesor de la capa de anodizado y de las condiciones de coloreado ( $t$  y  $T$ ). Es necesario un espesor mínimo de 14-16  $\mu\text{m}$  para que se consiga una saturación perfecta en negro. Opcional: sellar las muestras coloreadas como en el paso 5 si se quiere retrasar la pérdida de color de las muestras con el tiempo. Los alumnos que lo deseen pueden anodizar más muestras para colorearlas.

Paso 7. *Ensayo de corrosión*. Pesar las probetas tras «anodizado» y «anodizado+sellado» (Muestra 1 y Muestra 2) en balanza de precisión. Calentar la disolución de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a 38 °C en un vaso de precipitados de 100 mL. Sumergir las muestras durante 15 min. Lavar y pesar. Las muestras que presenten un cambio de masa inferior a 30 mg  $\text{dm}^{-2}$  habrán superado el ensayo.

## Informe

El informe final deberá incluir los siguientes apartados. Los porcentajes indican el peso en la calificación (la calidad del informe tiene un peso de 10%).

### **Introducción (10%), Objetivos (5%) y Parte experimental (5%)**

- Descripción breve de fundamentos teóricos, objetivos y metodología de la práctica.

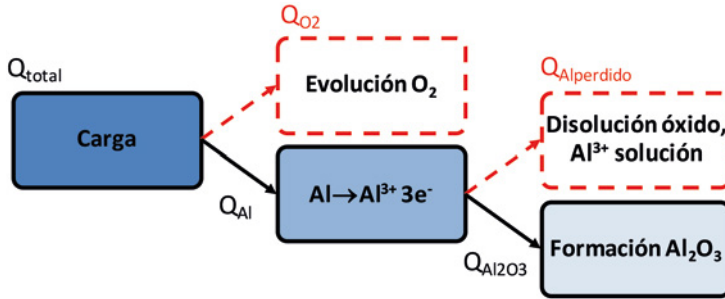
### **Resultados y discusión**

- Resultados obtenidos incluyendo las fotografías, reacciones y datos del proceso (voltaje, densidad de corriente, etc.) (5%).
- Fotografías y resultados/discusión relativos al coloreado (5%).
- Fotografías y resultados/discusión relativos al ensayo de corrosión (incluir resultados de todos los grupos) (10%).

### **Conclusiones/Bibliografía (10%)**

### **Cuestiones (1-15%, 2-15%, 3-10%).**

1. Estimar el espesor de la capa anódica utilizando la ley de Faraday para todos los tiempos utilizados en la práctica. Datos:  $\rho(\text{Al}_2\text{O}_3) = 3,14 \text{ g/cm}^3$ , eficiencia de la corriente anódica = 90%, porosidad = 30%,  $M(\text{Al}_2\text{O}_3) = 101,96 \text{ g/mol}$ ,  $i = 20 \text{ mA/cm}^2$ . Representar el espesor (mm) en función del tiempo de anodizado.
2. Cálculo de rendimientos de procesos anódicos: aproximadamente el 40% del espesor del recubrimiento se forma por migración de los cationes  $\text{Al}^{3+}$  hacia la intercara óxido/electrolito, y el 60% restante se forma en la intercara metal/óxido por la migración de los iones  $\text{O}^{2-}$  hacia esta intercara. Parte de la corriente se consume también en procesos colaterales: generación de  $\text{O}_2$  (reacción anódica) y expulsión de  $\text{Al}^{3+}$  al medio (pérdida del metal sin incorporarlo en la capa del óxido). Es importante saber el rendimiento de la corriente de estos procesos anódicos,  $\eta_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ,  $\eta_{\text{O}_2}$ ,  $\eta_{\text{Al perdido}}$ , para poder controlar la eficiencia del anodizado. El cálculo de estos parámetros se determina utilizando la Ley de Faraday junto con las medidas de masa de la probeta antes y después de anodizado, y la masa de la probeta tras la eliminación de la capa de óxido con un reactivo de decapado apropiado (Figura 118).



$$Q_{total} = Q_{O_2} + Q_{Al}$$

$$Q_{Al} = Q_{Al_2O_3} + Q_{Al\ perdido}$$

$$\% \eta_{Al_2O_3} = \frac{Q_{Al_2O_3}}{Q_{total}} \cdot 100 \qquad \% \eta_{O_2} = \frac{Q_{O_2}}{Q_{total}} \cdot 100$$

$$\% \eta_{Al\ perdido} = \frac{Q_{Al\ perdido}}{Q_{total}} \cdot 100$$

**Figura 118. Esquema del proceso para el cálculo del rendimiento del proceso de anodizado y distribución de la carga (Q = It) en los diversos procesos. Fuente: elaboración propia.**

Calcular  $\% \eta_{Al_2O_3}$ ,  $\% \eta_{Al\ perdido}$  y  $\% \eta_{O_2}$  para un proceso de anodizado realizado con una densidad de corriente constante de 20 mA/cm<sup>2</sup> durante 20 min. Datos:

$$m_{inicial} = 10,1342 \text{ g}$$

$$m_{anodizado} = 10,1480 \text{ g}$$

$$m_{sustrato\ decapado} = 10,1122 \text{ g}$$

$$A = 15 \text{ cm}^2, M(Al_2O_3) = 101,96 \text{ g/mol}, M_{Al} = 26,98 \text{ g/mol}, F = 96500 \text{ C/mol}$$

3. Calcular la fracción de porosidad para un proceso de anodizado con los siguientes datos: espesor = 20 μm, Área = 40 cm<sup>2</sup>,  $m_{inicial} = 13,5200 \text{ g}$ ,  $m_{anodizado} = 13,8022 \text{ g}$ ,  $m_{sustrato\ decapado} = 13,6125 \text{ g}$ ,  $\rho(Al_2O_3) = 3,14 \text{ g/cm}^3$ ,  $M(Al_2O_3) = 101,96 \text{ g/mol}$ ,  $M_{Al} = 26,98 \text{ g/mol}$ ,  $F = 96500 \text{ C/mol}$ .