# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

## Departamento de Materiales y Manufactura

# Manual de Prácticas

## LABORATORIO DE METALURGIA FÍSICA

## Ingeniería Mecánica


COLABORADORES EN LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS:

ING. ADOLFO ALTAMIRANO MEZA

ING. FRANCISCO SÁNCHEZ PÉREZ

ING. MARTÍN REYES FARÍAS

ING. ROBERTO CISNEROS HERNÁNDEZ

M. en A. VÍCTOR M. VÁZQUEZ HUAROTA

COORDINADORES:

DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

ING. ARMANDO SÁNCHEZ GUZMÁN



MAYO 2013

## PARTICIPANTES DE LA EDICIÓN

COORDINADORES:

DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

ING. ARMANDO SÁNCHEZ GUZMÁN

ELABORACIÓN:

ING. ADOLFO ALTAMIRANO MEZA

ING. FRANCISCO SÁNCHEZ PÉREZ

ING. MARTÍN REYES FARÍAS

ING. ROBERTO CISNEROS HERNÁNDEZ

M. en A. VÍCTOR M. VÁZQUEZ HUAROTA

REVISIÓN:

ING. HELENA GALVÁN SUÁREZ

LIC. VANIA PÉREZ MORALES

DR. ARTURO BARBA PINGARRÓN

DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

COORDINADOR DE LABORATORIO

ING. ALEJANDRA GARZA VÁZQUEZ

# Índice

**Prólogo** ..... **4**

**Metalografía de los Aceros** ..... **6**

M. en A. Víctor M. Vázquez Huarota

**Difusión de Sólidos** ..... **16**

Ing. Roberto Cisneros Hernández

**Diagramas de Equilibrio** ..... **26**

Ing. Francisco Sánchez Pérez

**Tratamientos Térmicos** ..... **34**

Ing. Martín Reyes Farías

**Templabilidad** ..... **41**

Ing. Roberto Cisneros Hernández

**Endurecimiento por Deformación en Frío** ..... **52**

M. en A. Víctor M. Vázquez Huarota

**Ensayo no Destructivo** ..... **58**

Ing. Adolfo Altamirano Meza

# Prólogo

Los Materiales han acompañado, desde su inicio, el desarrollo de los seres humanos (piénsese en nombres de etapas de la humanidad, tales como Edad de Piedra, Edad del Bronce o Edad del Hierro) y siguen presentes, sin duda, en nuestro diario andar. Dormimos en ellos, comemos usándolos, nos transportamos con vehículos que utilizan materiales cada vez más resistentes y ligeros, practicamos deportes con implementos y calzado deportivo pleno de diseños y materiales novedosos, por mencionar solo una parte de nuestra actividad cotidiana. En estos tiempos, cada día resulta más difícil imaginar nuestras actividades habituales sin dispositivos como los celulares o las computadoras, que evolucionan rápidamente, requiriendo y aprovechando continuamente, desarrollos en materiales. Parece casi obvio, asimismo, imaginar un futuro con una presencia relevante de los nanomateriales y la nanotecnología.

No dejemos de lado, que el desarrollo de materiales ha tenido y tiene una relación muy cercana con aspectos sociales. Así por ejemplo, muchos nuevos materiales se han generado, desafortunadamente, al impulso de situaciones de guerra. En otro sentido, la fabricación y el procesamiento de materiales son actividades que provocan preocupación social en términos de las necesidades de ahorro y uso de energías renovables o en el ámbito de la protección ambiental, por mencionar dos aspectos de capital importancia en estos momentos.

El proceso de enseñanza-aprendizaje de Materiales, en este contexto, también ha evolucionado e incorpora nuevas herramientas y recursos para la docencia en la conciencia de que el ingeniero del Siglo XXI tiene ante sí el reto de poseer un conocimiento adecuado y actualizado de los principios que regulan y explican los fenómenos y reacciones en que participan materiales, las formas de evaluar y medir sus propiedades y las tecnologías disponibles para modificarlas y lograr mejorar así su respuesta y desempeño, al menor costo, de forma cada vez más amigable con el medio ambiente y con la búsqueda constante de incrementar su vida útil en la medida posible.

Este Cuaderno reúne una serie de experimentos a través de los cuales se podrán conocer y comprender fenómenos, así como familiarizarse con varias de las más destacadas y significativas pruebas y ensayos por medio de los cuales se pueden evaluar y caracterizar materiales y representan un punto de partida para que los estudiantes puedan profundizar en los conceptos y en la interpretación de los resultados que arrojen dichos ensayos y pruebas. Será de la mayor importancia que los estudiantes y profesores, a partir de sus experiencias con el uso de este grupo de Prácticas puedan sugerir cambios y realizar

propuestas orientadas a enriquecer este Cuaderno y conseguir con ello mejores resultados en el aprendizaje de los estudiantes y profesores, de modo que serán bienvenidas las aportaciones de la comunidad de nuestra Facultad en ese sentido.

Con estas ideas y propósitos en mente, se ha elaborado este Cuaderno de Prácticas de Laboratorio de Metalurgia Física, que es el producto del trabajo conjunto y el esfuerzo de un grupo de profesores del Departamento de Materiales y Manufactura que han puesto su empeño para que, a través de esta serie de prácticas, los estudiantes puedan complementar los aspectos y puntos tratados en la clase teórica, por medio de la experimentación realizada, pero no sólo ello, sino también a través de su participación, de la búsqueda de explicaciones por medio del cuestionamiento y de la aplicación de su creatividad, de modo que, al final de cada una de ellas, los estudiantes puedan adquirir, de un modo atractivo y dinámico, conocimientos significativos que les den elementos para una futura práctica profesional en la que puedan contribuir, de modo relevante, al desarrollo de la ingeniería y al de un país con mayor independencia científica y tecnológica y, finalmente, más justo.

Dr. ARTURO BARBA PINGARRON

# Práctica 1: Metalografía de los aceros

## Duración 4 hrs. (dos clases)

### OBJETIVO

El alumno comprenderá y aplicará el método de preparación de las muestras metalográficas, realizará la observación microestructural y la relacionará con sus propiedades mecánicas.

### INTRODUCCIÓN

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o aleación para relacionarlas con las propiedades físicas y mecánicas de los mismos, como lo es el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación, y de las inclusiones no metálicas como sopladuras, micro cavidades de contracción, escorias, así como la presencia de segregaciones y otras heterogeneidades que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del material y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

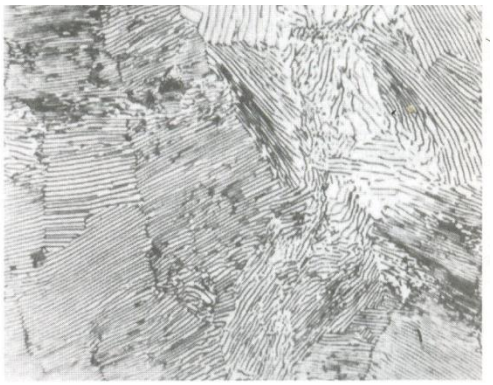
La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en gran parte del cuidado que se tenga para preparar la muestra y el objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejante a un espejo y así poder obtener un diagnóstico y/o un pronóstico.

El examen metalográfico puede realizarse antes de que la pieza sea destinada a un fin, a los efectos de prevenir inconvenientes durante su funcionamiento, o bien

puede ser practicado sobre piezas que han fallado en su servicio, es decir, piezas que se han deformado, roto o gastado. En este caso la finalidad del examen es la determinación de la causa que produjo la anormalidad.

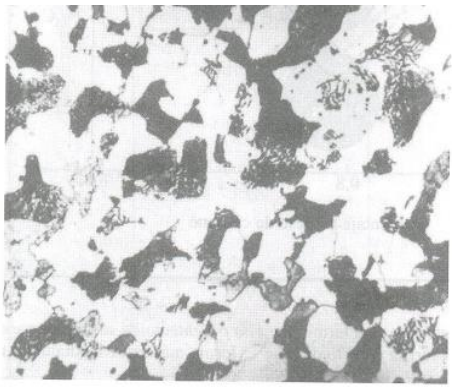
En las siguientes imágenes se pueden observar algunas de las muestras que es posible obtener con esta técnica y la información que proporciona:

*Muestra 1*



*Microestructura de un acero eutectoide enfriado lentamente. La microestructura consta de perlita eutectoide laminar. La fase oscura, atacada con ácido, es cementita y la fase blanca ferrita. (Ataque: picral; ampliación ×650).* (United States Steel Corp., tal como aparece en «Metals Hand book», vol. 8, 8.ª ed., American Society for Metals, 1973, pág. 188.)

*Muestra 2*



*Microestructura de un acero ordinario al carbono hipoeutectoide de 0,35% C enfriado lentamente a partir de la región austenítica. El constituyente blanco es ferrita proeutectoide; el constituyente oscuro es perlita. (Ataque: nital 2%; amplificación ×500.)* (Según W. F. Smith, «Structure and Properties of Engineering Alloys», McGraw-Hill, 1981, pág. 11.)

*Muestra 3*

*Microestructura de un acero hipereutectoide de 1,2 % C enfriado lentamente a partir de la región austenítica. En esta estructura, la cementita proeutectoide aparece como el constituyente blanco, que se ha formado en los bordes de los granos austeníticos previos. La estructura remanente consta de perlita gruesa laminar. (Ataque: picral, amplificación × 1.000.)* (Cortesía de United States Steel Corp., Research Laboratory.)

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

- ✓ Cortadora.
- ✓ Esmeril.
- ✓ Desbastadora.
- ✓ Pulidora.
- ✓ Microscopios metalográficos.
- ✓ Lijas de carburo de silicio con tamaño de grano 180, 220, 360, 400, 500 y 600.
- ✓ Probetas de diferentes aceros para identificar.
- ✓ Reactivos de ataque.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para realizar un examen metalográfico, es necesario aplicar el siguiente método:

1. Selección de la muestra

   La selección de una muestra para estudio microscópico puede ser para investigar una falla o un material desconocido. Si es por falla, se debe

escoger la muestra lo más próxima al área afectada, de otra forma, si es para caracterizar un material, se toma una sección normal o aleatoria de la muestra.

2. Corte

   El corte se realizará cuando la pieza presente dimensiones muy grandes o formas complicadas que dificultan la preparación de los pasos subsecuentes. También se debe cuidar que al realizar el corte no incremente la temperatura, ya que ésta puede modificar su microestructura; el corte se puede realizar de forma mecánica (Figura 1) o manual.

*Figura 1. Cortadora*

3. Montaje

   Cuando las muestras son pequeñas o de forma irregular deben montarse en resinas para facilitar el pulido intermedio y final. Ejemplo: alambres, varillas pequeñas, muestras de hojas metálicas, secciones delgadas, etc. El montaje se puede realizar en caliente: se coloca la muestra y la resina seleccionada (baquelita) en el cilindro de moldeo, se aplica temperatura aumentando gradualmente, hasta 150°C y se ejerce una presión de moldeo de 4000 psi. Una vez que la baquelita está adherida y curada a la muestra, se retira del cilindro de moldeo (Para más detalle consultar con su profesor de laboratorio).

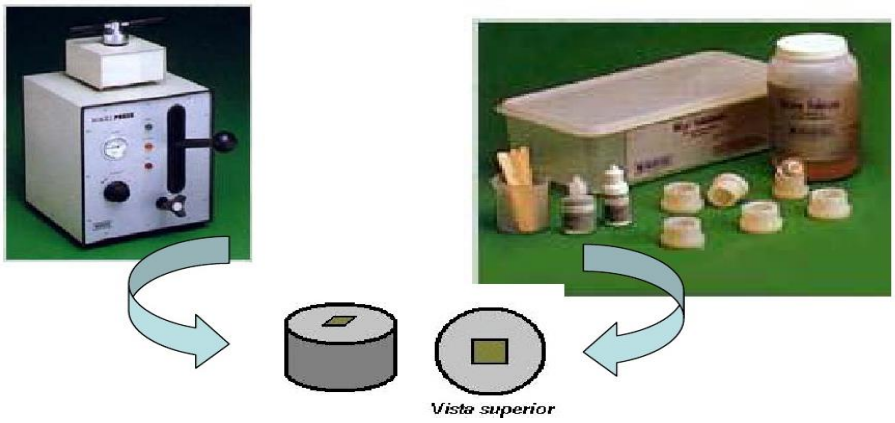



*Figura 2. Montaje de muestra*

4. Desbaste

   El desbaste se lleva a cabo con la finalidad de preparar la superficie, obteniendo un rayado uniforme. Para realizar esta actividad se debe hacer uso de un esmeril y continuar con lijas de grano grueso.

*Figura 3. Ejemplo de desbaste*

5. Pulido

   El pulido se divide en pulido intermedio (Figura 2) y pulido fino. El primero consiste en obtener de forma gradual, un rayado de acabado fino, la actividad se lleva a cabo con lijas de carburo de silicio, con las cuales el

procedimiento de pulido debe ser realizado en forma perpendicular al pulido o desbaste anterior. Las lijas se emplean en forma consecutiva desde el número 80, 180, 250, 300, 400, 500, 600.

*Figura 4. Lijadora*

Por otra parte el pulido fino (Figura 3) se realiza con alúmina hasta alcanzar el acabado espejo, esta operación se divide en dos etapas:

a. Alúmina de color gris (20 micras de diámetro).
b. Alúmina de color blanco (0.5 micras de diámetro).

*Figura 5. Pulido fino*

6. Ataque

   El ataque es de tipo químico y consiste en cubrir la zona preparada (acabado espejo), con una solución química que debe ser acorde al tipo de metal por observar. El ataque muestra las características estructurales del metal, como se muestra en los ejemplos de la introducción.

Aplicando la metodología indicada en las líneas anteriores, realiza la siguiente secuencia de acuerdo a como corresponda para realizar la preparación metalográfica en esta práctica:

1. Proporcionar muestras de trabajo seleccionadas a los alumnos, con la finalidad de analizar varios materiales.
2. Cortar la muestra (el tamaño deberá ser representativo).
3. Si el material se cortó con cinta sierra, esmerilar para disminuir el rayado.
4. Realizar el pulido intermedio con lijas, empezar con un tamaño de grano de 180 y llegar al 600. Con cada cambio de lija, girar la pieza 90° para generar el nuevo acabado.
5. Realizar el pulido fino con alúmina fina (alúmina gris de 20 micras de diámetro y alúmina blanca de 0.5 micras de diámetro), hasta obtener un acabo espejo en la cara de la pieza de trabajo.
6. Hacer el análisis metalográfico. En la primera fase, observar la pieza para determinar si presenta inclusiones, de qué tipo son y qué acabado tiene la pieza (Figura 6.a).
7. Realizar el ataque químico de acuerdo al material. Para los aceros se aplica NITAL (Acido nítrico 2% y alcohol metílico 98%).
8. Observar en el microscopio las fases presentes en la microestructura y tamaño de grano por pulgada cuadrada (Figura 6.b).
9. Plasmar los resultados.

*a)* *b)*

*Figura 6. Microscopio metalográfico a) no invertido y b) invertido.*

## RESULTADOS

Primera etapa del análisis: Muestra pulida sin ataque.

| Muestra | ¿Presenta inclusiones? | ¿De qué tipo son las inclusiones? | ¿Qué acabado tiene la pieza? |
|---|---|---|---|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |

Segunda etapa del análisis: Muestra con ataque químico.

| Muestra | Tipo de ataque químico | Número de aumentos | Tamaño de grano | Fases presentes |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. Con base en tus resultados realiza un análisis comparativo e identifica el tipo de acero que corresponde a las metalografías realizadas.
2. Justifica ampliamente tus aseveraciones.

Nota: Auxiliarse de metalografías disponibles y diferentes fuentes.

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

Elaborar las conclusiones y comentarios de acuerdo con el estudio que se realizó.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. ¿Qué se entiende por metalografía? ¿Cuál es su campo de aplicación?
2. Mediante la observación microscópica, ¿Qué es lo que se puede determinar de una muestra metálica? (por ejemplo, un acero).
3. Describir brevemente las etapas necesarias para preparar una muestra metalográfica.
4. ¿Qué es el Nital en la metalografía?, ¿para qué se utiliza?
5. Mencionar algunas diferencias existentes entre un microscopio metalúrgico y uno de tipo biológico.
6. Indicar los principales cuidados en la operación de un microscopio óptico.
7. Mencionar, al menos, dos métodos para determinar el tamaño de grano de una muestra.
8. Indicar cuáles son los reactivos empleados para el ataque químico de aceros al carbono, aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Metals, *Metals Handbook, Vol. 10, Materials Characterization*, 9ht ed., American Society for metals, EUA, 1986.
- Askeland, Donald R., *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Editorial Iberoamericana, México, 1987.
- Van Vlack, Lawrence H., *Materiales para Ingenieros*, Editorial CECSA, México, 1980.
- CAD CAE - INGENIERIA LTDA. *Análisis Metalográfico*, en ULR= http://www.cad-cae.com/analisis04.html., consultado el 16 de enero del 2012.

# Práctica 2: Difusión de Sólidos

**Duración 4 hrs.**

## OBJETIVO

El alumno identificará, a través de las experiencias propuestas, el fenómeno de difusión, algunos de sus efectos y aplicaciones en el procesamiento de los materiales metálicos.

## INTRODUCCIÓN

### Difusión de Sólidos

Existe un buen número de procesos industriales importantes, que están basados en este fenómeno. Por ejemplo:

1. Los tratamientos térmicos que se aplican comúnmente a metales y aleaciones en la industria, están basados en las transformaciones que suceden en el estado sólido, muchas de las cuales incluyen fenómenos de difusión.
2. Los tratamientos termoquímicos que se basan en la posibilidad de revestir aceros y otras aleaciones industriales con capas de alta resistencia al desgaste, a través de la penetración por la superficie del sólido, de átomos deseados, para lo cual se utilizan temperaturas apropiadas, en una atmósfera rica de los átomos deseados.
3. Durante la realización del proceso de sinterizado y en la soldadura.

## Mecanismos de difusión

Existen dos mecanismos principales de difusión en los átomos en una estructura cristalina: de vacantes o sustitucional e intersticial.

- **Mecanismo de difusión por vacantes o sustitucional.** Los átomos pueden moverse en las redes cristalinas desde una posición a otra si hay presente suficiente energía de activación, proporcionada ésta por la vibración térmica de los átomos, y si hay vacantes u otros defectos cristalinos en la estructura para que ellos los ocupen (Figura 1). Las vacantes en los metales son defectos en equilibrio, y por ello algunos están siempre presentes para facilitar que tenga lugar la difusión sustitucional de los átomos. Según va aumentando la temperatura del metal se producirán más vacantes y habrá más energía térmica disponible, por tanto, el grado de difusión es mayor a temperaturas más altas. La energía de activación para la difusión propia es igual a la suma de la energía de activación necesaria para formar la vacante y la energía de activación necesaria para moverla. A mayor temperatura mayor número de vacantes y de energía térmica, por lo tanto mayor difusión.

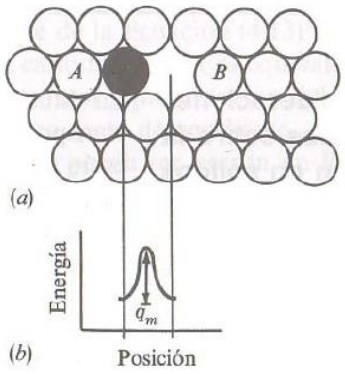



*Figura 1. Mecanismo de difusión por vacantes.*

- **Mecanismo de difusión intersticial.** La difusión intersticial de los átomos (Figura 2) en redes cristalinas tiene lugar cuando los átomos se trasladan de un intersticio a otro contiguo al primero, sin desplazar permanentemente a ninguno de los átomos de la matriz de la red cristalina. Para que el

mecanismo intersticial sea efectivo, el tamaño de los átomos que se difunde debe ser relativamente pequeño comparado con el de los átomos de la matriz. Los átomos pequeños como los de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno, pueden difundirse intersticialmente en algunas redes cristalinas metálicas. Por ejemplo, el carbono puede difundirse intersticialmente en hierro alfa BCC y hierro gamma FCC, en la difusión intersticial de carbono en hierro, los átomos de carbono deben pasar entre los átomos de la matriz de hierro.

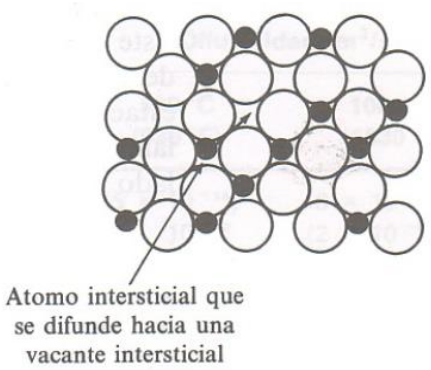



*Figura 2. Mecanismo de difusión intersticial.*

**Difusión en estado estacionario**

La difusión del soluto en la Figura 3 en la dirección del eje X entre dos planos de átomos perpendiculares al plano de la hoja, separados a una distancia X. Supongamos que tras un periodo de tiempo, la concentración de los átomos en el plano 1 es C1 y en el plano 2 es C2. Esto significa que no se produce cambios en la concentración de los átomos de soluto en esos planos, para el sistema con el tiempo; tales condiciones de difusión se conocen como condiciones en estado estacionario.

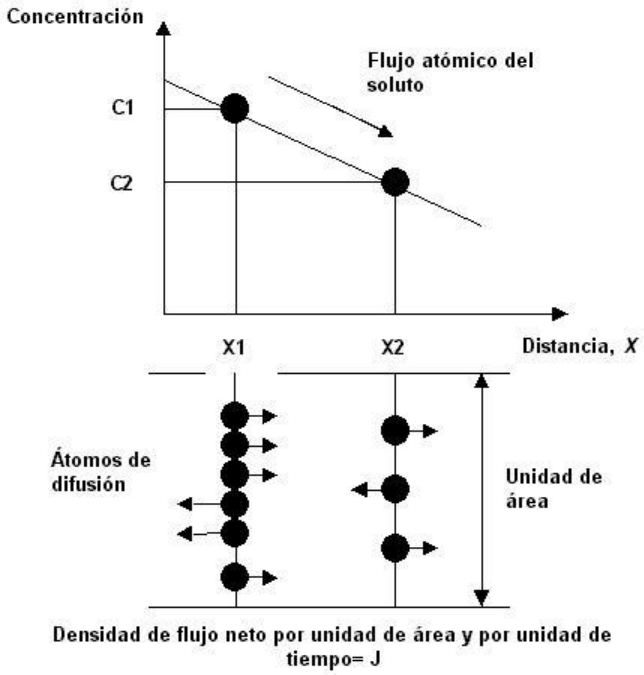



*Figura 3. Difusión en estado estacionario.*

Este tipo de difusión tiene lugar cuando un gas no reactivo difunde a través de una lámina metálica. Si en el sistema mostrado en la figura no existe interacción química entre los átomos de soluto y solvente, debido a que existe una diferencia de concentración entre los planos 1 y 2, se producirá un flujo neto de átomos de la parte de más alta concentración a la de más baja concentración. La densidad de flujo o corriente se representa mediante la expresión:

$$J = -D\frac{dC}{dX}$$

donde: J= Flujo neto de los átomos

D= Coeficiente de difusión

$$\frac{dC}{dX} = gradiente\ de\ concentración$$

Se emplea un signo negativo debido a que la difusión tiene lugar de una concentración mayor a una menor, es decir, existe un gradiente de difusión negativo. Esta ecuación es llamada primera Ley de Fick y afirma que para

condiciones de flujo en estado estacionario, la densidad de flujo neto de átomos es igual a la difusividad *D* por el gradiente de concentración *dC/dX.* Las unidades son las siguientes en el sistema internacional:

$$J\left(\frac{Atomos}{m^2 * s}\right) = D\left(\frac{m^2}{s}\right)\frac{dC}{dX}\left(\frac{Atomos}{m^3} * \frac{1}{m}\right)$$

***Ley de Fick***

Para que tenga lugar el fenómeno de la difusión, la distribución espacial de moléculas no debe ser homogénea, debe existir una diferencia, o gradiente de concentración entre dos puntos del medio.

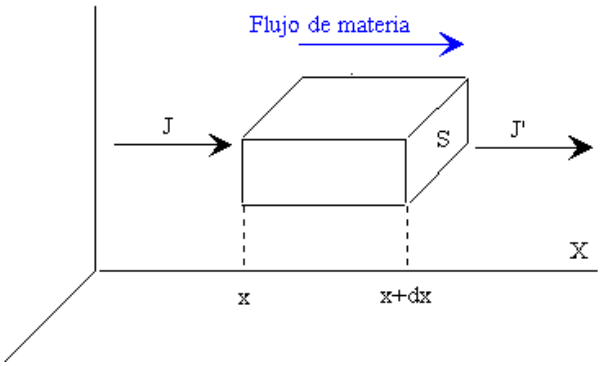



*Figura 5. Ley de Fick.*

Supongamos que su concentración varía con la posición a lo largo del eje X. Llamemos *J* a la densidad de corriente de partículas, es decir, al número efectivo de partículas que atraviesan en la unidad de tiempo un área unitaria perpendicular a la dirección en la que tiene lugar la difusión. La ley de Fick afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración

$$J = -D\frac{\partial n}{\partial x}$$

La constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de difusión *D* y es característico tanto del soluto como del medio en el que se disuelve.

La acumulación de partículas en la unidad de tiempo que se produce en el elemento de volumen $S \cdot dx$ es igual a la diferencia entre el flujo entrante $JS$, menos el flujo saliente $J'S$, es decir (Figura 5):

$$JS - J'S = \frac{\partial J}{\partial x} Sdx$$

La acumulación de partículas en la unidad de tiempo es:

$$(Sdx)\frac{\partial n}{\partial t}$$

Igualando ambas expresiones y utilizando la Ley de Fick se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left( D\frac{\partial n}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial t}$$

Ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el fenómeno de la difusión. Si el coeficiente de difusión $D$ no depende de la concentración.

$$\frac{1}{D}\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

**Efecto de la temperatura sobre la difusión en sólidos**. El coeficiente de la difusión es una función notable de la temperatura, por experimentación se ha encontrado que la dependencia de la temperatura de la velocidad de la difusión de muchos sistemas puede ser expresada por el siguiente tipo de ecuación de Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left( -\frac{Q}{RT} \right)$$

Donde, $D_o$ es una constante y Q es una constante llamada energía de activación de las especies en difusión en $\frac{J}{mol}$ ó $\frac{cal}{mol}$.

R, es la constante molar de los gases que equivale a 8.314 $\frac{J}{molK}$ ó $1.987\frac{cal}{molK}$.

La dependencia de la temperatura es muy fuerte; los metales de elevado punto de fusión tienen los mayores valores de D a temperatura ambiente, y los metales de bajo punto de fusión tienen los más bajos valores de D.

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

Material:

- ✓ Muestras de acero bajo carbono, 1020, 8620, etc.
- ✓ Lijas: 180, 220, 360, 400, 500 u 600.
- ✓ Carbón vegetal.
- ✓ Carbón mineral.
- ✓ Carbonato de bario.
- ✓ Carbonato de sodio.
- ✓ Carbonato de calcio.
- ✓ Cemento refractario.
- ✓ Tenazas.
- ✓ Guantes de asbesto.

Equipo:

- ✓ Horno y accesorios para maniobrar muestras.
- ✓ Caja de acero inoxidable con tapa.
- ✓ Cortadora.
- ✓ Montadora.
- ✓ Pulidoras.
- ✓ Microdurómetro (Vickers).
- ✓ Durómetro.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

**Carburización de aceros al carbono.**

1. Seleccionar una serie de muestras de algún acero para cementación en forma de barra.
2. Cementarlas en una caja de hierro que contenga:
    - Carbón vegetal - 53 a 55%
    - Carbón mineral - 30 a 32%
    - Carbonato de bario - 2 a 3%
    - Carbonato de sodio - 10 a 12%
    - Carbonato de calcio - 3 a 4%

3. Una vez hecha la mezcla se coloca una capa de esta de 2 cm de alto y encima se acomodan las piezas y el resto del relleno. La caja se tapa y en las uniones se sellan con cemento refractario.
4. Posteriormente someter las muestras a los siguientes tratamientos térmicos:

| Muestra | Temperatura | Tiempo (hr) | Enfriamiento |
|---|---|---|---|
| A | 900º | 5 | En caja |
| B | 900º | 20 | En caja |
| C | 900º | 80 | En caja |

5. Se sacan las cajas del horno y se dejan enfriar al aire libre.

## RESULTADOS

1. Para el galvanizado, reportar el espesor de la capa de revestimiento conseguida y su dureza, compárala con la dureza del sustrato.
2. Para el carburizado, reportar el espesor del revestimiento de carburizado en función del tiempo de permanencia en el horno, así como su dureza. Compárala con la dureza del sustrato.
3. Dibujar el perfil de durezas de la capa cementada en función a las distancias del borde.

Mediante gráficas representar el perfil de durezas del carburizado.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. Comparar los efectos del espesor del carburizado según el tiempo.
2. Analizar las microestructuras obtenidas y mencionar qué fases se presentan.
3. ¿Qué efecto tiene el tiempo con respecto al carburizado?
4. ¿Cómo se comporta la dureza con respecto al centro de la pieza?

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

Realizar conclusiones a partir del análisis de resultados hecho y la teoría dada en el curso.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. Explicar el concepto de difusión.
2. ¿De qué variables depende la difusión?

3. ¿Qué es el ordenamiento atómico y su relación con la difusión?
4. Explicar qué es la concentración de las especies que se difunden.
5. Explicar la primera y segunda ley de Fick.

## BIBLIOGRAFÍA


- American Society for Metals, Metals Handbook, Vol. 8, Materials Caracterization, 9th ed., American Society for metals, E.U.A., 1985.
- Dieter, George, E. *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, McGraw-Hill, UK, 1988.
- Verhoeven, John, D., *Fundamentos de Metalurgia Física*, Limusa, 1987.
- Guy, A. G. y Hren, J.J., *Elementos de Metalurgia Física,* Addison Wesley, 1974.
- Smith, William F. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Mc Graw Hill, 1993.

# Práctica 3: Diagramas de equilibrio

## Duración 2 horas

### OBJETIVO

Con la realización de esta práctica el alumno comprenderá el significado y uso de los diagramas de equilibrio binarios en Ingeniería, así como su elaboración.

### INTRODUCCIÓN

Los materiales en estado sólido pueden estar formados por varias fases. La combinación de estas fases define muchas de las propiedades que tendrá el material. Ante estas circunstancias es necesario contar con una herramienta teórica que permita describir las fases que están presentes en él, conocida como **Diagrama de fase.**

Las fases sólidas en un material tienen las siguientes características:

a) Los átomos que forman la fase tienen la misma estructura o arreglo atómico.
b) La fase tiene la misma composición química en todo su volumen.
c) Presentan las mismas propiedades físicas.
d) Poseen una interfase definida con su entorno.

Cabe mencionar que los materiales puros solamente poseen una fase, sin embargo las aleaciones pueden poseer dos o más fases presentes al mismo tiempo. Una aleación se define como una solución en estado sólido, siendo esta última la mezcla de dos o más elementos químicos.

Un diagrama de fases es un mapa que describe las fases presentes en un material en función de variables termodinámicas. Al mezclar dos o más elementos para formar una

aleación, se pueden presentar los siguientes casos:

a) Existe solubilidad ilimitada produciendo una fase sólida. Por ejemplo el cobre y níquel tienen solubilidad ilimitada, formando una sola fase en estado sólido.
b) Existe solubilidad limitada, lo cual significa que uno de los componentes puede disolverse hasta cierto límite en el otro. Como caso particular el cobre y el zinc tienen solubilidad limitada generándose varias fases en estado sólido.

Una aleación binaria está formada únicamente por la mezcla de dos componentes, donde la cantidad en que cada componente está presente en la mezcla se cuantifica por medio del porcentaje en peso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$porcentaje\ en\ peso\ de\ A = \frac{masa\ de\ A}{masa\ de\ A + masa\ de\ B} x100$$

$$porcentaje\ en\ peso\ de\ B = \frac{masa\ de\ B}{masa\ de\ A + masa\ de\ B} x100$$

Un diagrama de fase es un gráfico en cuyo eje vertical se mide la temperatura y en el eje horizontal se mide el porcentaje en peso de los componentes que forman la aleación Figura 1.

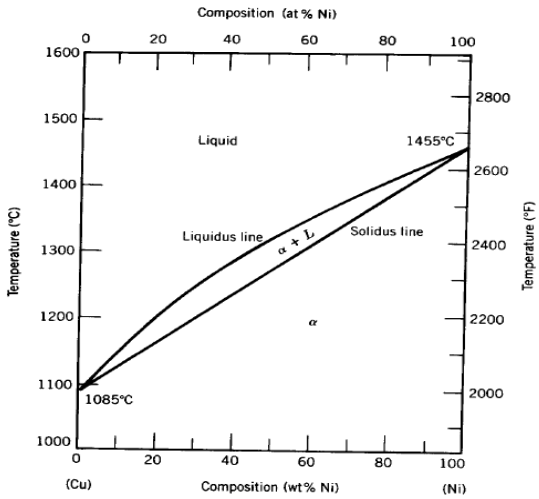
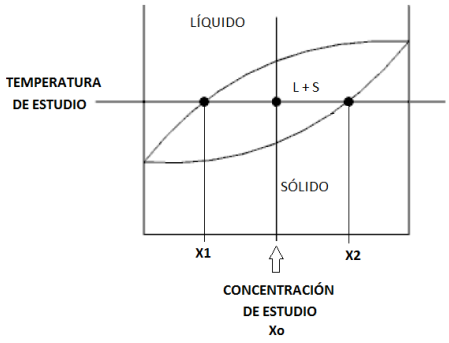



*Figura 1. Diagrama de equilibrio binario de una aleación Cu-Ni.*

Un diagrama de fases permite obtener información como:

1. Las fases presentes en la aleación en función de la temperatura y la composición química.
2. La composición química de las fases presentes. Teniendo dos casos:
    a) Si la aleación posee una fase, la composición de la fase es igual a la composición de la aleación.
    b) Si la aleación tiene dos fases, la composición de cada una de ellas se encuentra en la zona de mezcla.
3. La cantidad de cada fase en fracción o porcentaje, con respecto a la masa total de la aleación. Para ello es necesario la utilización de la regla de la palanca (Figura 2).




$$porcentaje\ de\ líquido = \frac{(X_2 - X_o)}{(X_2 - X_1)} x100$$

$$porcentaje\ de\ sólido = \frac{(X_o - X_1)}{(X_2 - X_1)} x100$$

*Figura 2. Aplicación de la regla de la palanca para un diagrama de equilibrio binario.*

Durante la solidificación de las aleaciones ocurre la segregación, en donde la composición química del sólido que se forma primero es diferente a la del sólido que se forma al final, teniendo que la composición química de la parte sólida no es uniforme, en las aleaciones este fenómeno propicia que las propiedades mecánicas de la pieza tampoco sean uniformes.

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

Material:

- ✓ 6 Tubos de ensaye.
- ✓ 3 Pinzas para tubo de ensaye.
- ✓ 3 Soportes Universales.
- ✓ 3 Termómetros.
- ✓ 3 Lámparas de Alcohol.
- ✓ Cronómetro.

Reactivos:

- ✓ Sobres de Naftalina (α) y β-Naftol con las siguientes concentraciones:
  - 100% α 0% β
  - 80% α 20% β
  - 60% α 40% β
  - 40% α 60% β
  - 20% α 80% β
  - 0% α 100% β

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Graficar curvas de enfriamiento de forma experimental, estas representan la variación de la temperatura en un sistema en función del tiempo (10 o 15 segundos), considerando las mismas condiciones de extracción de calor para cada una de las concentraciones especificadas en el apartado de material y equipo.
2. Integrar tres brigadas con el total de alumnos del grupo.
3. Cada brigada debe registrar los datos obtenidos de dos concentraciones del total de las propuestas.
4. Colocar el tubo de ensaye en el soporte universal y sujetar.
5. Colocar dentro de cada tubo de ensaye el contenido de un sobre (Naftalina (α) y β-Naftol).
6. Colocar dentro del tubo de ensaye un termómetro que no toque las paredes del tubo.
7. Colocar por debajo del tubo de ensaye la lámpara de alcohol y prender la mecha.
8. Calentar hasta llegar a los 160°C y una vez alcanzada dicha temperatura, retirar la lámpara de alcohol.
9. A partir de los 160°C, hacer mediciones cada 10 o 15 segundos registrando la temperatura hasta llegar a los 50°C (Tabla 1).

10. Con los datos registrados realizar las curvas de enfriamiento.
11. Identificar los puntos de cambio de fase y registrarlos para posteriormente generar el diagrama de fases binario.

## RESULTADOS

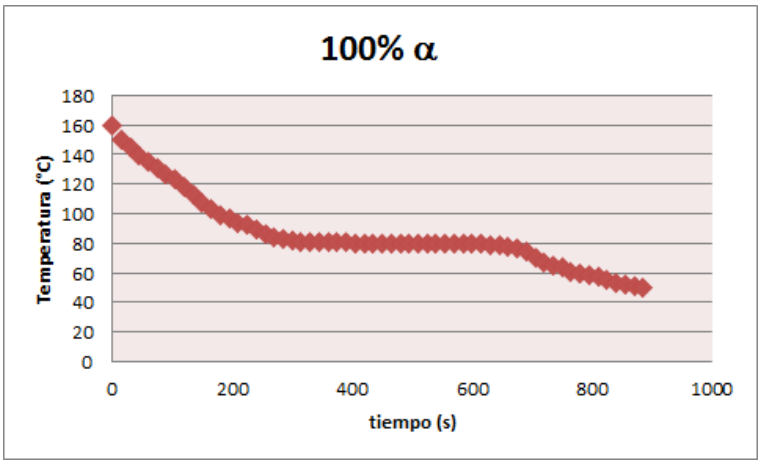
1. Llenar la siguiente tabla con los datos obtenidos:

*Tabla 1. Registro de Temperaturas de cada concentración.*

| Tiempo (t) seg. | Temperatura (°C) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 100%α | 80%α 20%β | 60%α 40%β | 40%α 60%β | 20%α 80%β | 100%β |
| | | | | | | |
| 0 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| 10 | | | | | | |
| 20 | | | | | | |
| 30 | | | | | | |
| 40 | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |

2. Graficar los resultados de la Tabla 1 para cada una de las concentraciones, teniendo un total de 6 gráficas (Temperatura vs Tiempo).

*Ejemplo. Gráfica curva de enfriamiento:*




*Gráfica1. Concentración 100%α*

3. Con las 6 curvas de enfriamiento obtenidas, realizar el diagrama de equilibrio correspondiente, graficando Temperatura vs % de Concentración.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. Con base en las gráficas generadas, identificar las zonas que se presentan durante el proceso de solidificación (liquidus, zona de mezcla y solidus).
2. Discutir la importancia de generar diagramas de equilibrio así como la utilidad para identificar las diferentes fases existentes en una mezcla, correlacionando con la regla de la palanca.

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

Realizar conclusiones y comentarios con base en lo desarrollado en esta práctica.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. ¿Qué es un Diagrama de Equilibrio?
2. ¿A qué se le denomina línea de Liquidus y Solidus?
3. ¿Qué variables intervienen en su construcción?
4. ¿Qué se entiende por "Fase"?
5. ¿En qué consiste la Regla de Fases de Gibbs?
6. Describa en qué consiste la Regla de la Palanca.
7. Defina que es el límite de solubilidad.
8. Defina punto invariante.

## BIBLIOGRAFÍA


- Callister, William D., *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 2da ed., Limusa Wiley, México, 2009.
- Smith, William F., Hashemi Javad, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 4ta ed., Mc Graw Hill – Interamericana, México, 2006.
- Schaffer, Saxena, Antolovich, Sanders, Warner, *Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería,* CECSA, Segunda reimpresión, México, 2006.

# Práctica 4: Tratamientos Térmicos

**Duración 2 hrs.**

## OBJETIVO

El alumno conocerá los tratamientos térmicos más comunes, entendiendo su fundamento básico y sus efectos sobre los materiales y sus propiedades.

## INTRODUCCIÓN

A través de los tratamientos térmicos es posible modificar las propiedades de los materiales, mediante alteraciones de su estructura, para así desempeñar con garantía los trabajos demandados; las aleaciones de tipo ferroso son las que mejor se prestan para ello.

El tratamiento térmico consiste en calentar el acero a una temperatura determinada, mantenerlo a esa temperatura durante un cierto tiempo hasta que se forme la estructura deseada y luego enfriarla a la velocidad conveniente. Los factores temperatura-tiempo deben ser muy bien estudiados dependiendo del material, tamaño y forma de las piezas.

Con el tratamiento térmico conseguiremos modificar microscópicamente la estructura interna de los metales, produciéndose transformaciones de tipo físico, cambios de composición y propiedades, permitiéndonos conseguir los siguientes objetivos:

- Estructura de mejor dureza y maquinabilidad.
- Eliminar tensiones internas y evitar deformaciones después del mecanizado.
- Estructura más homogénea, máxima dureza y resistencia posible.
- Variar algunas de las propiedades físicas.

El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales fue diseñado.

Este tipo de tratamiento consiste en el calentamiento y enfriamiento del material en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño de grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil.

Algunos de los tratamientos térmicos en los metales son:

**A. Temple**

El temple se utiliza para obtener un tipo de aceros de alta dureza con microestructura martensítica. Se trata de elevar la temperatura del acero hasta una temperatura cercana a 1000ºC y posteriormente someterlo a enfriamientos rápidos o bruscos y continuos en agua, aceite o salmuera. La capacidad de un acero para transformarse en martensita durante el temple depende de la composición química del acero y se denomina templabilidad. Al obtener aceros martensíticos, en realidad, se pretende aumentar la dureza, el problema es que el acero resultante será muy frágil y poco dúctil, porque existen altas tensiones internas.

**B. Revenido**

El revenido es el tratamiento térmico que sigue al temple. Consiste en calentar la pieza templada hasta cierta temperatura, para reducir las tensiones internas que tiene el acero martensítico (de alta dureza). De esto modo, evitamos que el acero sea frágil, sacrificando un poco la dureza. La velocidad de enfriamiento es, por lo general, rápida.

**C. Recocido**

El recocido consiste en calentar un material hasta una temperatura de transformación austenítica y posteriormente enfriarlo lentamente. Se utiliza, al igual que el caso anterior, para aliviar esfuerzos internos producto del endurecimiento por deformación, los cuales son:

- Eliminar tensiones del temple.

- Aumentar la plasticidad, ductilidad y tenacidad del acero.

Recocido se lleva a cabo de la siguiente forma:

1. Se mantiene la probeta de acero a la temperatura del horno aproximadamente entre 45 a 60 minutos.
2. Se enfría gradualmente dentro del horno hasta temperatura ambiente.

**D. Normalizado**

Este tratamiento se emplea para eliminar tensiones internas sufridas por el material tras una conformación mecánica, tales como una forja o laminación para conferir al acero, propiedades que se consideran normales de su composición. El normalizado se practica calentando rápidamente el material hasta una temperatura crítica y se mantiene en ella durante un tiempo. A partir de ese momento, su estructura interna se vuelve más uniforme y aumenta la tenacidad del acero. El medio de enfriamiento es a la atmósfera, una vez transcurrido el tiempo dentro del horno (45 – 60 min).

*Figura 1. Horno para tratamientos térmicos.*

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

- ✓ Horno para tratamientos térmicos.
- ✓ Pinzas.
- ✓ Guantes de asbesto.
- ✓ Soporte de cerámica refractaria.
- ✓ Aceite para temple.
- ✓ Salmuera.
- ✓ Agua.
- ✓ Muestras de diferentes aceros.
- ✓ Desbastadora.
- ✓ Lijas.
- ✓ Pulidora.
- ✓ Alúmina blanca y alúmina gris.
- ✓ Durómetro Rockwell.
- ✓ Microscopio metalográfico.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Previo al tratamiento térmico, realizar las siguientes pruebas en la pieza de trabajo: determinación de la dureza, microestructura presente en el material (sin tratamiento térmico).

   Procedimiento para el tratamiento térmico:

2. Calentar el horno hasta alcanzar 850°C.
3. Cuando se haya alcanzado la temperatura estimada colocar dentro del horno la probeta.
4. Una vez colocadas las muestras de acero, dejar por un tiempo aproximado de 30 minutos por cada pulgada de espesor. (Figura 2)

*Figura 2. Piezas en el horno.*

5. Sacar la probeta del horno una vez que haya alcanzado la temperatura de temple. (Figura 3)

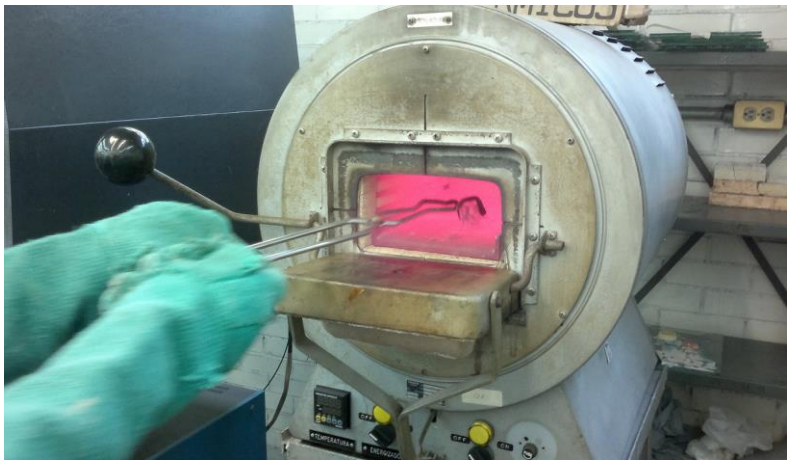


*Figura 3. Retirando probeta del horno.*

6. Introducir la probeta en aceite, agua o salmuera según sea el caso.

*Figura 4. Colocar la probeta en agua, aceite o salmuera.*

7. Determinar con el profesor el tipo de tratamiento térmico que será aplicado en cada probeta (recocido, temple, normalizado) y aplicar el procedimiento correspondiente indicado en la introducción.
8. Posteriormente al tratamiento térmico de la probeta, realizar nuevamente el estudio de dureza y metalografía.

## RESULTADOS

Realizar el estudio comparativo de los resultados obtenidos en las probetas antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico (Perfil de durezas y obtención de imágenes de la microestructura).

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para analizar los resultados contestar, las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el mecanismo por el cual los tratamientos térmicos cambian las propiedades mecánicas de los metales?
2. ¿Qué cambios se presentan en la microestructura y por qué influyen estos en las propiedades mecánicas?

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

Elaborar de acuerdo a los resultados obtenidos las conclusiones y/o comentarios pertinentes.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. ¿Qué son los tratamientos térmicos? ¿Cuál es la metodología para aplicarlos?
2. ¿Qué aplicaciones tienen los tratamientos térmicos?
3. ¿Cuál es la temperatura que se debe aplicar para el tratamiento térmico de los aceros?
4. Mencionar los principales cuidados que se deben de considerar al trabajar con hornos para tratamiento térmico.

## BIBLIOGRAFÍA


- Donald R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Iberoamericana.
- http://www.ecured.cu/index.php/Tratamiento_t%C3%A9rmico_de_los_metales

# Práctica 5: Templabilidad

**Duración 4 hrs.**

## OBJETIVO

El alumno comprenderá el concepto de templabilidad, mediante la aplicación del ensayo Jominy, en diferentes aceros, para obtener sus curvas de templabilidad.

## INTRODUCCIÓN

### Sistemas de enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento utilizados para los tratamientos térmicos se eligen teniendo en cuenta tres parámetros: composición del metal a tratar, dimensiones de las piezas y propiedades a obtener.

El agua es el medio de temple más barato. Se utiliza agua para templar el acero al carbono o los aceros (semialeados), que necesitan elevadas velocidades críticas de temple. No sirve el agua para templar piezas de formas complejas, ya que se generan tensiones internas.

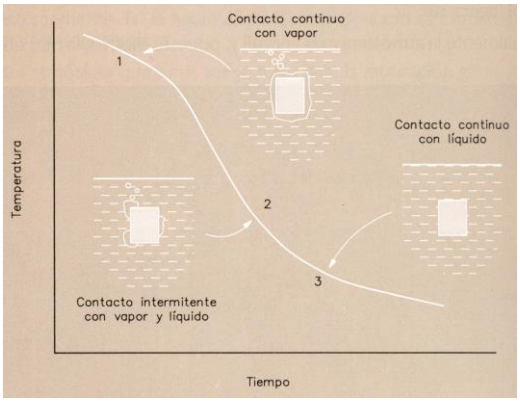



*Figura 1. Etapas en el enfriamiento de una pieza de acero en contacto con medio refrigerante. (Pere Molera Solá, Tratamientos térmicos de los metales, Ed. Marcombo, España, 1991.)*

En el enfriamiento con agua se pueden considerar tres etapas: 1, debido al contacto del agua con la pieza a elevadas temperaturas, se forma un halo de vapor alrededor de la pieza y el enfriamiento es por radiación; 2, rotura de este halo por agitación; 3, enfriamiento por conducción metal-líquido y por convección del líquido. (Figura 1)

Las disoluciones salinas, como el cloruro de sódico o la sosa caústica en agua, consiguen un enfriamiento más rápido debido al calor específico y a la posibilidad de romper el halo de vapor que se forma en el temple con agua. Esta rotura se debe a que la disolución salina experimenta pequeños precipitados salinos en la superficie de la pieza a tratar: estos pequeños cristales, debido a la elevada temperatura, estallan y rompen el halo de vapor.

El aceite utilizado para el temple tiene un comportamiento comparable a las tres etapas consideradas en el caso del agua pero debido a la baja velocidad de evaporación del aceite, el enfriamiento en aceite es menos drástico que en el agua. Por este motivo es preferible el aceite para templar piezas de formas complejas y para aceros aleados.

Los aceites minerales utilizados para el temple del acero tienen, a 20 ºC, una densidad en torno a 0.9, a 50 ºC una viscosidad Engler que varía de 2.0 a 3.5 y un punto de inflamación ≥ 170 ºC.

El enfriamiento en baño de sales, a 100 ÷ 300 ºC reduce considerablemente los riesgos de tensiones internas y deformaciones indeseables. Es uno de los sistemas de temple que más éxito tiene en su aplicación industrial.

En la figura 2 se muestran las velocidades de enfriamiento conseguidas según distintos tipos de medios utilizados para el temple del acero. En el enfriamiento con agua se observa que cuando la superficie de la probeta ha alcanzado la temperatura final de la transformación martensítica, el núcleo de la probeta aún no ha llegado a la temperatura del inicio de la citada transformación: esto implica generación de gran cantidad de tensiones internas. En el enfriamiento con baño de sales se aprecia que la temperatura interior y exterior de la probeta es prácticamente la misma, lo que implica ausencia de tensiones internas en este tipo de temple. (Información obtenida de Molera, Solá Pere, Tratamientos térmicos de los metales).

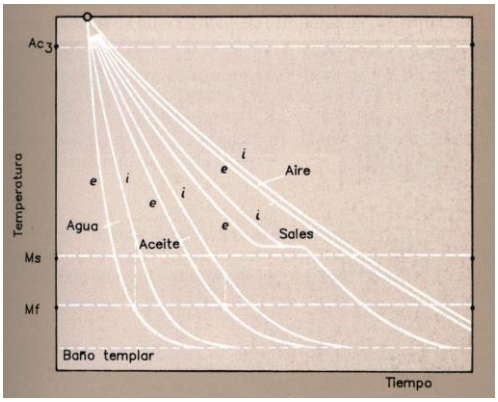



*Figura 2. Gráficas de enfriamiento conseguidas en distintos medios de temple.*

**Temple**

Se denomina temple de un acero al enfriamiento del mismo desde una temperatura por encima de la transformación $AC_3$ a una velocidad suficientemente rápida a fin de endurecerlo considerablemente. A nivel microscópico, el endurecimiento por temple implica la formación del constituyente martensítico y ausencia del constituyente perlítico.

La primera variable que se observa al estudiar la dureza conseguida en las piezas de acero es el porcentaje en carbono. La dureza y la resistencia a la tracción del acero en función del contenido en carbono se puede observar en la figura 3.

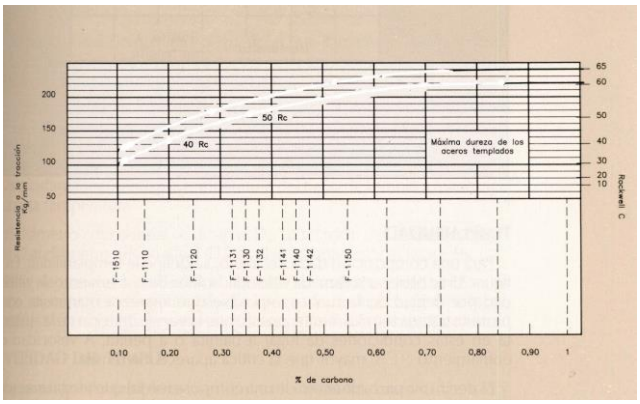



*Figura 3. Dureza y resistencia a la tracción del acero templado en función del porcentaje en carbono (Ídem).*

**Templabilidad**

La templabilidad de un acero se define como la propiedad que determina la profundidad y la distribución de la dureza provocada por el temple. La templabilidad de un acero depende principalmente de:

1) Composición química del acero.
2) Tamaño de grano.
3) Estructura del acero antes del temple.

**Ensayo Jominy**

Consiste en una probeta de forma cilíndrica con diámetro de una 1 pulg. y 4 pulg. de longitud, presentando una pestaña 1/16 de pulg. en uno de sus extremos (la pestaña sirve como medio de sujeción). La probeta es calentada a la temperatura apropiada para el tratamiento térmico, posteriormente la probeta es enfriada

mediante un chorro de agua situado en la cara inferior con una velocidad de flujo y temperatura específica. Dicha cara actúa como superficie templante y enfría la probeta de forma longitudinal hacia su extremo superior sólo por conducción, con lo cual se genera un gradiente de velocidades de enfriamiento desde la máxima velocidad en el extremo templado (inferior), a la mínima en el extremo superior.

La influencia de la composición del acero para transformarse en martensita para un tratamiento de temple, en particular es relacionada a un parámetro llamado templabilidad. Para cada aleación de acero hay una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento.

La presencia de elementos aleantes incrementa la templabilidad de un acero y las dimensiones de la pieza tienen un efecto directo sobre la templabilidad del material.

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

Material:

- ✓ Probeta de ensayo Jominy de acero 4140.
- ✓ Probeta de ensayo Jominy de acero 9849.

Equipo:

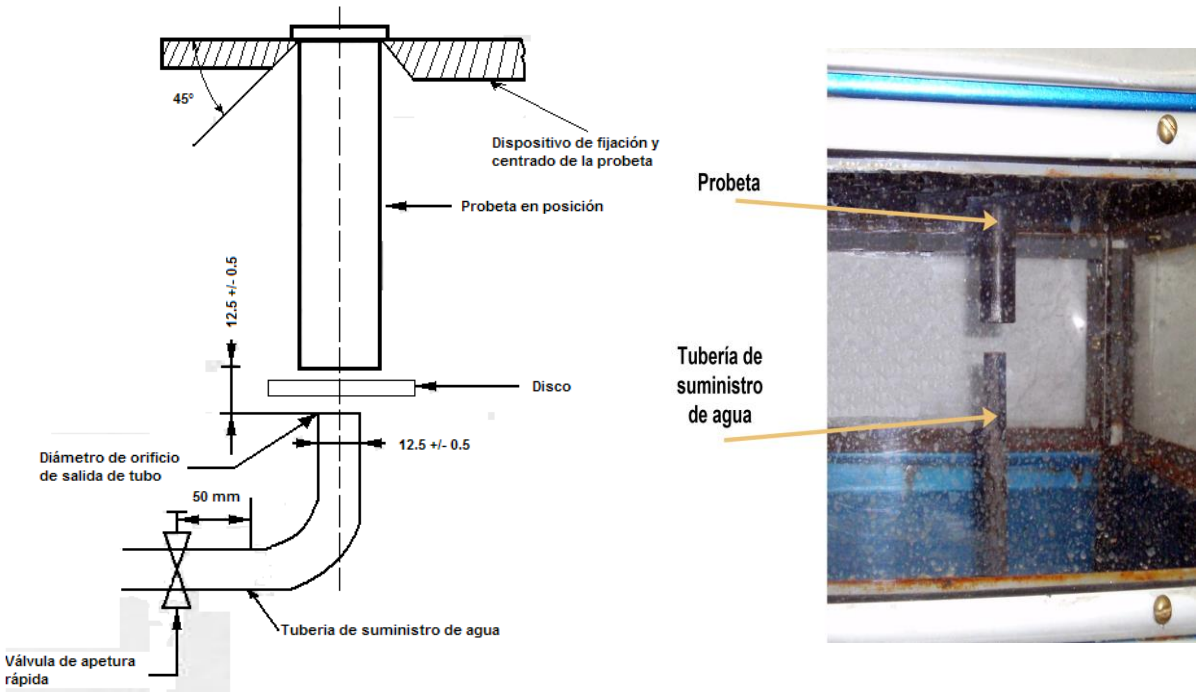
- ✓ Maquina de ensayo Jominy.
- ✓ Durómetro Rockwell.
- ✓ Horno eléctrico de resistencia.
- ✓ Fresadora vertical.

Se realizará el ensayo Jominy en las probetas de acero, como se indica en el siguiente procedimiento:

1. Precalentar el horno a 850 C°, colocar los especímenes Jominy en el horno y mantener durante media hora la temperatura de 850 °C.
2. Abrir la llave de agua del dispositivo Jominy (Figura 1), ajustar la columna de agua libre altura de 2,5 pulg.

*Figura 1. Equipo Jominy*

3. Trasladar la probeta del horno y colocarla en el dispositivo Jominy en un tiempo no mayor a 5 segundos, tal como se muestra en figura 2.




*a) Diagrama* *b) Muestra en el equipo Jominy*

*Figura 2. Posición de la probeta.*

4. Abrir la llave de agua para que se enfrié la parte baja de la probeta sin que el agua moje los lados, dejar correr el agua durante 5 minutos.
5. Remover la probeta Jominy del dispositivo y maquinar una superficie plana de 0,015 in en uno de los lados de la probeta.
6. Marcar los puntos en la superficie anterior a intervalos de 1/8” hasta una distancia de 1 in. A intervalos de 3/16” en la segunda pulgada y a intervalos de 1/4” en la tercera pulgada, tomados desde el extremo templado tal como se muestra en la figura 3.

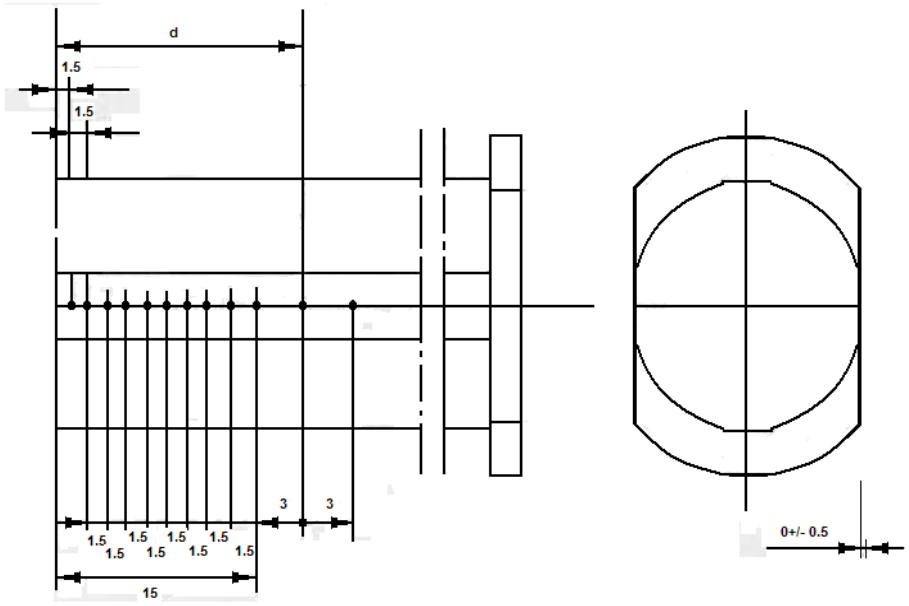



*Figura 3. Intervalos para ensayo de dureza.*

7. Tomar lecturas de dureza Rockwell en escala “C”. En cada punto marcado previamente en la etapa anterior.

## RESULTADOS

Completar la siguiente tabla con los intervalos marcados y la dureza obtenida en cada uno, posteriormente realizar la gráfica de dureza contra distancia desde el extremo templado a lo largo de la probeta.

| Pulgadas | Intervalo | Dureza Rockwell C |
|---|---|---|
| 1 | 1/8 | |
| 1 | 2/8 | |
| 1 | 3/8 | |
| 1 | 4/8 | |
| 1 | 5/8 | |
| 1 | 6/8 | |
| 1 | 7/8 | |
| 1 | 8/8 | |
| 2 | 3/16 | |
| 2 | 6/16 | |
| 2 | 9/16 | |
| 2 | 12/16 | |
| 2 | 15/16 | |
| 3 | 1/4 | |
| 3 | 2/4 | |
| 3 | 3/4 | |
| 3 | 4/4 | |

1.- Observar y describir la microestructura y relacionarla con la dureza obtenida por la pieza después del tratamiento.

2.- Determinar qué tipo de  microestructura se presenta a largo de toda la barra.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. Realizar una gráfica de dureza contra la distancia desde la base hasta el extremo superior de la probeta.
2. ¿Por qué ha variado la dureza respecto a la longitud de la probeta?
3. Discutir cuál es la relación que existe entre la dureza y la templabilidad, con base en los resultados obtenidos.

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

A partir del análisis de los resultados, discutir y elaborar las conclusiones respecto a los diferentes conceptos relacionados con la templabilidad de un acero.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. Describe qué es templabilidad y qué factores influyen sobre ella.
2. ¿Qué es el diámetro crítico?
3. ¿Qué es y cómo se evalúa la distancia al 50% de martensita?
4. ¿Qué información podemos obtener de la gráfica de Grossman?

## BIBLIOGRAFÍA


- American Society for Metals, *Metals Handbook*, Vol. 8, Materials Caracterization, 9th, American Society for metals, E.U.A., 1985.
- Dieter, George, E., *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, McGraw-Hill, UK, 1988.
- Verhoeven, John, D., *Fundamentos de Metalurgia Física*, Ed. Limusa, 1987.
- GUY, A. G. y Hren, J.J., *Elementos de Metalurgia Física*, Ed. Addison Wesley, 1974.
- Smith, William F., *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Ed. Mc Graw Hill, 2004.
- Pere Molera Solá, *Tratamientos térmicos de los metales*, Ed. Marcombo, España, 1991.
- *Jominy hardenability (quench) test* (2000) http://www.matter.org.uk/steelmatter/metallurgy/7_1_1.html

# Práctica 6: Endurecimiento por deformación en frío

**Duración 4 hrs. (dos clases)**

## OBJETIVO

El alumno determinará los efectos que se producen en los metales al realizar deformación en frío, hasta llegar a la falla o reducción máxima de espesor.

## INTRODUCCIÓN

El endurecimiento por deformación plástica, es un fenómeno por el cual un metal dúctil sufre endurecimiento al ser deformado. Generalmente también se le llama trabajo en frío debido a que se realizan las deformaciones a temperatura ambiente, con relación a la temperatura de fusión del metal.

El endurecimiento por deformación consiste en:

1. El metal presenta dislocaciones en su estructura cristalina.
2. Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica.
3. Al deformar el material, las dislocaciones aumentan en número.
4. Al aplicar mayor deformación y por ende más dislocaciones se vuelve más difícil su desplazamiento.
5. Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere de una fuerza mayor para generar mayores deformaciones. Se dice entonces que el material se ha endurecido.

Este fenómeno se explica en la curva *esfuerzo vs deformación* de un material. Los metales presentan diferente capacidad de endurecimiento al ser deformados

plásticamente (Figura 1). Esta capacidad se mide con el coeficiente de endurecimiento (n).

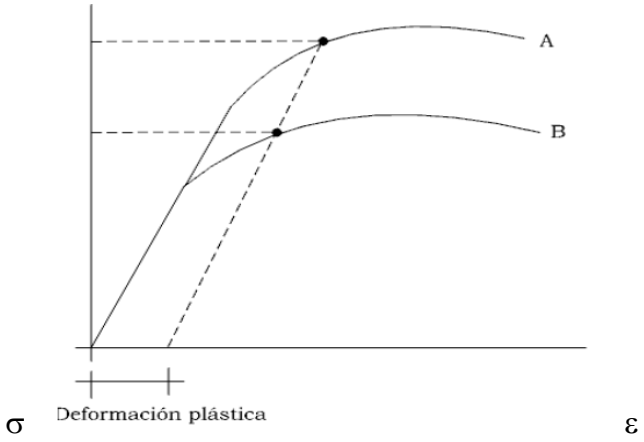



*Figura 1. Comparación de deformación plástica en frío y en caliente para un metal.*

Una vez realizada la deformación plástica se ha causado el incremento de dislocaciones, por lo que si se necesita liberar dislocaciones es necesario aplicar un tratamiento térmico para liberar los esfuerzos atrapados.

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

- ✓ Equipo para laminar.
- ✓ Arco con segueta.
- ✓ Flexómetro.
- ✓ Calibrador.
- ✓ Material (aluminio y latón), secciones de 5 cm.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Formar equipos de trabajo.
2. Preparar probetas o piezas de trabajo de aluminio (Al-1100, 99% Al) y latón (70% Cu, 30% Zn).
3. El profesor explicará sobre el funcionamiento de la laminadora, la forma de operarla y las medidas de seguridad.
4. Realizar de 2 a 8 pasos de laminación con una reducción del 15% respecto al espesor del material (R=(Lo-Lf)/Lo).
5. Realizar el punto anterior hasta llegar a la fractura o espesor mínimo del material.
6. Para cada paso, medir el espesor y la longitud finales del material y tomar la lectura de la carga que aplicó la laminadora empleando el lector de carga.
7. Después de cada paso de laminación, se deberá cortar una sección de la misma probeta empleada en el proceso de laminación de 1 cm en la dirección que se lamina.
8. Al concluir las deformaciones, realizar ensayos de dureza en cada una de las secciones cortadas, comprobando así, el mecanismo de endurecimiento por deformación que se presenta en el material.
9. Calcular porcentaje de deformación.
10. Recopilar la información.
11. Obtener resultados.

## RESULTADOS

1. Completar las siguientes tablas con los datos obtenidos durante el experimento (si es necesario agregar más renglones):

| Aluminio | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. de ensayo | Longitud inicial | Longitud final | Espesor inicial | Espesor final | Carga aplicada | Dureza |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |

| Latón | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. de ensayo | Longitud inicial | Longitud final | Espesor inicial | Espesor final | Carga aplicada | Dureza |
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |

2. Una vez terminados los ensayos, calcular el porcentaje de deformación (reducción).

Responder: ¿Se considera como beneficio o problema el endurecimiento por deformación? Explicar.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. A partir de los resultados, hacer un análisis de la relación que existe entre el número de deformaciones (pasadas) e incremento de dureza.
2. ¿Existe alguna variación en la carga registrada? ¿Por qué? Explicar.
3. ¿Existe alguna diferencia entre el porcentaje de deformación (reducción) calculado y el medido en los experimentos? ¿Por qué?
4. ¿Cómo se determina el coeficiente de endurecimiento por deformación (n)?

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

A partir de los resultados y análisis de resultados, concluir con justificaciones técnicas lo sucedido a los materiales.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. ¿Qué es laminación?
2. ¿Qué es deformación en frío?
3. ¿Qué tipos de material se pueden deformar?
4. ¿Cómo se calcula la deformación en frío?

## BIBLIOGRAFÍA


- Smith, F. William, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, Mc Gram Hill, 2004.
- Askeland, Donald R., *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Editorial Iberoamericana, México, 1987.
- Van, Vlack, Lawrence H., *Materiales para Ingenieros*, Editorial CECSA, México, 1980.

# Práctica 7: Ensayo no Destructivo

**Duración 2 hrs.**

## OBJETIVO

El alumno aplicará la metodología de ensayos no destructivos de partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

## INTRODUCCIÓN

Las pruebas no destructivas son métodos fundamentales y esenciales para el control de calidad de materiales de ingeniería, procesos de manufactura, confiabilidad de productos en servicio y mantenimiento de sistemas, cuya falla puede ser costosa o desastrosa.

Las pruebas no destructivas se definen como el empleo de elementos físicos y químicos aplicados a los materiales, para la evaluación indirecta de defectos internos o externos (grietas, fracturas, poros, inclusiones, etc.), sin dañar su utilidad futura. Se identifican comúnmente con las siglas PND (Pruebas No Destructivas), considerándose sinónimos de éstos, los ensayos no destructivos (END), inspecciones no destructivas y exámenes no destructivos.

**Clasificación de las pruebas no destructivas.**

La clasificación de los ensayos no destructivos se basan en la posición de donde se localizan las discontinuidades que pueden ser detectadas, por lo que se clasifican en:

1. **Pruebas no destructivas superficiales.**

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados. Los métodos de ensayos no destructivos superficiales son:

- Inspección Visual (VT).
- Líquidos Penetrantes (PT).
- Partículas Magnéticas (MT).
- Electromagnetismo (ET).

En el caso de utilizar inspección visual o líquidos penetrantes se tiene la limitante para detectar únicamente discontinuidades superficiales (abiertas a la superficie); con partículas magnéticas y electromagnetismo, se tiene la posibilidad de detectar tanto discontinuidades superficiales como sub-superficiales (las que se encuentran debajo de la superficie pero muy cercanas a ella).

*Figura 1. Ejemplo de un ensayo de Inspección visual.*

**2. Pruebas no destructivas volumétricas.**

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados. Los ensayos no destructivos volumétricos son:

- Radiografía Industrial (RT).
- Ultrasonido Industrial (UT).

- Emisión acústica (AE).

Estos métodos permiten la detección de discontinuidades internas y sub-superficiales, así como bajo ciertas condiciones, la detección de discontinuidades superficiales.

*Figura 2. Ejemplo de un ensayo de ultrasonido.*

## MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

- ✓ Lupa de al menos 5X.
- ✓ Pedazo de tela que no libere pelusas **(material proporcionado por el alumno).**
- ✓ Equipo de líquidos penetrantes.
- ✓ Lata en aerosol de líquido limpiador.
- ✓ Lata en aerosol de líquido penetrante visible a simple vista.
- ✓ Lata en aerosol de líquido penetrante fluorescente.
- ✓ Lata en aerosol de líquido revelador.
- ✓ Lámpara de luz negra.
- ✓ Equipo de partículas magnéticas.
- ✓ Partículas magnéticas coloreadas visibles a simple vista.
- ✓ Generador de campo magnético.
- ✓ Piezas metálicas que puedan tener fisuras y discontinuidades.
- ✓ Pliego de polietileno para cubrir mesas de trabajo.

- ✓ Cámara fotográfica **(proporcionada por el alumno).**

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

El alumno someterá varias muestras de materiales a algunos ensayos no destructivos con que cuenta el laboratorio para observar su comportamiento y estudiará las posibles fallas que pudiesen contener las muestras.

Para realizar los ensayos se deben seguir la siguiente metodología:

**Parte 1. Prueba de Inspección Visual y Líquidos Penetrantes.**

1) Examinarán a simple vista las muestras proporcionadas por el profesor para tratar de encontrar discontinuidades en la superficie. Se recomienda utilizar una lupa de pocos aumentos, para ver con más detalle las discontinuidades.
2) Aplicar el líquido limpiador directamente a la muestra y con ayuda de un pedazo de tela (que no libere pelusas) se seca la pieza completamente.
3) Aplicar el líquido penetrante sobre la muestra a inspeccionar. Se recomienda que a la mitad de las muestras, que se les proporcionó al grupo, se les aplique tinte fluorescente y a la otra mitad tinte visible. Dejar el tiempo suficiente para que penetre el líquido entre las fisuras o grietas de cada pieza.
4) Mojar un pedazo de tela con líquido limpiador y retirar el exceso de líquido penetrante.
5) Aplicar el líquido revelador. Dejar secar, el tiempo necesario.
6) Observar detalladamente los defectos superficiales o fallas que presentan las piezas, una vez que el líquido revelador haya secado (obtener fotografías de las fallas observadas).
7) Una vez terminada la observación, nuevamente aplicar líquido limpiador directamente sobre la pieza y secar con la ayuda del pedazo de tela.

Aplicando la metodología es posible observar el cambio en el color del material, lo que nos indica la presencia de una falla. Los líquidos penetrantes dan indicaciones de fallas cuando aparecen manchas del tinte, si la mancha es un círculo indica la presencia de un poro, por otro lado si la mancha es una línea, es porque hay una grieta. Cuando la limpieza es deficiente, pueden aparecer falsas indicaciones.

**Parte 2. Prueba de Partículas Magnéticas.**

1) Aplicar líquido limpiador directamente a la muestra a inspeccionar y con la ayuda del pedazo de tela secar la pieza completamente.
2) Aplicar una capa de partículas magnéticas de hierro sobre la muestra, tomando en cuenta que adquiera una capa uniforme.
3) Tomar las puntas de contacto del generador de campo magnético y tocar la pieza metálica en los extremos más lejanos posibles.
4) Aplicar la corriente sobre la pieza en estudio, verificando que realmente haya un valor medible en el amperímetro del equipo. **Importante: El tiempo de aplicación de corriente debe ser máximo de 5 seg.**
5) Observar las piezas durante la aplicación del campo magnético y tomar fotografías.
6) Después de la observación retirar las partículas magnéticas y tratar de reciclarlas en la medida de lo posible.
7) Por último aplicar líquido limpiador y secar la muestra con la ayuda del pedazo de tela.

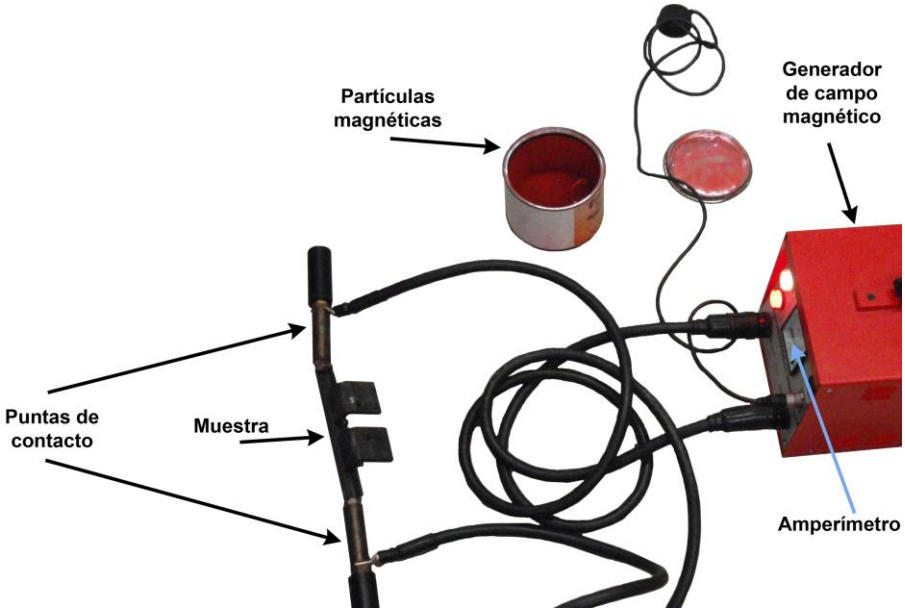



*Figura 3. Prueba de partículas magnéticas.*

Aplicando la metodología explicada es posible observar que en donde existen discontinuidades, las partículas magnéticas se acomodarán sin seguir el patrón del campo magnético, es decir, las partículas romperán las líneas de flujo, indicando la presencia de fisuras internas o externas en el material.

Precauciones:

- Evitar que el líquido penetrante y las partículas magnéticas tengan contacto con los ojos.

## RESULTADOS

**Parte 1. Prueba de  Inspección Visual y Líquidos Penetrantes.**

El alumno observará las posibles discontinuidades (grietas, fisuras, huecos y poros) que tengan las piezas en estudio. Obtener y colocar imágenes fotográficas para documentar las discontinuidades.

**Parte 2. Prueba de Partículas Magnéticas.**

El alumno observará las posibles discontinuidades (grietas, fisuras, huecos y poros) que tengan las piezas en estudio. Obtener y colocar imágenes fotográficas para documentar las discontinuidades.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con base en las imágenes obtenidas se puede discutir sobre las posibles causas de la falla y si además se conoce la historia previa de la pieza, se llegará a una mejor comprensión de la falla del material. Tomando en cuenta las características observadas en las pruebas no destructivas de líquidos penetrantes y partículas magnéticas contestar las siguientes preguntas:

1. Investigar qué tipo de fallas pueden presentarse en la superficie y en el interior de un metal. A partir de ello, determinar cuáles se presentan en el estudio de ensayos no destructivos realizados.
2. Indicar cuántas de las muestras presentaron las siguientes características:
   Un círculo _____

   Una línea _____

   Una discontinuidad en el patrón de campo magnético _____

   Algo diferente a un círculo, una línea o un patrón magnético _____
3. ¿Cuál es la cantidad de defectos presentados en la pieza de estudio?
4. Dependiendo de la cantidad de defectos, cómo se considera que afecta a las propiedades del metal.

5. Si se encontró algo diferente a un círculo, una línea o un patrón magnético en alguna de las muestras, ¿a qué se debió? Describir lo sucedido.

## CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

Con base en los resultados y al análisis realizado, el alumno deberá elaborar las conclusiones correspondientes.

## CUESTIONARIO PREVIO

1. Definir lo qué es un ensayo no destructivo.
2. ¿Cuál es la finalidad de realizar un ensayo no destructivo?
3. ¿Qué se puede detectar al aplicar un ensayo no destructivo?
4. Investigar en qué consiste el ensayo no destructivo de inspección visual.
5. ¿En qué consiste el ensayo no destructivo de líquidos penetrantes?
6. Describir brevemente el ensayo no destructivo de partículas magnéticas.
7. Investigar el método radiográfico que se emplea como ensayo no destructivo.
8. ¿En qué consiste el ensayo no destructivo de ultrasonido?

## BIBLIOGRAFÍA


- Pazos, Peinado Norma, *Tecnología de los Metales y Procesos de Manufactura*, Publicaciones UCAB, Venezuela, 2006.
- Morral, F. R. y Jimeno E., Molera, P., *Metalurgia General*, Editorial Reverté, España, 2008.
- Bilurbina, A. Luis e Iribarren L. J.I., *Diseño de equipos e instalaciones*, Ediciones UPC, España, 2002.
- Asociación Española de Ensayos No Destructivos, *Ensayos No Destructivos*, Fundación Confemetal, España, 2002.