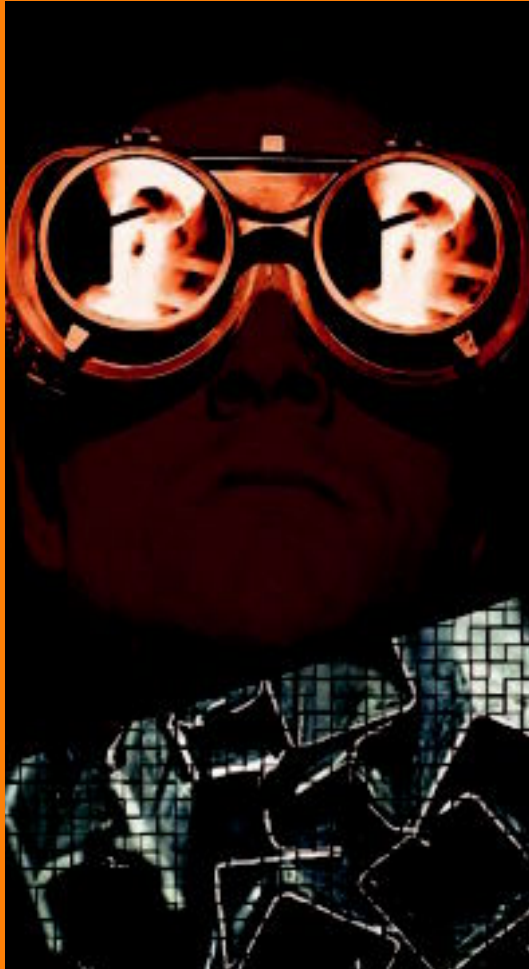


**Educación
técnico-profesional**

Fundamentos y ensayos en materiales metálicos



**Serie:
Desarrollo de contenidos**

Materiales

Serie: Desarrollo de contenidos

Colección: Materiales

Fundamentos y ensayos en materiales metálicos

Diego Hernán Ruiz

Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.

a u t o r i d a d e s

PRESIDENTE DE LA NACIÓN

Dr. Néstor Kirchner

MINISTRO DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Lic. Daniel Filmus

DIRECTORA EJECUTIVA DEL INSTITUTO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

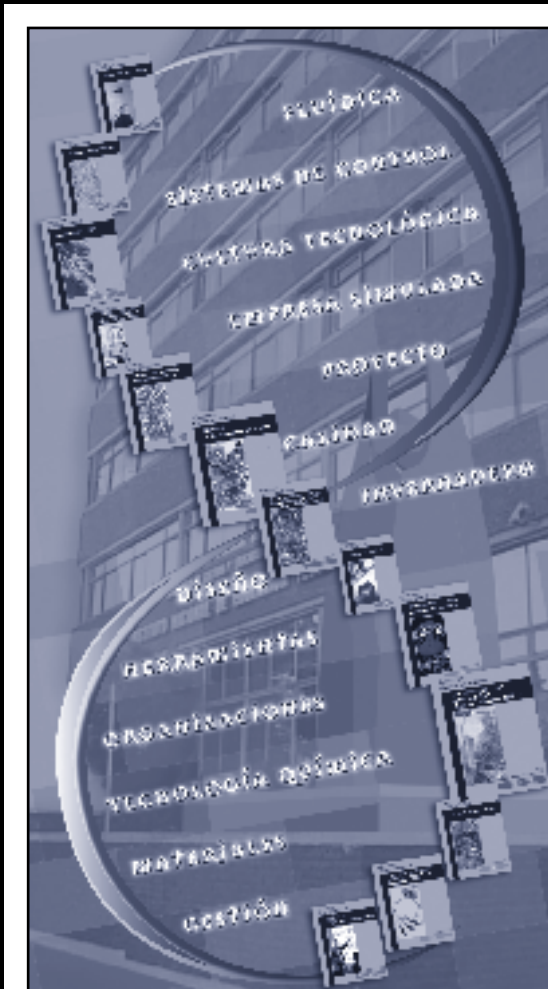
Lic. María Rosa Almandoz

DIRECTOR NACIONAL DEL CENTRO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum



Fundamentos y ensayos en materiales metálicos



Serie:
Desarrollo de
contenidos

Serie "Desarrollo de contenidos".
Colección "Materiales"

Distribución de carácter gratuito.

Queda hecho el depósito que previene la ley n° 11.723. ©
Todos los derechos reservados por el Ministerio de
Educación, Ciencia y Tecnología - Instituto Nacional de
Educación Tecnológica.

La reproducción total o parcial, en forma idéntica o modifi-
cada por cualquier medio mecánico o electrónico incluyendo
fotocopia, grabación o cualquier sistema de almacenamiento
y recuperación de información no autorizada en forma expresa
por el editor, viola derechos reservados.

Industria Argentina.

ISBN 950-00-0547-6

Dirección del Programa:
Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinación general:
Haydeé Noceti

Diseño didáctico:
Ana Rúa

Administración:
Adriana Perrone

Diseño gráfico:
Tomás Ahumada
Sebastián Kirschenbaum
Carolina Macedra

Diseño de tapa:
Tomás Ahumada

Con la colaboración
del equipo de profesionales
del Centro Nacional
de Educación Tecnológica

Todos los libros están
disponibles en la página
web del INET.
www.inet.edu.ar

Ruiz, Diego Hernán
Fundamentos y ensayos en materiales metálicos,
coordinado por Juan Manuel Kirschenbaum.
- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y
Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación
Tecnológica, 2006.
88 p.; 22x17 cm. (Desarrollo de contenidos; 8)

ISBN 950-00-0547-6

I. Materiales Metálicos. I
I. Kirschenbaum, Juan Manuel, coord. II. Título

CDD 620.16

Fecha de catalogación: 3/01/2006

Impreso en MDC MACHINE S. A., Marcelo T. de Alvear 4346
(B1702CFZ), Ciudadela, en setiembre 2006

Tirada de esta edición: 2.000 ejemplares

Índice



Las metas, los programas y las líneas de acción del Instituto Nacional de Educación Tecnológica — 6

Las acciones del Centro Nacional de Educación Tecnológica — 7

1 Los materiales — 8

2 La estructura del átomo — 11

3 Estructuras cristalinas y defectos — 13

- El enlace metálico
- El ordenamiento atómico
- Isotropía y anisotropía
- Defectos en las estructuras cristalinas
- Difusión

4 Diagramas de fase — 22

- Diagramas binarios de solubilidad total al estado sólido

- Diagramas binarios de solubilidad parcial al estado sólido
- Diagramas binarios de insolubilidad total al estado sólido
- Diagramas binarios eutéctoides
- Diagramas binarios peritéticos
- Diagramas binarios complejos

5 Ensayos de materiales — 30

- Ensayo de tracción
- Ensayo de compresión
- Ensayo de flexión
- Ensayo de impacto o choque
- Ensayo de dureza
- Ensayo de fatiga
- Ensayo de termofluencia
- Ensayo de doblado o plegado
- Ensayo de embutido
- Ensayos no destructivos

Bibliografía — 88



Diego Hernán Ruiz

Electrotécnico (Instituto Dr. Juan Segundo Fernández), Ingeniero mecánico (Universidad Tecnológica Nacional. Regional Buenos Aires), Magíster en Ciencia y Tecnología de materiales (Instituto Jorge Sabato. Universidad Nacional de San Martín –USAM–. Comisión Nacional de Energía Atómica –CNEA–); se desempeña como ingeniero de calidad y producción en la industria metalmeccánica y como docente universitario (UTN. Regional Buenos Aires).

Este libro
fue desarrollado
por:

LAS METAS, LOS PROGRAMAS Y LAS LÍNEAS DE ACCIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

El Instituto Nacional de Educación Tecnológica -INET- enmarca sus líneas de acción, programas y proyectos, en las metas de:

- Coordinar y promover programas nacionales y federales orientados a fortalecer la educación técnico-profesional, articulados con los distintos niveles y ciclos del sistema educativo nacional.
- Implementar estrategias y acciones de cooperación entre distintas entidades, instituciones y organismos –gubernamentales y no gubernamentales-, que permitan el consenso en torno a las políticas, los lineamientos y el desarrollo de las ofertas educativas, cuyos resultados sean considerados en el Consejo Nacional de Educación-Trabajo –CoNE-T- y en el Consejo Federal de Cultura y Educación.
- Desarrollar estrategias y acciones destinadas a vincular y a articular las áreas de educación técnico-profesional con los sectores del trabajo y la producción, a escala local, regional e interregional.
- Diseñar y ejecutar un plan de asistencia técnica a las jurisdicciones en los aspectos institucionales, pedagógicos, organizativos y de gestión, relativos a la educación técnico-profesional, en el marco de los acuerdos y resoluciones establecidos por el Consejo Federal de Cultura y Educación.
- Diseñar y desarrollar un plan anual de capacitación, con modalidades presenciales, semipresenciales y a distancia, con sede en el Centro Nacional de Educación Tecnológica, y con nodos en los Centros Regionales de Educación Tecnológica y las Unidades de Cultura Tecnológica.
- Coordinar y promover programas de asistencia económica e incentivos fiscales destinados a la actualización y el desarrollo de la educación técnico-profesional; en particular, ejecutar las acciones relativas a la adjudicación y el control de la asignación del Crédito Fiscal –Ley N° 22.317-.
- Desarrollar mecanismos de cooperación internacional y acciones relativas a diferentes procesos de integración educativa; en particular, los relacionados con los países del MERCOSUR, en lo referente a la educación técnico-profesional.

Estas metas se despliegan en distintos programas y líneas de acción de responsabilidad de nuestra institución, para el período 2003-2007:

Programa 1. Formación técnica, media y superior no universitaria:

- 1.1. Homologación y validez nacional de títulos.
- 1.2. Registro nacional de instituciones de formación técnica.
- 1.3. Espacios de concertación.
- 1.4. Perfiles profesionales y ofertas formativas.
- 1.5. Fortalecimiento de la gestión institucional; equipamiento de talleres y laboratorios.
- 1.6. Prácticas productivas profesionalizantes: Aprender emprendiendo.

Programa 2. Crédito fiscal:

- 2.1. Difusión y asistencia técnica.
- 2.2. Aplicación del régimen.
- 2.3. Evaluación y auditoría.

Programa 3. Formación profesional para el desarrollo local:

- 3.1. Articulación con las provincias.
- 3.2. Diseño curricular e institucional.
- 3.3. Información, evaluación y certificación.

Programa 4. Educación para el trabajo y la integración social.

Programa 5. Mejoramiento de la enseñanza y del aprendizaje de la Tecnología y de la Ciencia:

- 5.1. Formación continua.
- 5.2. Desarrollo de recursos didácticos.

Programa 6. Desarrollo de sistemas de información y comunicaciones:

- 6.1. Desarrollo de sistemas y redes.
- 6.2. Interactividad de centros.

Programa 7. Secretaría ejecutiva del Consejo Nacional de Educación Trabajo –CoNE-T-.

Programa 8. Cooperación internacional.

Los libros que, en esta ocasión, estamos acercando a la comunidad educativa, se enmarcan en el Programa 5 del INET; han sido elaborados por especialistas del Centro Nacional de Educación Tecnológica del INET y por especialistas convocados a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo –PNUD- desde su línea “Conocimientos científico-tecnológicos para el desarrollo de equipos e instrumentos”, a quienes esta Dirección expresa su profundo reconocimiento por la tarea encarada.

María Rosa Almandoz

Directora Ejecutiva

del Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología

LAS ACCIONES DEL CENTRO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Desde el Centro Nacional de Educación Tecnológica –CeNET– encaramos el diseño, el desarrollo y la implementación de proyectos innovadores para la enseñanza y el aprendizaje en educación técnico-profesional.

El CeNET, así:

- Es un ámbito de desarrollo y evaluación de metodología didáctica, y de actualización de contenidos de la tecnología y de sus sustentos científicos.
- Capacita en el uso de tecnología a docentes, profesionales, técnicos, estudiantes y otras personas de la comunidad.
- Brinda asistencia técnica a autoridades educativas jurisdiccionales y a educadores.
- Articula recursos asociativos, integrando a los actores sociales involucrados con la Educación Tecnológica.

Desde el CeNET venimos trabajando en distintas líneas de acción que convergen en el objetivo de reunir a profesores, a especialistas en Educación Tecnológica y a representantes de la industria y de la empresa, en acciones compartidas que permitan que la educación técnico-profesional se desarrolle en la escuela de un modo sistemático, enriquecedor, profundo... auténticamente formativo, tanto para los alumnos como para los docentes.

Una de nuestras líneas de acción es la de diseñar y llevar adelante un sistema de capacitación continua para profesores de educación técnico-profesional, implementando trayectos de actualización. En el CeNET contamos con quince unidades de gestión de aprendizaje en las que se desarrollan cursos, talleres, pasantías, conferencias, encuentros, destinados a cada educador que desee integrarse en ellos presencialmente o a distancia.

Otra de nuestras líneas de trabajo asume la responsabilidad de generar y participar en redes que vinculan al Centro con organismos e instituciones educativas ocupados en la educación técnico-profesional, y con organismos, instituciones y empresas dedicados a la tecnología en general. Entre estas redes, se encuentra la Red Huitral, que conecta a CeNET con los Centros Regionales de Educación Tecnológica -CeRET- y con las Unidades de Cultura Tecnológica -UCT- instalados en todo el país.

También nos ocupa la tarea de producir materiales de capacitación docente. Desde CeNET hemos desarrolla-

do distintas series de publicaciones –todas ellas disponibles en el espacio web www.inet.edu.ar–:

- *Educación Tecnológica*, que abarca materiales que posibilitan una definición curricular del área de la Tecnología en el ámbito escolar y que incluye marcos teóricos generales, de referencia, acerca del área en su conjunto y de sus contenidos, enfoques, procedimientos y estrategias didácticas más generales.
- *Desarrollo de contenidos*, nuestra segunda serie de publicaciones, que nuclea fascículos de capacitación en los que se profundiza en los campos de problemas y de contenidos de las distintas áreas del conocimiento tecnológico, y que recopila, también, experiencias de capacitación docente desarrolladas en cada una de estas áreas.
- *Educación con tecnologías*, que propicia el uso de tecnologías de la información y de la comunicación como recursos didácticos, en las clases de todas las áreas y espacios curriculares.
- *Educadores en Tecnología*, serie de publicaciones que focaliza el análisis y las propuestas en uno de los constituyentes del proceso didáctico: el profesional que enseña Tecnología, ahondando en los rasgos de su formación, de sus prácticas, de sus procesos de capacitación, de su vinculación con los lineamientos curriculares y con las políticas educativas, de interactividad con sus alumnos, y con sus propios saberes y modos de hacer.
- *Documentos de la escuela técnica*, que difunde los marcos normativos y curriculares que desde el CONET –Consejo Nacional de Educación Técnica- delinearón la educación técnica de nuestro país, entre 1959 y 1995.
- *Ciencias para la Educación Tecnológica*, que presenta contenidos científicos asociados con los distintos campos de la tecnología, los que aportan marcos conceptuales que permiten explicar y fundamentar los problemas de nuestra área.
- *Recursos didácticos*, que presenta contenidos tecnológicos y científicos, estrategias –curriculares, didácticas y referidas a procedimientos de construcción– que permiten al profesor de la educación técnico-profesional desarrollar, con sus alumnos, un equipamiento específico para integrar en sus clases.

Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional
del Centro Nacional de Educación Tecnológica.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica

1. LOS MATERIALES

El objetivo del presente módulo, es caracterizar los materiales metálicos disponibles para aplicaciones industriales. Porque, el conocimiento de estas características es de fundamental importancia para realizar su correcta selección y uso.

Antes de comenzar con el estudio de los metales en particular, le proponemos clasificar los materiales disponibles para el hombre. Una clasificación muy común resulta la de dividir a los materiales en:

- Materiales metálicos.
- Materiales cerámicos.
- Materiales poliméricos.
- Materiales compuestos.
- Materiales semiconductores.

Haremos a continuación una breve descripción de cada grupo.

Los **materiales metálicos**, tales como hierro, aluminio, titanio y cobre, entre otros, pueden utilizarse puros o, más generalmente, aleados (aceros, bronce, latones) lo que mejora una o varias propiedades deseables en el uso. La alta conductividad térmica y eléctrica es una característica de los metales. Su resistencia tiene un amplio rango; puede ser pequeña –como en el caso del plomo– o muy alta –como en el caso de aceros de alta resistencia–. Muchos materiales metálicos son dúctiles, lo que

significa que pueden tener grandes deformaciones antes de llegar a la rotura. La ductilidad es una propiedad útil –por ejemplo, en la fabricación de piletas de cocina o partes de carrocería de automóviles–.

Dentro de los **materiales cerámicos**, se encuentran los vidrios, la porcelana, los abrasivos, los refractarios, los cementos, la cerámica roja (ladrillos, tejas) y la cerámica blanca (vajilla, revestimientos, sanitarios). Estos materiales tienen altas resistencias y altas temperaturas de fusión. Las conductividades térmica y eléctrica son bajas. La fragilidad es el principal inconveniente de los materiales cerámicos. Algunos ejemplos de materiales cerámicos son la alúmina (Al_2O_3), el carburo de silicio (SiC), el nitruro de silicio (Si_3N_4) y la sílice (SiO_2). Importantes aplicaciones de este grupo son los aisladores, capacitores, sensores, detectores, herramientas de corte y pulido, y porcelanas dentales.

Los **materiales poliméricos**, también denominados plásticos debido a su gran facilidad de moldeo, se caracterizan porque, en general, tienen baja conductividad térmica y eléctrica. Su resistencia y su temperatura de fusión son bajas, lo que implica que no pueden aplicarse a componentes que trabajen a alta

Definimos con precisión estos conceptos clave en el título "Ensayos de materiales".

temperatura. Los polímeros están constituidos por moléculas largas, las que se forman a partir de la unión de moléculas orgánicas individuales. Existen tres categorías de materiales poliméricos: termoplásticos, termorrígidos y elastómeros; algunos ejemplos de termoplásticos son el polipropileno, el polietileno, el cloruro de polivinilo (PVC), el poliestireno, el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), las resinas acetálicas y las poliamidas (nylon); ejemplos de termorrígidos son las resinas fenólicas, las resinas epoxi, el poliéster y las aminorresinas (resinas urea-formaldehído). Entre los elastómeros se encuentran el poliisopreno, el polibutadieno, el butadieno-estireno (caucho SBR), las siliconas y el policloropreno (neopreno).

Se denominan **materiales compuestos** a la unión de dos o más materiales con la finalidad de obtener propiedades superiores a las de los materiales individuales de origen. Existen materiales compuestos naturales y, también, artificiales; entre los primeros se destacan la madera, formada a partir de fibras

de celulosa y matriz de lignina; entre los segundos tenemos a los plásticos (que son la matriz) reforzados con fibra de vidrio o con fibra de carbono. Los materiales compuestos tienen aplicaciones en la industria automotriz, aeronáutica, naval y en muchas otras.

Los **materiales semiconductores** se destacan por tener una conductividad eléctrica intermedia. Es decir, que no son buenos conductores ni buenos aisladores. El silicio (Si) y el germanio (Ge) son los elementos semiconductores más usuales y, como tales, se encuentran en la tabla periódica en el límite entre los elementos metálicos y los no metálicos. Controlando las impurezas en estos elementos, pueden variarse sus propiedades de conducción eléctrica. Estos materiales tienen gran importancia en la industria electrónica moderna, en la fabricación de componentes electrónicos como diodos, transistores y circuitos integrados. Además, existen compuestos semiconductores, como por ejemplo, el arseniuro de galio (GaAs).



Actividades para el aula 1

Respecto de esta primera clasificación de los materiales, le sugerimos estos interrogantes, para discutir en clase con sus alumnos:

- ¿De qué material se construían, alrededor de 1970, los blocks de motor de automóviles? ¿De qué material se construyen, actualmente? Expliquemos los principales motivos del cambio.
- ¿Con qué material se construían en los '70 los paragolpes de los automóviles? ¿De qué material se construyen, actualmente? Expliquemos los motivos del cambio.
- ¿Con qué material se construye la estructura de los aviones (fuselaje, alas, etc.)? ¿Por qué no se usa acero?





• ¿Qué ventajas tiene el aluminio sobre el acero en la fabricación de marcos de puertas y ventanas que son utilizados en ambientes externos? ¿Cuál es el costo de ambos materiales?

- Los materiales de los neumáticos de automóviles, ¿son materiales compuestos? ¿Por qué?
- Los revestimientos (vainas) de conductores eléctricos, deben ser aislantes eléctricos y se construyen con mate-

riales poliméricos. Los materiales cerámicos también son aislantes y, sin embargo, no se usan para aislar los conductores. ¿Por qué?

- Hagamos una lista de cinco productos contruidos con materiales compuestos.
- Antiguamente, los tapones de las bebidas eran de corcho; hoy, la tendencia es ir reemplazándolos por plástico. ¿Por qué?



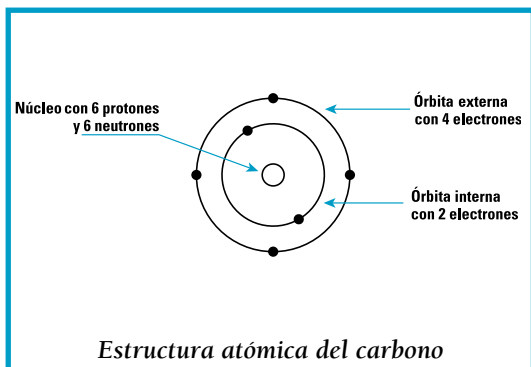
2. LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

Es importante conocer la estructura atómica, a fin de comprender la descripción de los distintos tipos de enlace atómico existentes en los materiales.

Quien, después de numerosas investigaciones, propone un modelo de átomo es Ernest Rutherford. Más tarde, este modelo es modificado por Niels Bohr. El modelo atómico resultante, conocido como modelo de Rutherford-Bohr, considera al átomo formado por un núcleo central, que es muy pequeño en relación con el tamaño total del átomo pero que concentra casi toda su masa.

Dentro del núcleo se encuentran los protones, que son partículas cargadas positivamente y cuya masa es muy pequeña.

En el interior del núcleo también se hallan los neutrones, partículas sin carga eléctrica y cuya masa es, aproximadamente, igual a la del protón. Cada protón o neutrón tiene una masa aproximada de $1.66 \cdot 10^{-24}$ gramos.



A gran distancia del núcleo, giran en órbitas los electrones, que tienen carga negativa.

El número de electrones es igual al número de protones, de tal forma que el átomo, en su conjunto, es eléctricamente neutro.

La masa del electrón es, aproximadamente, 1840 veces más pequeña que la masa del protón.

En el modelo de Rutherford-Bohr, cada capa u órbita en la que giran los electrones, tiene su determinado nivel de energía; por este motivo, cada órbita también se llama nivel de energía. Cada nivel de energía se designa por la letra n (n se llama, también, número cuántico principal). Así, tenemos $n = 1, 2, 3 \dots$. A cada capa n se le asigna una letra mayúscula, según la siguiente clave:

Valor de n	1	2	3	...
Letra	K	L	M	...

Los electrones giran alrededor del núcleo únicamente en los niveles de energía mencionados, ya que no existen niveles energéticos intermedios.

Una característica de los elementos de la tabla periódica es su número atómico. Dicha cantidad se define como el número de protones en el núcleo. Como el número de protones coincide con el número de electrones, se verifica:

Número atómico = Número de protones = Número de electrones

Por otra parte, la masa atómica –también llamada peso atómico– se define como:

Masa atómica = Número de protones + Número de neutrones

La masa atómica de un elemento, es la masa de un mol de átomos de ese elemento; o sea, la masa de $6,02^{23}$ átomos de ese elemento.

Por otra parte, todo átomo al cual le sobran o faltan electrones, se denomina ión. Un ión negativo (por tener electrones en exceso) se llama anión; un ión positivo (por tener defecto de electrones) se llama catión.

Sus alumnos pueden preguntarse por qué es importante conocer la estructura del átomo.

La respuesta es que la estructura atómica determina cómo los átomos de los distintos elementos de la tabla periódica se pueden unir entre sí. Y, los distintos tipos de uniones permiten clasificar a los materiales en grupos (metales, polímeros, cerámicos, semiconductores); además, el conocimiento de la forma en que se unen los átomos posibilita comprender las propiedades de los distintos grupos de materiales.

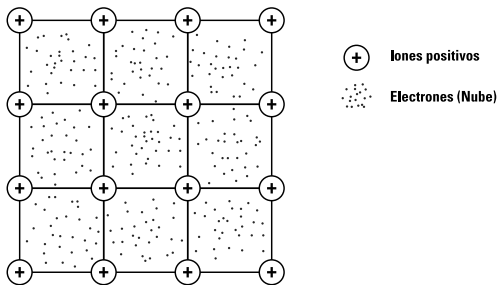
Esta capacitación trata sobre materiales metálicos y, por lo tanto, estudiamos la unión metálica, en particular.

3. ESTRUCTURAS CRISTALINAS Y DEFECTOS

El enlace metálico

Los metales tienden a ceder fácilmente electrones; es decir, tienden a formar iones positivos. En otras palabras: Los metales son electropositivos.

En el estado sólido, los metales ceden sus electrones de valencia, los cuales pasan a formar una nube de electrones. La estructura resultante consiste en cuerpos centrales atómicos cargados positivamente (iones positivos) que oscilan alrededor de posiciones fijas, rodeados de una nube electrónica.

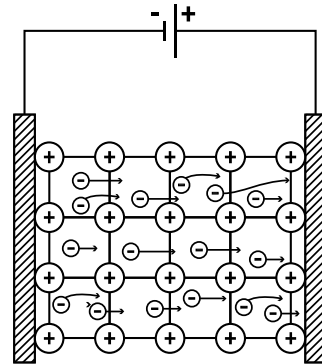


El enlace metálico

En resumen, podemos imaginar a la unión metálica como una red de iones positivos (formados por los núcleos atómicos y los electrones que se mantienen unidos a él) entre los cuales circulan electrones libres o de valencia. La nube electrónica (cargada negativamente) actúa como material ligante y, así, se mantiene la estructura.

La libertad de movimiento de los electrones que forman la nube electrónica permite

explicar la buena conductibilidad eléctrica de los metales. Cuando se aplica una tensión eléctrica a un metal, la nube electrónica puede moverse fácilmente y, de este modo, se conduce la corriente eléctrica.



Conductividad eléctrica

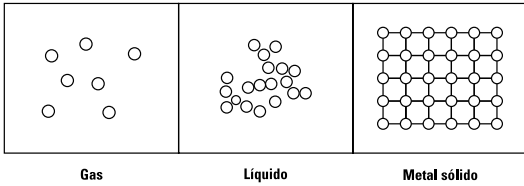
El enlace metálico es característico de los materiales del mismo tipo. Sin embargo existen, por ejemplo, ciertos compuestos formados a partir de dos o más metales, denominados **compuestos intermetálicos**, que están enlazados a través de enlaces metálicos e iónicos¹ en forma conjunta. En otras palabras: Existen materiales metálicos que están formados a partir de enlaces mixtos. Sin embargo, vamos a considerar como hipótesis de trabajo que los materiales metálicos están ligados únicamente a través de enlaces metálicos.

¹ Iremos explicándole los otros tipos de enlace en los próximos materiales de capacitación de esta serie.

El ordenamiento atómico

En los materiales metálicos en estado sólido, los átomos se ordenan según distintos tipos de arreglos; los átomos presentan un ordenamiento espacial regular y repetido, ubicándose en los puntos (también llamados nodos) de una red. El ordenamiento regular y repetido se denomina **estructura cristalina**.

A cada punto de esa red le corresponden uno o varios átomos, dependiendo de la complejidad del material.



Existen 14 tipos de celdas unitarias, que constituyen 7 sistemas cristalinos. Las celdas unitarias, al constituir la menor subdivisión de una estructura cristalina, conservan las características generales de toda la red.

Por simple traslación de la celda unitaria, puede construirse el sólido cristalino completo.



En una celda unitaria, se denominan parámetros de red a las longitudes de las aristas y a los ángulos entre aristas.

Características de los sistemas cristalinos		
Sistema cristalino	Longitud de aristas	Ángulos entre aristas
Cúbico	$L_1 = L_2 = L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Tetragonal	$L_1 = L_2 \neq L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Ortorrómbico	$L_1 \neq L_2 \neq L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$
Hexagonal	$L_1 = L_2 \neq L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ ; \alpha_3 = 120^\circ$
Romboédrico	$L_1 = L_2 = L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \neq 90^\circ$
Monoclínico	$L_1 \neq L_2 \neq L_3$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ ; \alpha_3 \neq 90^\circ$
Triclínico	$L_1 \neq L_2 \neq L_3$	$\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq 90^\circ$



Actividades para el aula 2

Es interesante que sus alumnos, en pequeños grupos:

- Elijan un metal de la tabla periódica y construyan, mediante esferas de madera y conectores, la celda unitaria correspondiente.

- Investiguen los procesos de obtención del metal elegido, sus principales características físicas y mecánicas, y, también, sus aplicaciones más importantes. Le recomendamos que incentive la investigación bibliográfica y no sólo a través de Internet; esta última debe ser una herramienta más de búsqueda, pero no la única.



Isotropía y anisotropía

Observando cada celda unitaria, vemos que la disposición de los átomos varía según las distintas direcciones. Esto genera que una celda unitaria tenga diferentes propiedades mecánicas en distintas direcciones.

Esta variación en la disposición atómica en función de la dirección, origina los conceptos de isotropía y anisotropía.

- Un material es **isotrópico** cuando sus propiedades son iguales en todas las direcciones.
- Un material es **anisotrópico** cuando las propiedades varían según la dirección.

Como ejemplo, diremos que de acuerdo a lo explicado más arriba, se deduce que una

celda unitaria es anisotrópica; pero, si consideramos muchas celdas unitarias unidas en forma azarosa, el conjunto se comporta isotrópicamente.

Otro ejemplo de anisotropía son los metales laminados. En ellos, los cristales se alargan en la dirección de laminación; resulta así un material anisotrópico, ya que las propiedades mecánicas no son iguales en dirección paralela y perpendicular a la de laminación.

La madera es otro ejemplo de material anisotrópico; se comprueba fácilmente que la resistencia mecánica en dirección paralela a las fibras es mayor que en dirección perpendicular a éstas.

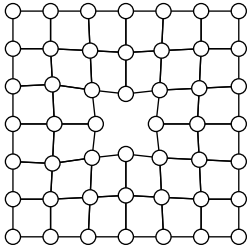
Defectos en las estructuras cristalinas

Las estructuras cristalinas reales no son perfectas sino que contienen defectos, los cuales ejercen gran influencia en el comportamiento de los materiales.



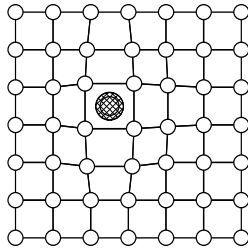
Los **defectos puntuales** son:

Vacancia. Falta de un átomo en un sitio de la red que debería estar ocupado.

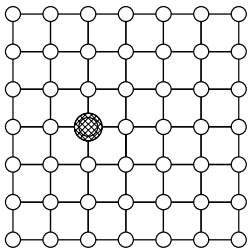


Intersticial. Existe un átomo en un sitio de la red, que debería estar vacío.

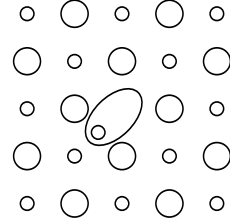
Como ejemplo, diremos que, en los aceros, el carbono entra en forma intersticial en la red cristalina del hierro.



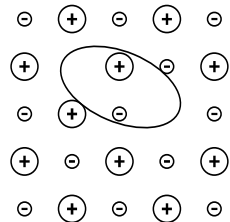
Sustitucional. Un átomo de un elemento ocupa un sitio de la red que debería estar ocupado por un átomo de otro elemento.



Defecto Frenkel. Es un defecto formado, conjuntamente, por una vacancia y por un intersticial. Un ión se moviliza a un lugar intersticial, quedando una vacancia en el sitio original.



Defecto Schottky. Está formado por un par de vacancias de iones de carga opuesta. Este defecto es propio de materiales cerámicos.

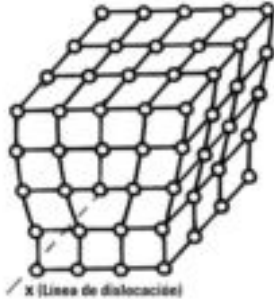


Los defectos puntuales modifican la estructura cristalina circundante, generando obstáculos para el movimiento de dislocaciones; de esta forma, los defectos puntuales aumentan la resistencia del metal.

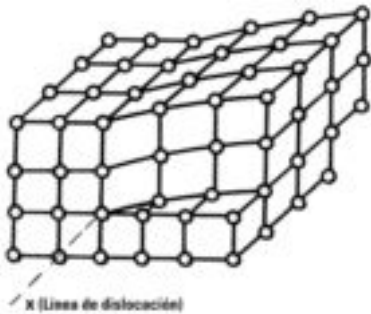
Las vacancias, los átomos intersticiales y sustitucionales intervienen en los procesos difusivos en metales; a su vez, los procesos difusivos tienen muchísimas aplicaciones prácticas, como vamos a ir presentando más adelante.

Consideremos, ahora, un segundo grupo, el de los **defectos lineales**.

Dislocación de borde. Se genera debido a la existencia de un semiplano adicional de átomos. La línea inferior del semiplano agregado, es la dislocación de borde. El cristal está deformado en la zona cercana a la dislocación.



Dislocación de tornillo. Si en un cristal perfecto efectuamos un corte parcial y desplazamos una porción del cristal respecto de la otra, se obtiene una dislocación de tornillo. Así, se forma una rampa en forma de hélice; la dislocación es el eje x.



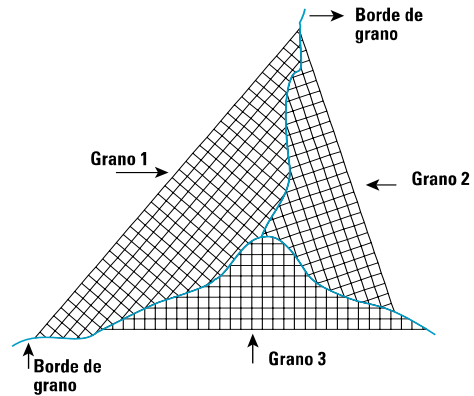
Dislocación mixta. Es una combinación de la dislocación de borde y la de tornillo.

Identifiquemos, ahora, **defectos superficiales**.

Superficie del material. Las superficies exteriores son zonas en donde el ordenamiento

atómico está modificado. La superficie contiene, además, pequeñas fisuras y puede ser atacada más fácilmente por elementos reactivos.

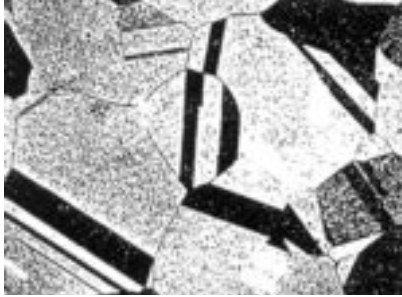
Bordes de grano. Definimos como grano a una parte del material que tiene celdas unitarias con la misma orientación. El defecto conocido como “borde de grano” es la superficie que limita los distintos granos. En los bordes de grano, no se conservan los parámetros de red correspondientes y, por lo tanto, constituye una zona de desorden.



El tamaño de los granos influye en la resistencia del material; A menor tamaño de grano, el material es más resistente; esto se debe a que los límites de grano son obstáculos para el movimiento de las dislocaciones. Con granos pequeños, las dislocaciones pueden moverse poca distancia antes de alcanzar el borde de grano y la resistencia del material aumenta.

Apilamiento. Se genera debido a un mal ordenamiento de los planos atómicos. Por ejemplo, una estructura cúbica centrada en las caras, se obtiene mediante el apilamiento ABCABCABC de esferas; pero, puede suceder el apilamiento ABCACABCABC, en el que aparece un plano C donde debería existir un plano B; esto es un defecto de apilamiento.

Macla. Es un sector, dentro de un grano que tiene una orientación levemente diferente respecto del grano mismo. Las maclas pueden formarse durante el crecimiento del cristal; pero, también pueden aparecer por deformación o por tratamientos térmicos.



Maclas en granos metálicos

En tecnología de los materiales resulta imprescindible considerar las consecuencias de la existencia de defectos; porque éstos, ya sean puntuales, lineales o superficiales, alteran el ordenamiento en la estructura cristalina.

Las dislocaciones se crean al iniciarse la formación del cristal (durante la solidificación) y, también, se generan a través de las deformaciones permanentes o plásticas, aplicadas en el trabajado mecánico. El estudio completo de las dislocaciones es complejo pero imprescindible; porque, muchas de las propiedades mecánicas de los materiales –como son los módulos elásticos, las deformaciones plásticas, el endurecimiento con elementos aleantes y tratamientos térmicos, y las propiedades de endurecimiento por trabajado– dependen del movimiento de dislocaciones, de la interacción entre dislocaciones, y de la interacción entre dislocaciones con los defectos puntuales y superficiales. Por otra parte, los defectos puntuales, lineales y superficiales, dificultan la movilidad de los

electrones y, por tanto, aumentan la resistencia eléctrica del metal.

Los cristales serían mucho más resistentes si no existieran las dislocaciones. Al deformar un material, las dislocaciones se mueven. Entonces, todo aquello que impide el movimiento de las dislocaciones, contribuye a aumentar la resistencia del material.

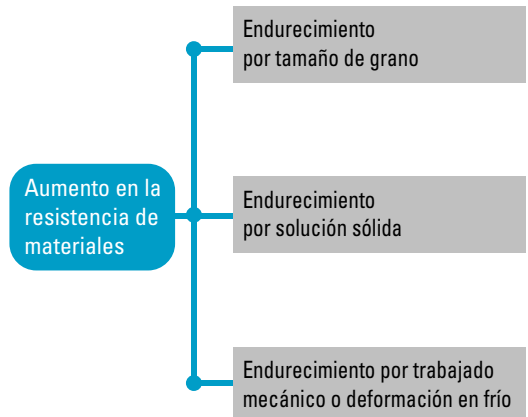


Movimiento de una dislocación de borde



Movimiento de una dislocación de tornillo

Surgen, entonces, distintas posibilidades para aumentar la resistencia de los materiales.



Endurecimiento por tamaño de grano. Los bordes de grano son obstáculos para el movimiento de dislocaciones, ya que son zonas que presentan desorden en la estructura. Por consiguiente, como mencionábamos, al reducir el tamaño de grano de un material, se incrementa la resistencia de éste.

Endurecimiento por solución sólida. Los átomos extraños (intersticiales o sustitucionales) son obstáculos para el movimiento de

las dislocaciones. Ésta es la base conceptual del endurecimiento por solución sólida.

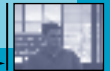
Endurecimiento por trabajado mecánico o deformación en frío. Las deformaciones en frío generan dislocaciones; luego de una deformación en frío, el número de dislocaciones ha aumentado. Una característica del trabajo en frío, es que el metal se hace más difícil de deformar (y más frágil) a medida que progresa la deformación; la razón es que una dislocación obstaculiza el movimiento de otra dislocación.



Actividades para el aula 3

Los metales pueden trabajarse en caliente o en frío. Le proponemos analizar las siguientes cuestiones con su grupo de alumnos:

- Se logra una pieza con mejor precisión dimensional, ¿trabajando en frío o en caliente? ¿Por qué?
- Queda más tensionado y frágil un metal trabajado, ¿en frío o en caliente? ¿Por qué?
- La terminación superficial es mejor, ¿trabajando en frío o en caliente? ¿Por qué?
- ¿Cuándo se requiere mayor energía mecánica para deformar un metal? ¿Trabajando en frío o en caliente? ¿Por qué?



Difusión

La difusión es una herramienta para la investigación de la estructura de los metales y los defectos de estructuras cristalinas, entre otras cosas. Veamos de qué se trata...

Si llenamos con cuidado un recipiente con dos líquidos miscibles de diferente densidad, vamos a observar que la superficie de separación –nítida, al comienzo

del experimento– desaparece con el paso del tiempo. Finalmente, todo el líquido es homogéneo.

Este fenómeno tiene lugar, aún cuando no exista agitación; es muy lento, se denomina difusión y consiste en que el sistema tiende a nivelar las concentraciones en forma espontánea.

En forma genérica, se denomina **difusión** al proceso de nivelación exacto de la concentración (En forma rigurosa, esto no es exacto, ya que la verdadera razón que origina el movimiento de las partículas durante la difusión no es la diferencia de concentraciones sino la diferencia de potenciales químicos).

La difusión también ocurre en los cuerpos sólidos; pero, es más lenta que en los líquidos y más aún que en los gases.

La difusión es un proceso que se realiza gracias al desplazamiento a escala atómica de diferentes partículas, como ser moléculas, iones y átomos; es muy común en materiales sólidos, ya que se produce en metales puros, aleaciones, óxidos, compuestos intermetálicos, dieléctricos y semiconductores, desempeñando un papel importante en las transformaciones de fase, en la generación de soluciones sólidas y en la aglutinación de materiales en polvo.

El primer experimento científico para estudiar la difusión en un cuerpo sólido es realizado en 1896 por el metalurgista inglés Robert Austen: Soldó un disco fino de oro a un cilindro de plomo y colocó ese “par difusivo”, en un horno a 200 °C durante 10 días. Finalmente, observó que el oro y el plomo se interpenetraban mutuamente.

En el mecanismo de intercambio simple, dos átomos vecinos intercambian sus lugares; la probabilidad de que ocurra este proceso es relativamente pequeña.

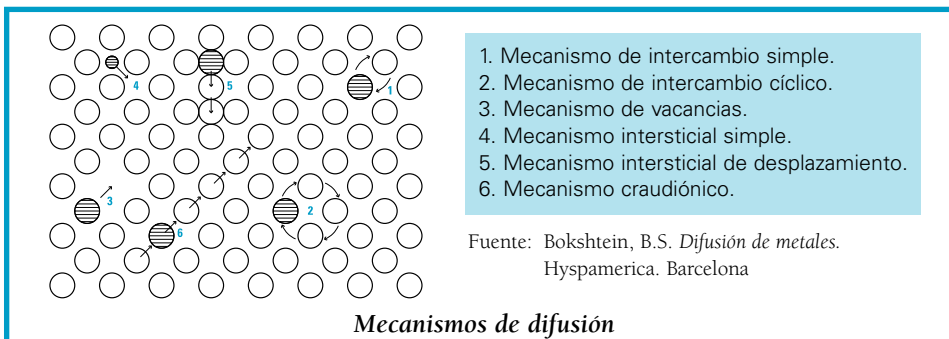
En el mecanismo de intercambio cíclico, un conjunto de átomos se traslada, intercambiando posiciones entre sí.

En el mecanismo de vacancias, un átomo deja su sitio y pasa a ocupar la posición de una vacancia.

En el mecanismo intersticial simple, un átomo pasa de un sitio intersticial a otro sitio intersticial vecino.

En el mecanismo intersticial de desplazamiento, un átomo intersticial desplaza a un átomo de un nodo de la red cristalina y ocupa su sitio; el átomo desplazado del nodo, pasa a ocupar un sitio intersticial y echa al vecino siguiente, y así sucesivamente; en el intersticio siempre se encuentra un nuevo átomo.

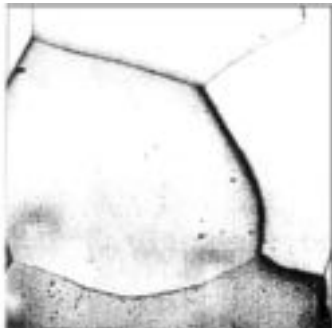
El craudión es un conjunto compactado de átomos, debido a la existencia de un átomo de más en la fila. El mecanismo de difusión craudiónico, se basa en que cada átomo se desplaza un poco, a la vez que se traslada el conjunto completo.



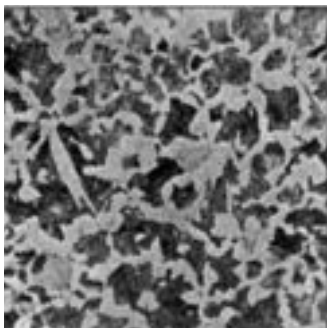
4. DIAGRAMAS DE FASE

Comencemos con algunas definiciones importantes.

Fase. Porción homogénea del material. Los diferentes granos de una misma fase tienen igual estructura cristalina y composición química; pero, difieren en la orientación cristalográfica. Las distintas fases pueden separarse entre sí.



Granos de zinc (una fase)



Ferrita y perlita (2 fases)

Componentes. Distintos elementos que forman la fase. Los elementos de la tabla periódica (hierro, níquel, etc.) son componentes; pero, también lo son los compuestos

con estequiometrías definidas como los óxidos, sales o compuestos intermetálicos.

Diagramas de fase. Gráficos (trazados experimentalmente, en laboratorio) que muestran las distintas fases existentes en un sistema. Estos diagramas se trazan en condiciones de equilibrio; por lo tanto, son válidos cuando el sistema estudiado está en equilibrio. Equilibrio significa que los enfriamientos son muy lentos y que, por lo tanto, los átomos tienen tiempo suficiente para acomodarse en los sitios de menor energía.

Los diagramas de fase se clasifican sobre la base del número de componentes; tenemos, entonces: diagramas unitarios (un componente), diagramas binarios (dos componentes), diagramas ternarios (tres componentes) y, así, sucesivamente.

Vamos a centrar nuestro estudio solamente a diagramas binarios, los que nos indican las fases presentes en el sistema (en equilibrio), en función de la temperatura y de la composición.

El trazado de diagramas de fase se facilita mediante ciertas reglas. Entre ellas, profundizaremos en la **Regla de las fases de Gibbs** que enuncia que: El máximo número de fases P que puede coexistir en una aleación o sistema químico, más el número de grados de libertad F , es

igual a la cantidad de componentes C del sistema más 2.

Es decir que:

$$P + F = C + 2$$

Los grados de libertad F son las variables independientes que se pueden controlar: la temperatura, la presión y la composición.

Sin embargo, como en la mayoría de los casos se trabaja a presión atmosférica, la cantidad de grados de libertad del sistema son dos: temperatura y composición. Con esta última consideración, la regla de las fases puede reescribirse como:

$$P + F = C + 1$$

A modo de ejemplo, vamos a aplicar la expresión anterior a un metal puro. Si queremos conocer en qué condiciones coexisten las fases líquida y sólida de dicho metal, tenemos:

- $P = 2$ (Ya que son dos fases, líquida y sólida).
- $C = 1$ (Hay un solo componente, que es el metal en estudio).

Resulta que $F = C + 1 - P$; y, reemplazando

valores tenemos: $F = 1 + 1 - 2$; $F = 0$.

Como $F = 0$, significa que no tenemos grados de libertad y que, en consecuencia, no podemos “elegir” la temperatura de coexistencia de las fases líquida y sólida del material metálico estudiado (Recordemos que el otro grado de libertad, la composición, ya lo adoptamos, dado que elegimos un metal puro para el estudio).

Consideremos, entonces, los diagramas de fase binarios.

Hay diversos tipos de diagramas binarios simples. Vamos a estudiar los más usuales, que son:

1. Diagramas binarios de solubilidad total al estado sólido.
2. Diagramas binarios de solubilidad parcial al estado sólido.
3. Diagramas binarios de insolubilidad total al estado sólido.
4. Diagramas binarios eutectoides.
5. Diagramas binarios peritéticos.
6. Diagramas binarios complejos.

A través del estudio de diagramas binarios simples, podremos encarar posteriormente el estudio de diagramas binarios más complejos. Un caso de gran importancia práctica es el diagrama binario hierro-carbono, mediante el cual podremos estudiar y comprender los aceros y fundiciones, materiales metálicos de vital importancia.

1. Diagramas binarios de solubilidad total al estado sólido

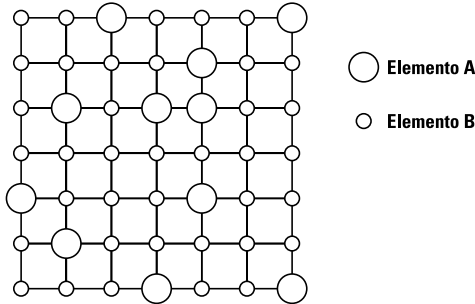
Al igual que las soluciones líquidas, tales como un té azucarado, existen soluciones metálicas al estado sólido. El metal que

está en mayor proporción, se denomina solvente y el que está en menor proporción se llama soluto.

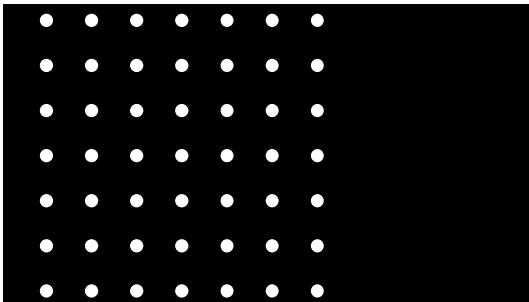
Hay dos tipos de soluciones sólidas:

- sustitucionales,
- intersticiales.

En una **solución sólida sustitucional**, los átomos de soluto reemplazan a los de solvente; estas soluciones se forman entre átomos que tienen un tamaño similar.



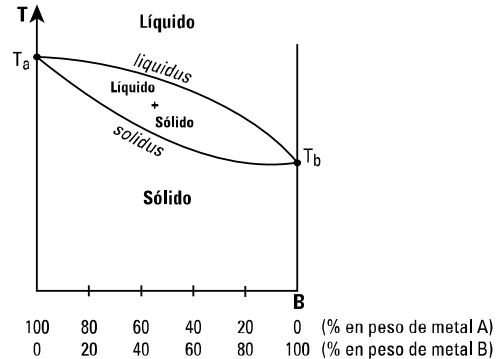
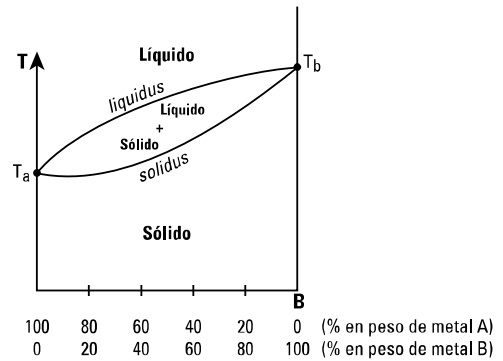
En una **solución sólida intersticial**, los átomos de soluto ocupan sitios intersticiales en la red del solvente; estas soluciones se forman entre metales que tienen un tamaño de átomo bastante diferente.



Como en todo diagrama de fases binario, en el eje vertical se representan temperaturas y, en el eje horizontal, se indican composiciones.

El eje vertical izquierdo representa el diagrama de fases para el metal A puro, siendo T_a la temperatura de fusión del metal A. Por encima de T_a , el metal A está en estado líquido; por debajo de T_a , dicho metal está en estado sólido.

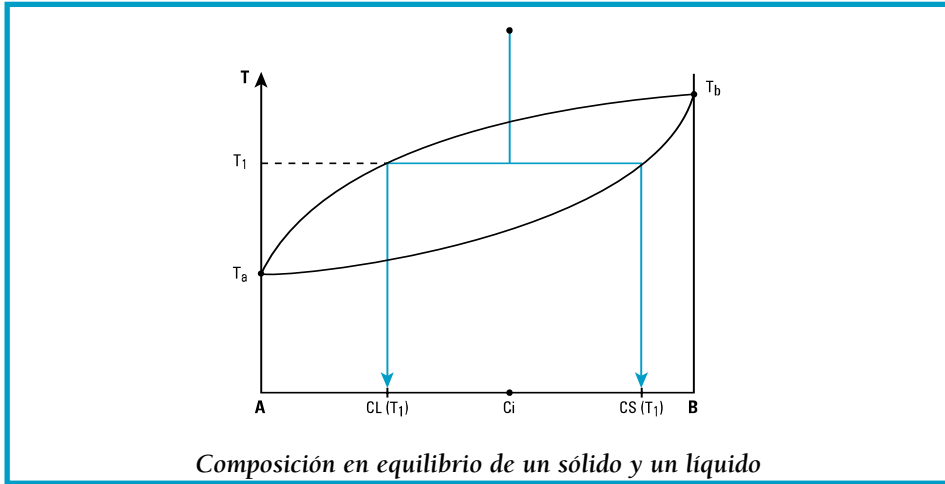
El eje vertical derecho representa el diagrama de fases para el metal B puro. T_b es la temperatura de fusión.



Hay dos curvas importantes, denominadas *liquidus* y *solidus*. Por encima de la curva *liquidus*, el sistema (cualquiera sea su composición) estará

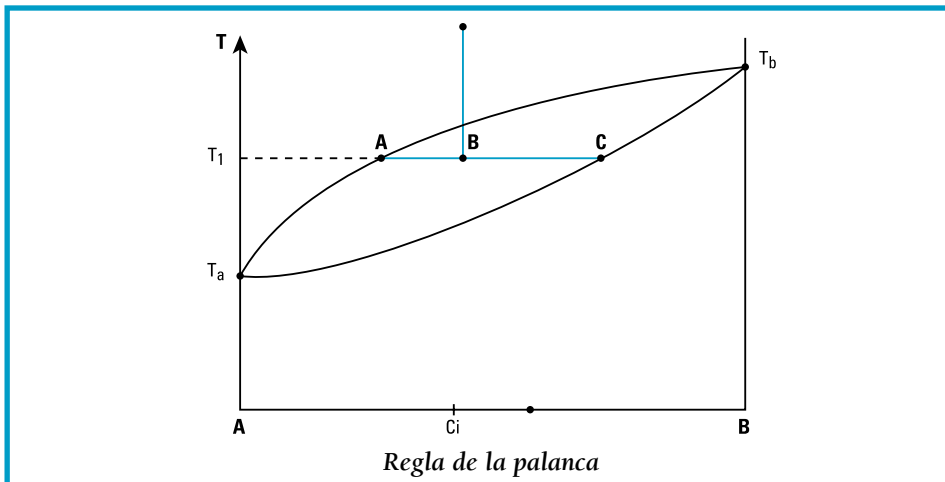
en estado líquido. Por debajo de la curva *solidus*, el sistema (cualquiera sea su composición) estará en estado sólido. Entre las curvas *liquidus* y *solidus*, el sistema estará formado por una mezcla de fases líquida y sólida.

La intersección de una isoterma T_1 con las curvas *liquidus* y *solidus*, nos indica la composición del líquido $CL(T_1)$ y del sólido $CS(T_1)$, los cuales están en equilibrio a la temperatura mencionada. La línea horizontal se denomina línea de unión.



La **Regla de la palanca**, aplicable a todo campo de dos fases, permite determinar las cantidades relativas de las fases que coexisten a una cierta temperatura. No expondremos la deducción, sino que mostraremos su aplica-

ción mediante un ejemplo: Si en una aleación de composición inicial C_i , queremos determinar las cantidades relativas de líquido y sólido a la temperatura de interés T_1 , procedemos del siguiente modo:



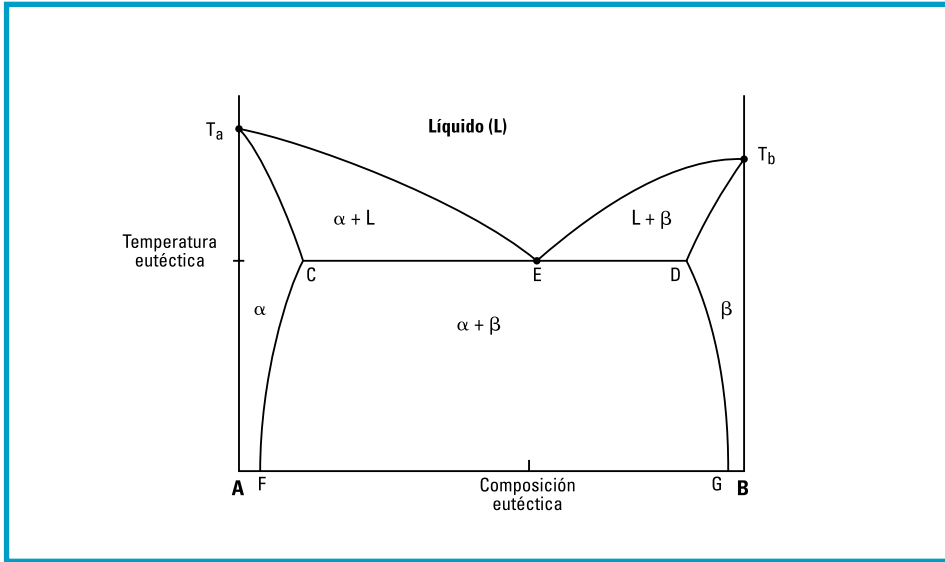
Se traza una línea de unión a la temperatura T_1 , que corta a las curvas *liquidus* y *solidus*, obteniéndose los puntos A y C. La aplicación de la regla de la palanca, indica que:

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de fase sólida} &= (AB / AC) \cdot 100 \\ \text{Porcentaje de fase líquida} &= (BC / AC) \cdot 100 \end{aligned}$$

Así, por simple medición de la longitud de los segmentos en cuestión, determinamos los porcentajes de fase sólida y líquida.

2. Diagramas binarios de solubilidad parcial al estado sólido

Estos sistemas binarios tienen la forma:



En este tipo de sistemas, los dos metales A y B son solubles al estado sólido solamente para ciertas composiciones. La solubilidad existe en las zonas cercanas a los respectivos ejes verticales; las soluciones sólidas son denominadas α y β .

la cual hay disueltos átomos del metal B (soluto).

- La solución sólida β tiene la estructura cristalina del metal B (solvente) en la cual hay disueltos átomos del metal A (soluto).

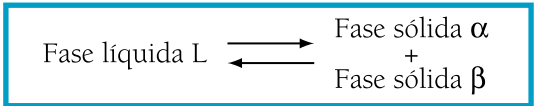
- La solución sólida α tiene la estructura cristalina del metal A (solvente) en

Por otra parte, en la zona central del diagrama coexisten las fases α y β .

- La curva *liquidus* está dada por los puntos T_a . E . T_b .
- La curva *solidus* está dada por los puntos T_a . C . E . D . T_b .
- Las curvas CF y DG se denominan *solvus*.

Una aleación cuya composición es menor a la eutéctica, se denomina hipoeutéctica; si la composición es mayor a la eutéctica, la aleación es hipereutéctica.

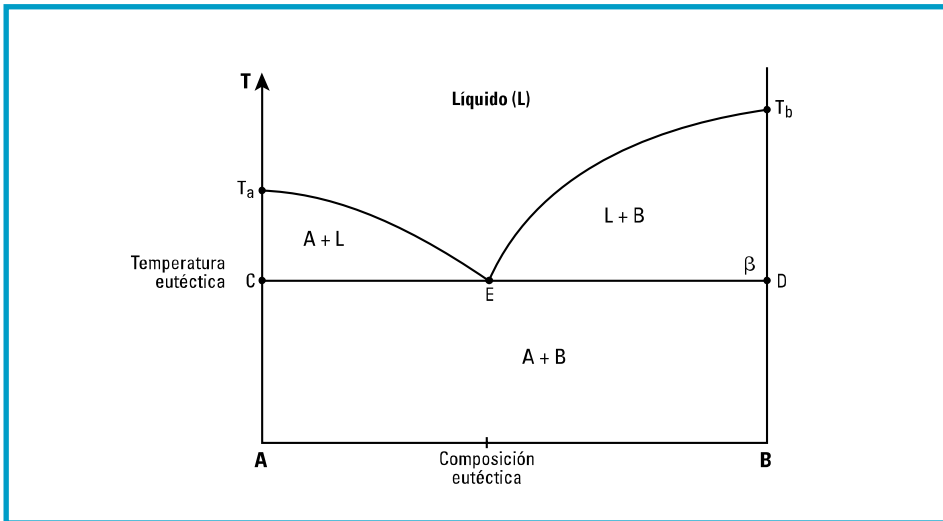
Cuando un líquido de composición eutéctica solidifica, se forman dos fases sólidas α y β :



En los diagramas con solubilidad parcial al estado sólido, existe un punto característico, denominado punto eutéctico (E). El punto eutéctico se caracteriza por tener una composición definida (composición eutéctica) y una temperatura de fusión definida al igual que los metales puros (temperatura eutéctica).

3. Diagramas binarios de insolubilidad total al estado sólido

Estos sistemas binarios tienen la forma:

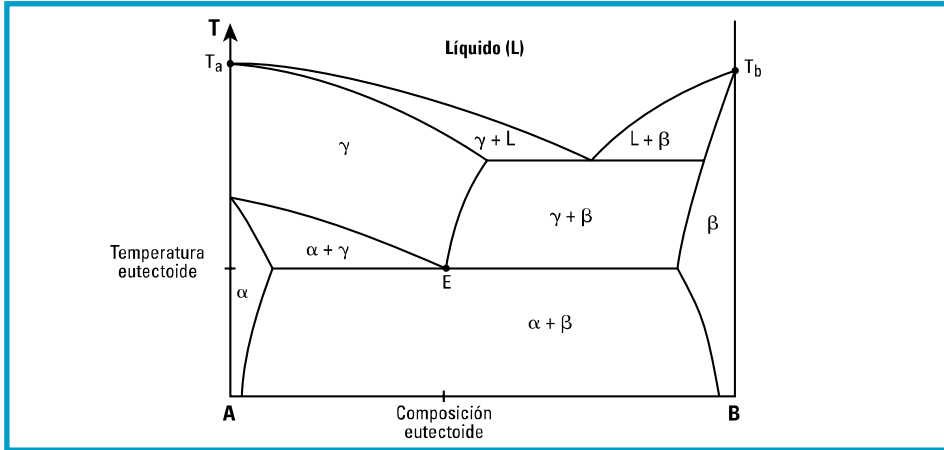


En este caso, no existe ninguna solución al estado sólido. Por lo tanto, los dos metales A y B solidifican en forma separada, encontrándose capas puras del metal A y capas puras del metal B en forma alternada.

La curva *liquidus* está determinada por los puntos T_a . E . T_b ; mientras que la curva *solidus* está determinada por los puntos C . E . D . Nuevamente, el eutéctico corresponde al punto E .

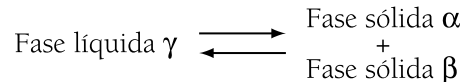
4. Diagramas binarios eutectoides

Los diagramas binarios eutectoides, se caracterizan por tener un punto denominado eutectoide (punto E).



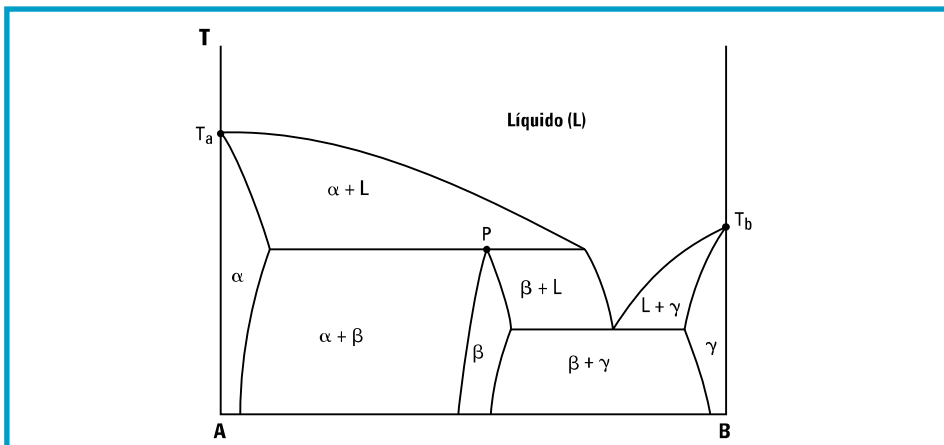
En una transformación eutectoide, una fase sólida γ que se enfría, se transforma en dos fases sólidas α y β ; y, durante el calentamiento, la reacción es la inversa.

La reacción eutectoide puede escribirse:

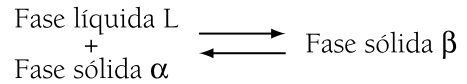


5. Diagramas binarios peritéticos

El siguiente es un diagrama binario con una transformación peritética:

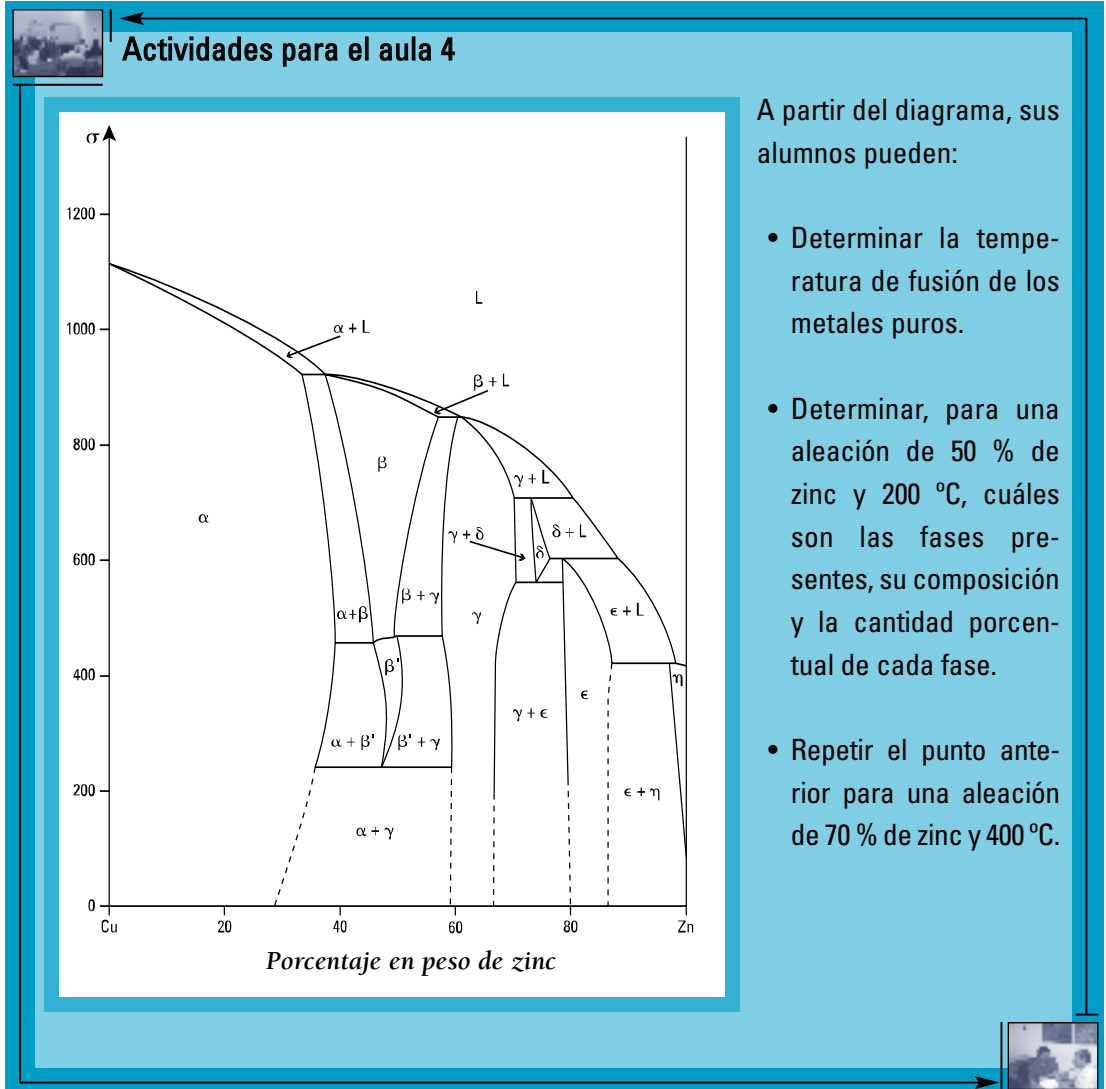


La reacción peritética (punto P), resulta así:



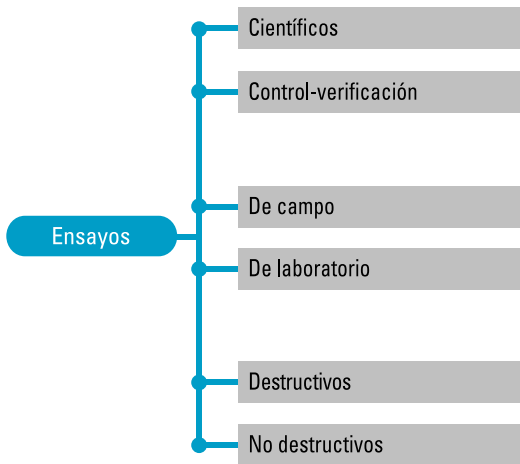
6. Diagramas binarios complejos

Resultan de la combinación de algunos de los diagramas simples ya explicados. El siguiente es un ejemplo.



5. ENSAYOS DE MATERIALES

Los ensayos tienen como objetivo determinar las propiedades de los materiales. Los ensayos de materiales se aplican a materiales metálicos; pero, también, por supuesto, a las otras categorías de materiales (polímeros, cerámicos, etc.).



Una clasificación muy común para los ensayos, es dividirlos en ensayos científicos y ensayos de control-verificación.

Los **ensayos científicos** deben realizarse con absoluto cuidado y precisión, a fin de obtener los valores más exactos posibles de propiedades desconocidas del material. Los valores obtenidos de los ensayos científicos suelen ser usados en diversas aplicaciones tecnológicas.

Los **ensayos de control-verificación** se utilizan para determinar si una determinada muestra extraída de un lote, cumple con los

requisitos esperados por los diseñadores o por las especificaciones de compras.

Una segunda clasificación considera ensayos de campo y ensayos de laboratorio.

Los **ensayos de campo** se efectúan a aquellos componentes que no pueden ser trasladados al laboratorio; por ejemplo: grandes estructuras metálicas o civiles, calderas, puentes, etc. Debido a las dificultades en las condiciones de trabajo, los ensayos de campo son, en general, menos precisos que los **ensayos de laboratorio**. Sin embargo, se debe mencionar que hay ensayos que, por su simpleza, pueden realizarse con igual precisión tanto en campo como en laboratorio.

Una tercera clasificación se produce al dividir a los ensayos en destructivos y no destructivos. En los **ensayos destructivos**, el material se destruye durante el ensayo y, por lo tanto, no puede ser usado posteriormente. En los **ensayos no destructivos**, el material no se destruye durante el ensayo y, entonces, puede ser utilizado posteriormente.

Todos estos ensayos están normalizados. Las normas son de vital importancia para realizar

los ensayos, ya que establecen los procedimientos para su realización. Algunas de las ventajas que brinda el empleo de normas, son las siguientes:

- Permiten comparar resultados de ensayos obtenidos en diferentes laboratorios.
- Evitan confusiones y malos entendidos.
- Simplifican la preparación de especificaciones técnicas.
- Permiten la obtención de productos más uniformes.
- Brindan confianza a los usuarios.
- Reducen costos.

Las normas de uso más habitual en la industria son:

- **IRAM:** Instituto Argentino de Normalización.
- **ISO:** *International Organization for Standardization.*
- **ASTM:** *American Society for Testing and Materials.*
- **BSI:** *British Standards Institution.*
- **ANSI:** *American National Standards Institute.*
- **DIN:** *Deutsches Institut Für Normung.*

Algunos conceptos clave

Elasticidad. Un material está en el período elástico cuando, al quitar las cargas actuantes, las deformaciones desaparecen totalmente y el material recobra sus dimensiones originales.

Plasticidad. Un material está en el período plástico cuando, al quitar las cargas actuantes, queda con cierta deformación permanente y, por lo tanto, no recobra sus dimensiones originales.

Ductilidad. Un material es dúctil cuando sufre gran deformación antes de llegar a la rotura.

Fragilidad. Un material es frágil cuando sufre nula o mínima deformación antes de llegar a la rotura.

Maleabilidad. Un material es maleable cuando puede ser reducido a hojas o láminas delgadas, mediante la acción de un martillo, de una prensa hidráulica o de un laminador.

Tenacidad. Un material es tenaz cuando se requiere gran energía para que llegue a la rotura.

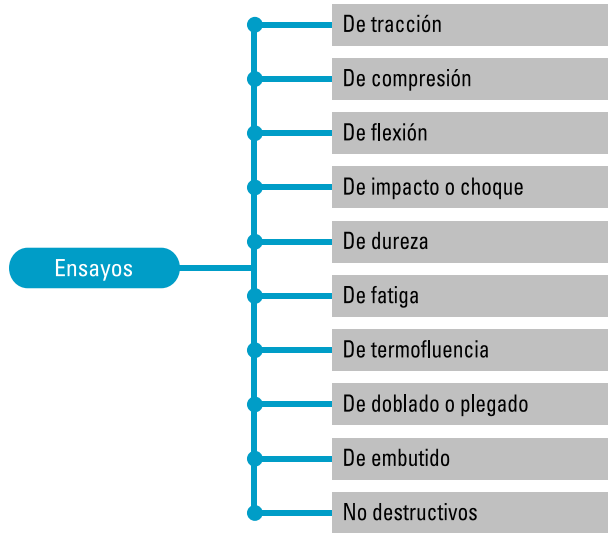
Dureza. Resistencia que ofrece un material, a ser rayado o penetrado por otro.



Actividades para el aula 5

Se sugiere que los alumnos formen grupos y se contacten con IRAM. Cada grupo podrá acceder a la norma correspondiente a un ensayo particular (tracción, dureza, etc.), la analizará y realizará una exposición en clase.





Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es el más utilizado de todos los ensayos mecánicos; consiste en aplicar a una pieza de eje recto, en forma lentamente creciente, dos fuerzas en la dirección del eje que tienden a producir el alargamiento de la pieza.

El ensayo de tracción se realiza en las denominadas máquinas “universales”, que

permiten efectuar varios tipos de ensayos (compresión, flexión, etc.).

La probeta se sujeta, mediante dispositivos, a los cabezales de la máquina. Un cabezal de la máquina es fijo y el otro es móvil; este último es el que permite el alargamiento de la probeta hasta llegar a la rotura.

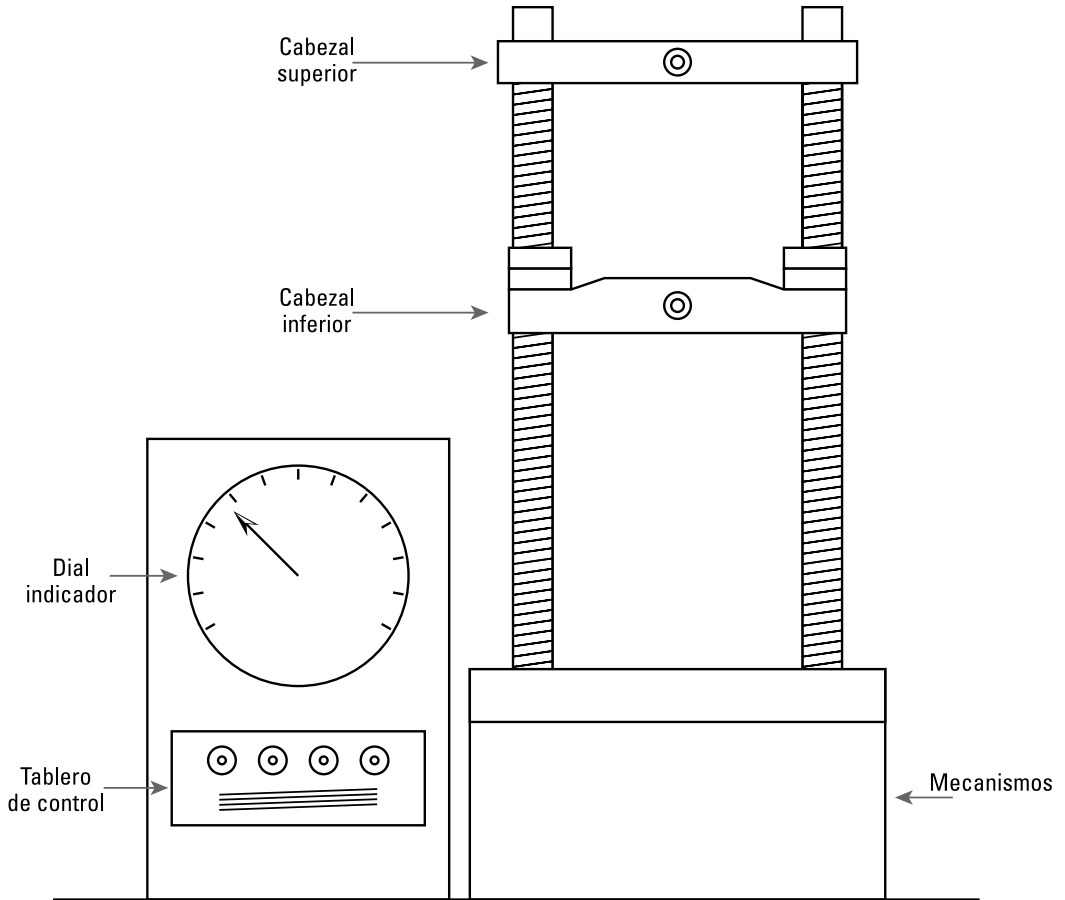
Una **probeta** es una muestra de un producto industrial o manufacturado, que se saca de un lote para ser sometida a pruebas mecánicas, análisis químicos u otros ensayos.

Las probetas que se utilizan en los ensayos de materiales pueden ser industriales o normalizadas.

Las probetas industriales pueden tener cualquier forma; incluso, puede tratarse de la misma pieza en estudio.

Las probetas industriales se usan sólo en ensayos de control-verificación.

Las probetas normalizadas se caracterizan por tener sus dimensiones principales establecidas por norma; se usan en ensayos de investigación y, también, en ensayos de control-verificación.



Esquema de máquina universal

Al realizar el ensayo, se obtiene un gráfico de la máquina que nos indica la carga o fuerza aplicada (P) en función del alargamiento de la probeta (Δl).

Mediante un simple cambio de escalas, se puede convertir el gráfico P - Δl en un gráfico de tensiones (σ) versus alargamientos específicos (ϵ).

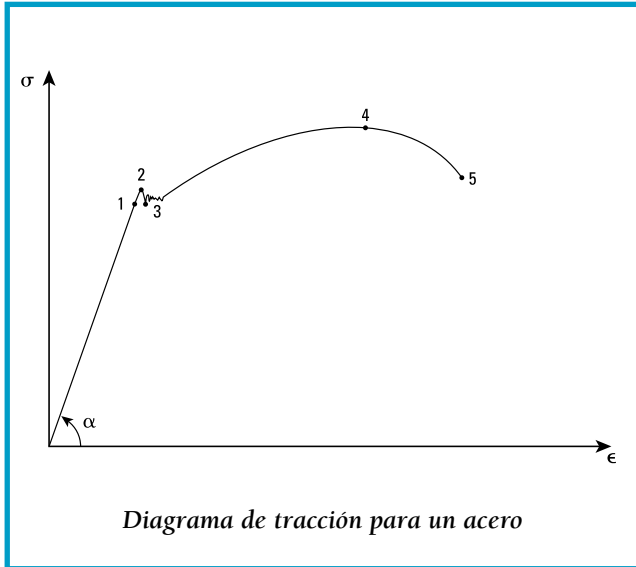
Teniendo en cuenta que:

- S_0 es la sección inicial.
- L_0 es la longitud inicial.
- L_f es la longitud final.

El cambio de escalas se realiza de la siguiente forma:

$$\sigma = P / S_0 \quad [\text{kgf/cm}^2; \text{kgf/mm}^2; \text{Mpa, etc.}]$$

$$\epsilon = (L_f - L_0) / L_0$$



La ley de Hooke establece que en el período elástico, las tensiones son directamente proporcionales a las deformaciones. Matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Donde:

- σ es la tensión.
- ε es la deformación específica.
- E es el módulo de elasticidad longitudinal, que es constante de proporcionalidad.

A partir del diagrama, se efectúan ciertas determinaciones características de las propiedades mecánicas del material:

- Módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young.
- Tensión al límite de proporcionalidad.
- Tensión al límite de fluencia superior.
- Tensión al límite de fluencia inferior.
- Tensión máxima o resistencia estática a la tracción.
- Tensión de rotura convencional.
- Alargamiento porcentual.
- Estricción porcentual.

MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL O MÓDULO DE YOUNG (E). Es una constante para cada material y da idea de la rigidez de éste; a mayor E, el material es más rígido. Geométricamente, el módulo E se obtiene como la tangente del ángulo α .

TENSIÓN AL LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD (σ_p). Está indicada en el gráfico, por el punto 1. El límite de proporcionalidad se llama así porque en dicho punto finaliza la parte recta del gráfico. Es decir que, en el límite de proporcionalidad, deja de cumplirse la ley de Hooke y a, partir de allí, las tensiones no son proporcionales a las deformaciones.

En los aceros, se considera que el límite de proporcionalidad coincide con la finalización de la zona de comportamiento elástico. Esto no es rigurosamente cierto, ya que no siempre la tensión al límite de proporcionalidad coincide con la tensión al límite de elasticidad; sin embargo, el error cometido al hacer tal suposición, es pequeño.

La tensión al límite proporcional, se calcula del siguiente modo:

$$\sigma_p = \frac{\text{Carga al límite proporcional}}{S_0}$$

TENSIÓN AL LÍMITE DE FLUENCIA SUPERIOR (σ_{fs}). Está indicada en el gráfico por el punto 2. Durante el período de fluencia, se producen importantes deformaciones de la probeta, sin variaciones apreciables de la carga.

La tensión al límite de fluencia superior se calcula:

$$\sigma_{fs} = \frac{\text{Carga al límite de fluencia superior}}{S_0}$$

TENSIÓN AL LÍMITE DE FLUENCIA INFERIOR (σ_{fi}). Está indicada en el gráfico por el punto 3. La tensión al límite de fluencia inferior es:

$$\sigma_{fi} = \frac{\text{Carga al límite de fluencia inferior}}{S_0}$$

TENSIÓN MÁXIMA O RESISTENCIA ESTÁTICA A LA TRACCIÓN (σ_{ET}). Está indicada en el gráfico por el punto 4. Se define como el cociente entre la carga máxima y la sección inicial de la probeta:

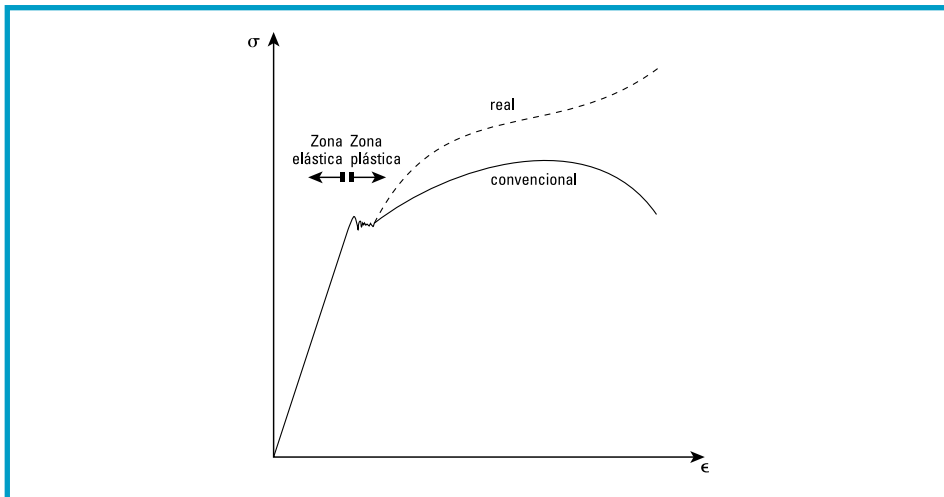
$$\sigma_{ET} = \frac{\text{Carga máxima}}{S_0}$$

TENSIÓN DE ROTURA CONVENCIONAL (σ_R). Está indicada en el gráfico por el punto 5. Se define como el cociente entre la carga convencional de rotura y la sección inicial de la probeta:

$$\sigma_R = \frac{\text{Carga convencional de rotura}}{S_0}$$

Si observamos el gráfico, vemos que la tensión de rotura convencional (σ_R) es menor que la tensión máxima (σ_{ET}), lo cual parece incoherente. La causa de la aparente incoherencia es que, en el gráfico anterior, las tensiones fueron calculadas respecto a la sección inicial S_0 ; sin embargo, en la realidad, se produce un cuello en la probeta y las tensiones deberían calcularse basándose en las secciones instantáneas.

Es así que tenemos un diagrama convencional y uno real, según calculemos las tensiones con la sección inicial o con la instantánea, respectivamente.



La tensión de rotura real se calcula como el cociente entre la carga real de rotura y la sección real de rotura; esta última se mide en la probeta fracturada.

Además, a partir del ensayo de tracción se calculan otros parámetros; a saber:

ALARGAMIENTO PORCENTUAL

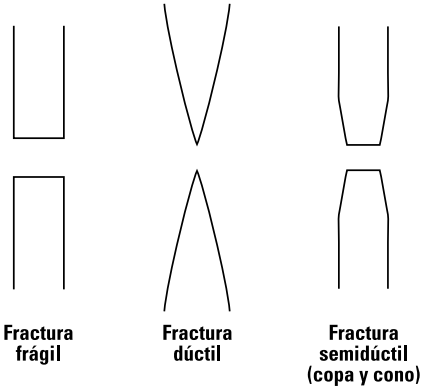
$$\delta = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$$

ESTRICCIÓN PORCENTUAL

$$\phi = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100$$

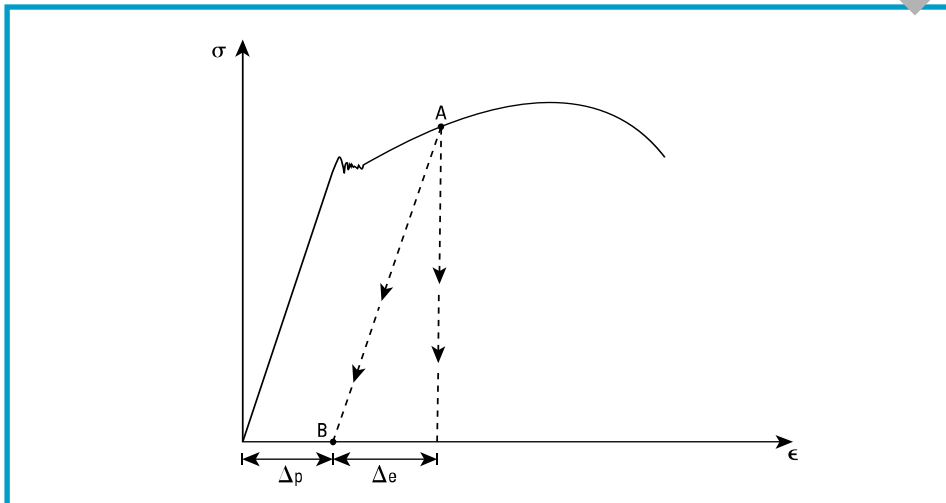
Tanto el alargamiento como la estricción, son medidas que nos indican la ductilidad del material ensayado.

De acuerdo con la ductilidad del material, obtenemos los siguientes tipos de fracturas:



Es importante distinguir cuál es la zona de comportamiento elástico y cuál es la zona de comportamiento plástico.

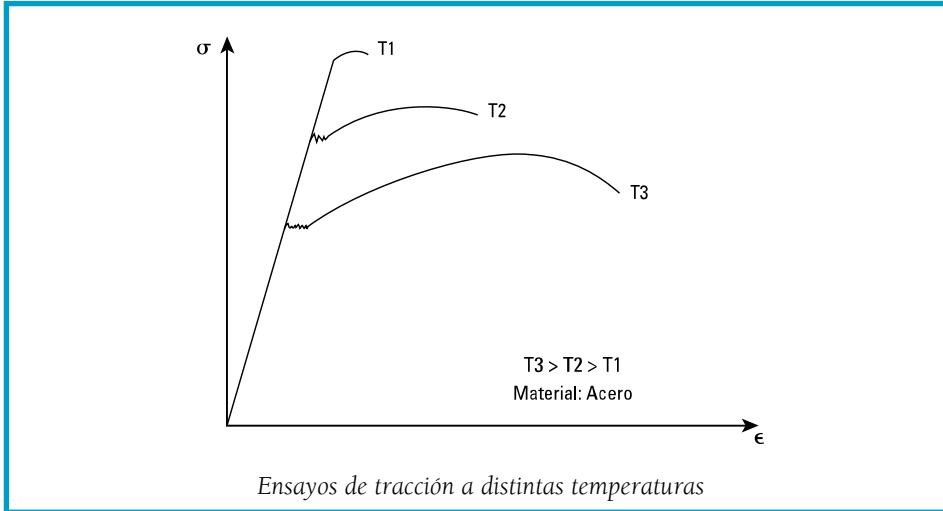
- Si estamos en la zona de comportamiento elástico y quitamos la carga, la probeta recobra sus dimensiones originales.
- En cambio, si estamos en la zona de comportamiento plástico (por ejemplo, en el punto A) y quitamos la carga, la probeta queda con una deformación plástica permanente (Δp) mientras que la deformación elástica (Δe) desaparece.



Cabe destacar que la recta AB que indica la descarga, es paralela a la recta del periodo proporcional.

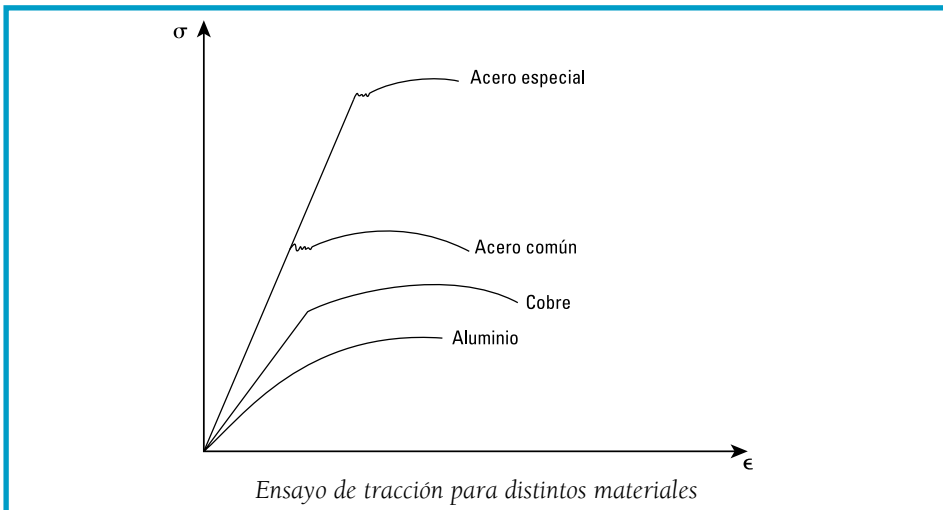
coloca en un pequeño horno y se efectúa el ensayo a la temperatura deseada. En general, al aumentar la temperatura de ensayo, se verifica que disminuye la resistencia y que aumenta la ductilidad.

Los ensayos de tracción también pueden realizarse a altas temperaturas. A tal fin, la probeta se



Hemos definido la tenacidad como la energía necesaria para que un material alcance la rotura. El área total bajo la curva de un ensayo de tracción, representa la tenacidad.

No todos los materiales presentan gráficos de la forma que hemos considerado. A continuación, mostramos algunos ejemplos:





Actividades para el aula 6

Puede resultarle interesante analizar en clase estas cuestiones:

- Si el material A tiene mayor resistencia estática a la tracción que el material B, ¿se debe cumplir necesariamente que el material A tiene mayor módulo E que el material B? Dibujen la situación en un gráfico tensión-deformación.
- Un material frágil, ¿tendrá fluencia? ¿Por qué?
- ¿Cómo determinarían la tensión de fluencia en un material frágil?
- El hierro tiene un módulo de elasticidad tres veces mayor que el aluminio. En un gráfico tensión-deformación, representen cualitativamente los períodos elásticos de ambos metales.
- Una fuerza de 18000 newton aplicada a una barra de $0,9 \text{ cm}^2$ de sección, le genera un alargamiento de 9 cm a 9,05 cm. Calculen el módulo de elasticidad del material.
- A una barra metálica de 180 mm^2 de sección se le aplica una fuerza de 87000 newton. La tensión de fluencia del material es de 375 Mpa. La barra, ¿sufrirá deformación plástica? Justifiquen las razones.
- Una probeta se ensayó a tracción según los siguientes datos: diámetro inicial: 10 mm; diámetro final: 9 mm; longitud calibrada inicial: 15 cm; longitud calibrada final: 17,3 cm. Determinen el alargamiento porcentual y la estricción porcentual.



Ensayo de compresión

Este ensayo se realiza, generalmente, en materiales frágiles, como fundiciones y hormigones (en este último caso, el ensayo se efectúa a los 28 días de fabricada la probeta). Por supuesto, es posible realizar ensayos de compresión a materiales dúctiles; estos materiales suelen tener una resistencia similar, tanto a compresión como a tracción.

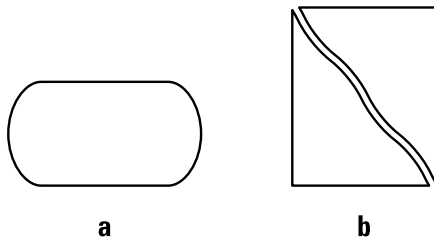
El ensayo de compresión también se aplica a maderas.

Recordemos que los materiales frágiles rompen con nula o mínima deformación, y que los materiales dúctiles (aluminio, cobre, etc.) rompen con gran deformación.

En el ensayo de compresión, se aplican cargas estáticas a la probeta, en la dirección de su eje longitudinal; durante el ensayo, la probeta tiende a acortarse.

Al ensayar materiales dúctiles, debido al rozamiento existente entre los platos de la máquina y la probeta, esta última generalmente no se rompe pero adquiere forma de barril (figura a).

En caso de que se llegue a la rotura del material ensayado (lo que es habitual en materiales frágiles), ésta se produce según planos inclinados a, aproximadamente, 45° o en forma de grietas. El hecho de que los planos inclinados de rotura formen 45° tiene justificación teórica, ya que en ellos se producen las máximas tensiones de corte (figura b).



Probetas sometidas a compresión

En los ensayos de compresión se deben tener ciertas precauciones con las dimensiones de la probeta, que se normalizan para evitar la aparición de pandeo.

A partir de los diagramas obtenidos del ensayo de compresión, se pueden realizar las determinaciones de:

- Tensión al límite de proporcionalidad.
- Tensión al límite de aplastamiento.

- Tensión máxima o resistencia estática a la compresión.
- Acortamiento porcentual.
- Ensanchamiento porcentual.

TENSIÓN AL LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD. El límite de proporcionalidad se llama así porque, en dicho punto, finaliza la parte recta del gráfico. Es decir que, en el límite de proporcionalidad deja de cumplirse la ley de Hooke y, a partir de allí, las tensiones no serán proporcionales a las deformaciones.

La tensión al límite proporcional se calcula del siguiente modo:

$$\sigma_p = \frac{\text{Carga al límite proporcional}}{S_0}$$

TENSIÓN AL LÍMITE DE APLASTAMIENTO. Este concepto es equivalente a la tensión de fluencia en un ensayo de tracción. Cabe decir que, en un ensayo de compresión, la fluencia no siempre es fácilmente identificable. La tensión al límite de aplastamiento se calcula como:

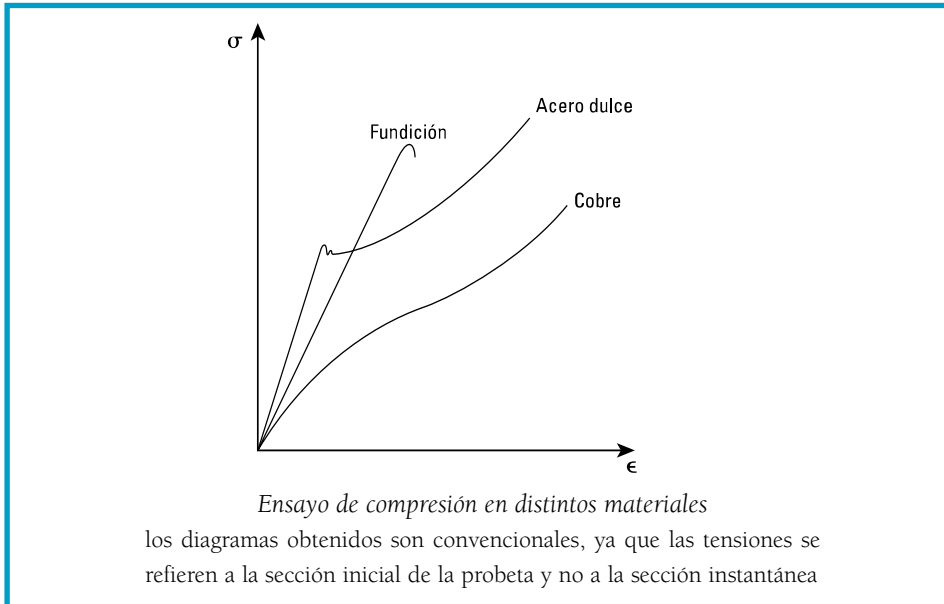
$$\sigma_f = \frac{\text{Carga al límite de fluencia}}{S_0}$$

TENSIÓN MÁXIMA O RESISTENCIA ESTÁTICA A LA COMPRESIÓN (σ_{ec}). Se define como el cociente entre la carga máxima y la sección inicial de la probeta:

$$\sigma_{ec} = \frac{\text{Carga máxima}}{S_0}$$

$$\delta = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \cdot 100$$

$$\phi = \frac{S_f - S_0}{S_0} \cdot 100$$



Actividades para el aula 7

Sus alumnos pueden analizar:

- La diferencia entre un diagrama convencional y uno real, ¿es mayor para materiales frágiles o materiales dúctiles? Justifiquen la respuesta.
- La compresión es muy utilizada en procesos de fabricación tales como: recalado de cabezas de tornillo, acuñado de monedas y laminado de roscas. ¿Cómo se realizan estas operaciones? ¿Qué ventaja fundamental tienen las roscas laminadas sobre las mecanizadas?
- El ensayo de compresión también se aplica a ladrillos, maderas y concreto. Justifiquen estas aplicaciones.



Ensayo de flexión

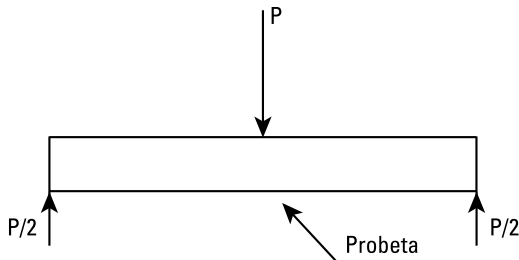
Este ensayo se aplica, generalmente, en metales frágiles y, también, en maderas y en vigas de hormigón. Vamos a centrarnos en el estudio del ensayo de flexión en metales.

Le resultará interesante conocer nuestra publicación:

• Durán, María Gabriela (2005) *Equipamiento EMA –características físicas de los materiales de construcción–*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires.

Su versión digital está disponible en www.inet.edu.ar, en la Serie "Recursos didácticos".

Este ensayo también se realiza en las llamadas máquinas universales. El esquema generalmente usado para realizar un ensayo de flexión es el siguiente:

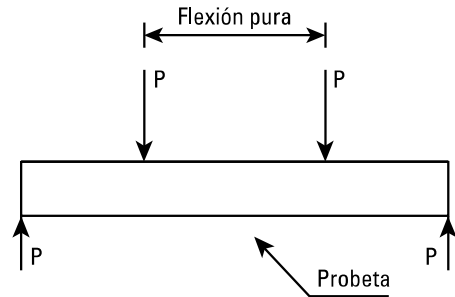


Ensayo de flexión

En el esquema anterior, los esfuerzos de flexión van acompañados por esfuerzos de corte. La influencia de los esfuerzos de corte disminuye, al incrementarse la luz entre apoyos; por tal motivo, las probetas están normalizadas.

Pero, si queremos ser rigurosos, debemos considerar que el esquema de ensayo para

obtener flexión pura (sin esfuerzos de corte) es éste:



Ensayo de flexión

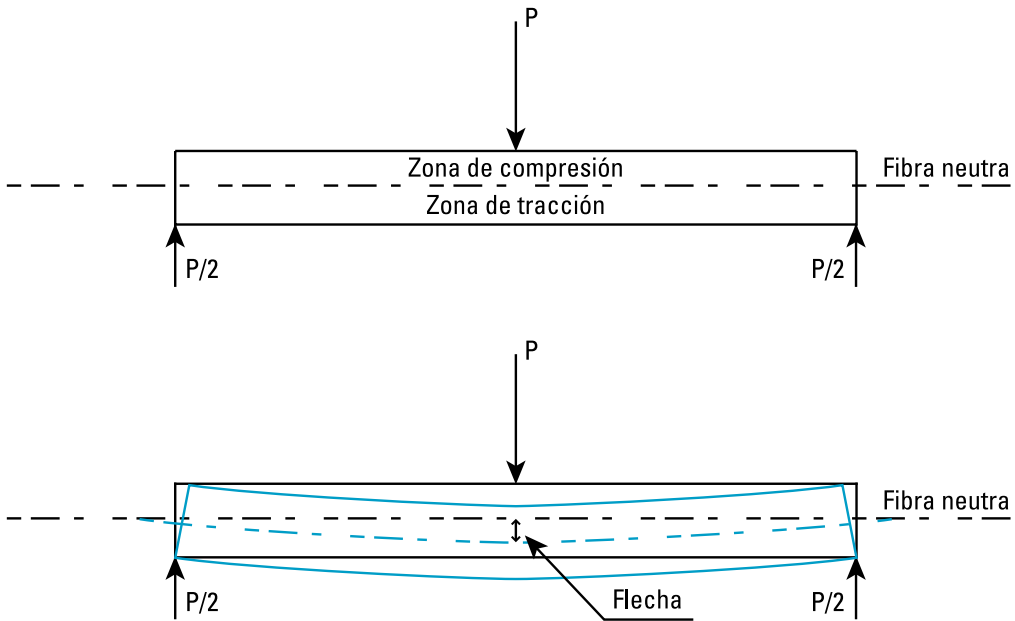
La flexión se caracteriza por provocar esfuerzos de tracción y compresión en forma simultánea:

- La parte de la viga que tiende a alargarse, está sometida a tracción (parte inferior de la viga en los esquemas anteriores).
- La parte de la viga que tiende a acortarse, está sometida a compresión (parte superior de la viga en los esquemas anteriores).
- El eje neutro –también llamado *fibra neutra*– es aquel que separa las zonas de tracción y compresión. Este eje no experimenta deformaciones (no se alarga ni se acorta).
- La superficie que contiene los ejes neutros se denomina *superficie neutra* o *plano neutro*.

Cuando la probeta es ensayada, el eje neutro se desplaza gradualmente de su posición original. Se llama *flecha*, a la distancia vertical

entre la posición original del eje neutro y las sucesivas posiciones que tome dicho eje, medida en el lugar de máxima flexión de la

probeta. La flecha puede ser medida durante la realización del ensayo, a través de un dispositivo especial llamado *flexímetro*.



Las determinaciones más importantes de este ensayo son:

- Momento flector o flexor máximo para viga con carga concentrada en el centro.
- Módulo resistente.
- Resistencia a la flexión.
- Factor de flexión.
- Índice de rigidez.

siendo P la carga aplicada en el medio de la viga y L la luz entre apoyos

MÓDULO RESISTENTE (Wz). Es el cociente entre el momento de inercia de la sección con respecto al eje neutro y la distancia de la fibra más alejada al eje neutro. En caso que la probeta sea de sección circular, la fórmula queda:

$$W_z = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

MOMENTO FLECTOR O FLEXOR MÁXIMO PARA VIGA CON CARGA CONCENTRADA EN EL CENTRO (MfMAX). Se calcula como:

$$M_{fmax} = \frac{P \cdot L}{4}$$

Las unidades para Wz son mm³, cm³ o cualquier otra unidad de longitud elevada al cubo.

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (σ_{FF}). Es el cociente

entre el momento flector máximo y el módulo resistente.

FACTOR DE FLEXIÓN. Se define como el cociente entre la resistencia de flexión (σ_{EF}) y la resistencia de tracción (σ_{ET}).

INDICE DE RIGIDEZ. Se calcula como el cociente entre la resistencia a la flexión (σ_{EF}) y la flecha de rotura.

Debemos recordar que las determinaciones se efectúan con probetas normalizadas.



Actividades para el aula 8

Le proponemos que plantee a los alumnos:

- Esquematicen cómo queda una probeta de metal frágil ensayada a flexión y cómo resulta una probeta de metal dúctil.
- ¿Por qué motivo el ensayo de flexión se aplica, entre otras cosas, a vigas de hormigón armado y vigas de madera utilizadas en construcciones civiles?



Ensayo de impacto o choque

Un alto valor de resistencia estática a la tracción o de resistencia de rotura, no indican necesariamente que ese material sea apropiado para soportar las cargas en servicio. Recordemos que, en el ensayo de tracción, las cargas son aplicadas en forma lenta y gradual; pero que, muchas veces, los elementos o piezas se ven sometidos a tensiones cíclicas, trabajos a alta temperatura o a cargas aplicadas en forma repentina como, por ejemplo, golpes. El problema de impacto, entonces, adquiere relevancia, básicamente, en el diseño de maquinaria con partes móviles y pesadas.

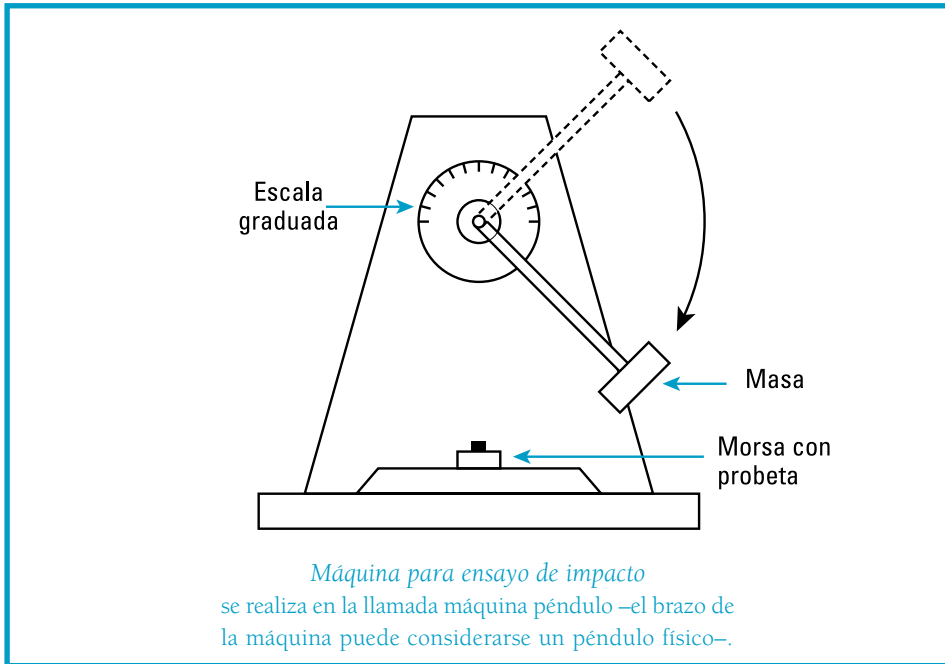
Los ensayos de impacto determinan la capacidad de un material de soportar cargas aplicadas en forma instantánea; los resultados obtenidos sólo se utilizan con fines comparativos con otros ensayos realizados en condiciones idénticas.

El ensayo de impacto nos suministra una indicación de la fragilidad del material y considera los tres factores que aumentan la fragilidad:

- Alta velocidad de aplicación de la carga.
- Bajas temperaturas.
- Estado complejo de tensiones (existencia de entallas, cambios bruscos de sección, etc.).

Durante el ensayo, una masa que cae de cierta altura impacta sobre la probeta con muesca (entalla). Como resultado, se obtiene la energía absorbida por la probeta, cuando esta probeta es rota de un solo golpe, por una masa que cae.

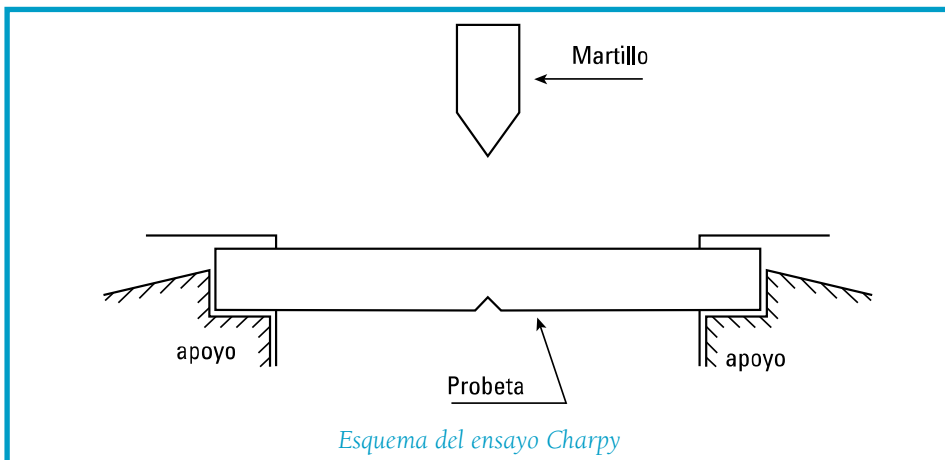
Existen dos formas para realizar los ensayos de impacto y son el método Charpy (que es

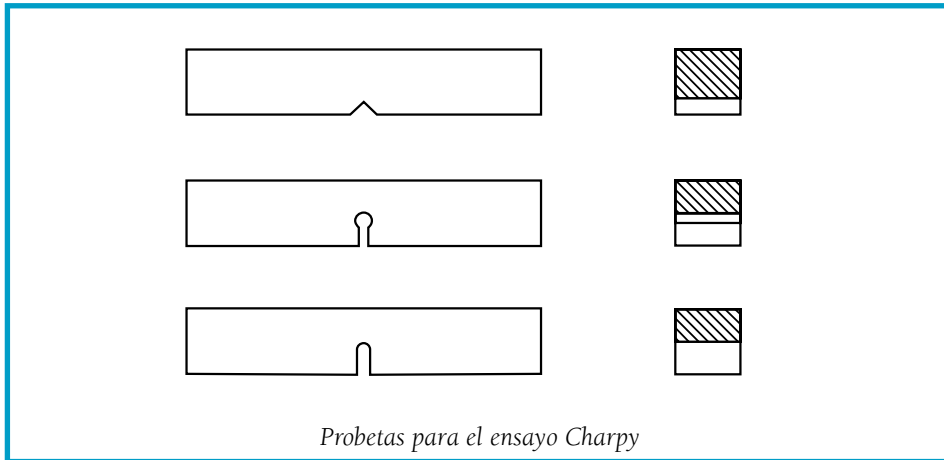


el más usado) y el método Izod. En los dos casos, la rotura se produce por flexión de la probeta, por lo que ésta se llama flexión por choque.

El **método Charpy** comenzó utilizándose en Alemania, Francia e Italia, entre otros países

europeos. En este caso, la probeta está simplemente apoyada en la máquina. Una masa golpea el centro de la probeta y la rompe de un solo golpe; las normas fijan las velocidades de impacto como así también las dimensiones de la probeta. La probeta recibe el impacto en el lado opuesto a la entalladura.



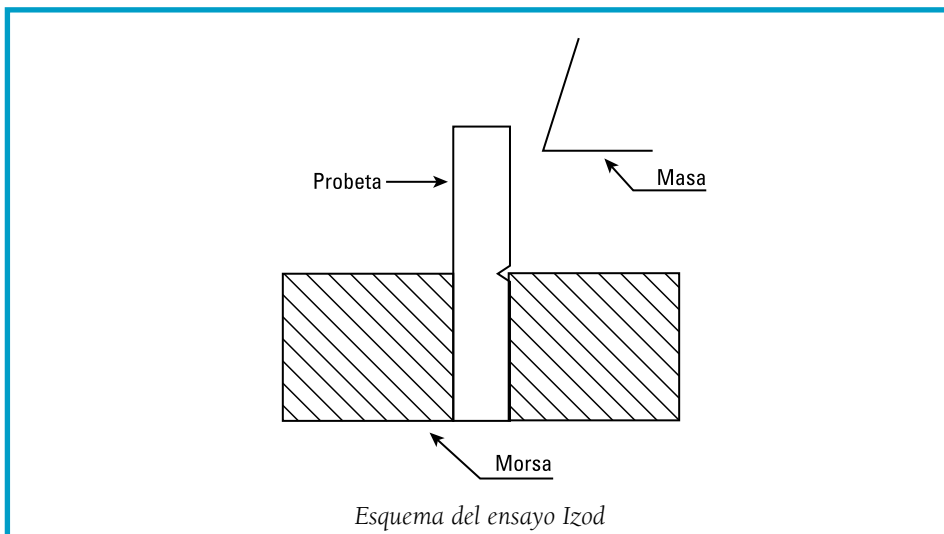


Se define la *resiliencia* como el trabajo gastado por unidad de sección; o sea que la resiliencia es el cociente entre la energía absorbida y el área de la probeta en el plano medio de la entalla. Se mide, así, en joule/cm^2 en una unidad de energía dividida por una unidad de superficie.

Sin embargo, la tendencia es dar los resultados del ensayo expresando solamente la energía de rotura.

El **método Izod** es originario de los países anglosajones (EEUU, Inglaterra). En este ensayo, la probeta se coloca verticalmente en el dispositivo de sujeción de la máquina. La masa, al caer, impacta sobre la probeta en la cara que tiene la entalla.

La energía de impacto debe ser suficiente para romper la probeta de un solo golpe. En este método, los resultados se expresan mediante la energía absorbida en la rotura.



El método Charpy ha ido desplazando al método Izod, aún en los países anglosajones. Su ventaja es que permite realizar ensayos a temperatura distinta de la ambiente, con gran facilidad; para lograr este objetivo, sólo es necesario llevar la probeta a la temperatura de trabajo y, luego, ensayarla rápidamente para que la probeta no intercambie calor ni con los apoyos ni con el aire. En cambio, en el método Izod, como la probeta está empujada, se produce gran intercambio de calor entre probeta y apoyos, lo que hace necesario que tanto la probeta como el dispositivo alcancen la temperatura de trabajo, lo que resulta complejo.

En el ensayo de impacto, podemos considerar:

- Expansión lateral.
- Apariencia de fractura.
- Temperatura de transición.

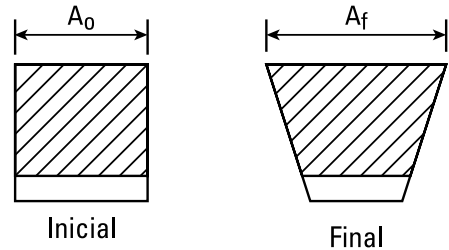
EXPANSIÓN LATERAL. La acción del impacto produce flexión y corte en la probeta, tanto en el método Charpy como en el Izod. Hemos visto que la flexión provoca, simultáneamente, tracción y compresión:

- la zona traccionada se alargará longitudinalmente y, por tanto, disminuirá su ancho; mientras que
- la zona comprimida se acortará en la dirección del eje de la probeta y se ensanchará transversalmente.

Se define la expansión lateral ΔA como la diferencia entre el mayor ancho en la sección de entalla (A_f) y el ancho inicial de la probeta (A_o).

La expansión lateral también puede expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Expansión lateral} = \frac{A_f - A_o}{A_o} \cdot 100$$

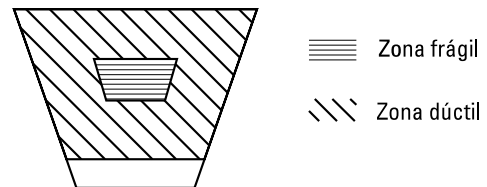


Expansión lateral

APARIENCIA DE FRACTURA. En el plano de rotura de la probeta, se distinguen dos zonas: una zona dúctil cuyo aspecto es sedoso y opaco, y una zona frágil de aspecto granular y brillante.

El porcentaje de fractura dúctil (%D), se define como:

$$\%D = \frac{\text{Superficie dúctil}}{\text{Superficie total}} \cdot 100$$

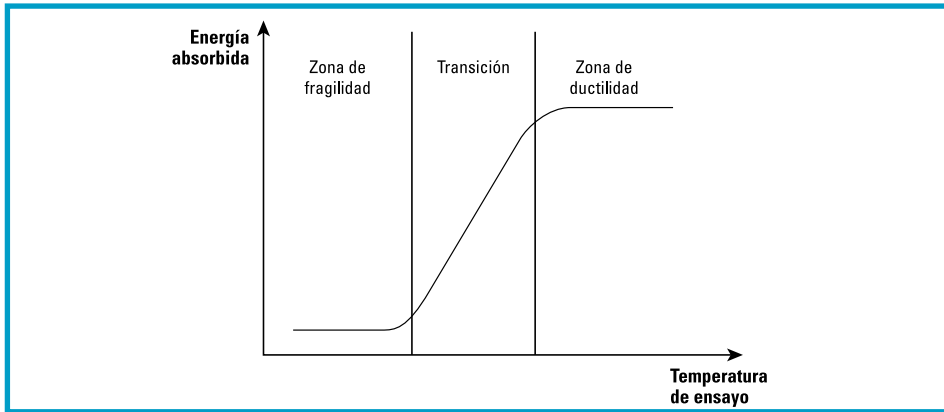


Esquema de una fractura

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN. Determinados materiales (aceros ferríticos,

aleaciones de titanio) se caracterizan porque la energía absorbida en la rotura

varía fuertemente en función de la temperatura de ensayo:



En el gráfico se observa que:

- a temperaturas bajas, la energía absorbida es pequeña (zona de fragilidad);
- a temperaturas altas, la energía absorbida es grande y el comportamiento del material se califica como dúctil;
- la zona intermedia se denomina zona de transición. Se observa que dicha zona abarca un rango de temperaturas.

Cabe, entonces, preguntarnos: ¿Cuál es la temperatura de transición?

Hay diversos criterios para definir la temperatura de transición; los más comunes son:

- Temperatura para la cual la energía absorbida toma determinado valor. Dicho valor varía según el material ensayado.
- Es la temperatura para la cual la energía absorbida es igual al promedio de las energías de la zona dúctil y frágil.
- Temperatura para la cual la fractura presenta iguales superficies dúctil y frágil (50 % y 50 %, respectivamente).



Actividades para el aula 9

Resultará interesante que plantee a los estudiantes de su clase:

- ¿Conviene que las piezas trabajen por encima o por debajo de la temperatura de transición? ¿Por qué?
- Mencionen ejemplos de componentes sometidos a cargas de impacto.

- Analicemos información sobre el naufragio del Titanic. Se sorprenderán por la relación existente entre esta catástrofe y la resistencia al impacto del material con que estaba construido el casco del buque.



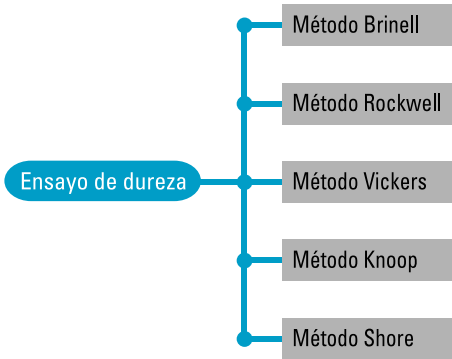
Ensayo de dureza

Como definimos anteriormente, la dureza es la resistencia que ofrece un material, a ser rayado o penetrado por otro.

Entre las aplicaciones más importantes de este ensayo, podemos mencionar:

- Control de calidad de materias primas.
- Control de calidad de tratamientos térmicos
- Estimación de la resistencia a la tracción de aceros.
- Estimación de la resistencia al desgaste.

Existen diversos métodos para medir durezas; estudiaremos los más habituales.



MÉTODOS BRINELL

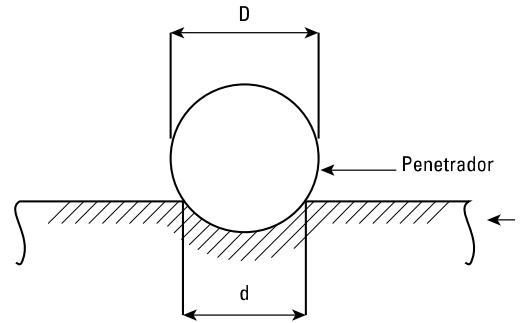
Es uno de los métodos más utilizados; consiste en aplicar sobre la pieza o probeta a ensayar una carga P (generalmente, 3000 kgf) durante un tiempo t , empleando una bolilla (penetrador) de acero duro de diámetro (D) , generalmente igual a 10 mm.

Se define la dureza Brinell (HB) como el cociente entre la carga aplicada (P) expresa-

da en kgf y el área S de la impronta expresada en mm^2 .

Es decir que:

$$HB = \frac{P \text{ (kgf)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$



Esquema de un ensayo Brinell

A través de una deducción matemática, se puede demostrar lo siguiente:

$$HB = \frac{2 P}{(\pi D^2) \{1 - [1 - (d/D)^2]^{1/2}\}}$$

La expresión anterior permite el cálculo de la dureza Brinell en función de la carga aplicada P , el diámetro de la bolilla D y el diámetro de la impronta d .

El diámetro de la impronta d surge promediando dos valores obtenidos en direcciones perpendiculares entre sí.

Como el diámetro de la impronta debe medirse con 0,01 mm de aproximación, se

usan microscopios con oculares micrométricos o con instrumentos similares.

Debemos recordar que las cargas se expresan en kgf y los diámetros en mm.

Consideremos, ahora, la Ley de semejanza para el ensayo Brinell.

Si queremos comparar resultados de ensayos Brinell realizados en materiales iguales o distintos, y en diferentes condiciones (cargas, bolillas, espesores), es necesario lograr que las condiciones de deformación plástica sean iguales en las probetas o piezas ensayadas.

Para un mismo valor de dureza Brinell, obtenido en diferentes condiciones de ensayo (diámetro de bolilla y carga), se demuestra matemáticamente que:

$$\frac{P_1}{(D_1)^2} = \frac{P_2}{(D_2)^2} = C$$

C es la constante del ensayo.

En forma estricta, los valores de dureza Brinell solamente pueden compararse cuando la constante de ensayo C es la misma.

Sin embargo, en la práctica, la norma IRAM fija valores de C para grupos de materiales y la norma ASTM fija valores de C para rangos esperados de dureza.

Para acotar la falta de semejanza, las normas recomiendan que:

$$0,25 \leq d/D \leq 0,5$$

Antes de efectuar el ensayo, debemos seleccionar los **valores de las distintas variables** según se indica a continuación.

Elección de las variables de ensayo

1. Determinación de la constante de ensayo C
2. Determinación del diámetro de la bolilla
3. Determinación de la carga máxima
4. Determinación del tiempo de permanencia (t)

1. Determinación de la constante de ensayo C

La norma IRAM 104 establece los siguientes valores:

C = 30, para aceros y fundiciones.

C = 10, para aleaciones de aluminio y cobre.

C = 5, para aluminio y cobre.

C = 2,5 - 1,25 - 1, para materiales muy blandos (plomo, estaño y sus aleaciones).

2. Determinación del diámetro de la bolilla

La bolilla más usada es la de 10 mm de diámetro. También se utilizan, aunque en mucha menor medida, bolillas de 5 - 2,5 - 2 y 1 mm de diámetro.

Para seleccionar el diámetro de la bolilla, debemos tener en cuenta que el espesor de la probeta sea mayor o igual a 10 veces la profundidad de penetración; de

esta manera, nos aseguramos que la deformación es absorbida íntegramente por la probeta y no por la máquina de ensayo.

Cumpliendo lo anteriormente enunciado, se deben usar las bolillas del mayor diámetro posible, a fin de facilitar la lectura y de disminuir la influencia de la falta de homogeneidad del material.

3. Determinación de la carga máxima

Debemos tener en cuenta que

$$P \text{ (kgf)} = C \text{ (kgf / mm}^2\text{)} \cdot D^2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Esta tabla satisface la relación anterior y nos permite conocer las cargas a emplear en los casos más frecuentes:

Díámetro de bolilla (mm)	Plomo, estaño, etc. (C = 2,5)	Cobre, aluminio (C = 5)	Aleaciones de cobre y aluminio (C = 15)	Aceros y fundiciones (C = 30)
2,5	15,6	31,2	93,75	187,5
5	62,5	125	375	750
10	250	500	1500	3000

4. Determinación del tiempo de permanencia (t)

El aumento de la carga hasta su valor máximo debe efectuarse sin choques ni vibraciones.

El tiempo de aplicación (t) debe asegurar la finalización del flujo plástico del material deformado por la bolilla. Este tiempo varía según el material, siendo:

- para aceros y fundiciones, entre 10 y 15 segundos;
- para aluminio y sus aleaciones, 30 segundos;
- para metales muy blandos –plomo, cinc, etc.–, la carga es aplicada durante 3 minutos.

Las **consideraciones generales** a tener en cuenta en el ensayo son:

- El método Brinell no se aplica a materiales muy duros, ya que la bolilla se deforma, distorsionando, así, los resultados del ensayo.
 - Para bolillas de acero duro, los resultados son aceptables hasta 450 HB; algunas normas recomiendan no superar los 300 HB.
 - Para bolillas de carburo de tungsteno, los resultados son aceptables hasta 630 HB.
- Al realizar el ensayo, las superficies de la probeta estarán limpias de partículas, virutas, aceites, etc.
- La probeta a ensayar tendrá superficies paralelas y planas, siempre que sea posible.
- Durante el ensayo no existirán movimientos relativos entre probeta y máquina
- La probeta no deberá sufrir calenta-

miento ni endurecimiento superficial durante el mecanizado.

- La pieza o probeta a ensayar se apoyará sobre un soporte limpio, pulido y rígido.
- La dirección de aplicación de la carga y la superficie de la probeta serán perpendiculares.
- El diámetro de la impronta surgirá promediando dos valores de diámetros, medidos perpendicularmente entre sí.
- El ensayo se considerará aceptable si $0,20 \leq d/D \leq 0,60$.
- El espesor de la probeta será suficiente como para que no queden marcas en la cara opuesta a la impronta. Además, el espesor de la probeta será, como mínimo, de 10 veces mayor al valor de la profundidad de penetración h.
- El centro de la impronta estará a una distancia mínima de $2,5 \cdot d$ del borde de la probeta (excepto, para casos especiales). La distancia mínima entre centros de improntas será, como mínimo, de 4 d.

Consideremos, ahora, cómo resolver el cálculo y la presentación de los resultados del ensayo.

Para obtener la dureza Brinell, reemplazamos los valores de P, D y el promedio (d) de los diámetros de la impronta en la fórmula:

$$HB = \frac{2 P}{(\pi D^2) \{1 - [1 - (d/D)^2]^{1/2}\}}$$

Otra metodología posible para el cálculo de la dureza es el empleo de tablas indicadas en las normas. Entrando a dichas tablas con los valores de los parámetros utilizados, obtenemos, directamente, el valor de la dureza.

Con respecto a la presentación de los resultados y en caso que el ensayo se haya realizado en condiciones normales –es decir, con una carga P de 3000 kgf, con bolilla de acero duro de 10 mm de diámetro y durante un tiempo de 15 segundos–, el resultado se presenta con el número de la dureza seguido por las letras mayúsculas HB.

En caso de emplear condiciones normales de ensayo pero con bolilla de carburo de tungsteno, el valor de la dureza va seguido de las letras mayúsculas HBW.

En caso que alguna condición del ensayo difiera de las condiciones normales, el valor numérico de la dureza va seguido de las letras HB o HBW; y, a continuación, se colocan los valores de D, P, t (en ese orden) y sin unidades. Por ejemplo: Una dureza Brinell de 200 obtenida con bolilla de acero duro de 5 mm de diámetro, empleando una carga de 375 kgf, en tiempo t igual a 30 segundos, se indica de la siguiente forma:

200 HB 5 / 375 / 30

Las **ventajas** del ensayo Brinell son:

- Como el tamaño de la impronta es relativamente grande, se disminuyen los efectos de las heterogeneidades del material.
- La preparación de la probeta es simple.
- Si no se dispone de un durómetro, puede utilizarse una prensa hidráulica o una máquina de tracción, siempre que sea posible controlar la aplicación de la carga.

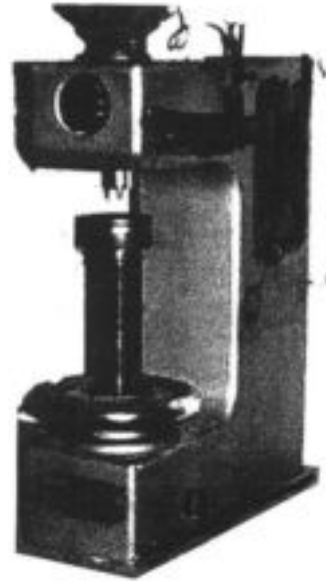
Desventajas del ensayo Brinell:

- Es un ensayo relativamente lento.
- La impronta que produce este ensayo es grande; en muchos casos, la pieza se inutiliza, con el consiguiente desperdicio.
- No es un método aplicable a materiales muy duros ya que se deforma la bolilla, provocando distorsión en los resultados del ensayo.
- No es un método aplicable a piezas pequeñas.
- No es un método aplicable a piezas con tratamiento superficial.

Existe una relación entre la dureza Brinell y la resistencia a la tracción de aceros. La siguiente expresión permite calcular, en forma aproximada, la resistencia máxima a la tracción, para el caso de aceros de bajo carbono recocidos.

$$\sigma_{ET} \text{ (Mpa)} = 3,5 \cdot \text{HB}$$

Las **máquinas** para realizar ensayos de dureza se denominan durómetros.



Durómetro

Cabe mencionar la existencia de máquinas que permiten realizar más de un tipo de ensayo de dureza; por ejemplo, Brinell y Vickers.



Actividades para el aula 10

Usted puede proponer a sus alumnos una actividad como ésta:

A fin de controlar la calidad de diversas materias primas compradas, una empresa realiza ensayos Brinell (todos con bolilla de acero) en las condiciones presentadas en la tabla.

A partir de la tabla, los alumnos calculan la dureza Brinell en cada caso y expresan

los resultados en la forma correcta.

Además –y, suponiendo que los materiales de los ensayos 1 y 3 corresponden a aceros–, es interesante que determinen, en forma aproximada, la resistencia a la tracción para dichos casos.

En caso que la escuela posea un durómetro, le recomendamos hacer





Nº de ensayo	Carga P (kgf)	Diámetro de bolilla (mm)	Diámetro de impronta (mm)	Tiempo de ensayo (s)
1	3000	10	3,2	15
2	1000	10	2,8	30
3	750	5	3	45
4	500	5	2,1	45

ensayos de aplicación. Existen durómetros Brinell de taller que son portátiles y de mucho menor costo que los durómetros tradicionales.

En caso que la escuela no posea durómetro, sus alumnos pueden efectuar ensayos de

dureza empleando una máquina universal o una prensa hidráulica; no importa que los valores obtenidos no sean de gran precisión ya que –a efectos del proceso de enseñanza y de aprendizaje– la experiencia resultará igualmente valiosa.



MÉTODO ROCKWELL

El método Rockwell, al igual que el Brinell, es un método de penetración.

En este método se utilizan cargas más pequeñas que en el método Brinell; los penetradores pueden ser de dos tipos: cono de diamante o bolillas de acero duro de distintos diámetros.

El método Rockwell, al aplicar cargas menores, deja improntas menores que el método Brinell.

En este sistema, la dureza se lee directamente en el dial de la máquina y sólo depende de la profundidad de penetración (Recordemos

que, para determinar la dureza Brinell, se debía efectuar el correspondiente cálculo).

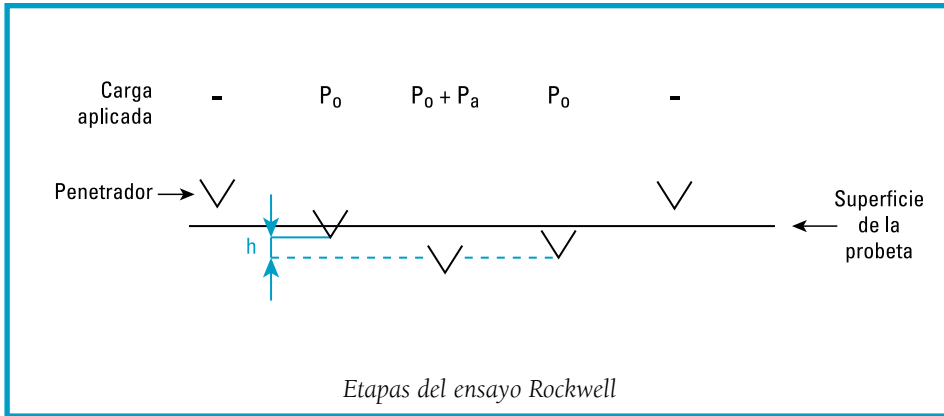
Para la realización del ensayo Rockwell:

- Aplicamos una carga inicial P_0 (también llamada *precarga*) para que el penetrador quede firmemente en contacto con la pieza; la profundidad alcanzada será usada como nivel de referencia.
- Luego, colocamos la aguja del dial indicador en el valor de fondo de escala (invertimos la escala para lograr que a materiales más duros correspondan mayores valores numéricos de dureza).
- A continuación, agregamos la carga adicional P_a sin choques ni vibraciones.

- Dejamos actuar un tiempo la carga total (inicial más adicional) de modo que asegure la finalización de la deformación plástica (el indicador se detiene).
- Acto seguido, retiramos la carga adicional

y leemos la dureza Rockwell en el dial de la máquina.

Resumidamente, el aumento de penetración expresado en micrómetros (h) provocado por la carga adicional, determina la dureza de la pieza.



El durómetro se calibra de forma tal que, a partir de la medición de la profundidad de penetración, se lea la dureza Rockwell directamente en el dial de la máquina; la dureza Rockwell (HR) y la profundidad de penetración (h), están relacionadas mediante la ecuación:

$$HR = C - (h/C1)$$

Donde:

- C y C1 son constantes que dependen de la escala Rockwell utilizada.
- C es el número que corresponde al fondo de escala; su valor es 100, cuando usamos cono de diamante, y 130 si el penetrador usado es la bolilla.
- C1 es la distancia de penetración equivalente a un número Rockwell; vale 1 micrómetro para la escala Rockwell

superficial y 2 micrómetros para la escala Rockwell normal.

La ecuación $HR = C - (h / C1)$ es válida para superficies planas; en caso de ensayar superficies curvas, las normas especifican el valor que se debe agregar al número indicado por el dial de la máquina.

Las **escalas Rockwell** se pueden dividir en dos grandes categorías: escalas comunes y escalas superficiales.

- En las escalas Rockwell **comunes**, la carga inicial tiene un valor de 10 kgf. Un número Rockwell corresponde a una penetración de 2 micrómetros.
- En las escalas Rockwell **superficiales**, la carga inicial tiene un valor de 3 kgf. Un número Rockwell corresponde a una penetración de 1 micrómetro.

Características de algunas escalas Rockwell tanto comunes como superficiales

Escala	Tipo de escala	Penetrador	Carga inicial (kgf)	Carga adicional (kgf)	Carga total (kgf)
A	Común	Cono de diamante	10	50	60
C	Común	Cono de diamante	10	140	150
D	Común	Cono de diamante	10	90	100
F	Común	Bolilla 1/16"	10	50	60
B	Común	Bolilla 1/16"	10	90	100
H	Común	Bolilla 1/8 "	10	50	60
E	Común	Bolilla 1/8 "	10	90	100
15N	Superficial	Cono de diamante	3	12	15
30N	Superficial	Cono de diamante	3	27	30
15T	Superficial	Bolilla 1/16"	3	12	15
30T	Superficial	Bolilla 1/16"	3	27	30

En las escalas superficiales, la letra N significa que se usa cono de diamante y la letra T significa que se usa bolilla de 1/16".

Para elegir la escala correspondiente a una determinada aplicación, se considera tanto el material como el espesor de la capa o pieza a ensayar.

A fin de realizar una correcta elección de la escala, lo más apropiado (como en todo otro ensayo) es consultar las normas correspondientes.

Sin embargo, a fin de tener una primera

aproximación, podemos considerar las siguientes indicaciones:

- **Rockwell A.** Se aplica a materiales de gran dureza y de poco espesor, como hojas de tijeras, aceros con tratamientos termoquímicos, etc.
- **Rockwell B.** Se aplica a materiales de dureza intermedia, como aceros de medio y bajo tenor de carbono, aleaciones de cobre y aluminio, etc.

- **Rockwell C.** Se aplica a materiales de gran dureza y espesor, como aceros templados, aceros aleados, fundiciones muy duras y, en general, materiales con HRB superior a 100.
- **Rockwell F.** Se aplica a chapas de metales blandos, aleaciones de cobre, etc.
- **Rockwell E.** Se aplica a metales blandos y antifricción.

La **escala B** arroja valores aceptables entre HRB 10 y 100. Para valores mayores a HRB = 100, la bolilla se puede deformar. Para valores menores a HRB = 10, los valores son erráticos.

La **escala C** se aplica a materiales cuya dureza excede HRB = 100. El rango correcto de trabajo en la escala Rockwell C abarca desde HRC = 20 hasta HRC = 70.

Si no se conoce el material ensayado ni sus condiciones, lo conveniente es realizar, primero, un ensayo Rockwell C y, si el resultado obtenido es inferior a 20, se procede a realizar un ensayo Rockwell B.

Si el material ensayado carece de homogeneidad, habrá gran dispersión en los resultados obtenidos; en ese caso, conviene cambiar a una escala con carga o bolilla mayor.

En cuanto a las escalas superficiales:

- **Escalas N.** Se aplican a materiales como aceros endurecidos, aleaciones duras y carburos.
- **Escalas T.** Se aplican a materiales blandos, como latones, bronces, aceros blandos o materiales similares.

Las **precauciones** generales del ensayo Rockwell son:

- La superficie de la pieza o probeta a ensayar estará libre de aceites, pinturas, virutas, etc. Durante el mecanizado de preparación de la superficie, no resultarán calentamientos que produzcan tratamientos térmicos superficiales.
- La pieza o probeta estará apoyada firmemente sobre la máquina de ensayo; la carga se aplicará perpendicularmente a la superficie ensayada.
- Durante la realización del ensayo, no se producirán vibraciones ni choques.
- El espesor de la pieza o capa a medir, será igual o mayor a 10 veces la profundidad de penetración h .
- La distancia entre el borde de la probeta y el centro de la impronta será igual o mayor a 2,5 veces el diámetro de la impronta. La distancia entre centros de improntas contiguas será igual o mayor a 4 veces el diámetro de impronta.
- La máquina de ensayo se calibrará periódicamente; a tal fin, con la máquina se suministran probetas de dureza certificada.
- Se recomienda leer las instrucciones del manual de la máquina.

MÉTODO VICKERS

El método de dureza Vickers es también un método de penetración. En él, se aplica un penetrador de diamante con forma de pirámide recta de base cuadrada, cuyo ángulo entre caras opuestas es de 136° .

Se aplica una carga creciente, hasta un valor máximo que varía entre 1 y 120 kgf; sin

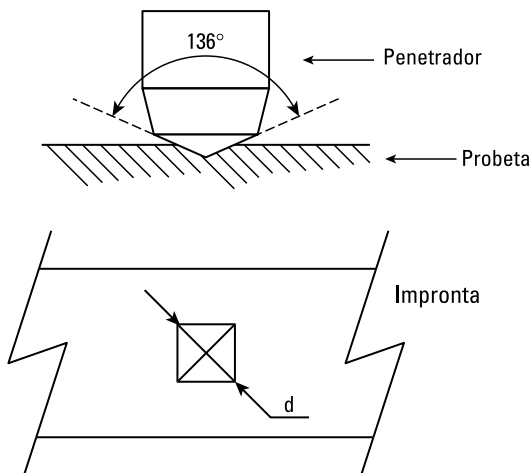
embargo, las cargas de mayor uso en este método corresponden a 10, 30 y 50 kgf.

Los ensayos realizados con cargas menores a 1 kgf se denominan ensayos de microdureza Vickers; en estos casos, las cargas más utilizadas corresponden a 100, 300 y 500 gf.

El penetrador se aplica hasta que la carga alcanza su máximo valor; luego, dicha carga actúa durante un tiempo t ; posteriormente, se retiran la carga y el penetrador.

En la pieza o probeta ensayada queda una impronta; debemos medir las dos diagonales de dicha impronta y hacer el promedio.

La dureza Vickers está definida como el cociente entre la carga aplicada (kgf) y la superficie de la impronta (mm^2) calculada a partir del promedio de las diagonales.



Esquema del ensayo Vickers

En forma genérica, la dureza Vickers se calcula del siguiente modo:

$$HV = (k \cdot P) / S$$

Donde:

- P es la carga aplicada.
- S es la superficie de la impronta.
- k es una constante de conversión.

En caso que la carga P estuviese expresada en kgf y la superficie de la impronta en mm^2 , la constante k vale 1.

En caso que la carga P estuviese expresada en newton y la superficie de la impronta en mm^2 , la constante k vale 0,10197.

En caso que la carga P estuviese expresada en gf y la superficie de la impronta en micrometros cuadrados, la constante k vale 1000.

La **fórmula de cálculo** (cuya deducción no exponemos) que permite determinar la dureza Vickers en función del promedio de las diagonales, es:

$$HV = (k \cdot 1,8544 \cdot P) / d^2$$

Donde:

- k es la constante.
- P es la carga.
- d es el valor promedio de las diagonales.

Consideremos la **notación**. En los ensayos Vickers normales, el resultado numérico va seguido de las letras HV y, a continuación, se especifica la carga de ensayo en kgf. El tiempo de permanencia de la carga se especifica a

continuación de la carga, si fuese distinto a los 15 segundos.

Por ejemplo: Una dureza Vickers de 150 obtenida con una carga de 30 kgf aplicada durante 20 segundos, se expresa de la siguiente forma:

150 HV 30 / 20

En un caso similar al anterior, pero habiendo aplicado la carga durante 15 segundos, la notación es:

150 HV 30

Observamos que, aquí, no es necesario especificar el tiempo, ya que éste es igual a 15 segundos.

Para los ensayos de microdureza, la carga P expresada en gf y el tiempo t se ubican como subíndices.

Así, una dureza Vickers de 500, obtenida con una carga de 300 gf durante 15 segundos se expresa:

500 HV₃₀₀

El mismo caso anterior, pero habiendo actuado la carga durante 30 segundos:

500 HV_{300 / 30}

Las **precauciones** durante el ensayo de Vickers son:

- La superficie estará limpia y libre de lubricantes, óxidos, etc.
- Si la superficie a ensayar tiene curvatura (esférica o cilíndrica) se podrá corregir mediante factores correctivos expresados en las normas.
- En los ensayos de microdureza, la probeta será preparada con extremo cuidado, obteniendo un pulido correspondiente a una preparación metalográfica.
- Se asegurará la perpendicularidad entre carga y superficie.
- La probeta no sufrirá desplazamientos, choques ni vibraciones durante el ensayo.
- La medición de las diagonales de la impronta se realizará con instrumentos de precisión.
- Para calcular la dureza, se usará el promedio de las diagonales. Si los valores de las diagonales difieren mucho entre sí, se investigarán los motivos de tal diferencia, y, si es posible, se corregirá la causa y se repetirá el ensayo.
- El espesor de la probeta será, como mínimo, igual a 10 veces la profundidad de la impronta.
- La distancia entre centros de improntas será igual o mayor a 4 veces el valor de la diagonal. La distancia entre el centro de una impronta y el borde de la probeta, será igual o mayor a 2,5 veces el valor de la diagonal.

Las **ventajas** del ensayo Vickers son:

- Se usa un único penetrador para todo el rango de durezas.
- Con las cargas pequeñas (en gramos) se obtienen improntas pequeñas y, por lo tanto, se pueden medir capas o piezas muy delgadas.

Las **desventajas** del ensayo Vickers:

- Es un ensayo lento.
- Deben medirse cuidadosamente las diagonales.
- Requiere una excelente preparación superficial para cargas bajas.



Actividades para el aula 11

Le proponemos que trabaje esta situación con sus alumnos:

En un determinado proceso de fabricación, las durezas de pequeñas láminas metáli-

cas son variables críticas para el correcto funcionamiento del producto final. Por tal motivo, se realiza una serie de ensayos Vickers a distintos tipos de láminas, de acuerdo con la siguiente tabla:

Lámina N°	Carga P (gf)	Diagonal N° 1 (micrómetros)	Diagonal N° 2 (micrómetros)	Tiempo de ensayo (s)
1	100	10	12	15
2	300	32	29	30
3	500	59	61	45

Calculemos los valores de dureza Vickers para cada tipo de lámina, expresando los

resultados en forma adecuada.



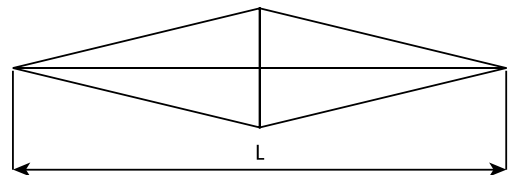
MÉTODO KNOOP

Es un ensayo de penetración, similar a los que ya hemos visto.

El penetrador es una pirámide de diamante; su base tiene forma de rombo determinada por norma.

En este ensayo, se aumenta el valor de la carga hasta un valor máximo P y se mantiene aplicada la carga P durante un tiempo t;

posteriormente, se retira el penetrador y se mide la diagonal mayor L.



Vista superior de una impronta Knoop

La dureza Knoop queda definida como el cociente entre la carga P (expresada en kgf) y

el área S (expresada en mm²) del rombo marcado en la superficie de la probeta.

Siendo así, podemos calcular la dureza Knoop de la siguiente manera:

$$HK = (k \cdot P) / S$$

Cuando la carga P está expresada en kgf y el área en mm², la constante k vale:

$$k = 1 \frac{HK}{\text{kgf} / \text{mm}^2}$$

Cuando la carga P está expresada en gf y el área en micrómetros cuadrados, la constante k vale:

$$k = 1000 \frac{HK}{\text{gf} / \mu\text{m}^2}$$

A partir de consideraciones geométricas, cuya deducción no presentamos, se obtiene la fórmula de cálculo de la dureza Knoop:

$$HK = (14,229 \cdot k \cdot P) / L^2$$

Donde:

- k toma el valor de acuerdo a las unidades elegidas.
- L es el valor de la diagonal mayor.

Las cargas utilizadas varían entre 1 y 1000 gf, mientras que los tiempos de permanencia de la carga P más comúnmente usados oscilan, generalmente, entre 10 y 15 segundos (estos tiempos no se indican en la notación).

Respecto de las **notaciones**, el criterio es similar al de los métodos anteriores. Por

ejemplo, una dureza Knoop de 350, obtenida con una carga de 200 gramos aplicada entre 10 y 15 segundos, se expresa:

$$350 \text{ HK}_{200}$$

El mismo ejemplo anterior pero con tiempo de aplicación de 30 segundos:

$$350 \text{ HK}_{200/30}$$

Este ensayo se aplica a piezas muy pequeñas, capas superficiales delgadas o electrodepositadas, superficies tratadas termoquímicamente, etc.

Respecto de los cuidados y precauciones a tener en cuenta en el ensayo, son los mismos que en los casos anteriores.

Como en todos los ensayos, se recomienda consultar las normas correspondientes.

MÉTODO SHORE

Éste es un ensayo de rebote. Consiste en dejar caer desde cierta altura una masa (llamada martillo) con punta diamantada o de acero muy duro. El martillo cae guiado por el interior de un tubo vertical de vidrio; éste último puede acercarse o alejarse de la base del durómetro, para poder ensayar piezas de diferentes espesores.

A partir de la altura de rebote, se calcula la dureza Shore:

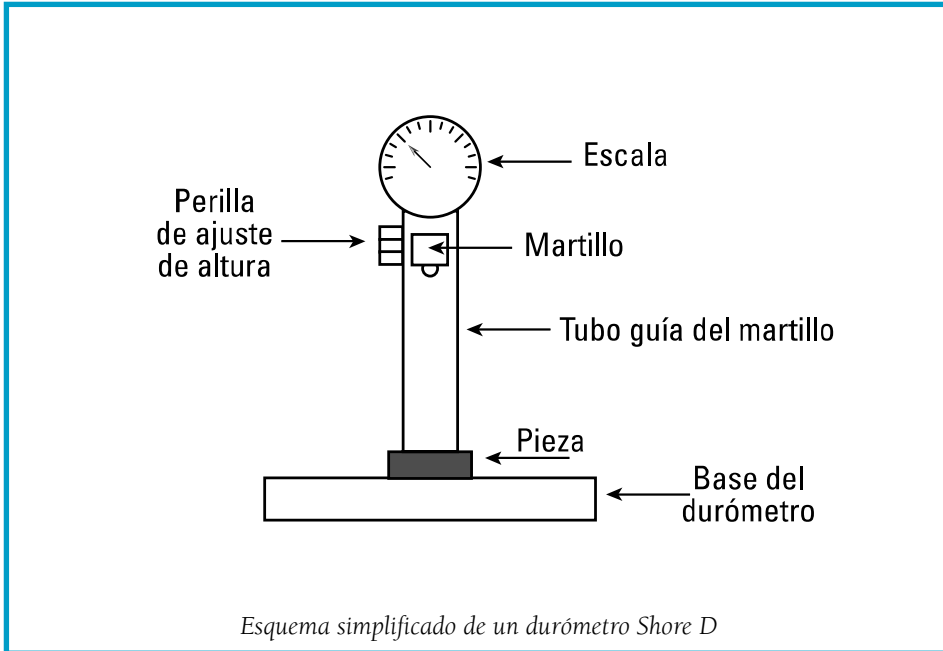
$$HS = \frac{h \cdot 100}{h_0}$$

Donde:

- h_0 es la altura inicial.
- h es la altura del rebote.

Como material de referencia para la construcción de la escala, se toma un acero de herramientas templado (si ensayamos este acero, la altura de rebote será h_0).

Respecto de los durómetros Shore, existen dos tipos fundamentales: el durómetro Shore C y el durómetro Shore D.



Los resultados se expresan con el valor numérico de la dureza seguido de las letras mayúsculas HSC o HSD, según hayamos empleado un durómetro C o D, respectivamente.

Las **ventajas** del ensayo Shore son:

- Es un ensayo rápido y simple.
- La impronta es muy pequeña y, por lo tanto, puede aplicarse en piezas reducidas.

- Hay instrumentos de dureza Shore que son portátiles.
- Es un ensayo sensible para altos valores de dureza.

Sus **desventajas**:

- Es un ensayo que requiere gran preparación superficial.
- El ensayo no puede realizarse en superficies magnetizadas.



Actividades para el aula 12

Sus alumnos pueden construir un dispositivo elemental de medición de dureza por rebote. Éste, a pesar de carecer de la precisión necesaria, tendrá gran valor didáctico y permitirá ensayar diversos materiales, a fin de realizar comparaciones. Con él será posible medir la altura de rebote de distintos materiales, como aceros con y sin tratamiento térmico, aleaciones de cobre y aluminio, fundiciones, maderas, plásticos.

Un método elemental es el empleo de una lima, para determinar si un material es

más o menos duro. En los materiales duros, la lima tenderá a resbalar con gran facilidad; mientras que, en los materiales más blandos, la lima arrancará material de la pieza.

Los alumnos pueden realizar esta experiencia sobre distintos materiales, como aceros con y sin tratamiento térmico, aleaciones de cobre y aluminio, fundiciones, maderas, plásticos y otros. Esta sencilla experiencia, permitirá comparar las durezas de distintos materiales, en forma cualitativa.



Ensayo de fatiga

La mayoría de los componentes de máquinas no están sometidos a cargas estáticas sino a cargas variables en función del tiempo.

Sucede que un componente mecánico sometido a esfuerzos cíclicos, puede alcanzar la rotura aún cuando las tensiones soportadas sean muy inferiores a la resistencia estática máxima del material o, incluso, inferiores a la tensión de fluencia del material.

Se denomina **fallas de fatiga** a este tipo caracterizado por:

- esfuerzos cíclicos y repetidos en el tiempo,
- roturas ocasionadas por tensiones infe-

riores a la resistencia máxima del material o a la resistencia de fluencia.

Las fallas por fatiga se inician en una grieta pequeña, la cual va aumentando su tamaño con el paso de los ciclos de carga. La mayoría de las veces, la grieta comienza en la superficie del componente.

El comienzo de las fallas por fatiga se puede generar en:

- defectos del material como inclusiones, etc.,
- cambios geométricos en el componente o pieza (agujeros, roscas, chaveteros, reduc-

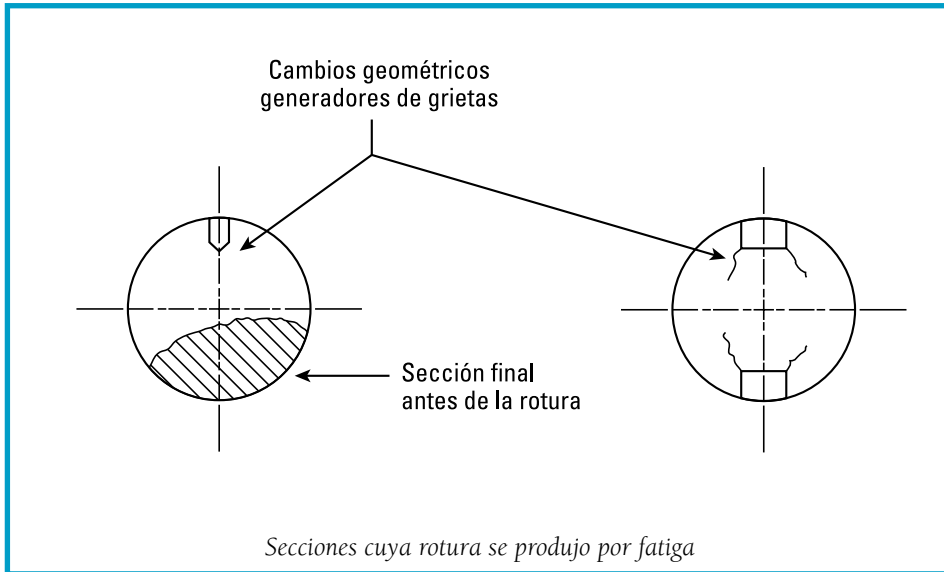
ciones o aumentos de sección, etc.),

- estado superficial del componente (una superficie muy rugosa favorece las fallas por fatiga, lo mismo que las superficies oxidadas).

El aumento de la grieta hace disminuir la sección resistente hasta que, finalmente, esta

última es tan pequeña que se produce la rotura repentina de la pieza.

En consecuencia, en una sección fracturada por fatiga se distinguen dos zonas: una primera zona en la que la grieta ha ido aumentando su tamaño y una segunda zona que rompió repentinamente.



En las fallas estáticas, en general, se produce una gran deformación del componente antes de alcanzar la rotura; muchas veces, esta gran deformación es visible y, entonces, pueden tomarse las medidas correspondientes.

Por el contrario, las fallas por fatiga se producen en forma abrupta y, entonces, resultan muy peligrosas.

Esto significa que los materiales sometidos a cargas estáticas, trabajan en forma muy distinta a los materiales sometidos a cargas de fatiga.

Consideremos algunos ejemplos de componentes sometidos a fatiga.

Las fibras pertenecientes a ejes rotatorios (motores eléctricos, cigüeñales, etc.), en ciertas posiciones de funcionamiento, estarán sometidas a compresión y, en otras posiciones de funcionamiento, estarán sometidas a tracción. Podemos decir, entonces, que los ejes rotatorios están sometidos a fatiga.

Un eje de una máquina gira a razón de 2.000 rpm, durante 8 horas de trabajo diarias. En

un día da 960.000 vueltas y, trabajando 20 días por mes, dará 19.200.000 vueltas mensuales; se ve, entonces, que durante la vida útil, un componente puede sufrir miles de millones de ciclos.

También los cascos de los barcos y las estructuras de aviones están sometidos a esfuerzos variables en el tiempo. Algunos ejemplos de piezas sometidas a fatiga son los rieles de ferrocarril, los dientes de engranajes, los álabes de turbinas y los resortes.

De acuerdo con el tipo de sollicitación a que se ven sometidos los componentes y las piezas mecánicas, existen diversos tipos de falla por fatiga:

- Fallas por fatiga debidas a cargas cíclicas de tracción variables.
- Fallas por fatiga debidas a cargas cíclicas de tracción-compresión alternadas.
- Fallas por fatiga debidas a cargas cíclicas de flexión.
- Fallas por fatiga debidas a cargas cíclicas de torsión.

Teniendo en cuenta la cantidad de ciclos a que el componente o pieza estará sometido durante su vida útil, los estudios de fatiga se dividen en:

- Fatiga de bajo número de ciclos.
- Fatiga de alto número de ciclos.

Algunos autores consideran que 1.000 ciclos es el límite entre la fatiga de bajo número de

ciclos y la de alto número de ciclos; otros autores consideran que dicho límite es 10.000 ciclos o aún más.

Según sea que el componente a analizar esté sometido, durante su vida útil, a alto número de ciclos o a bajo número de ciclos, se aplicarán distintos procedimientos para analizar las fallas por fatiga.

En el caso de fatiga de alto número de ciclos (que se da en máquinas rotativas tanto fijas como móviles) que es el caso que estudiaremos nosotros, el procedimiento aplicado busca encontrar un límite de resistencia a la fatiga.

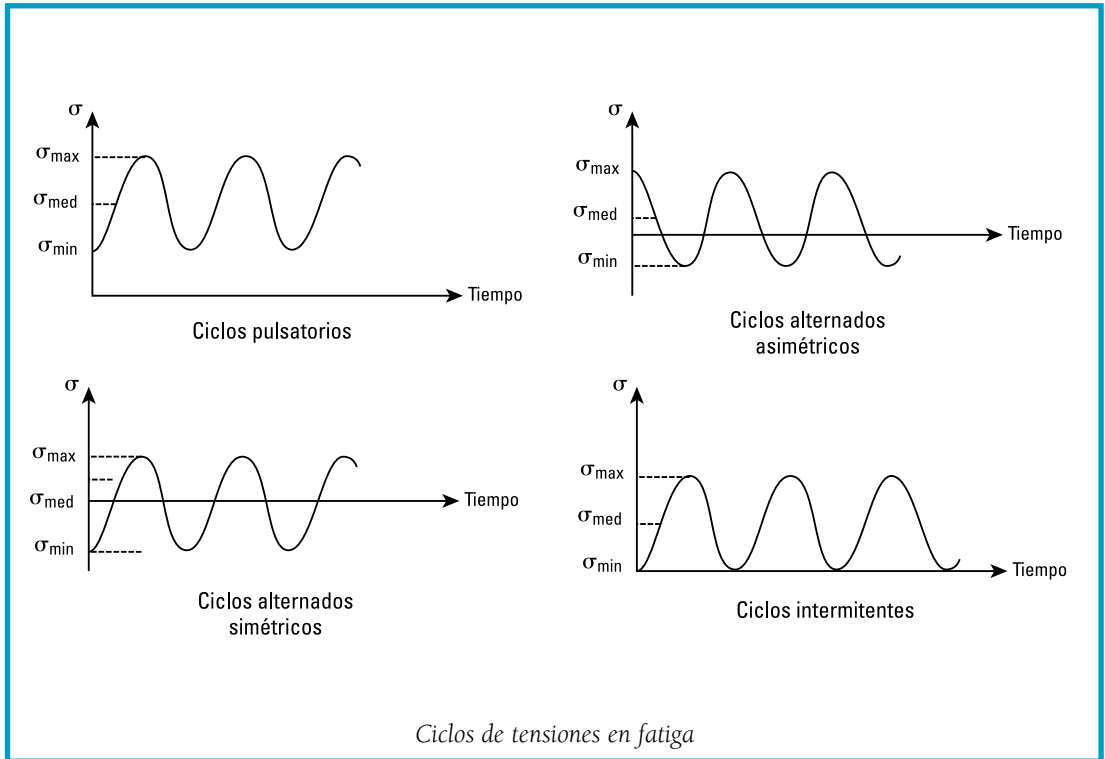
Teniendo en cuenta el límite de resistencia a la fatiga (obtenido de los ensayos) y un factor de seguridad, diseñamos la pieza o componente para que soporte la fatiga sin problemas. Aplicando este procedimiento de encontrar un límite de resistencia a la fatiga, buscamos que la iniciación de las grietas nunca empiece.

Este procedimiento² se ha aplicado durante mucho tiempo, por lo que existe una gran cantidad de datos y de información disponibles. Mediante su aplicación se pueden diseñar componentes sujetos a cargas variables que tengan vida infinita.

De acuerdo a cómo son las tensiones aplicadas en función del tiempo, tenemos distintos ciclos:

²Existen otros dos procedimientos que escapan del objetivo de este material de capacitación, por lo que no los estudiaremos. Éstos permiten analizar las fallas por fatiga de bajo número de ciclos y son:

- el procedimiento de la deformación-vida,
- el procedimiento de la mecánica de fractura lineal elástica.



En todos los ciclos graficados, se verifica que σ_{MAX} es la tensión máxima, σ_{MED} es la tensión media y σ_{MIN} es la tensión mínima.

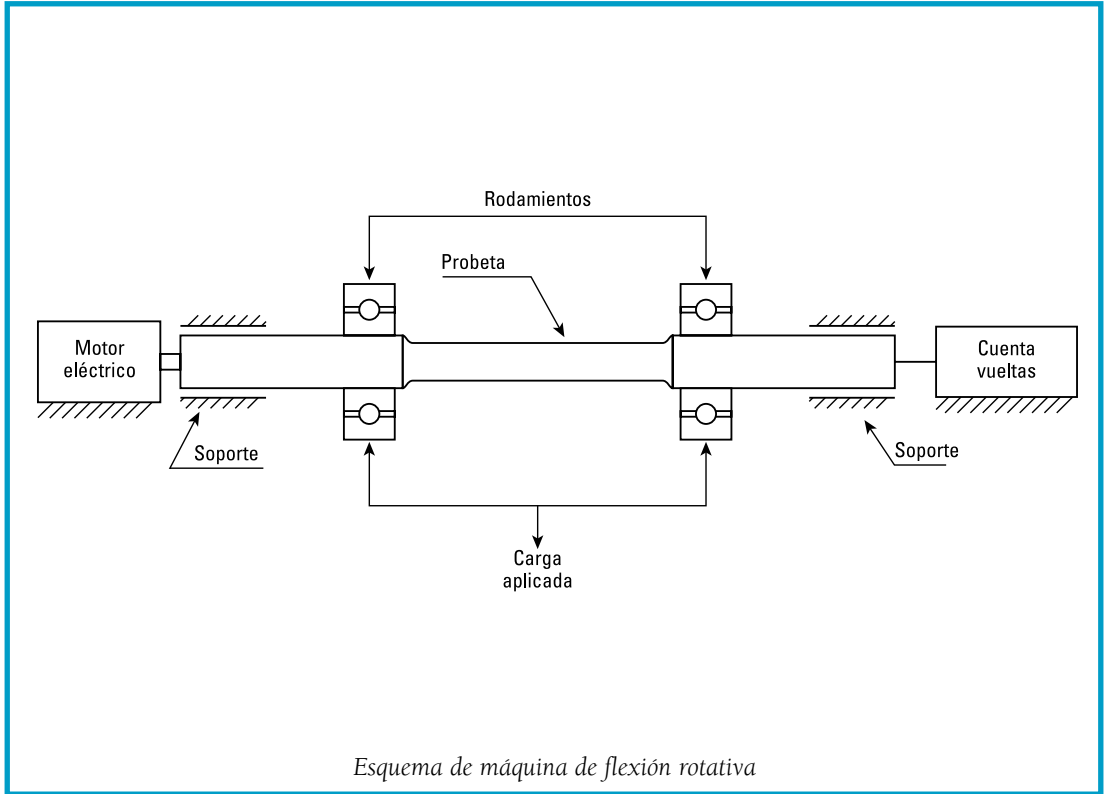
La fatiga puede ser ocasionada por distintos tipos de esfuerzos cíclicos. Por lo tanto, existen distintos tipos de máquinas:

- Máquinas que producen fatiga, mediante esfuerzos axiales variables de tracción/compresión.
- Máquinas que producen fatiga, mediante esfuerzos variables de flexión.
- Máquinas que producen fatiga, mediante esfuerzos variables de torsión.

Cada una de éstas incluye un contador que registra el número de ciclos aplicados.

Las máquinas más utilizadas son las que producen fatiga aplicando esfuerzos de flexión; estas máquinas utilizan una probeta giratoria. La probeta está sostenida, en sus extremos, por sujetadores especiales. La carga se aplica a través de dos rodamientos equidistantes del centro de la probeta; ambos rodamientos soportan cargas iguales.

Para que los esfuerzos sean cíclicos, se hace girar mecánicamente la probeta mediante un motor; en cada vuelta se provoca un ciclo de carga. Lo anterior significa que cuando una fibra de la superficie externa de la probeta esté en la parte superior se encontrará sometida a compresión; cuando el giro de la probeta provoque que la fibra anterior pase a ocupar la parte inferior de la probeta, la misma fibra estará sometida a tracción.



Existen máquinas universales de fatiga en las que, a través del uso de distintos dispositivos, se pueden realizar ensayos aplicando esfuerzos cíclicos de tracción y/o compresión, de flexión o de torsión.

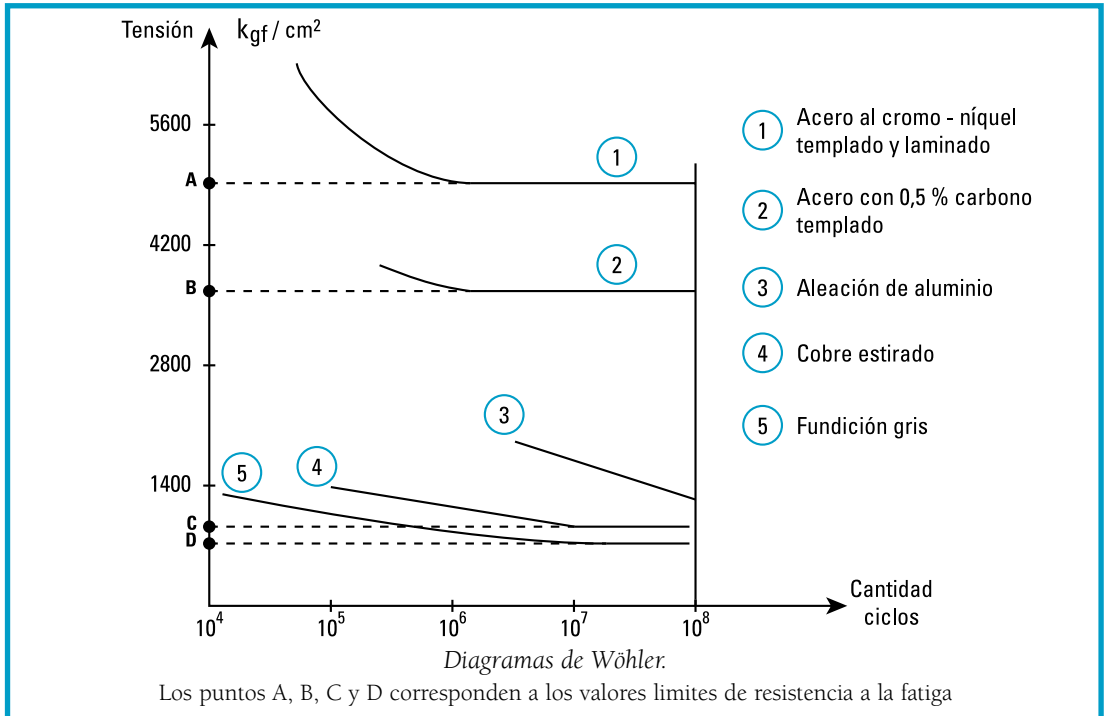
El objetivo final del ensayo es determinar el límite de resistencia a la fatiga del material estudiado. A tal fin, se prepara un número suficiente de probetas que sean representativas del material. Con los resultados obtenidos de las distintas probetas, se traza la curva de Wöhler correspondiente al material ensayado.

Para construir la curva de Wöhler de un material, se necesita un mínimo de entre 10

y 15 probetas iguales. La curva de Wöhler es un gráfico que muestra la tensión en el eje de ordenadas y la cantidad de ciclos para alcanzar la rotura en el eje de abscisas; los gráficos de Wöhler también se conocen como gráficos S-N (S hace referencia a las tensiones y N al número de ciclos).

Los gráficos de Wöhler son semilogarítmicos; esto significa que la escala de tensiones (eje de ordenadas) es lineal, mientras que la escala del número de ciclos (eje de abscisas) es logarítmica.

A continuación, mostramos diagramas de Wöhler para distintos materiales metálicos sometidos a fatiga mediante flexión rotativa:



La probeta inicial se somete a altas tensiones y, por lo tanto, su rotura ocurre a baja cantidad de ciclos; las probetas siguientes se ensayan con tensiones menores, necesitando mayor cantidad de ciclos para alcanzar la rotura.

Es muy importante mencionar que, aún para un mismo material ensayado en iguales condiciones, las curvas de Wöhler obtenidas tienen importantes variaciones entre sí.

Para ensayos habituales de rutina, puede tomarse como válida la curva de Wöhler obtenida con una única serie de probetas; para estudios más rigurosos, además de las tensiones (S) y del número de ciclos (N), debemos considerar la probabilidad de falla (P) mediante la realización de estudios estadísticos.

Consideremos la influencia de las distintas variables en la resistencia a la fatiga:

- **Terminación superficial.** Como hemos dicho, la mayor parte de las grietas se da en la superficie de los componentes; por esto, cuanto mejor sea la terminación superficial (superficie más pulida), mayor será la resistencia a la fatiga. Así, por ejemplo, una superficie rectificada tendrá mayor resistencia a la fatiga que una superficie desbastada en un torno.
- **Endurecimiento superficial.** El endurecimiento superficial se obtiene mediante la proyección de bolillas de acero sobre la superficie de la pieza. El impacto de bolillas de acero (granalla-

do) provoca tensiones de compresión en la superficie de la pieza; dichas tensiones de compresión perjudican el inicio y la propagación de grietas, mejorando así la resistencia a la fatiga.

- **Trabajado en frío.** El trabajado en frío (por ejemplo: estampado, laminado o trefilado) origina tensiones de compresión en la superficie de la pieza. Estas tensiones de compresión disminuyen la generación y propagación de grietas, mejorando la resistencia a la fatiga.
- **Corrosión.** Durante su funcionamiento, muchos componentes mecánicos están expuestos a la acción de vapor de agua, gases de escape de motores, vapores de ácidos, etc., los que tienen importantes efectos corrosivos. Estos factores corrosivos favorecen la aparición de nuevas grietas, además de incrementar la velocidad de crecimiento de las grietas ya existentes. Resulta, entonces, que la corrosión perjudica la resistencia a la fatiga.
- **Tratamientos térmicos.** Tratamientos térmicos tales como la cementación y el temple a la llama o por inducción, mejoran la resistencia a la fatiga³. La nitruración, que es un tratamiento termoquímico, también mejora la resistencia a la fatiga.
- **Capas depositadas en forma electrolítica.** El niquelado y el cromado no favorecen la resistencia a la fatiga, a menos que vayan acompañados de otros tratamientos superficiales –como el granallado–.

Por otra parte, las capas depositadas de metales blandos tales como cobre, plomo, estaño y zinc no comprometen seriamente la resistencia a la fatiga.

- **Temperatura.** La mayor parte de los ensayos de materiales se realiza a temperatura ambiente. Sin embargo, durante su vida útil, muchas piezas están expuestas a altas temperaturas (como en las máquinas térmicas) o a bajas temperaturas (como en máquinas frigoríficas). Por lo tanto, la resistencia a la fatiga también varía en función de la temperatura; la relación entre resistencia a la fatiga y temperatura es bastante compleja, dependiendo, además, del material ensayado. Por ejemplo, la resistencia a la fatiga de algunos aceros disminuye hasta que encuentra su punto más bajo alrededor de los 150 °C y, luego, aumenta hasta alcanzar su punto más alto entre los 300 °C y 400 °C; a partir de los 300-400 °C, la resistencia a la fatiga disminuye nuevamente.

¿Cómo se concreta el ensayo en componentes reales? Muchas veces, se necesita estudiar el comportamiento a fatiga de piezas críticas en las condiciones de trabajo reales; por ejemplo, en amortiguadores, estructuras de aviones, etc. Para realizar estos ensayos se construyen dispositivos específicos que, obviamente, son costosos, pero cuyo gasto es justificado por razones de seguridad.

Al realizarse el ensayo sobre componentes que tienen forma y tamaño real, los resultados son mucho más confiables que si el ensayo se hubiese realizado sobre probetas de laboratorio.

³ Estudiaremos los tratamientos térmicos, con mayor profundidad, en los próximos materiales de capacitación de esta serie.



Actividades para el aula 13

Le proponemos las siguientes cuestiones para discutir en clase:

- Cuando queremos cortar un alambre a mano, en lugar de traccionarlo, lo que hacemos es esforzarlo hacia un lado y hacia el otro en forma sucesiva, hasta que se rompe. ¿Qué relación tiene esta forma de proceder con la sollicitación por fatiga? Suponiendo que los esfuerzos aplicados hacia un lado y hacia el otro son absolutamente parejos, ¿qué tipo de ciclo corresponde?
- Supongamos que tenemos dos ejes A y B que tienen igual diámetro, son de igual material y cada uno tiene un chavetero. La única diferencia es que la base del chavetero correspondiente al eje A tiene ángulos rectos, mientras que la base del chavetero correspondiente al eje B es redondeada. ¿Cuál de los ejes tendrá mayor resistencia a la fatiga y por qué?
- ¿Se puede afirmar que las bielas de motores de combustión interna están sometidas a ciclos de fatiga de tracción–compresión? Expliquemos la idea.
- ¿Qué importancia tienen las grietas en la resistencia a la fatiga?



Ensayo de termofluencia

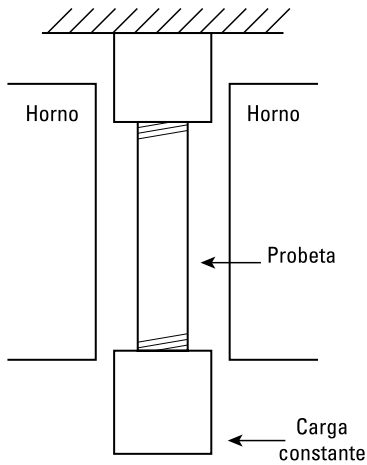
Muchas piezas, equipos y componentes están sometidos a altas temperaturas de funcionamiento durante el transcurso de su vida útil: las calderas, las turbinas de gas y de vapor, los equipos de las industrias químicas y petroquímicas. En tales condiciones de carga y temperaturas elevadas, se produce una deformación lenta y progresiva; este proceso se denomina termofluencia o *creep*.

Los ensayos de termofluencia son, generalmente, largos: pueden durar varios meses e, incluso, años, y sirven para conocer la capa-

cidad de un material para soportar cargas a temperaturas elevadas.

En forma genérica, la termofluencia se produce a temperaturas superiores a $1/3$ o $1/2$ de la temperatura de fusión del metal ensayado.

Durante el ensayo, se mantienen constantes la tensión o la carga y la temperatura; lo que se busca obtener es la deformación de la probeta en función del tiempo. Los ensayos se realizan, habitualmente, a carga y temperatura constante, y es conveniente que las condiciones de ensayo sean muy similares a las de funcionamiento.



Esquema de un ensayo de termofluencia

En los gráficos obtenidos, se distinguen tres etapas distintas.

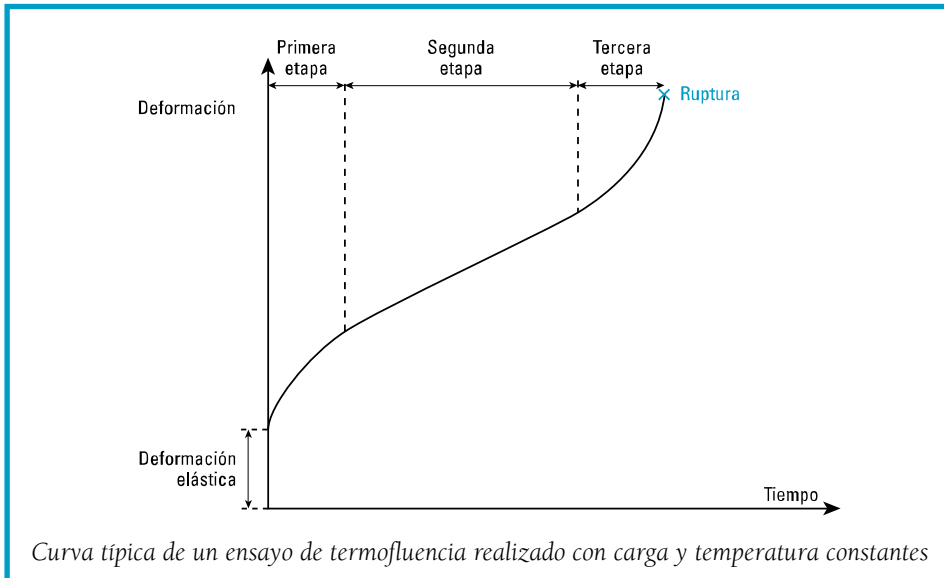
1. Disminuye la velocidad de deformación (dada por la pendiente de la curva), lo que significa que el material se endurece. Es decir que, a medida que transcurre la etapa 1, las dislocaciones

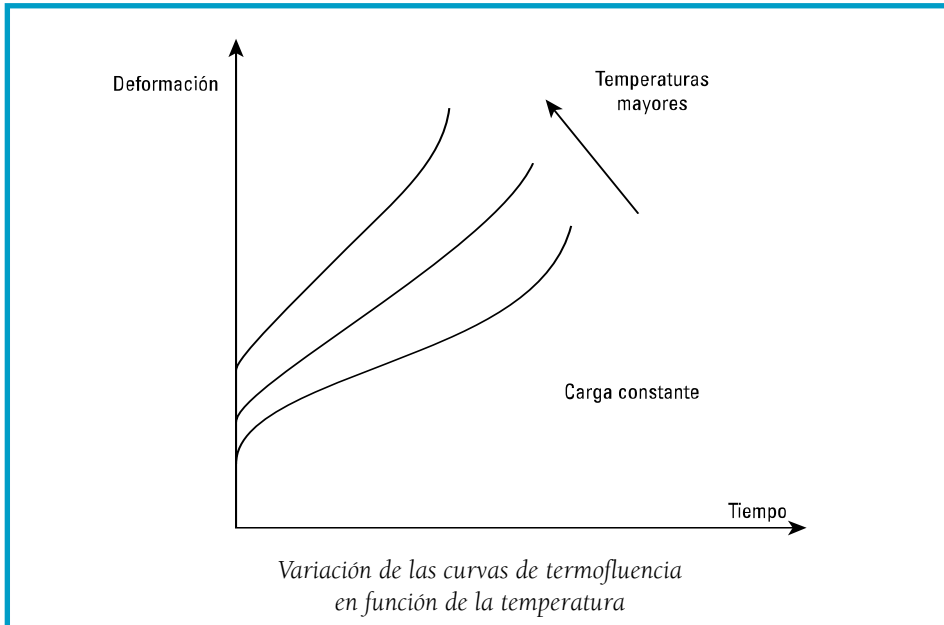
tienen mayor dificultad para moverse.

2. Corresponde a la parte lineal del gráfico. La velocidad de deformación es constante; las dislocaciones sobrepasan los obstáculos con la misma velocidad con que son "frenadas" por otras imperfecciones. La pendiente de la recta en esta segunda etapa es un importantísimo parámetro a obtener en el ensayo y se denomina *velocidad de termofluencia*:

$$\text{Velocidad de termofluencia} = \frac{\Delta \text{deformación}}{\Delta \text{tiempo}}$$

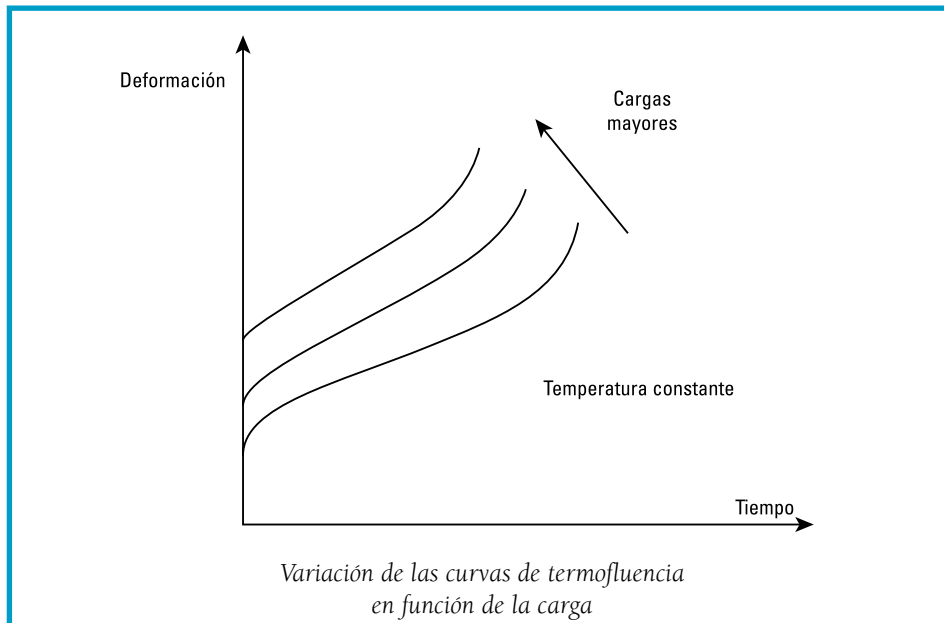
3. Caracterizada por un aumento de la velocidad de deformación, se produce una reducción de la sección que lleva a la rotura final; en este punto, se determina otro importante parámetro: el tiempo de rotura. En determinadas aplicaciones, el *tiempo de rotura* es el parámetro que limita el funcionamiento de las piezas





A partir de la realización de gran cantidad de ensayos de termofluencia, se puede construir, para cada temperatura y cada material, un gráfico de tensión en función del tiempo de ruptura.

Estos gráficos se utilizan para predecir la vida útil de un componente, para una tensión y temperatura determinadas.





Actividades para el aula 14

Un problema para trabajar en clase:

A fin de conocer el comportamiento de un material metálico que trabajará a 560 °C,

se realiza un ensayo de termofluencia. A tal fin, se ensaya una probeta de 10 cm de longitud inicial; los datos obtenidos se muestran en la tabla siguiente.

Tiempo (horas)	Deformación (cm)	Tiempo (horas)	Deformación (cm)
0	10,1	1000	11,6
200	11	1200	11,7
400	11,3	1400	12
600	11,4	1600	12,5
800	11,5	1800	13,4

Graficamos los valores de deformación específica en función del tiempo e identificamos, en el gráfico, cada una de las etapas de la termofluencia.

Explicamos qué sucede en cada etapa y obtenemos la velocidad aproximada de termofluencia.



Ensayo de doblado o plegado

Es un ensayo simple y se utiliza para verificar la ductilidad de metales.

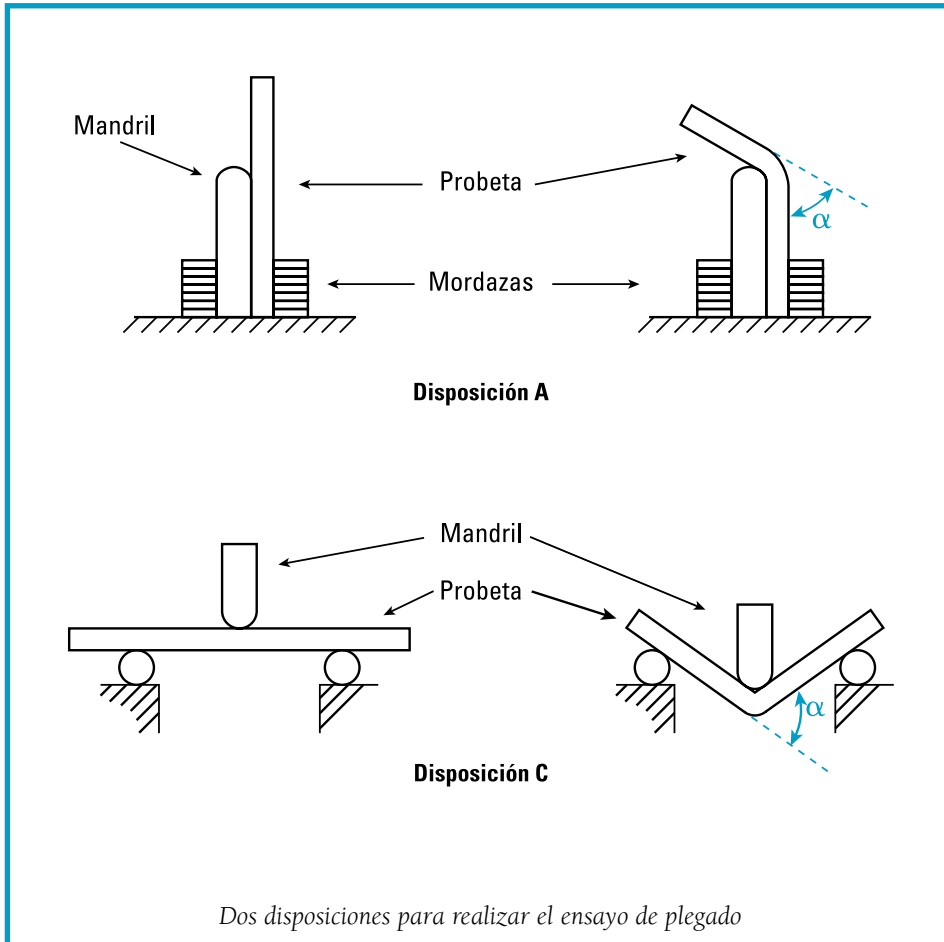
Consiste en:

- someter la probeta a esfuerzos de flexión, hasta que ésta alcanza un determinado ángulo α establecido en la norma del producto ensayado o en las especificaciones técnicas; y, luego,
- verificar visualmente si en la cara sometida a tracción aparecieron grietas⁴.

El material es aceptado si no aparecen grietas a simple vista en la cara traccionada; o, eventualmente, si las grietas no superan determinado tamaño.

Es un ensayo que, entre otros usos, se aplica a juntas soldadas.

⁴ Existen varias disposiciones para realizar el ensayo; como siempre, es imprescindible consultar las normas correspondientes.



Actividades para el aula 15

¿Por qué no propone a sus alumnos que, utilizando una prensa y un mandril de doblado (que puede ser construido por ellos mismos), realicen el doblado a diversos materiales metálicos, y verifiquen o no la existencia de fisuras en la cara traccionada?

Ensayo de embutido

El ensayo de embutido, también denominado ensayo Erichsen, se aplica principalmente a chapas que serán sometidas a procesos de embutido mediante matrices.

Este ensayo permite determinar qué tan buena es la chapa, para ser sometida a procesos de embutido.

Consiste en aplicar un penetrador (punzón) a la chapa para:

- Determinar la ductilidad de la chapa ensayada.
- Determinar el tamaño de grano.

La chapa a ensayar está sujeta por los bordes en su totalidad, mientras que el penetrador avanza a velocidad uniforme sobre la chapa (probeta).

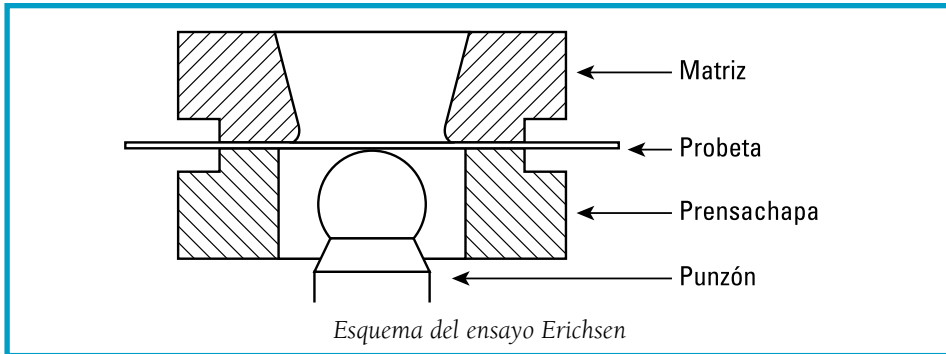
El ensayo finaliza cuando la deformación de la chapa alcanza determinada magnitud o cuando la chapa alcanza la rotura.

La distancia, expresada en mm, que avanza el penetrador desde el inicio del recorrido hasta la rotura de la chapa, se denomina **índice Erichsen**. Este índice da idea de la ductilidad de la chapa y, en consecuencia, es una medida de la capacidad que tiene la chapa para ser deformada mediante procesos de embutido. Este índice no es una característica propia del material, ya que varía con el espesor de la chapa.

El punzón utilizado habitualmente tiene forma esférica, pudiendo variar la forma para casos especiales.

La determinación del tamaño de grano de la chapa ensayada puede efectuarse de dos formas:

- empleando oculares o microscopios provistos en el accesorio correspondiente,
- mediante un muestrario suministrado por el fabricante de la máquina de ensayo.



La probeta y el punzón se recubren con grasa antes del ensayo, a fin de disminuir el rozamiento.

Como en todo ensayo, se recomienda con-

sultar las normas correspondientes; éstas especifican la precisión con que deben efectuarse las mediciones, el tipo de grasa a utilizar y otros parámetros a tener en cuenta.

Ensayos no destructivos

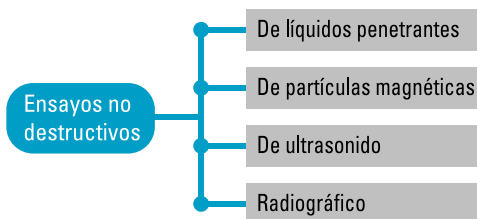
En los ensayos no destructivos, no se provoca la rotura del componente ensayado.

Estos ensayos tienen inmensa aplicación para analizar la existencia de defectos en componentes y piezas que están en uso; algunos defectos que se pueden detectar con estas técnicas son: fallas superficiales y subsuperficiales (grietas), porosidades internas del material, inclusiones, etc. También se pueden medir espesores de recubrimientos, tales como capas niqueladas, pintadas, cromadas, etc.

Los ensayos no destructivos tienen gran aplicación en mantenimiento y permiten, entre otros objetivos:

- determinar la existencia de grietas en soldaduras, componentes de uso aeronáutico, puentes y grandes estructuras;
- determinar espesores de pared en recipientes a presión, tanques y cañerías, considerando que los efectos corrosivos en estos elementos, hacen que las paredes disminuyan su espesor con el paso del tiempo, pudiendo alcanzar valores pequeños que resultan peligrosos;
- inspeccionar defectos internos en piezas fundidas, forjadas o mecanizadas.

Pasaremos ahora, a estudiar los ensayos no destructivos más importantes, en forma particular.



Ensayo de líquidos penetrantes

Con este ensayo se pueden detectar poros o fisuras abiertos a la superficie. El método es aplicable a todo tipo de materiales metálicos y no metálicos, con la restricción de que el material ensayado no debe ser poroso. Los resultados del ensayo son cualitativos.

Resumidamente, el método se basa en la capacidad de ciertos líquidos de penetrar en los defectos superficiales tales como fisuras. Posteriormente, se aplica una sustancia reveladora (que puede ser seca o húmeda), que tiene la propiedad de absorber el líquido que ingresó en los defectos. Observando las manchas en el revelador, podemos determinar las características generales de las fisuras tales como posición, cantidad, forma y tamaño aproximado.

Las etapas a seguir para la realización del ensayo son:

- Realizamos una minuciosa limpieza de la superficie a ensayar.
- Aplicamos el líquido penetrante sobre la superficie a ensayar. El líquido penetrante debe tener la viscosidad, la tensión superficial y la capilaridad correctas. Esperamos el tiempo adecuado, para que el líquido penetre en los defectos superficiales, tales como poros y fisuras.
- Quitamos el exceso de líquido penetrante.
- Aplicamos el medio revelador sobre la superficie de la pieza y esperamos el tiempo adecuado.
- Examinamos visualmente la superficie de

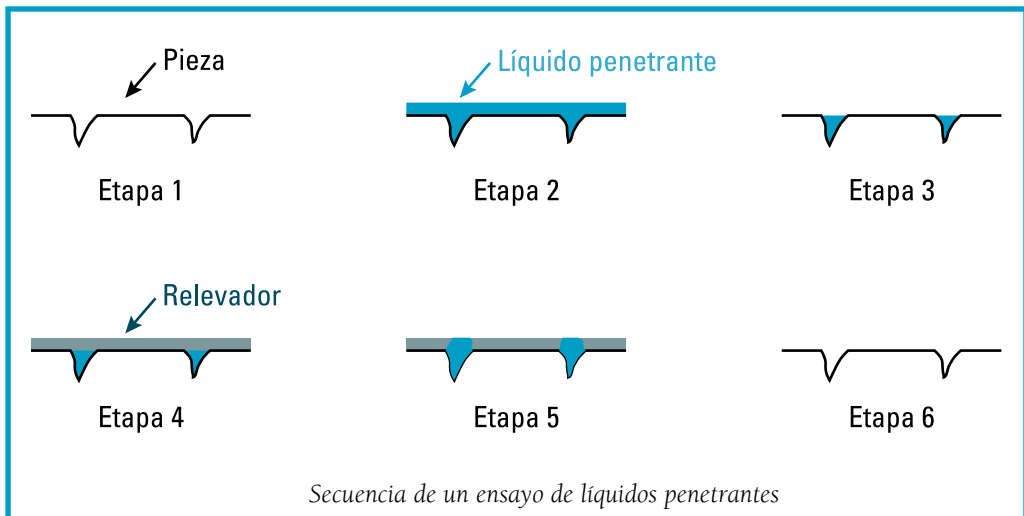
la pieza, a fin de percibir la existencia o no de manchas que indiquen la presencia de defectos. Si el líquido penetrante utilizado no es fluorescente, el examen de la superficie puede realizarse con luz natural o con luz artificial común. Si el líquido penetrante usado es fluorescente, la observación debe realizarse con luz ultravioleta. En el caso de usar líquido no fluorescente, las manchas –generalmente– son de color rojo sobre el revelador color blanco. En el caso de usar líquido

fluorescente, las manchas aparecen fluorescentes sobre un fondo oscuro.

Debemos tener la precaución de no enfocar los ojos directamente a la fuente de luz ultravioleta.

- Realizamos la limpieza final de la pieza.

Los líquidos penetrantes, así como las sustancias reveladoras, se consiguen comercialmente.



Actividades para el aula 16

En caso de que su escuela posea líquidos penetrantes y reveladores comerciales, puede usted proponer a sus alumnos ensayar piezas fisuradas.

En caso de no poseer tales elementos comerciales, le sugerimos probar con tintas diluidas, pinturas diluidas o líqui-

dos similares; y, como reveladores, probar con cal de construcción, talco o sustancias similares.

Por supuesto, es importante que usted aclare a los estudiantes que éstos no son ensayos rigurosos sino experiencias que facilitan la comprensión.



Ensayo de partículas magnéticas

Con este ensayo es posible detectar defectos sobre la superficie o muy cercanos a ésta.

Se aplica a piezas construidas con materiales ferromagnéticos –materiales que pueden ser magnetizados fuertemente–; la magnetización de la pieza puede realizarse empleando corriente continua o alterna.

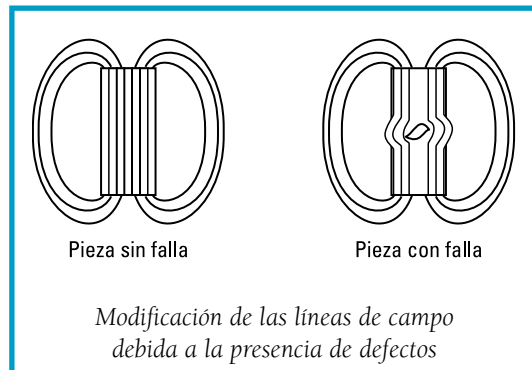
Si esparcimos sobre la pieza o superficie a examinar (previamente magnetizada) partículas de material magnético –polvo de hierro seco o húmedo–, podemos observar las líneas de fuerza del campo magnético y detectar, así, la presencia de defectos.

Como su nombre indica, en el método seco las partículas de hierro se aplican en seco; en el método húmedo, en cambio, las partículas están en suspensión en un líquido que puede ser agua, aceite u otro. Al ensayar superficies amplias, generalmente se usa el método seco, ya que la recuperación de las partículas de hierro es más fácil; por otra parte, el método seco permite detectar los defectos subsuperficiales con mayor facilidad que el método húmedo. El método húmedo, por su parte, facilita la detección de defectos superficiales muy pequeños.

En caso que la pieza o superficie ensayada no tuviese defectos, las partículas de polvo de hierro siguen la forma característica de las líneas de campo magnético.

En caso que la pieza o superficie ensayada tuviese defectos en la superficie o cercanos a ella, las líneas de campo magnético cambian su forma y, por lo tanto, la disposición de las

partículas de polvo de hierro refleja el defecto presente.



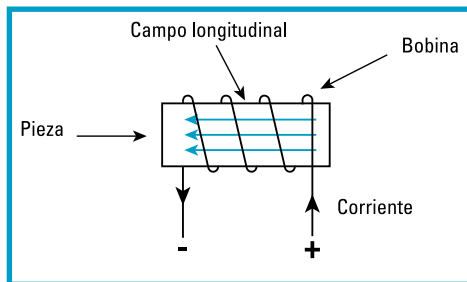
Este método –como los ensayos no destructivos, en general– se aplica al mantenimiento en la industria aeronáutica, ferroviaria y naval, entre otras.

La orientación relativa entre el defecto y las líneas de campo magnético, es de gran importancia para visualizar fácilmente los defectos. Los defectos más fácilmente visualizables son aquellos que están en un plano perpendicular a las líneas de campo magnético. Cuando el ángulo entre las líneas de campo magnético y el plano del defecto es pequeño (desde 0° hasta $30^\circ/40^\circ$), el defecto no se visualiza.

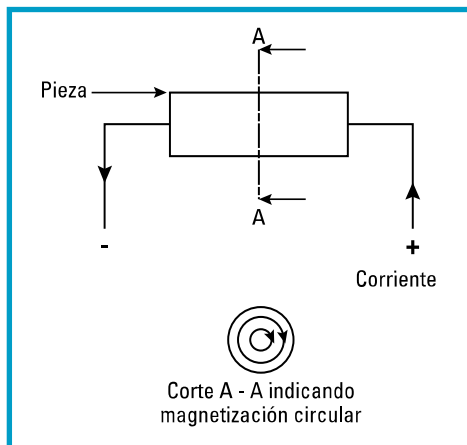
Existen dos formas diferentes para magnetizar las piezas:

- **Magnetización longitudinal.** En este caso, las líneas de fuerza atraviesan la pieza en forma paralela a su eje longitudinal. Para obtener magnetización longitudinal, se hace circular corriente por una bobina o arrollamiento, en cuyo interior se ubica la pieza (la pieza debe ubicarse en forma longitudinal

respecto al campo generado por la bobina). El campo magnético en la zona externa a las piezas magnetizadas longitudinalmente, es muy notorio.



- **Magnetización circular.** En este caso, se establece un flujo magnético en todo el contorno periférico de la pieza estudiada. Para obtener magnetización circular, se hace circular corriente por la pieza misma o a través de un conductor que atraviesa la pieza (en caso de que ésta sea hueca). El campo magnético en la zona externa a las piezas magnetizadas circularmente es muy poco notorio.



Para obtener la magnetización de las piezas que serán ensayadas, se usan: imanes permanentes, electroimanes, bobinas, pasaje de corriente a través de la pieza, pasaje de

corriente por un conductor central que atraviesa la pieza. Cabe destacar que, mediante el uso de imanes permanentes, se obtienen piezas magnetizadas en forma débil; esta situación mejora de gran manera con el uso de electroimanes.

La magnetización puede efectuarse mediante corriente continua (CC) o mediante corriente alterna (CA). La CA es de mayor aplicación que la CC para realizar este tipo de ensayos; detecta bastante fácilmente los defectos superficiales, no así los subsuperficiales. Por su parte, la CC es muy útil para detectar fallas subsuperficiales.

Usando CA, no existen mayores diferencias entre el método húmedo y el seco; en cambio, con CC, el método seco da mejores resultados que el húmedo.

Los pasos a seguir durante la realización del ensayo son:

- Limpiamos la superficie a ensayar.
- Desmagnetizamos la pieza (en caso que estuviera magnetizada), a fin de eliminar las perturbaciones al campo magnético que será aplicado posteriormente.
- Magnetizamos la pieza a ensayar y aplicamos las partículas magnéticas. Existen dos maneras de hacerlo:
 - aplicar la magnetización y las partículas en forma simultánea,
 - realizar primeramente la magnetización y, luego, aplicar las partículas.
- Realizamos la inspección de la pieza ensayada, evaluando los resultados.
- Desmagnetizamos la pieza.
- Limpiamos la pieza.

La desmagnetización de la pieza es importante, ya que el magnetismo remanente puede afectar su normal funcionamiento. Por ejemplo, una pieza móvil que quede magnetizada,

se vería afectada por las posibles virutas y partículas metálicas que se adhieran a su superficie, incrementándose así rápidamente el desgaste de dicha pieza.



Actividades para el aula 17

Le proponemos que sus alumnos realicen la magnetización de piezas fisuradas (mediante imanes, electroimanes o haciendo circular corriente por la pieza) y, luego, cubran la pieza con viruta fina de hierro para verificar la existencia de fisuras.

No olvide implementar todas las precauciones necesarias al trabajar con corriente eléctrica.



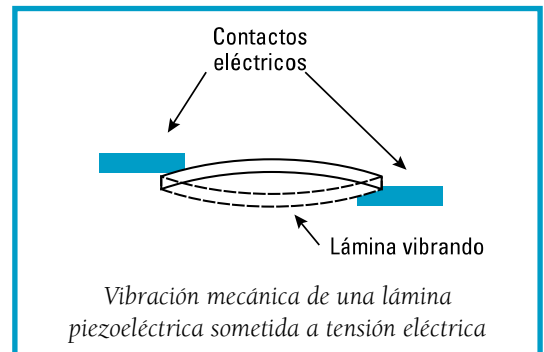
Ensayo de ultrasonido

Este ensayo se basa en la emisión de ondas ultrasónicas (no audibles) que atraviesan el material o pieza ensayada, y que son reflejadas por la cara opuesta de la pieza o por sus defectos internos.

Los pulsos emitidos y los pulsos reflejados por defectos o por la superficie opuesta son visualizados en la pantalla de un osciloscopio.

Las ondas ultrasónicas son generadas mediante cristales piezoeléctricos (cristales de cuarzo, titanato de bario y otros). Estos cristales, tienen la característica de que, cuando son sometidos a una tensión eléctrica aplicada entre dos de sus caras, se deforman mecánicamente; al eliminar la tensión eléctrica aplicada, el cristal recupera su forma original, generando una onda; porque, para llegar a la posición original, el cristal pasa por una serie de

oscilaciones. En resumen, los cristales piezoeléctricos generan vibraciones cuando son sometidos a una tensión eléctrica y viceversa.



Mediante la aplicación de ondas acústicas se detectan defectos internos de los materiales como sopladuras, grietas, inclusiones y discontinuidades superficiales en lingotes, chapas, barras, tubos, en estado fundido, forjado o mecanizado. El ensayo de ultrasonido también permite medir espesores y realizar controles de calidad en

cordones de soldadura. Debemos tener muy en cuenta que la propagación de ondas a través de la pieza es un transporte de energía y no de materia.

Las ondas ultrasónicas consisten en la propagación de oscilaciones de una partícula alrededor de su posición de equilibrio; estas oscilaciones se transmiten de una partícula hacia las partículas vecinas y, de esta forma, se transmite la onda a través de todo el material.

La frecuencia de las ondas ultrasónicas es superior a los 20 kHz.

Existen diferentes tipos de ondas ultrasónicas:

- **Ondas longitudinales:** Son aquellas en que la dirección de propagación de la onda es coincidente con la dirección de oscilación de las partículas.
- **Ondas transversales:** Son aquellas en que la dirección de propagación de la onda es perpendicular a la dirección de oscilación de las partículas. Un caso particular de las ondas transversales son las ondas superficiales, las que se transmiten por la superficie del material.

En los líquidos y gases tenemos solamente ondas longitudinales; en los sólidos, las ondas pueden ser longitudinales, transversales o combinación de ambas.

Impedancia acústica es la resistencia que opone el material a la oscilación de las partículas. Un material con baja impedancia acústica ofrece poca resistencia al pasaje de ondas ultrasónicas; un material con alta impedancia acústica ofrece gran resistencia al pasaje de ondas ultrasónicas.

Se produce pérdida de energía ultrasónica debido a varios factores:

- A medida que nos alejamos del palpador emisor, se produce una divergencia de la onda. Esto significa que la energía ultrasónica es menor al aumentar la distancia al emisor.
- La presencia de inhomogeneidades y defectos (tales como inclusiones, poros, etc.) en el material generan dispersión y pérdida de energía.
- Parte de la energía ultrasónica se convierte en calor, como consecuencia de la deformación experimentada por la estructura cristalina y por el movimiento transmitido a las partículas del material (iones, en el caso de un metal).

Por tales motivos, disminuye la energía ultrasónica que atraviesa el material y, en consecuencia, disminuye la amplitud de las señales reflejadas por las fallas existentes.

Los **palpadores** (también llamados cabezales) son los elementos que se apoyan sobre la superficie de la pieza a ensayar; su función es la de generar, emitir y recibir las ondas ultrasónicas que atraviesan la pieza.

El palpador está constituido por un cristal piezoeléctrico ubicado dentro de una carcasa metálica.

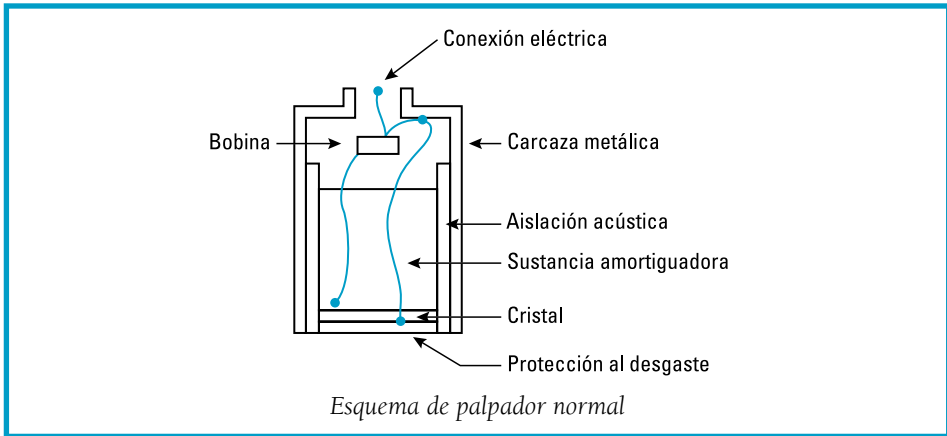
Los palpadores se caracterizan por:

- **Resistencia al desgaste.** Ésta depende de si el cristal piezoeléctrico está directamente en contacto con la pieza a ensayar o está protegido.
- **Sensibilidad.** Da idea de la cantidad de

energía eléctrica que se convierte en energía ultrasónica.

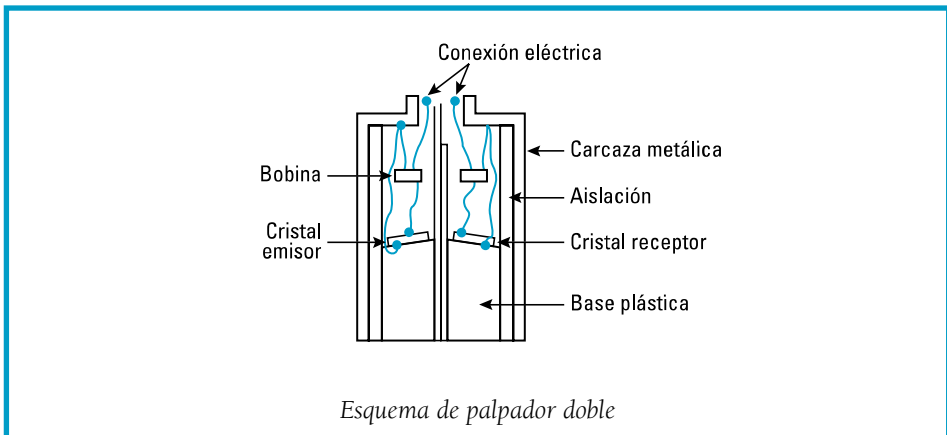
- **Poder de resolución.** Se dice que un palpador tiene alto poder de resolución cuando la separación entre dos ecos de fondo es muy visible, a pesar de que el escalón de la pieza que produce esos ecos, sea muy pequeño. Un alto poder de resolución ayuda a una correcta lectura y evita errores.

En un **palpador normal**, la propagación de la onda es perpendicular a la superficie. Está formado por un solo cristal que puede ser de cuarzo u otros materiales piezoeléctricos, dependiendo de la sensibilidad, del poder resolutorio y de la resistencia al desgaste requeridos. Cuando empleamos el método de reflexión –lo explicamos en unos párrafos más–, el cristal puede actuar como emisor y receptor simultáneamente.



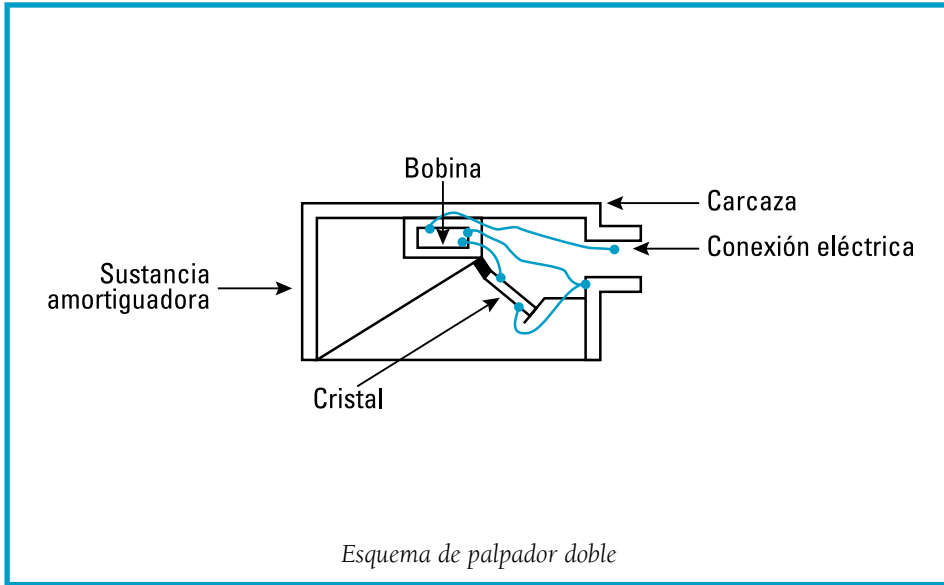
El **palpador doble** está formado por dos cristales separados, integrados en la misma carcasa. Uno de los cristales actúa como emisor y el otro como receptor de las ondas

ultrasónicas. Estos palpadores son muy adecuados para detectar defectos cercanos a la superficie y para examinar piezas con superficies curvas.



Un palpador angular se caracteriza porque las ondas ultrasónicas son dirigidas en forma oblicua sobre la superficie de la pieza. Los palpadores angulares son muy útiles para determinar fallas orientadas verticalmente o en diagonal respecto de la superficie del mate-

rial. Los palpadores angulares estándar tienen ángulos característicos de 35°, 45°, 60°, 70°, 80°, y 90°; los palpadores de 90° se usan para fallas superficiales. Existen palpadores angulares universales; en ellos se puede variar el ángulo del cristal, según las necesidades.



En su carcasa, los palpadores tienen grabado un código integrado por números y letras que indican las características del palpador. No vamos a estudiar aquí estos códigos con detenimiento; sólo diremos, a modo de ejemplo, que el tipo de cristal es indicado por una letra: Los cristales de cuarzo se identifican con la letra Q, los cristales de titanato de bario con la letra B y los cristales especiales se indican con la letra K.

Dentro del código se incluye un número que indica la frecuencia de operación del cristal y letras que indican el tipo de palpador (angular, doble, de inmersión, etc.).

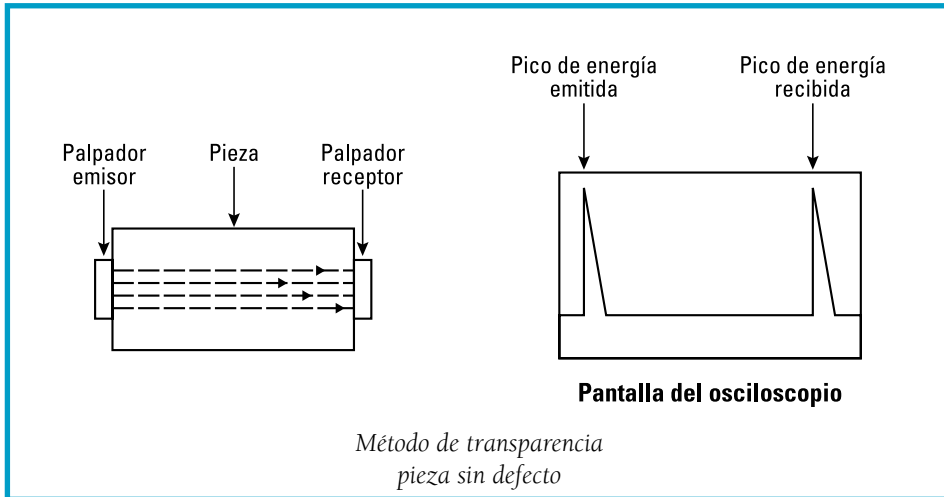
Los dos métodos principales para efectuar el

ensayo de ultrasonido son⁵:

- método de transparencia y
- método de reflexión.

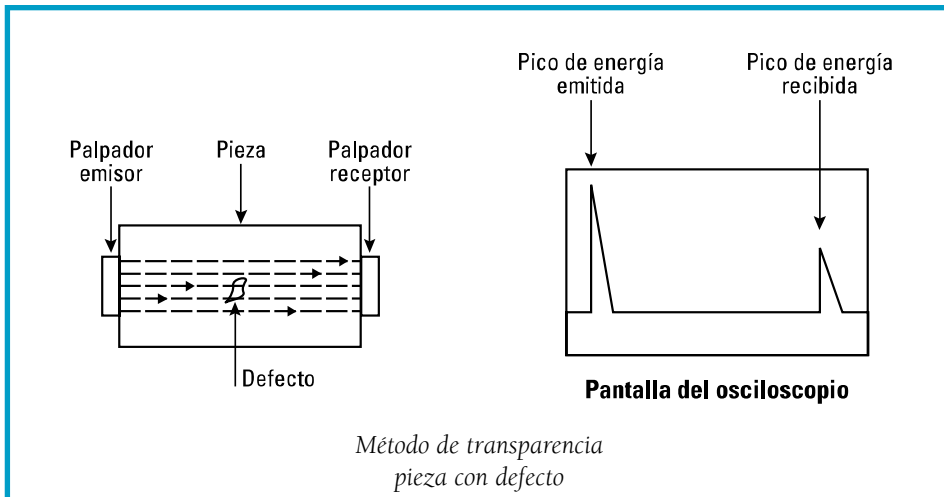
MÉTODO DE TRANSPARENCIA. En este caso, el palpador emisor se coloca en una cara de la pieza, mientras que el palpador receptor se coloca en la cara opuesta. Si en la pieza ensayada no existen defectos, el palpador receptor registra toda la energía emitida por el palpador emisor (a excepción de las pequeñas pérdidas). Los picos de energía emitida y recibida tienen igual altura y se visualizan separados en la pantalla del osciloscopio.

⁵ Existe un tercer método, menos utilizado, llamado de resonancia. Se utiliza, fundamentalmente, para la determinación de espesores en piezas de caras paralelas.



En caso que la pieza ensayada tuviese defectos, parte de la energía emitida se refleja en tales defectos; resulta, entonces, que la energía recibida por el palpador receptor es menor que la energía emitida por el palpador emisor. La

energía emitida y la energía recibida por el receptor tienen sus correspondientes picos, individualizados en la pantalla del osciloscopio. En este caso, el pico de energía recibida es de menor altura que el pico de energía emitida.

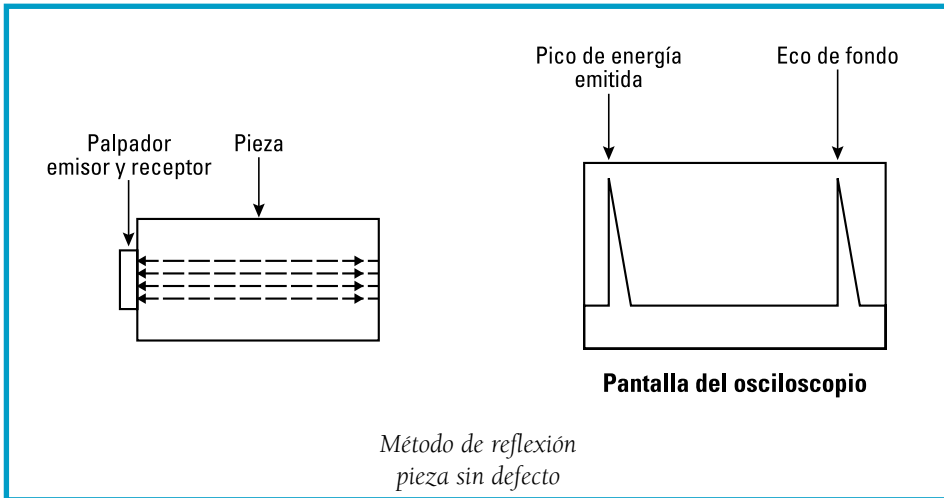


Resumidamente, en el método de transparencia, la detección del defecto se basa en la disminución de energía recibida. Por este método, no se puede determinar la profundidad a que se encuentra el defecto (no se puede determinar su ubicación).

MÉTODO DE REFLEXIÓN. En este caso, el palpador emisor es también el receptor. Por tal motivo, no debe existir interferencia entre las ondas incidentes y las reflejadas; esto se logra haciendo que las ondas incidentes sean emitidas en forma de pulsos y no de manera continua.

Si en la pieza ensayada no existen defectos, en la pantalla del osciloscopio se observan dos pulsos separados: uno correspondiente a la energía emitida y otro correspondiente al eco

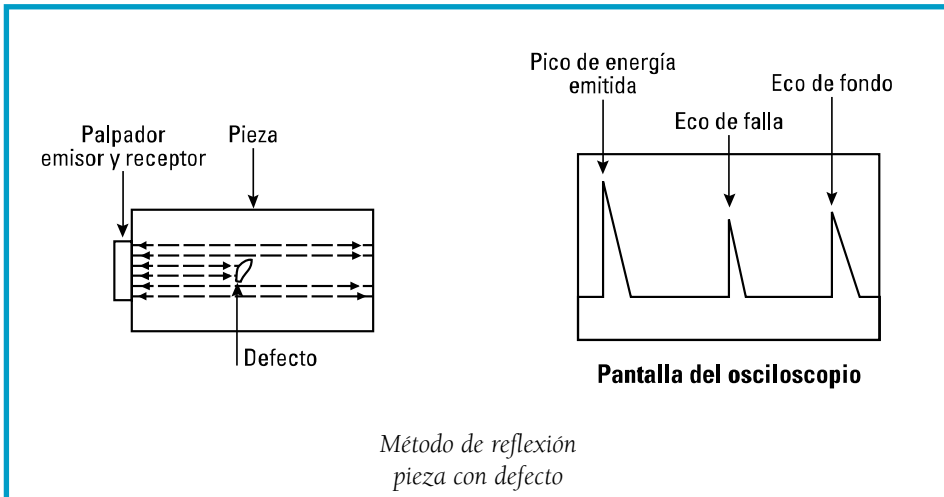
de fondo de la cara opuesta de la pieza. Al no existir defectos, la distancia entre los picos en la pantalla del osciloscopio corresponde al doble del espesor de la pieza ensayada.



En caso de que la pieza ensayada tuviese defectos, parte de la energía emitida se refleja en tales defectos y parte de la energía continúa su trayectoria hasta reflejarse en el fondo de la pieza. Puede ocurrir que, si el tamaño del defecto es muy grande, toda la energía se refleje en él y nada de

energía llegue al fondo de la pieza.

La energía emitida, la energía reflejada por el defecto y la energía reflejada por el fondo de la pieza tienen su correspondiente pico, individualizado en la pantalla del osciloscopio.



En síntesis: En el método de reflexión se determina la existencia del defecto por la aparición de un pulso de energía reflejada en este defecto. Por este método se puede determinar la ubicación del defecto ya que, midiendo el tiempo del movimiento del haz desde su origen hasta la recepción, y conociendo la velocidad de propagación del sonido en el material, se determina el camino recorrido hasta el defecto. A partir de este ensayo, existen métodos aproximados para estimar el tamaño del defecto.

El método de reflexión también se aplica para la determinación de espesores.

A fin de eliminar la película de aire existente entre los palpadores y la pieza ensayada, se utilizan **medios de acople**. Los medios de acople más utilizados, son aceites; pero, también pueden utilizarse pastas de acoplamiento producidas por los fabricantes de equipos de ultrasonido. o grasas.

Debemos tener presente que la frecuencia de la señal ultrasónica, es inversamente proporcional a la longitud de onda de dicha señal. Al fijar la frecuencia de ensayo, queda automáticamente definida la longitud de onda. A menores longitudes de onda, podemos detectar defectos más pequeños.

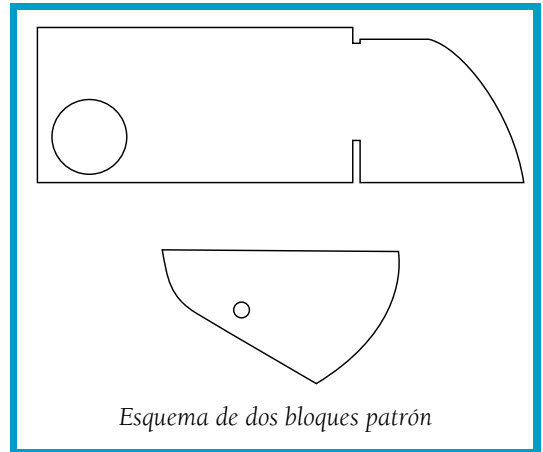
En forma resumida, si elegimos altas frecuencias estaremos trabajando con bajas longitudes de onda y podremos detectar defectos más pequeños.

Como ejemplo y a modo estimativo:

- Para metales con tamaño de grano grande (por ejemplo, piezas fabricadas por fundición) se emplean frecuencias de hasta 1 MHz.
- Para materiales que tienen tamaño de grano menores (piezas laminadas) se usan frecuencias entre 2 y 12 MHz.

La **calibración del equipo** se realiza cuando el equipo de ultrasonido ha sido reparado, cuando se cambian palpadores, cuando se pasan a ensayar piezas distintas a las que se venían inspeccionando o en circunstancias similares. Para realizar la calibración se emplean bloques patrón, piezas que tienen discontinuidades (agujeros, partes curvas, escalones) que hacen las veces de defectos; los bloques patrón se pueden considerar, así, como piezas que tienen defectos patrón.

Estos bloques patrón están normalizados en sus dimensiones, formas y materiales.



Entre las distintas calibraciones a efectuar, encontramos la calibración de distancias (linealidad horizontal). Con esta calibración nos aseguramos que los ecos de fondo, producidos por el bloque patrón, aparezcan distribuidos correctamente en la pantalla del osciloscopio; por lo tanto, podemos conocer a qué distancia se encuentran los defectos en la pieza real a ensayar.

Otra calibración importante es la linealidad vertical. Esta calibración permite asegurar que la amplitud de los ecos es la correcta y, así, tendremos indicios de las dimensiones de las discontinuidades en la pieza real a ensayar.

Otras posibles calibraciones a efectuar empleando los bloques patrones son: calibración de distancias con palpadores angulares, y control de sensibilidad con palpadores nor-

males o angulares.

También existen bloques patrón para calibrar el equipo cuando empleamos palpadores dobles.



Actividades para el aula 18

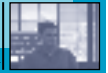
En caso que su escuela disponga del equipo de ensayo, es recomendable que los estudiantes realicen las prácticas que hemos puntualizado.

Puede usted, además, plantear a su grupo:

- Usando el método de transparencia, ¿cómo se ven los picos en el osciloscopio cuando tenemos en el interior de la pieza un defecto pequeño y uno grande? ¿Qué ocurre con los picos del osciloscopio, si la pieza está libre de defectos pero el pal-

pador emisor no está perfectamente alineado con el palpador receptor?

- Usando el método de reflexión, ¿aparece el pico correspondiente a un defecto paralelo al haz ultrasónico? ¿Se visualiza el eco de fondo, cuando el defecto abarca todo el ancho del haz ultrasónico? ¿Cómo se visualizan los picos correspondientes a un pequeño defecto perpendicular al haz ultrasónico y muy cercano al palpador? Y, ¿si el defecto estuviese más alejado del palpador?



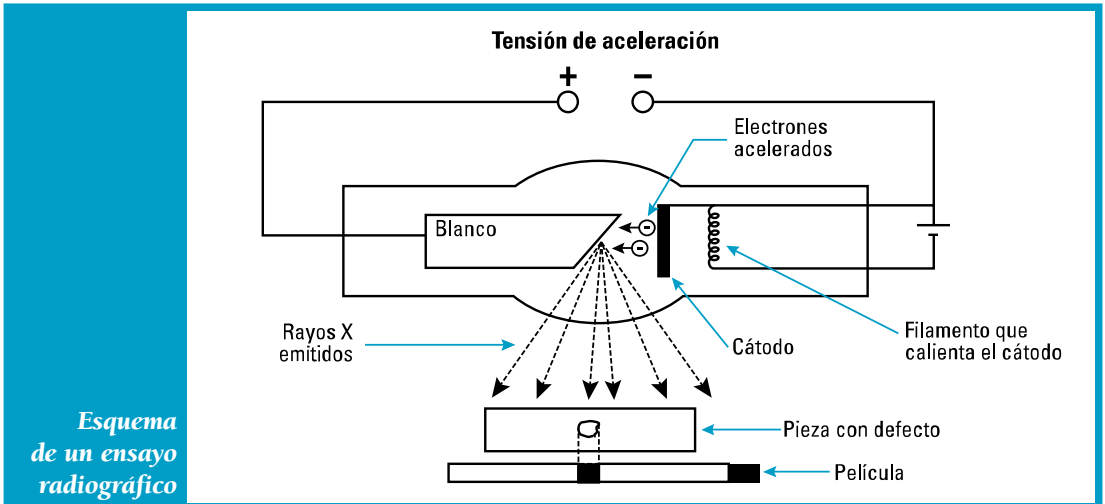
Ensayos radiográficos

Los rayos X son ondas electromagnéticas que pueden penetrar los materiales metálicos y no metálicos.

En particular, esta característica sirve

para analizar la estructura cristalina y también la macroestructura de las piezas metálicas.

Los rayos X se producen cuando un filamento incandescente emite electrones, los cuales inciden sobre una placa anódica.



Esquema de un ensayo radiográfico

Detrás de la pieza a ensayar, se coloca un sobre que contiene una placa; esta placa está formada por una base de acetato de celulosa revestida con una emulsión sensible a los rayos X.

Entre cada cara de la placa y el sobre, se ubica una pantalla intensificadora para reforzar el contraste. Todo este conjunto forma el chasis.

El chasis se pone en contacto con la muestra a radiografiar; luego, se aplica la radiación que atraviesa la muestra y llega a la placa sensible, produciendo el efecto fotográfico. Una vez finalizada la exposición de la pieza a los rayos X, la película debe ser revelada.

- Cuando los rayos X atraviesan un **material sin fallas**, la película queda impresionada en forma uniforme, ya que recibe la misma cantidad de energía radiante en todas sus partes.
- Cuando se trata de un **material con fallas**, varía la cantidad de radiación absorbida por cada sector del material. En las zonas en que la pieza tiene fallas, el material tiene menor densidad y es atravesado por mayor cantidad de radiación; en esa zona, la película queda más impresionada y más oscuro el tono respectivo.

Para determinar el tiempo de exposición de la pieza a los rayos X, se utilizan gráficos provistos por el fabricante de las películas.

Los **indicadores de calidad de imagen** son alambres o plaquetas del mismo material que el objeto a radiografiar y con espesores que representan el 1 %, 2 %, 3 %, etc. del espesor máximo del objeto a radiografiar.

El indicador se coloca en la superficie del objeto que enfrenta a los rayos X y en el extremo más lejano.

El espesor del alambre más delgado visible en la placa revelada, permite evaluar la calidad obtenida mediante el siguiente índice:

$$\text{Calidad de imagen} = \frac{\text{Diámetro del menor hilo visible en la placa} \cdot 100}{\text{Espesor de la pieza}}$$

Se deduce que cuanto menor es el valor del índice de calidad, mejor es la radiografía obtenida.

La radiografía es una técnica que tiene gran aplicación en el control de soldaduras (tuberías y recipientes a presión) como también en la construcción de puentes metálicos.

Para efectuar radiografías, existen instalaciones fijas y equipos móviles.

A título informativo, es interesante conocer que, además de usar rayos X, existe la posibilidad de usar rayos gamma –provenientes de la fisión de elementos radiactivos–. En este caso, habremos realizado una gammagrafía.



Actividades para el aula 19

No es posible realizar el ensayo radiográfico si en la escuela no se dispone del equipo adecuado.

En este caso, le sugerimos que sus alumnos consulten bibliografía y/o busquen información de fabricantes de estos equipos, para integrar más conocimientos.



Bibliografía

- Askeland, Donald (2003) *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thomson. México.
- Bokshtein, B. S. (1980) *Difusión en metales*. Mir. Moscú.
- Cabrera Manero J. M.; MasPOCH Rulduà M. L.; Llanes Pitarch L. M.; Salán Ballesteros M. N. (2002) *Materiales en ingeniería. Problemas resueltos*. Gil Mur F. J. Alfaomega - UPC. México.
- Davis, H. E.; Troxell, G. E.; Wiskocil, C. W. (1981) *Ensayo e inspección de los materiales de ingeniería*. Continental. México.
- González Arias, Antonio (1987) *Laboratorio de ensayos industriales. Ultrasonido*. Litenia. Buenos Aires.
- González Arias, Antonio (1995) *Laboratorio de ensayos industriales. Metales*. Litenia. Buenos Aires.
- Helfgot, Aarón (1979) *Ensayo de los materiales*. Kapelusz. Madrid.
- McKelvey, J. P. (1994) *Física del estado sólido y de semiconductores*. Limusa. México.
- Norton, Robert (1999) *Diseño de máquinas*. Prentice Hall. México.
- Shackelford, James (1995) *Ciencia de materiales para ingenieros*. Prentice Hall. México.
- Steeds, W. (1977) *Materiales, máquinas herramientas y procesos de ingeniería*. Eudeba. Buenos Aires.



MINISTERIO *de*
EDUCACIÓN
CIENCIA y TECNOLOGÍA
PRESIDENCIA *de la* NACIÓN



Argentina

inet
Instituto Nacional de
Educación Tecnológica