

Table of Contents

1 Materiales metálicos.....	2
1.1 Principales propiedades mecánicas.....	3
1.2 El acero.....	6
1.2.1 Clasificación de los aceros.....	8
1.2.2 Diagrama tensión-deformación.....	10
1.2.2.1 Esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión.....	15
1.2.2.2 Cálculo del alargamiento.....	19
1.3 Tipos de aceros más utilizados.....	21
1.4 Tratamientos térmicos de metales.....	23
1.5 Tratamientos termoquímicos de los metales.....	26
1.6 Protección del acero.....	28
1.7 Fundiciones.....	33
1.8 Compatibilidad de metales: la corrosión galvánica.....	34
1.9 Fatiga de materiales.....	37

1 Materiales metálicos

Se denomina **METAL** a los elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores del **CALOR** y la **ELECTRICIDAD**, poseer alta **DENSIDAD**, y ser **SÓLIDOS** a temperaturas normales (excepto el mercurio y el galio). Generalmente son **REFLECTANTES** de la luz, lo que les da su peculiar brillo. El concepto de metal refiere tanto a elementos puros, así como a **ALEACIONES** con características metálicas, como el acero (**HIERRO, CARBONO Y OTROS**) y el bronce (**COBRE Y ESTAÑO**). Los metales comprenden la mayor parte de la [tabla periódica de los elementos](#) y se separan de los no metales por una línea diagonal entre el boro y el polonio. Se extraen de los minerales de las rocas (menas). Los materiales metálicos cuyo componente principal es el HIERRO se llaman ferrosos, el resto se llaman no ferrosos, como el **ALUMINIO, COBRE, LATÓN**, etc.

Los principales metales puros son: oro, plata, plomo, mercurio, estaño, cobre, hierro, zinc y aluminio.

Las dos aleaciones principales del cobre son el bronce (cobre y estaño) y el latón (cobre y zinc).

El acero galvanizado es acero cubierto con una fina capa de zinc para protegerlo de la corrosión. Se utilizaba mucho en tuberías de agua, donde es efectivo a temperaturas por debajo de 60 °C. A temperaturas superiores el zinc pierde su propiedad protectora.

1.1 Principales propiedades mecánicas

1-Plasticidad

Es la propiedad mecánica de los metales completamente opuesta a la **ELASTICIDAD**. La plasticidad se define como la capacidad que tienen los metales de **CONSERVAR** la forma que les fue dada después de ser sometidos a un esfuerzo. Los metales, usualmente son altamente **PLÁSTICOS**, por esta razón, una vez son deformados, fácilmente conservarán su nueva **FORMA**.

2-Fragilidad

La fragilidad es una propiedad completamente opuesta a la tenacidad, ya que denota la facilidad con la que un metal puede ser **ROTO** una vez es sometido a un esfuerzo. En muchas ocasiones, los metales son **ALEADOS** unos con otros para reducir su coeficiente de **FRAGILIDAD** y poder tolerar más las cargas. La fragilidad también se define como fatiga durante las pruebas de resistencia mecánica de los metales. De esta manera, un metal puede ser sometido varias veces al mismo esfuerzo antes de **ROMPERSE** y arrojar un resultado concluyente sobre su fragilidad.

3-Maleabilidad

La maleabilidad hace alusión a la facilidad que tiene un metal para ser **LAMINADO** sin que esto represente una ruptura en su estructura. Muchos metales o aleaciones metálicas cuentan con un alto coeficiente de maleabilidad, este es el caso del aluminio que es altamente maleable, o el acero inoxidable.

4-Dureza

La dureza se define como la resistencia que opone un metal ante agentes abrasivos. Es la resistencia que tiene cualquier metal a ser **RAYADO** o penetrado por un cuerpo. La mayoría de metales requieren de ser aleados en algún porcentaje para aumentar su **DUREZA**. Este es el caso del oro, que por sí solo no lograría ser tan duro como lo es cuando se mezcla con el bronce. Históricamente, la dureza se medía en una escala empírica, determinada por la capacidad que tenía un metal de rayar a otro o de resistir el impacto de un **DIAMANTE**. Hoy en día, la dureza de los metales es medida

con procedimiento estandarizados como lo son el test de Rockwell, Vickers o [Brinell](#). Todos estos tests buscan arrojar resultados concluyentes sin dañar mayormente el metal que está siendo estudiado.

5-Ductilidad

La ductilidad es la capacidad que tiene un metal para deformarse antes de ROMPERSE. En este sentido, es una propiedad mecánica completamente opuesta a la **FRAGILIDAD**. La ductilidad puede ser dada como un porcentaje de elongación máximo o como un máximo de reducción de área. Una forma elemental de explicar ductilidad de material, es su capacidad para ser transformado en **HILO o ALAMBRE**. Un metal altamente dúctil es el **COBRE**.

6-Elasticidad

La elasticidad que define como la capacidad que tiene un metal para recuperar su **FORMA** después de haber sido sometido a una fuerza externa. En general, los metales NO son muy elásticos, por esta razón es común que presenten **ABOLLADURAS** o rastros de golpes de los que nunca se recuperarán. Cuando un metal es elástico, también se puede decir que es resiliente, ya que es capaz de absorber de forma elástica la **ENERGÍA** que le está provocando una deformación.

7-Tenacidad

La tenacidad es el concepto opuesto a la **FRAGILIDAD**, ya que denota la capacidad que tiene un material de resistir la aplicación de una fuerza externa sin **ROMPERSE**. Los metales y sus aleaciones son, generalmente, tenaces. Este es el caso del **ACERO**, cuya tenacidad le permite ser apto para aplicaciones de construcción que requieran de soportar altas **CARGAS** sin que haya lugar a rupturas. La tenacidad de los metales puede ser medida en diferentes escalas. En algunas pruebas, se aplican cantidades relativamente pequeñas de fuerza a un metal, como ligeros impactos o choques. En otras ocasiones, es común que sean aplicadas fuerzas mayores. De cualquier manera, el coeficiente de tenacidad de un metal será dado en la medida en la que éste no presente ningún tipo de **RUPTURA** después de haber sido sometido a un esfuerzo.

8-Rigidez

La rigidez es una propiedad mecánica propia de los metales. Esta tiene lugar cuando una fuerza externa es aplicada a un metal y éste debe desarrollar una fuerza interna para soportarla. Esta fuerza interna se denomina “estrés”. De esta manera, la rigidez es la capacidad que tiene un metal de **RESISTIRSE** a la deformación durante la presencia del estrés.

9-Variabilidad de las propiedades

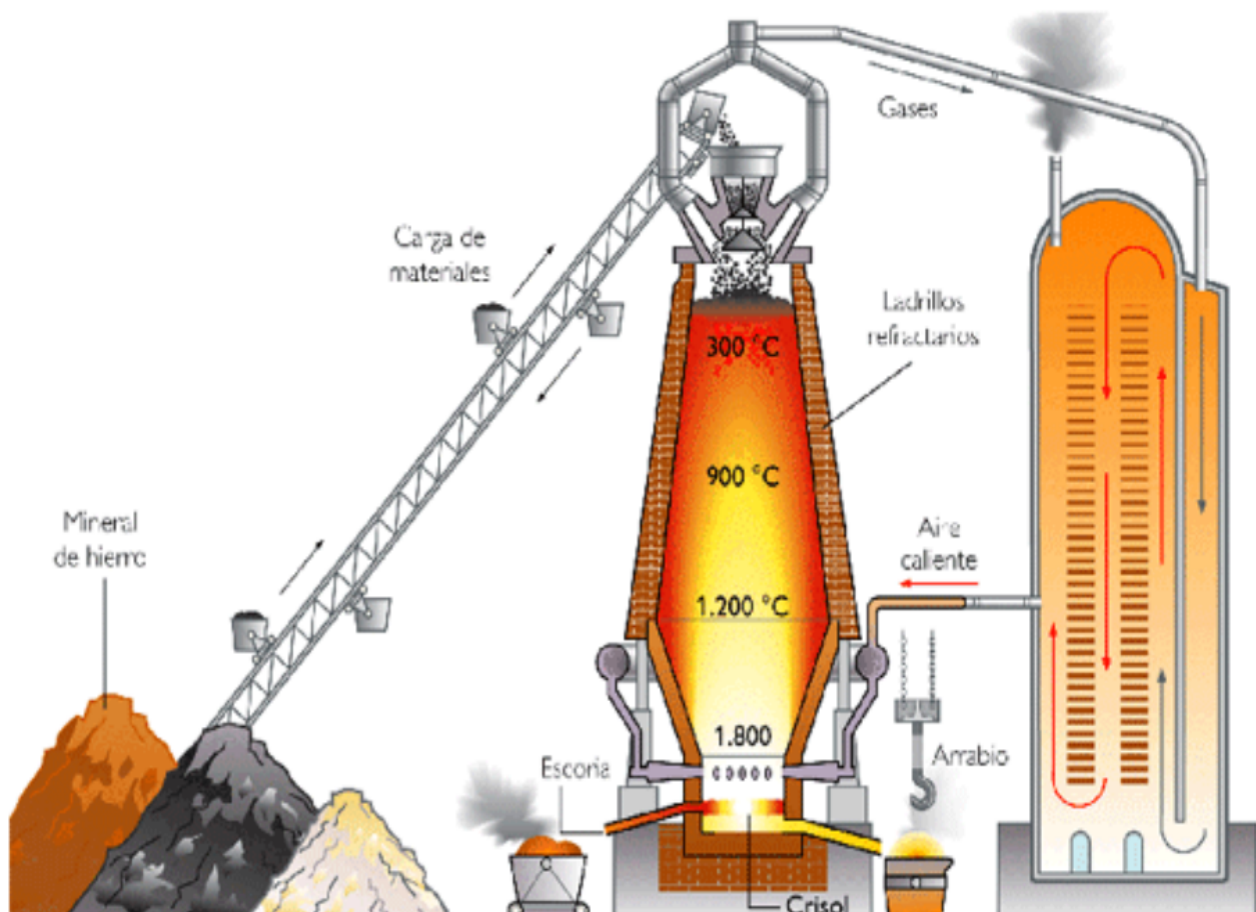
Los tests de propiedades mecánicas de los metales no siempre producen los mismos resultados, esto se debe a los posibles cambios en el tipo de equipo, procedimiento, u operario que se usa durante las pruebas. Sin embargo, incluso cuando todos estos parámetros son controlados, existe un pequeño margen en la variación de los resultados de las propiedades mecánicas de los metales. Esto se debe a que en general la fabricación o proceso de extracción de los metales difiere. Por lo tanto, los resultados a la hora de medir las propiedades de los metales se pueden ver alterados. Con el objetivo de mitigar estas diferencias, se recomienda realizar varias veces la misma prueba de resistencia mecánica en el mismo material, pero en diferentes muestras seleccionadas de forma aleatoria.

1.2 El acero

Los materiales más **FRECUENTES** en cualquier taller de mantenimiento industrial son los aceros. Generalmente acero al carbono del tipo A42b. Aunque actualmente también se utilizan mucho otros materiales como los aceros **INOXIDABLES**, el **ALUMINIO**, la fibra de **VIDRIO**, los **PLÁSTICOS** o los materiales **COMPUESTOS**. El acero es una aleación de **HIERRO Y CARBONO**. Se puede alear, además, con otros elementos para obtener aleaciones de diferentes características según sea necesario.

Es el metal más usado del mundo con gran diferencia por sus elevadas prestaciones **MECÁNICAS** así como su **RECICLABILIDAD**. Las aleaciones de hierro-carbono dan lugar a los aceros si el porcentaje de carbono es menor del **2%**. Si hay más carbono, dan lugar a las fundiciones. Las técnicas para la obtención del acero se denominan **SIDERURGIA**. Empieza con los minerales ricos en **HIERRO** como siderita, limonita, pirita, magnetita... El hierro se obtiene de sus óxidos, presentes en los minerales anteriores, en un **ALTO HORNO**. En el alto horno se reduce con **CARBÓN** y carbonato cálcico.

Esquema de un alto horno.



En la imagen anterior se ve cómo el alto horno se alimenta por la **BOCA** con carbón, mineral de hierro y caliza. El carbón se **QUEMA**, potenciándose el calor generado con **AIRE** a presión. Se funden los **ÓXIDOS** de hierro, mezclándose con el carbono presente en el carbón. La mezcla **HIERRO-CARBONO** (llamada arrabio), más pesada, se va al **FONDO** del alto horno (**CRISOL**). En la parte intermedia (etalaje) queda la **ESCORIA**. El arrabio se extrae por la parte **INFERIOR** del alto horno. El arrabio, al contener alrededor del **4-6%** de carbono, es un material **DURO**, pero **FRÁGIL**, que tiene menos aplicaciones prácticas. Para convertirlo en acero se le debe rebajar el contenido en **CARBONO**. Asimismo, se le pueden añadir otros **ALEANTES** para obtener características determinadas que mejoren sus propiedades.

1.2.1 Clasificación de los aceros

Según la norma UNE EN 10020:2001 define al acero como aquel material en el que el **HIERRO** es el elemento predominante, el contenido en **CARBONO** es, generalmente inferior al **2%** y contiene además a otros elementos. El límite superior del 2% en el contenido de carbono (C) es el límite que separa al acero de la **FUNDICIÓN**. En general, un aumento del contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la **TRACCIÓN**, pero como contrapartida incrementa su **FRAGILIDAD** en frío y hace que disminuya la **TENACIDAD** y la **DUCTILIDAD**. En función de este porcentaje, los aceros se pueden clasificar de la siguiente manera:

-Aceros **DULCES**: Cuando el porcentaje de carbono es del **0,25%** máximo. Estos aceros tienen una resistencia última de rotura en el rango de 48-55 kg/mm² y una dureza Brinell en el entorno de 135-160 HB. Son aceros que presentan una buena **SOLDABILIDAD** aplicando la técnica adecuada. Aplicaciones: Piezas de resistencia media de buena tenacidad, deformación en frío, embutición, plegado, herrajes, etc.

-Aceros **SEMIDULCE**: El porcentaje de carbono está en el entorno del **0,35%**. Tiene una resistencia última a la rotura de 55-62 kg/mm² y una dureza Brinell de 150-170 HB. Estos aceros bajo un tratamiento térmico por **TEMPLADO** pueden alcanzar una resistencia mecánica de hasta 80 kg/mm² y una dureza de 215-245 HB.

Aplicaciones: Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes.

-Aceros **SEMIDUROS**: Si el porcentaje de carbono es del **0,45%**. Tienen una resistencia a la rotura de 62-70 kg/mm² y una dureza de 280 HB. Después de someterlos a un tratamiento de temple su resistencia mecánica puede aumentar hasta alcanzar los 90 kg/mm².

Aplicaciones: Ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, etc.

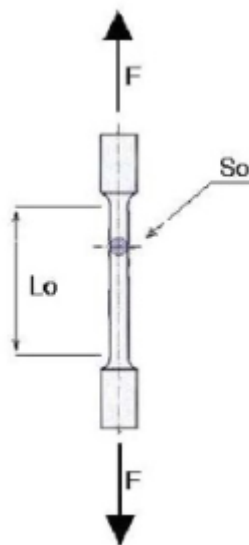
-Aceros **DUROS**: El porcentaje de carbono es del **0,55%**. Tienen una resistencia mecánica de 70-75 kg/mm², y una dureza Brinell de 200-220 HB. Bajo un tratamiento de templado estos aceros pueden alcanzar un valor de resistencia de 100 kg/mm² y una dureza de 275-300 HB.

Aplicaciones: Ejes, transmisiones, tensores y piezas regularmente cargadas y de espesores no muy elevados.

1.2.2 Diagrama tensión-deformación

El diagrama tensión-deformación resulta de la representación gráfica del **ENSAYO DE TRACCIÓN**, normalizado en UNE-EN 10002-1, y que consiste en someter a una probeta de acero normalizada a un esfuerzo **CRECIENTE** de tracción según su eje hasta la rotura de la misma. El ensayo de tracción permite el cálculo de diversas propiedades **MECÁNICAS** del acero.

La probeta de acero empleada en el ensayo consiste en una pieza **CILÍNDRICA** cuyas dimensiones guardan una relación de proporcionalidad.

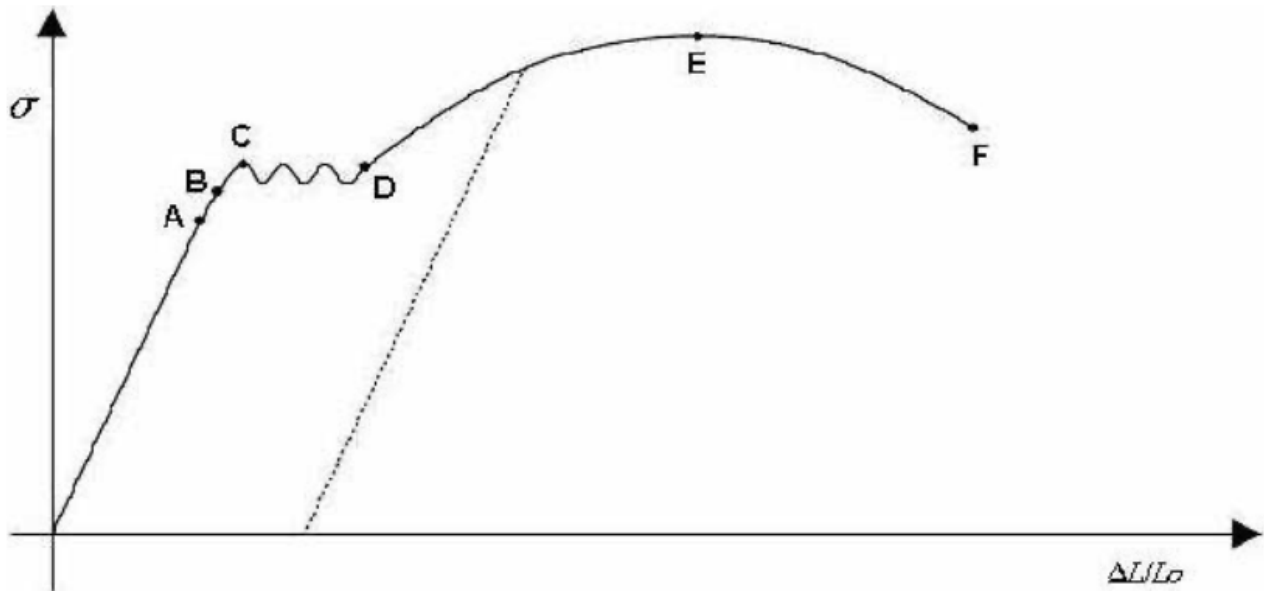


L_0 es la longitud inicial, S_0 es la sección inicial y D_0 es el diámetro inicial de la probeta. Para llevar a cabo el ensayo de tracción, las anteriores variables pueden tomar los siguientes valores:

$D_0 = 20 \text{ mm}$, $L_0 = 100 \text{ mm}$, ó bien, $D_0 = 10 \text{ mm}$, $L_0 = 50 \text{ mm}$.

El ensayo comienza aplicando gradualmente la fuerza de **TRACCIÓN** a la probeta, lo cual provoca que el recorrido inicial en la gráfica discorra por la línea **RECTA** que une el origen de coordenadas con el punto A. Hasta llegar al punto A se conserva una proporcionalidad entre la tensión alcanzada y el **ALARGAMIENTO** producido en la pieza. Es lo que se conoce como Ley de Hooke, que relaciona linealmente tensiones con las **DEFORMACIONES** a través del módulo de elasticidad E . El módulo de elasticidad es específico y constante para cada material. En el caso de los aceros y fundiciones es aproximadamente **2.100.000 Kg/cm²**. Otra particularidad de este tramo es que al cesar la tracción, la pieza recupera su **LONGITUD INICIAL**. Es decir, se comporta de manera **ELÁSTICA** y el punto A se denomina “**LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD**”.

Pasado el punto A y hasta llegar al punto B, los alargamientos producidos crecen de manera más rápida con la tensión, y se cumple que al **CESAR** la carga, la pieza **RECUPERA** de nuevo su geometría inicial, es decir, se sigue comportando elásticamente. El punto B marca el límite a este comportamiento, y por ello al punto B se le denomina Límite Elástico.



Tras pasado el punto B, el material pasa a comportarse de manera **PLÁSTICA**, es decir, que no recupera su **LONGITUD** inicial, quedando una deformación remanente al cesar la carga. De esta manera, el proceso de descarga se realiza siguiendo la trayectoria según la línea punteada mostrada del diagrama **TENSIÓN-DEFORMACIÓN**, que como se ve, corta al eje de deformaciones, $\Delta L/L_0$, a una cierta distancia del origen, que se corresponde con la deformación **REMANENTE** que queda. Concretamente, el punto B o “**LÍMITE ELÁSTICO**” es aquel que le corresponde una deformación remanente del **0.2%**.

Si se sigue aplicando carga se llega al punto identificado en la gráfica como C, a partir de aquí y hasta el punto D, las deformaciones **CRECEN** de manera rápida mientras que la carga fluctúa entre dos valores, llamados límites de fluencia, **SUPERIOR E INFERIOR**. Este nuevo estadio, denominado de **FLUENCIA**, es característico exclusivamente de los aceros **DÚCTILES**, no apareciendo en los aceros **ENDURECIDOS**.

Más allá del punto de fluencia D es necesario seguir aplicando un **AUMENTO** de la carga para conseguir un pronunciado aumento del alargamiento. Entramos ya en la zona de las grandes **DEFORMACIONES** plásticas hasta alcanzar el punto F, donde la carga alcanza su valor

MÁXIMO, lo que dividida por el área inicial de la probeta proporciona la tensión máxima de **ROTURA** o resistencia a la tracción.

A partir del punto E tiene lugar el fenómeno de estricción de la probeta, consistente en una **REDUCCIÓN** de la sección en la zona de la rotura, que es la causa de la siguiente bajada de la curva, dado que al reducirse el valor de la **SECCIÓN**, el valor de la carga aplicado a partir del punto E también se va reduciendo hasta alcanzar el punto F de **ROTURA**.

LÍMITE ELÁSTICO Y RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La determinación de las propiedades mecánicas en el acero, como el **LÍMITE ELÁSTICO**, la **RESISTENCIA A TRACCIÓN**, así como de otras características mecánicas del acero como el **MÓDULO DE ELASTICIDAD**, o el **ALARGAMIENTO MÁXIMO** que se produce en la rotura, se efectuará mediante el anteriormente definido ensayo de tracción normalizado en la UNE-EN 10002-1.

El valor de la tensión última o **RESISTENCIA A TRACCIÓN** se calcula a partir de este ensayo, y se define como el cociente entre **LA CARGA MÁXIMA** que ha provocado el fallo a rotura del material por tracción y la **SUPERFICIE** de la sección transversal inicial de la probeta, mientras que el **LÍMITE ELÁSTICO** marca el umbral que, una vez se ha superado, el material trabaja bajo un comportamiento plástico y deformaciones remanente.

En la sección ANEXOS de este tutorial se pueden consultar los valores del límite elástico y la resistencia a tracción para las distintas calidades de aceros según las normativas europea y americana.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ACERO

- Aleación de color pardo/oscurο.
- Resistencia a tracción: **2.600Kg/cm²**.
- Alargamiento rotura: **20%**.
- Densidad: **7,85 Kg/dm³**.
- Fusión a **1.375° – 1.610° C** en función de los aleantes empleados.
- **Tenaz, resistente, duro, maleable (hojas finas), dúctil (alambres). Soldable. Conductor.**
- Se **CORROE/OXIDA** en presencia de agua/humedad
- Es **MAGNÉTICO**, el imán se pega.

La composición y las proporciones de los elementos de aleación tienen gran influencia sobre las características resultantes de los aceros.

El carbono eleva la **dureza, resistencia y templabilidad** del acero y disminuye su tenacidad; el silicio mejora la **ELASTICIDAD**, y el azufre y el fósforo pueden considerarse perjudiciales.

Entre los metales, el níquel incrementa la **TENACIDAD**, el cromo la **RESISTENCIA Y DUREZA**, el vanadio la **RESISTENCIA AL DESGASTE**, el tungsteno y el cobalto la dureza a alta **TEMPERATURA**.

ALEANTES PRINCIPALES.

- Plomo: Reduce resistencia. Fácil de mecanizar.
- Cromo: Dureza, Resistencia, inoxidable
- Vanadio: Resistencia, corrosión.
- Molibdeno: Tenacidad, resistencia, corrosión.
- Silicio: Flexibilidad. Muelles.
- Níquel: Tenacidad, resistencia corrosión.
- Cobalto: Gran dureza. Para corte.
- Tungsteno o Wolframio: Resistencia a alta temperatura, para herramientas de corte.

APLICACIONES DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN.

- Aceros al Carbono: Para elementos constructivos (vigas, pilares), piezas mecánicas.
- Aceros al Silicio: Muelles, ballestas.
- Aceros al Cromo-Vanadio: Herramientas.
- Aceros al Cromo- Molibdeno: Herramientas, piezas de alta resistencia.
- Aceros al Cobalto o Tungsteno: Herramientas de corte.

1.2.2.1 Esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión

El **esfuerzo de tracción** estira un material.

Se produce en los cables de un puente colgante.



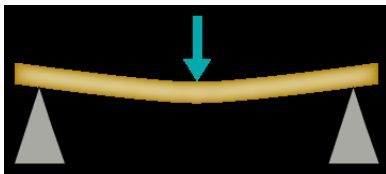
El **esfuerzo de compresión** comprime un material.

Se produce en los pilares que soportan un puente.



Entre los pilares de un puente, las vigas que los unen están sometidas a un **esfuerzo de flexión**.

El esfuerzo de flexión tiende a doblar un material.



El **esfuerzo de torsión** se produce al hacer girar un objeto, por ejemplo un eje. El esfuerzo de torsión aumenta con la resistencia que el eje oponga al giro.

La broca de un taladro está sometida a un esfuerzo de torsión.

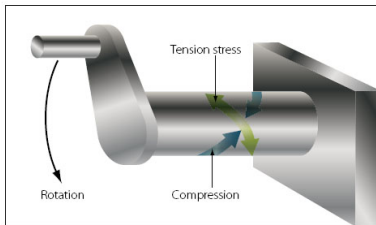
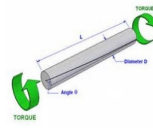
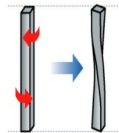


Figure 3-20. Torsion on a rotating shaft, made up of tension and compression.

PRE-STRESSED CONCRETE LAB, CE-416

Torsional Stress

➤ A Specific type of Shear Stress in Which One end of a part is secured while the other end is Twisted



Cálculo de la tensión

La tensión es una medida del esfuerzo al que se somete un objeto. La tensión que actúa sobre un elemento estructural, como por ejemplo una columna, está definida como el cociente de fuerza y superficie perpendicular a la fuerza. En estructuras de edificaciones, las cargas principales están causadas por las masas que deberán soportar las estructuras. Como la relación entre la fuerza de gravedad y la masa es proporcional ($F = g \cdot m$), en las propiedades mecánicas de los metales, los

valores de tensión se indican en $\frac{kg}{cm^2}$

$$\sigma = \frac{m}{A}$$

m masa en kg

A area en cm^2

Ejemplo

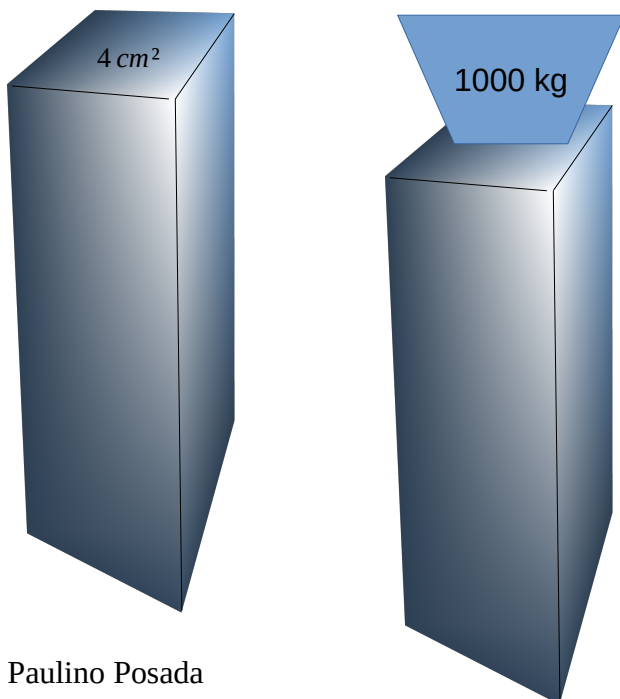
Una columna debe soportar $1000\,kg$. La superficie de la columna es de $4\,cm^2$.

¿A qué tensión está sometida la columna?

$$\sigma = \frac{m}{A} = \frac{1000\,kg}{4\,cm^2} = 250 \frac{kg}{cm^2}$$

¿Qué tipo de esfuerzo se produce?

El esfuerzo es de compresión.



Ejercicio 1.2.2.1-1

¿Se podría utilizar una grúa con un cable de acero redondo de 5 mm de diámetro para elevar un motor de 2 toneladas?

¿A qué tensión estaría sometido el cable?

¿Qué tipo de esfuerzo se produce?

1.2.2.2 Cálculo del alargamiento

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E$$

σ tensión en $\frac{kg}{cm^2}$

$\frac{\Delta L}{L}$ alargamiento relativo sin unidad

E módulo de elasticidad en $\frac{kg}{cm^2}$

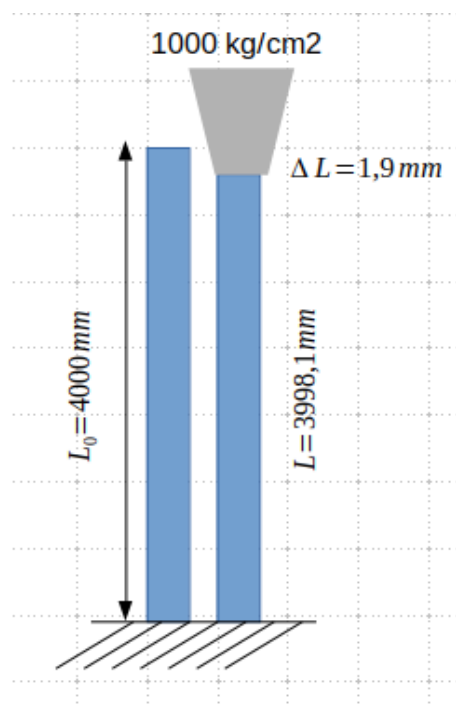
Ejemplo

Si a una viga de acero de 4 m de longitud se le aplica una tensión de compresión de $1000 \frac{kg}{cm^2}$, su

$$\text{alargamiento relativo será de } \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\sigma}{E} = \frac{-1000 \frac{kg}{cm^2}}{2100000 \frac{kg}{cm^2}} = -0,0004762$$

$$\rightarrow \text{alargamiento} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot L_0 = -0,0004762 \cdot 4000 \text{ mm} = -1,9 \text{ mm}$$

El esfuerzo de compresión se considera negativo para indicar que el alargamiento es negativo (acortamiento).



Ejercicio 1.2.2.2-1

Una viga de acero de 10 m se somete a una tensión de tracción de $500 \frac{kg}{cm^2}$.

¿Cuanto se alarga la viga?

1.3 Tipos de aceros más utilizados

HIERRO DULCE (O FORJADO)

Es un acero **bajo** en carbono de **0,05%** a **0,30%**, blandos y dúctil fácil de maquinar, formar y soldar.

Inconvenientes: es muy **poroso**, **oxida** fácilmente, además de presentar grietas internas frecuentemente, lo que lo convierte en un material poco **útil** para aplicaciones industriales.

Sí se utiliza mucho en **decoración (forja), vallas, rejas, etc.**

ACEROS INOXIDABLES

Tiene características mecánicas **similares** a los aceros ordinarios. Se obtiene como el acero como aleación de **carbono** y se convierte en inoxidable añadiendo al menos un 12% de **cromo** (habitualmente también **níquel**). Estos aceros son mucho más **caros** que los aceros al carbono, hasta 10 veces.

En el uso de los aceros **inoxidables** se deben tener en cuenta algunas recomendaciones:

Cuidado con la corrosión **galvánica** al unir 2 metales diferentes con un medio conductor. El menos **noble** se corroe. Por ejemplo, unir planchas de acero **inox** con tornillos de acero al **carbono**.

Se pueden soldar con electrodos de inox, con método MIG o bien TIG.

Los aceros inoxidables más utilizados son de los tipos:

- Aceros inoxidables **ferríticos** (se pega el imán)
- Aceros inoxidables **austeníticos** (el imán no se pega)

Aceros inoxidables **ferríticos**

Son los aceros inoxidables más **resistentes**, pero con menor resistencia a la **oxidación y corrosión**.

El imán se **pega** en ellos. Se usan en cuchillería, sartenes, para placas de inducción. En general no se utilizan en el mundo **marino** y son los más **baratos**.

Ejemplos: AISI 420.

Aceros inoxidables **austeníticos**

Se tienen a su vez dos grandes tipos:

- Los aceros inoxidables **alimentarios**: Usados en la industria alimentaria. Tienen buena resistencia a la **oxidación**. Se denominan también como acero inox A2, AISI303 (barras), AISI 304 (chapas), 18-10 (18% de cromo, 10% de níquel).
- Acero inoxidable **marino**: El más resistente a la **oxidación**. Llevan un 2-4% de **molibdeno**. Se conoce como acero inox A4, o bien AISI 316.

1.4 Tratamientos térmicos de metales

El objetivo de estos tratamientos es **mejorar** las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones. En ocasiones se utiliza este tipo de tratamientos para, posteriormente, conformar el material.

Las propiedades **mecánicas** de las aleaciones de un mismo metal, y en particular de los aceros, residen en la composición **química** de la aleación que los forma y el tipo de tratamiento **térmico** a los que se les somete. Los tratamientos térmicos modifican la estructura **cristalina** que forman a los aceros, sin variar su composición **química**.

El tratamiento **térmico** en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Este tipo de procesos consisten en el **calentamiento** y **enfriamiento** de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la **tenacidad** o producir una superficie **dura** con un interior **dúctil**. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de **calentamiento** y **enfriamiento** de las piezas, en unos tiempos **establecidos**.

Para conocer a qué **temperatura** debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de **fases** como el del hierro-carbono. En este tipo de **diagramas** se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina).

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores **resistencias** tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

Temple

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

Revenido

El **revenido** es el tratamiento térmico que sigue al **temple**. El acero templado es aquel que tiene una **dureza** muy alta (llamado martensita), pero tiene el inconveniente de ser **frágil** y poco **dúctil** porque tiene tensiones internas.

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

Recocido

El recocido consiste en **calentar** un material hasta una temperatura dada y, posteriormente, enfriarlo lentamente. Se utiliza, al igual que el caso anterior, para suprimir los defectos del **temple**.

Se persigue:

Eliminar **tensiones** del temple.

Aumentar la **plasticidad, ductilidad y tenacidad** del acero.

El proceso del **recocido** es el siguiente:

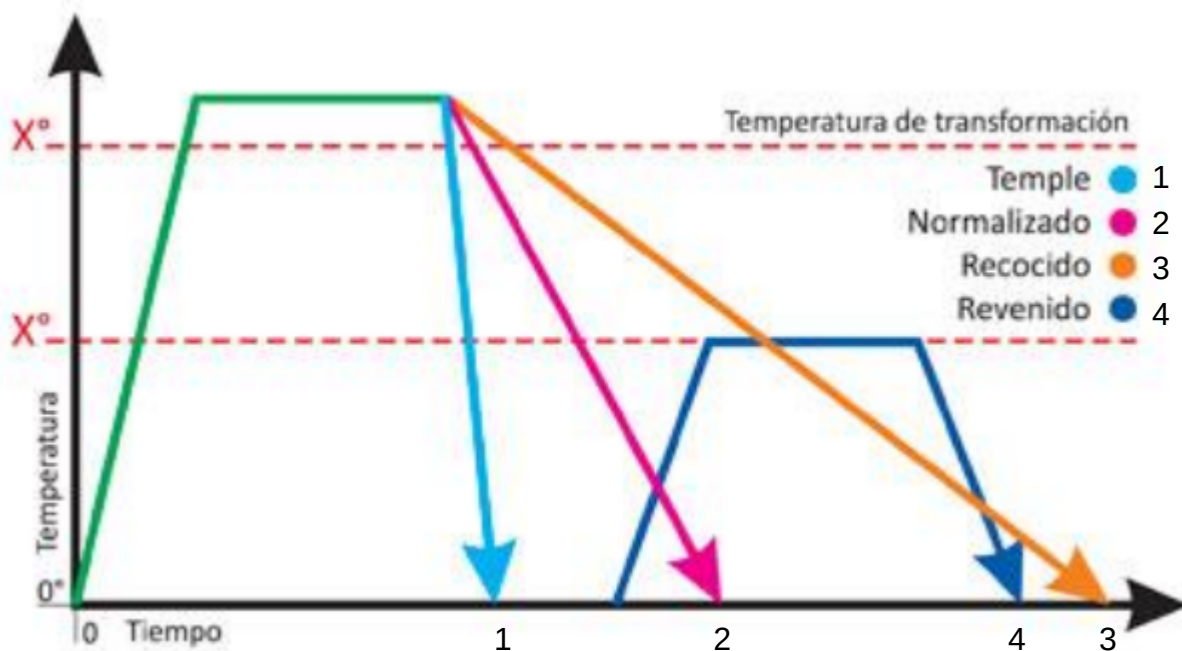
Se **calienta** el acero hasta una temperatura dada

Se **mantiene** la temperatura durante un tiempo

Se **enfriá** lentamente hasta temperatura ambiente, controlando la **velocidad** de enfriamiento. Si la variación de temperatura es muy **alta**, pueden aparecer tensiones internas que inducen grietas o deformaciones. El grado de **plasticidad** que se quiere dotar al metal depende de la velocidad de **enfriamiento** y la **temperatura** a la que se elevó inicialmente.

Normalizado

Este tratamiento se emplea para eliminar **tensiones** internas sufridas por el material tras una conformación **mecánica**, tales como una forja o laminación para conferir al acero unas propiedades que se consideran normales de su composición. El normalizado se practica calentando **rápidamente** el material hasta una temperatura crítica y se mantiene en ella durante un tiempo. A partir de ese momento, su estructura interna se vuelve más **uniforme** y aumenta la **tenacidad** del acero.



1.5 Tratamientos termoquímicos de los metales

Los tratamientos termoquímicos son tratamientos **térmicos** en los que, además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la **composición química** de la capa **superficial**, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento **controlados** en **atmósferas** especiales. Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos están aumentar la **dureza** superficial de las piezas dejando el núcleo más **blando y tenaz**, disminuir el **rozamiento** aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al **desgaste**, aumentar la resistencia a **fatiga** o aumentar la resistencia a la **corrosión**.

Cementación:

Consiste en aumentar la cantidad de **carbono** de la **capa exterior** de los aceros. Se mejora la **dureza** superficial y la resiliencia. Se aplica a piezas que deben ser resistentes a golpes y la vez al desgaste. Se aplica a los aceros.

Nitruración:

Consiste en **endurecer la superficie** de los aceros y fundiciones. Las durezas son elevadas y tienen alta resistencia a la **corrosión**. El componente químico añadido es **nitrógeno**, que se obtiene del amoníaco.

Cianuración o carbonización:

Se trata de **endurecer** la superficie del material introduciendo **carbono y nitrógeno**. Es una mezcla de **cementación y nitruración**. La temperatura es **intermedia** entre la utilizada para la cementación y la nitruración, que es mucho menor que aquella. Se aplica a los aceros.

Sulfinación:

Se trata de introducir en la superficie del metal **azufre, nitrógeno y carbono** en aleaciones férricas y de cobre. Se aumenta la resistencia al **desgaste**, favorecer la **lubricación** y disminuir el coeficiente de **rozamiento**.

1.6 Protección del acero

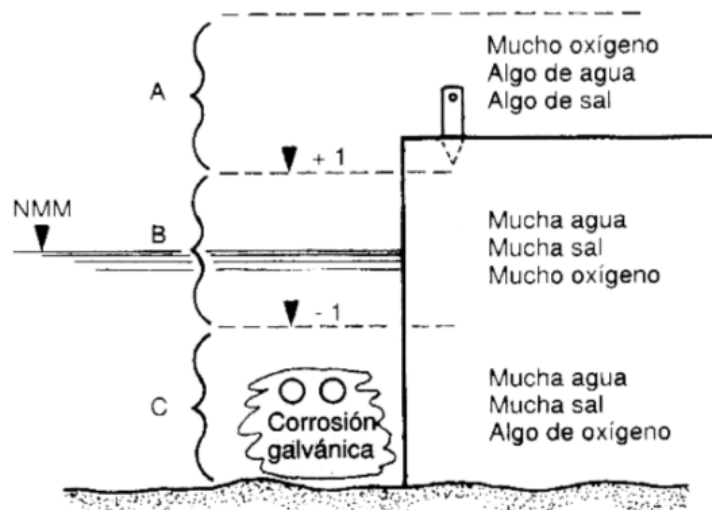
EL PROCESO DE CORROSION

Para que el acero se **CORROA** (es decir, para que se forme óxido) éste debe quedar expuesto al **OXÍGENO O AL AIRE**. Además, el acero se corroe mucho más deprisa en presencia de otros agentes atmosféricos como el **AGUA DE LLUVIA O EL AGUA SALADA**. Además, cuando queda inmerso en agua del mar, el acero está expuesto también a corrosión **GALVÁNICA**, similar a la que tiene lugar entre el acero y los elementos de **LATÓN** de una embarcación.

En la figura:

- la zona A queda expuesta a **AIRE HÚMEDO Y SALPICADURAS DE AGUA SALADA**, por lo que es una zona generalmente corrosiva para productos de acero;
- la zona B se encuentra constantemente **HÚMEDA CON AGUA DE MAR**, que también contiene mucho oxígeno disuelto. Es la zona más **AGRESIVA** para el acero;
- la zona C es también muy **AGRESIVA** para el acero debido a que a la **OXIDACIÓN** se añade la **CORROSIÓN GALVÁNICA**.

Zonas de corrosión en un entorno marino.



Son múltiples los sistemas de protección existentes, muchas veces la solución óptima se alcanza integrando varios de ellos.

vídeo: La protección del acero contra la corrosión | UPV

<https://youtu.be/xow45w9YhM4?si=v2ncdJx6ND6NsMWa>

PROTECCIÓN POR RECUBRIMIENTO

"La protección por **RECUBRIMIENTO** consiste en crear una capa **superficial** o barrera que aísle el metal del **entorno**." En principio es el método más evidente, cubrimos el material por una **capa** de otra sustancia que no se **oxida** y que impide que el material sensible entre en **contacto** con el **oxígeno** y la humedad. Dentro de este tipo de protección podemos diferenciar:

Recubrimientos no **metálicos**

Pinturas y barnices: Método económico. Precisa que la superficie del material a proteger se encuentre **limpia de óxidos y grasas**. El **minio**, pintura que contiene óxido de **plomo**, es uno de los más empleados.

Plásticos: Son muy resistentes a la oxidación. Tienen la ventaja de ser muy **flexibles**, pero tienen muy poca resistencia al **calor**, el más habitual es el **PVC**.

Esmaltes y cerámicos: Tiene la ventaja de resistir elevadas **temperaturas** y desgaste por **rozamiento**.

Recubrimientos **metálicos**

Se distinguen varios métodos según el modo en que se deposita la capa protectora:

Inmersión: Se sumerge el metal a proteger en un baño de otro metal **fundido**. Al sacarlo del baño, el metal se **solidifica** formando una fina película **protectora**. Los metales más comunmente empleados en estos procedimientos son:

Estaño (estañado), se utiliza mucho en las latas de conserva (la hojalata).

Cinc (galvanizado), es el más empleado para proteger vigas, vallas, tornillos y otros objetos de acero.

Aluminio (aluminización), es muy económico y de gran calidad.

Plomo (plombeado), para recubrir cables y tuberías.

Cuando el riesgo de corrosión es muy elevado, se recomienda hacer un recubrimiento con Alclad. El Alclad es un producto forjado, formado por un núcleo de una aleación de **aluminio** y que tiene un recubrimiento de aluminio o aleación de aluminio que es anódico al núcleo y por lo tanto protege electroquímicamente al núcleo contra la **corrosión**.

Electrodeposición:

Se hace pasar corriente eléctrica entre dos metales diferentes que están inmersos en un líquido **conductor** que actúa de electrolito. Uno de los metales será aquel que queremos proteger de la oxidación y hará de cátodo. El otro metal hará de **ánodo**. Al pasar corriente eléctrica, sobre el metal **catódico** se crea una película protectora. Con este método se produce el **cromado o niquelado** de diversos metales.

Protección por capa química:

Se provoca la reacción de las piezas con un agente químico que forme compuestos de un pequeño espesor en su **superficie**, dando lugar a una película protectora por ejemplo:

Cromatizado. Se aplica una solución de ácido crómico sobre el metal a **proteger**, formándose una película de **óxido de cromo** que impide su corrosión.

Fosfatación. Se aplica una solución de ácido fosfórico y fosfatos sobre el metal. Formándose una capa de fosfatos metálicos sobre el metal, que la **protegen** del entorno.

INHIBIDORES

Los inhibidores pueden ser:

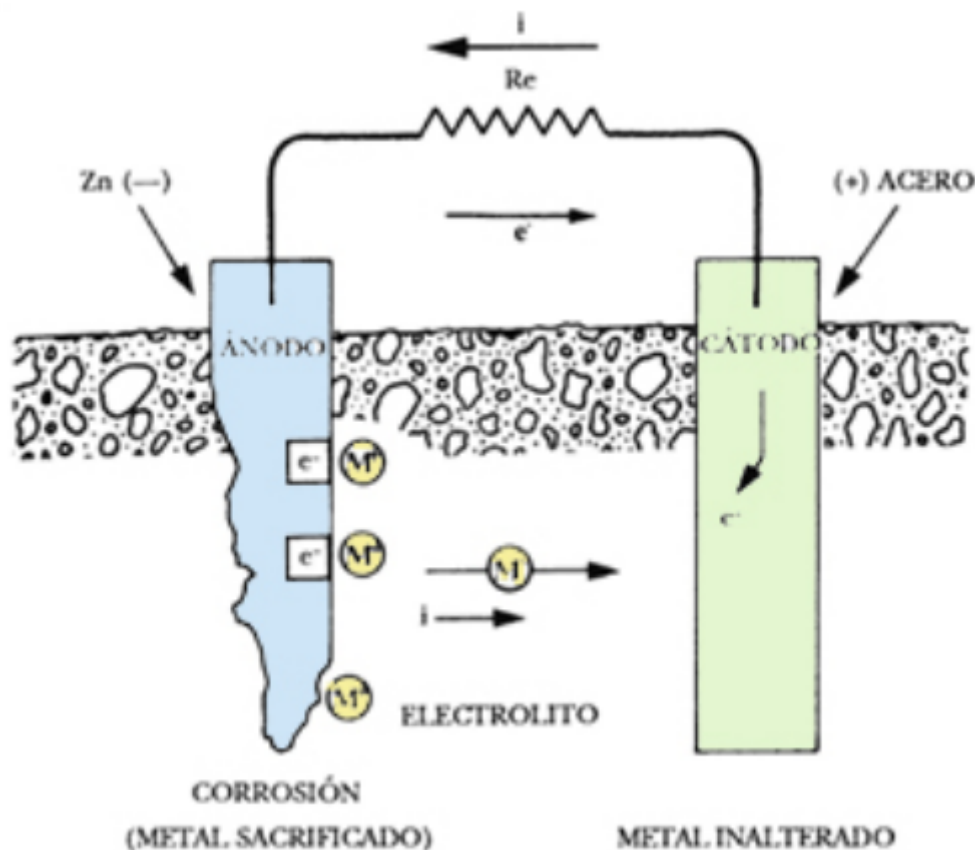
De absorción: Forman una película protectora.

Barrenderos: Eliminan oxígeno.

Los más utilizados son las **sales de cromo**, muy empleadas en los radiadores de los automóviles.

PROTECCIÓN CATÓDICA

"En este método se obliga al material que se pretende proteger a comportarse como un cátodo suministrándole electrones. Para ello se emplea otro metal que estará en contacto con él, llamado **ánodo de sacrificio**. El **ánodo de sacrificio** está formado por un metal mucho más electronegativo que el metal a defender."



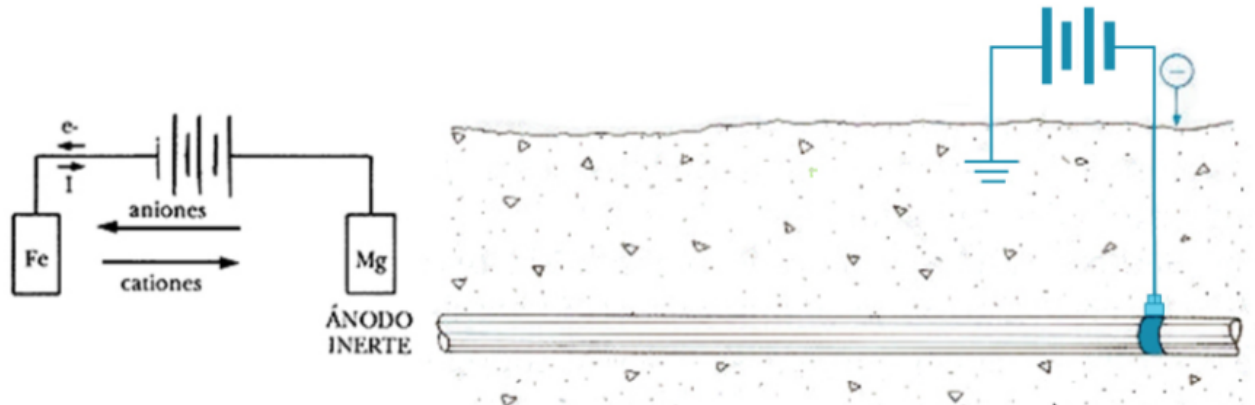
Cuando dos sistemas se ponen en contacto eléctrico el más **electronegativo** se oxida cediendo **electrones** al menos electronegativo. En este caso el ánodo de sacrificio, **más** electronegativo, se oxida comunicando los electrones liberados en este proceso al metal a **proteger**.

A través de esta reacción el **ánodo** se va corroyendo y acaba destruyéndose, por lo que cada cierto tiempo tiene que ser **sustituido**. Este método se utiliza mucho en cubiertas de barcos, y en conducciones subterráneas. Los ánodos galvánicos más utilizados en la protección catódica son de **magnesio, zinc y aluminio**.

PROTECCIÓN POR DIFERENCIA DE POTENCIAL

"Variante del método anterior en la que se incrementa el paso de electrones hacia el metal a proteger **conectando** una fuente de tensión que mantenga la **corriente eléctrica** entre ambos metales."

Se emplea sobre todo en conducciones enterradas.



"Tal y como hemos visto en el punto anterior existe una gran cantidad de sistemas para controlar la corrosión. Sin embargo quizás el método más eficaz sea realizar un buen diseño y elección de los materiales a emplear en las aplicaciones industriales, de tal forma que se evite dicho fenómeno."

1.7 Fundiciones

Las fundiciones son aleaciones de **HIERRO y CARBONO** que, además, pueden contener otros elementos.

El tanto por ciento de carbono oscila entre el **2% y 7 %**.

Pero atención, también se denomina fundición al proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas pero también de plástico, consistente en **FUNDIR** un material e introducirlo en un **MOLDE**, donde se solidifica. Las características de la fundición no dependen solamente de su **COMPOSICIÓN**, sino del proceso de **FABRICACIÓN**. Así, las fundiciones se clasifican atendiendo a la **FRACTURA** (aspecto y color que adquiere cuando se rompe), las **PROPIEDADES** y la **COMPOSICIÓN**.

Fundición	Tipos	Caraterísticas
Ordinaria Solamente lleva hierro y carbono, sin elementos de aleación)	Fundición blanca	Es muy dura y frágil solamente se crea como materia prima para fabricar aleaciones maleables.
	Fundición gris	Su color es gris, porque el carbono esta en forma de grafito
	Fundición atruchada	Tiene unas propiedader intermedias entre la fundición blanca y gris.
Aleada	Además de hierro y carbono (en las proporciones adecuadas) lleva otros elementos químicos que mejoran sus propiedades.	
Especial Emplea como materia prima las fundiciones ordinarias, sometidas a un tratamiento térmico.	Maleable de corazón blanco	Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre a la pieza de mineral de hierro y se introduce en el horno a 1000 °C durante unos 10 días. Se enfría lentamente en el horno durante unos 5 días, hasta temperatura ambiente.
	Maleable de corazón negro	Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre a la pieza de arena y se introduce en el horno a 900 °C durante unos 6 días. Se enfría lentamente en el horno durante unos 5 días, hasta temperatura ambiente.
	Maleable perlítica	Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre a la pieza de arena y se introduce en el horno a 900 °C durante unos 5 días. Se enfría lentamente en el horno durante unos 2 días, hasta temperatura ambiente.

Fundición de hierro gris en 5 pasos

<https://youtu.be/Ld3FMCeW11I?si=Nmlzww3MnQIjM54H>

1.8 Compatibilidad de metales: la corrosión galvánica.

En alguna ocasión se puede haber planteado la duda sobre la utilización de accesorios de latón junto con tuberías fabricadas en otro tipo de **metal**, por los posibles efectos perjudiciales sobre la instalación. Un fenómeno que se puede dar es la **corrosión** conocida como corrosión **galvánica**, que se puede producir por contacto entre **metales** diferentes en presencia de un medio conductor o electrolito como el agua.

Pero ¿qué es exactamente la corrosión galvánica? En presencia de una solución conductora, entre dos **metales** con suficiente diferencia de potencial se produce un flujo de **corriente**, uno de ellos actúa como **ánodo** (-) y el otro como **cátodo** (+), produciéndose una migración de **iones** del primero al segundo. El flujo de **corriente** es mayor cuanto más **diferencia** haya entre los metales. Este efecto, aunque de escasa importancia en instalaciones sanitarias, en que el medio consiste en agua potable o condensados, se incrementa notablemente en el caso de agua **salada** o soluciones ácidas.

El índice o serie galvánica nos indica el grado de nobleza de cada metal: cuanto más **alejados** en el índice, mayor **corrosión**, que se producirá sólo sobre uno de los dos metales, el **menos noble**, situado en posición inferior en el siguiente gráfico:



Es importante saber que este efecto queda compensado por el efecto del área relativa: la corrosión es insignificante si el área del metal más noble es **menor** que la del metal susceptible de corrosión. Por ejemplo no existe incompatibilidad en la combinación de accesorios de latón con tuberías de **hierro o acero** debido a la superficie comparativamente **mayor** de éstas. En los casos en que se combina latón con acero inoxidable, que en este caso actúa como metal noble, el latón -aquí como metal corrosible- sólo sufriría este efecto si la superficie del metal **noble** fuera mucho mayor. Por ejemplo en el caso de un racor instalado en un tanque de acero **inoxidable**. En estos casos, como medida de precaución, se pueden utilizar los **manguitos anti-electrolisis** (vídeo).

Para más información, recomendamos consultar las normas [UNE 112076 IN](#) y la serie de normas [UNE EN12502](#).

También puede interesarle las [PROPIEDADES DEL LATÓN](#).

Fuente

<https://www.rmmcia.es/blog/laton-y-cobre/compatibilidad-de-metales-la-corrosion-galvanica>

1.9 Fatiga de materiales

La fatiga de los materiales es un proceso de daño que se produce en los elementos mecánicos cuando se someten a cargas variables, incluso aunque estas sean varias veces inferiores a las que producirían la rotura ante una carga constante. Puede definirse como un proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que se produce en algún punto del material sujeto a condiciones que producen tensiones y deformaciones fluctuantes y que puede terminar en la aparición de grietas y la fractura completa después de un número suficiente de fluctuaciones.

Ejemplos de fallos por fatiga se pueden encontrar en multitud de sistemas mecánicos. Desde los ferrocarriles hasta los aviones, pasando por los automóviles, barcos o muy diversos tipos de máquinas empleadas en la industria o la agricultura. En los últimos años son también frecuentes los fallos por fatiga en equipos electrónicos sometidos a variaciones de temperatura durante su funcionamiento. Los ciclos térmicos generan tensiones variables en los materiales, que producen un daño progresivo. Una característica de los fallos por fatiga es su espontaneidad, ya que normalmente se producen de forma repentina sin dar tiempo para tomar medidas que lo eviten, con las consecuencias catastróficas que puede tener en muchos casos. Una idea de la importancia del fenómeno nos la da el hecho de que aproximadamente tres de cada cuatro fallos mecánicos producidos en las máquinas y vehículos de distinto tipo son debidos a la fatiga.

Se dice que el proceso es permanente porque, excepto muy en sus inicios, no es posible reparar el material mediante algún tipo de tratamiento. Igualmente, el proceso es progresivo porque el daño aumenta al aumentar el número de ciclos de carga. El proceso se inicia normalmente en zonas muy localizadas en las que hay algún tipo de discontinuidad geométrica en el elemento, como son taladros, marcas producidas por un golpe o cambios de diámetro. Aunque lo determinante en el proceso son las tensiones y deformaciones producidas por las cargas aplicadas al elemento de que se trate, en lo que sigue, para simplificar, se utilizará el término "cargas" para referirnos a las sollicitaciones que producen la fatiga.

El número de fluctuaciones de la carga necesarios para producir la rotura del elemento depende del nivel de carga aplicado. Este puede ser desde varias decenas o centenas de ciclos, como ocurre cuando se intenta romper un alambre de poco diámetro doblándolo alternativamente en uno y otro sentido hasta su rotura, hasta cientos de miles o millones de ciclos, con niveles de carga más bajos. En general, en la mayoría de los materiales hay un nivel de tensiones generadas por las cargas, por debajo del cual no se produce daño por fatiga. Es lo que se conoce como límite de fatiga del material.

El proceso es complejo y depende de múltiples parámetros, además de las características del material y el nivel de las cargas. Entre ellos cabe destacar el ambiente, principalmente agentes corrosivos y temperatura, la geometría del elemento: tamaño, discontinuidades, acabado superficial, la complejidad de las cargas aplicadas, tratamientos superficiales, etc. Como ejemplo, puede decirse que dependiendo del acabado superficial y de las discontinuidades como taladros, ángulos, etc., la

resistencia a fatiga de un elemento puede ser la mitad o la cuarta parte que ese mismo elemento con un buen acabado superficial y unas discontinuidades más suaves.

La historia está llena de casos de fallos por fatiga, que se han ido produciendo a medida que han ido apareciendo sistemas más complejos y sometidos a mayores sollicitaciones. En la segunda mitad del siglo XIX comenzó a saberse algo del fenómeno con la aparición del ferrocarril, en el que existen numerosas piezas sometidas a cargas variables y un número considerable de ciclos; por ejemplo, los ejes y ruedas producen un ciclo cada vuelta que dan. A principios y mediados del siglo pasado comenzó también a tomarse conciencia de la importancia de la fatiga en los automóviles y en los barcos. Un caso bien conocido es el de los barcos de la serie Liberty producidos por Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. De los cerca de 3000 barcos producidos, alrededor del 50% tuvieron fallos por fatiga durante la Guerra, llegando el fallo hasta la rotura en dos en cerca de doscientos de ellos. Pero ese fenómeno se produce aún, aunque con mucha menos frecuencia, siendo el desastre del Prestige un exponente de ello. Desde los años 50 del pasado siglo hasta nuestros días ha tomado especial relevancia el fenómeno de la fatiga en la industria aeronáutica. La desintegración en vuelo de algunos de los aviones Comet, que fueron los primeros aviones comerciales presurizados, hizo ver la importancia de la fatiga en el diseño de los fuselajes de los aviones. Actualmente, la fatiga suele ser uno de los parámetros fundamentales en el diseño tanto de los fuselajes como de los motores de los aviones.

Es difícil hacer estimaciones suficientemente fiables de la resistencia de un sistema a fatiga, lo que requiere de altos coeficientes de seguridad en el diseño y numerosos ensayos para comprobar las estimaciones realizadas. Ello es debido principalmente a diversos factores entre los que se incluyen la aleatoriedad de las cargas producidas en los sistemas, la variabilidad del comportamiento de los materiales a fatiga y a la gran cantidad de parámetros de los que depende.

Sin embargo, en los últimos años se ha producido una mejora importante en el conocimiento del proceso, que puede dividirse en una fase inicial de daño microestructural, la aparición de una microgrieta y su posterior crecimiento ante las cargas cíclicas hasta la fractura final. Igualmente, se ha producido una mejora de la capacidad de predicción del comportamiento de las grietas. Además, los equipos que permiten detectar grietas pequeñas han experimentado una gran evolución, permitiendo detectar grietas cada vez menores. Todo ello ha permitido, especialmente en la industria aeronáutica, el desarrollo de diseños basados en la denominada tolerancia al daño, que ha supuesto un aumento de la seguridad de los equipos ante la fatiga.

El criterio de diseño basado en la tolerancia al daño considera que es posible que aparezcan grietas en un avión y por ello, mediante técnicas de análisis y métodos de detección, debe garantizarse que la aparición de dichas grietas no generará un fallo catastrófico. Para ello, el avión debe diseñarse capaz de soportar las cargas de funcionamiento con grietas de determinada longitud. Pero ello no quiere decir que se permita volar con grietas de esas dimensiones. El diseño tolerante al daño va unido al cumplimiento de tres condiciones: la capacidad de análisis de la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga ante las cargas de funcionamiento; la capacidad de detección de grietas de pequeñas dimensiones durante el mantenimiento; y una planificación adecuada de los periodos de revisión para comprobar la existencia de grietas. Teniendo en cuenta las grietas menores que es

capaz de detectar el sistema de inspección, los periodos de revisión deben planificarse suficientemente cortos para que desde que la grieta alcanza una longitud detectable por los procedimientos al uso hasta que llega a la longitud máxima tolerada se hayan producido varias revisiones. De esa forma solo es posible un accidente si el procedimiento de detección de grietas falla varias veces y cada vez con grietas de mayor longitud, más fáciles de detectar.

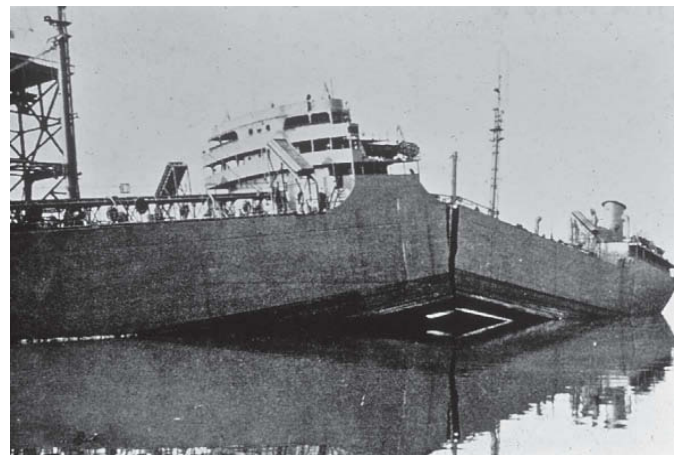
Todos estos avances en el conocimiento del proceso, en los procedimientos de análisis y en las capacidades de ensayo a fatiga han permitido reducir enormemente los fallos y accidentes producidos por esta causa. Sin embargo aún debe seguir profundizándose en el fenómeno para reducir los fallos y las necesidades de altos coeficientes de seguridad, que reducen la eficiencia de los sistemas al aumentar sus costes tanto de fabricación como de mantenimiento.

Jaime Domínguez Abascal es académico de la Real Academia de Ingeniería.

Fuente:

El Mundo 16/01/2018

<https://www.elmundo.es/economia/2018/01/16/5a5de0e4e5fdeaad3c8b45e5.html>



Liberty Ship SS John W. Brown on the Great Lakes in the United States

https://ww2db.com/image.php?image_id=5061

<https://www.mathscinotes.com/2018/05/liberty-ship-production-data/>



Petrolero Prestige ante la costa gallega en 2002

<http://citaconlahistoriajm.blogspot.com/2017/11/el-desastre-del-prestige.html>

Vídeo fatiga de materiales

https://youtu.be/ec50pX_0N4s?si=PMXcHEAsMXVJuHJx

Responde a las siguientes preguntas:

1. ¿En el mástil de un velero, que tipo de esfuerzo se produce? ¿Se podría producir rotura por fatiga, porqué?
2. ¿Cómo se anuncia la fractura por fatiga?
3. ¿Cuál es el porcentaje aproximado de las fracturas por fatiga en las causas de fallos mecánicos?
4. ¿Cómo se puede reparar un inicio de daño avanzado por fatiga de material?
5. ¿Qué zonas de una pieza son especialmente propensas a sufrir fatiga de material?
6. ¿Qué indica el límite de fatiga del material?
7. ¿Qué parámetros influyen en que se produzca un daño por fatiga de material?
8. ¿Qué significa diseño basado en la tolerancia al daño?
9. ¿Qué condiciones se deben cumplir para que el diseño basado en la tolerancia al daño sea efectivo y prevenga un accidente?