

## ENSAYOS DE MATERIALES

### 1.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los materiales se diferencian entre sí por sus propiedades. Estas propiedades pueden agruparse de maneras diferentes. No obstante, desde el punto de vista técnico resulta útil la siguiente clasificación:

**Las propiedades fisicoquímicas** Son aquellas propiedades que nos informan sobre el comportamiento del material ante diferentes acciones externas, tales como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de productos químicos.

Entre las mismas podemos citar la **densidad**, relación entre la masa y el volumen, la **conductividad térmica** de un material está relacionada con la mayor o menor dificultad que tiene el material para conducir el calor; la **dilatación térmica** indica el aumento de volumen que experimenta un material cuando se calienta; la **transparencia** es la facilidad con la que un material permite que lo atraviese la luz; la **conductividad eléctrica** indica si un material es buen o mal conductor de la corriente eléctrica, etc.

**Propiedades ecológicas** Son aquellas propiedades relacionadas con la mayor o menor nocividad del material para el medio ambiente: toxicidad, volatilidad, facilidad de reciclado, etc.

En tecnología las propiedades más importantes son las **mecánicas**, hacen referencia al comportamiento del material ante la aplicación de diferentes tipos de esfuerzos.

**Ductilidad:** capacidad de los materiales para deformarse cuando se les aplica un esfuerzo de tracción. Mide la capacidad de un material para deformarse en forma de hilos.

**Maleabilidad:** capacidad de los materiales de deformarse plásticamente frente a esfuerzos de compresión. Mide la capacidad de un material para deformarse en forma de láminas.

**Tenacidad:** es la capacidad de un material para soportar esfuerzos de rotura aplicados de manera lenta. Un esfuerzo puede ser de **tracción, de compresión, de flexión, de torsión y de cizalladura**.

**Elasticidad:** capacidad de un material de recobrar su forma primitiva cuando cesa la causa que lo deformó.

**Resiliencia:** capacidad de un material de absorber energía en la zona elástica al someterlo a un esfuerzo de rotura. Mide la capacidad para resistir golpes sin romperse.

**Dureza:** resistencia que opone un material a ser penetrado o rayado por otro.

**Fatiga:** resistencia a la rotura de un material sometido a esfuerzos variables tanto en magnitud como en sentido.

**Plasticidad:** capacidad de algunos materiales sólidos de adquirir deformaciones permanentes sin llegar a romperse.

### 2.- ENSAYOS TECNOLÓGICOS

Son procedimientos normalizados con los que se cuantifican las diferentes propiedades de los materiales.

#### **Clasificación de los ensayos**

Con los ensayos se intenta simular las condiciones de trabajo para determinar la idoneidad del material o pieza en cuestión. Debido a la diversidad de propiedades y a las diferentes formas de determinarlas, los ensayos se pueden clasificar en:

**Según la rigurosidad del ensayo**

**Ensayos científicos:** son ensayos que se hacen en laboratorios especializados y permiten obtener valores precisos y reproducibles de las propiedades ensayadas, ya que las condiciones a las que se somete el material están convenientemente normalizadas.

**Ensayos tecnológicos:** se hacen en fábrica e indican calidades de material.

**Según la naturaleza del ensayo**

**Ensayos químicos:** permiten conocer la composición cualitativa y cuantitativa del material, así como la naturaleza del enlace químico o la estabilidad del material en presencia de compuestos corrosivos.

**Ensayos metalográficos:** con el uso de microscopios, permiten conocer la estructura interna del material.

**Ensayos físicos:** tienen por objeto cuantificar ciertas propiedades físicas tales como: densidad, punto de ebullición, punto de fusión, conductividad eléctrica, conductividad térmica, etc.

**Ensayos mecánicos:** con ellos se determina la resistencia del material a ciertos esfuerzos. Los ensayos de este tipo más importantes son: dureza, fatiga, choque, tracción, etc.

**Según la utilidad de la pieza después de ser sometida al ensayo**

**Ensayos destructivos:** son aquellos que producen un daño o rotura de la pieza sometida al ensayo.

**Ensayos no destructivos:** se analizan los defectos externos e internos de una pieza mediante procedimientos de observación directa empleando microscopios, rayos X, ultrasonidos, campos magnéticos, etc.

**2.1.- ENSAYOS DE DUREZA**

Los más empleados son los ensayos de dureza estáticos, donde se emplea un elemento "penetrador" y se mide la huella que produce en el material a medir.

La dureza viene dada por la relación entre fuerza y superficie de la huella.

**Método Brinell (HB)**

Emplea como penetrador una bola de acero muy duro de diámetro conocido. Al someter la bola a una carga determinada, se produce en el material una huella en forma de casquete esférico. La dureza Brinell queda determinada por;

$$HB = \frac{F}{A}$$

Este ensayo se utiliza en materiales blandos (de baja dureza) y muestras delgadas. El penetrador usado es una bola de **acero templado** de diferentes diámetros. Para los materiales más duros se usan **bolos de carburo de tungsteno**. En el ensayo típico se suele utilizar una bola de acero de 10 a 12 milímetros de diámetro, con una fuerza de 3.000 kilopondios. El valor medido es el diámetro del casquete en la superficie del material.

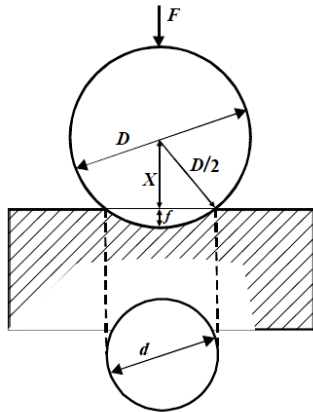
La carga a aplicar viene dada por la siguiente expresión  $F = KD^2$

K es una constante que depende del material, 5 (aluminio, magnesio y sus aleaciones), 10 (cobre y sus aleaciones), y 30 (aceros).

D es el diámetro de la bola.

F la fuerza en Kg a aplicar.

La determinación de superficie de la huella se realiza por  $A = \pi \cdot D \cdot f$



$$f = \frac{D}{2} - X = \frac{1}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$A = \frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

**HB** = Dureza Brinell en **kg/mm<sup>2</sup>**

**F** = Carga en **kg**

**A** = Superficie de la huella en **mm<sup>2</sup>**

**D** = Diámetro de la bola en **mm**

**f** = Flecha (profundidad de la huella) en **mm**

**d** = Diámetro de la huella en **mm**

Este ensayo sólo es válido para valores menores de **600 HB** en el caso de utilizar la bola de acero, pues para valores superiores la bola se deforma y el ensayo no es válido. Se pasa entonces al ensayo de dureza Vickers.

Algunos valores típicos de dureza serían: Acero (blando): 120 HB, Acero de herramientas: 500 HB, Acero inoxidable: 250 HB, Aluminio: 15 HB, Cobre: 35 HB, Madera: entre 1 HB y 7 HB, Vidrio: 482 HB

La denominación del resultado del ensayo se describe de la siguiente manera:

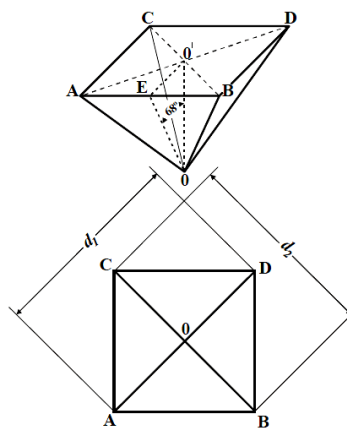
340 HB 10/3000/30

Siendo el primer número el resultado del ensayo en Kp/mm<sup>2</sup>.

Y los valores que siguen a las siglas representan: 10 (diámetro de la bola en mm), 3000 (carga en Kp) y 30 (duración de la carga en segundos)

**Método Vickers HV**

Este método se emplea para durezas superiores a 400 HB. El método es igual al caso anterior, con la salvedad del penetrador que es una pirámide regular de base cuadrada cuyas caras forman un ángulo de 136°. Sus cargas van de 5 a 125 kilopondios (de cinco en cinco). El tiempo que dura el ensayo es de unos 20 s.



$$HV = \frac{F}{A} \quad A = 4 \cdot \text{area}(OAB)$$

donde A es el área de la huella que el penetrador produce en el material.

$$A = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \overline{AB} \cdot \overline{OE} = 2 \cdot \overline{AB} \cdot \overline{OE}$$

$$\text{sen } 68^\circ = \frac{\overline{O'E}}{\overline{OE}} \Rightarrow \overline{OE} = \frac{\overline{O'E}}{\text{sen } 68^\circ}$$

$$\overline{O'E} = \frac{\overline{AB}}{2}$$

$$A = 2 \cdot \overline{AB} \cdot \frac{\overline{AB}}{\text{sen } 68^\circ} = \frac{\overline{AB}^2}{\text{sen } 68^\circ}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ como } \overline{AB} = \overline{AC}$$

$$d^2 = 2 \cdot \overline{AB}^2 \Rightarrow A = \frac{d^2}{2 \cdot \text{sen } 68^\circ} = \frac{d^2}{1,854}$$

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

**HV** = Dureza Vickers en **kg/mm<sup>2</sup>**

**d** = Diagonal de la huella en **mm**

**F** = Carga en kilogramos **kg**

El resultado de la medición viene dado por: 315 HV 30

Donde el 315 es el valor obtenido en Kp/mm<sup>2</sup> y 30 la carga aplicada en Kp

**Método Rockwell**

Este método, a diferencia de los anteriores, permite determinar la dureza de un material, no a partir de la superficie de la huella sino de su profundidad. El penetrador empleado depende del material a ensayar, para los materiales blandos empleamos una bola de acero y para los duros un cono de diamante con 120° de ángulo, denominándose el ensayo según el penetrador con una letra que sigue a las siglas HR, los ensayos más comunes son **Rockwell B y C, HRB o HRC**.

| Denominación del ensayo  | BOLA  |       |       |       |       | CONO |     |     |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
|                          | B     | E     | F     | G     | K     | A    | C   | D   |
| Diámetro de la bola (mm) | 1.590 | 3.175 | 1.590 | 1.590 | 3.175 | -    | -   | -   |
| Carga (kg)               | 100   | 100   | 60    | 150   | 150   | 60   | 150 | 100 |

**Forma de realizar el ensayo**

1º Se aplica al penetrador una carga de 10 Kg durante un tiempo determinado. Esta carga provoca una huella de profundidad **h<sub>1</sub>**.

2º Después, dependiendo de la dureza del material, se añade la carga adicional que puede ser de 60, 100 ó 150 kg. La profundidad de la huella alcanza entonces el valor **h<sub>2</sub>**.

3º Al retirar la carga adicional, el penetrador retrocede por la recuperación elástica del material, hasta una profundidad **h<sub>3</sub>**

Siendo 
$$e = \frac{h_3 - h_1}{0,002} \quad h_3 \ h_1 \text{ en mm}$$

La dureza Rockwell queda determinada por

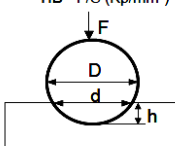
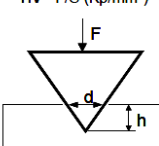
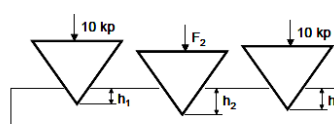
**HRC = 100 – e      HRB = 130 – e**

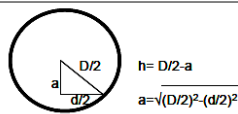
Cuanto mayor es la profundidad **e**, menor es la dureza del material.

El durómetro para Rockwell está provisto de una escala graduada que permite realizar una medida instantánea de la profundidad de la huella. En los anteriores casos hay que utilizar una lupa graduada o un microscopio para medir el diámetro de la huella o diagonales de la pirámide.

| Símbolo de la escala | Penetrador             | Carga mayor (kg) | Aplicaciones                                                                 |
|----------------------|------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| A                    | Diamante               | 60               | Aceros tratados y sin tratar. Materiales muy duros. Chapas duras y delgadas. |
| B                    | Esfera de 1/16 pulgada | 100              | Aceros recocidos y normalizados.                                             |
| C                    | Diamante               | 150              | Aceros tratados térmicamente.                                                |
| D                    | Diamante               | 100              | Aceros cementados.                                                           |
| E                    | Esfera de 1/8 pulgada  | 100              | Metales blandos y antifricción.                                              |
| F                    | Esfera de 1/16 pulgada | 60               | Bronce recocido.                                                             |
| G                    | Esfera de 1/16 pulgada | 150              | Bronce fosforoso y otros materiales.                                         |
| H                    | Esfera de 1/8 pulgada  | 60               | Metales blandos con poca homogeneidad, fundiciones con base hierro.          |
| K                    | Esfera de 1/8 pulgada  | 150              | Aplicaciones análogas al tipo anterior.                                      |

**Comparativo de ensayos de dureza**

| TIPO DE ENSAYO                         | BRINELL HB                                                                                                                                                                                                                                      | VICKERS HV                                                                                                                                                                                                | ROCKWELL                                                                                                                                                                                                           |                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|                                        |                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                           | HRB                                                                                                                                                                                                                | HRC                                 |
| Tipo de material                       | no muy duros                                                                                                                                                                                                                                    | muy duros                                                                                                                                                                                                 | blandos                                                                                                                                                                                                            | duros                               |
| Penetrador                             | Bola de acero templado                                                                                                                                                                                                                          | pirámide regular de diamante                                                                                                                                                                              | bola de acero                                                                                                                                                                                                      | cono de acero con punta de diamante |
| Medida                                 | superficie de la huella                                                                                                                                                                                                                         | superficie de la huella                                                                                                                                                                                   | profundidad de la huella                                                                                                                                                                                           |                                     |
| Valor de dureza (resultado del ensayo) | $HB = F/S \text{ (Kp/mm}^2\text{)}$<br><br>$S = \pi D h = \pi D \left( \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right)$<br>Valor dureza igual sólo si $F = K \cdot D^2$ | $HV = F/S \text{ (Kp/mm}^2\text{)}$<br><br>$S = 4 \cdot \frac{d \cos 45^\circ \cdot h}{2} = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}$ | $HRB = 130 - e$                                                                                                                                                                                                    | $HRC = 100 - e$                     |
|                                        | <br>$e = \frac{h_3 - h_1}{0,002}$ ( $h_3$ y $h_1$ en mm)                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                    |                                     |
| Ventajas e inconvenientes              | Válido para la mayoría de los aceros. Si las deformaciones son pequeñas el margen de error es grande<br><br>Hay que medir con un microscopio la diagonal de la huella                                                                           | Es más exacto que Brinell pero más caro.                                                                                                                                                                  | es el ensayo más rápido y sencillo pero también el menos preciso (no mide superficie de la huella, sólo su profundidad).<br><br>El aparato de medida suele dar ya el resultado (no hace falta medir profundidades) |                                     |



**Medidor de Dureza Rockwell TH-500**

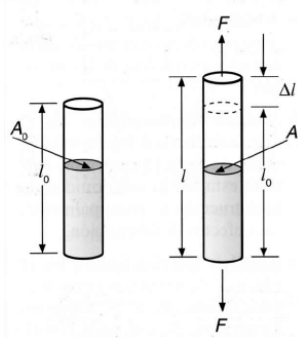


- Determinación de la dureza Rockwell A, B ó C de metales ferrosos y no ferrosos tales como aceros al carbono, aleaciones de acero, hierro fundido, etc.
- Utilizados en la industria, institutos de investigación, laboratorios, etc.
- Diseño moderno, simpleza de uso, lectura estable, simple de mantener.
- Cumple con normas BSEN 10109-96 e ISO6508.2

**2.2.- ENSAYO DE TRACCIÓN**

Cuando un material es sometido a una fuerza de tensión se produce una deformación del mismo. Si al cesar la fuerza el material vuelve a sus dimensiones primitivas diremos que ha experimentado una deformación elástica.

Si el material se deforma hasta el extremo de no poder recuperar por completo sus medidas originales, se dice que ha experimentado una deformación plástica.



Dado un elemento cilíndrico sometido a una fuerza F de tracción, se define tensión o esfuerzo  $\sigma$  como el coeficiente entre la fuerza y la sección transversal  $A_0$  del elemento.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Se acostumbra a utilizar como unidad de esfuerzo Kp/cm<sup>2</sup>, Kp/mm<sup>2</sup> ó en N/m<sup>2</sup> (Pascuales).

Recordar 1 Pascal (1 N/m<sup>2</sup>) = 9,8 . 10<sup>4</sup> Kp/cm<sup>2</sup>.

*Alargamiento unitario*

Al aplicar la tensión al elemento se producirá un alargamiento  $\Delta l = l - l_0$

Esta **deformación** se suele dar en tanto por ciento de la longitud inicial:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

*Módulo de elasticidad (E)*

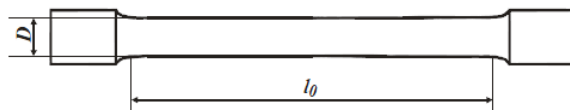
Todo material se comporta de manera elástica hasta un límite de tensión. El módulo de Young es la relación entre tensión y alargamiento característico de cada material hasta ese límite.

$\sigma = E \cdot \epsilon$  (como  $\epsilon$  es adimensional se mide en las mismas unidades que la tensión?)

El ensayo de tracción consiste en someter a una "probeta" del material a ensayar de unas dimensiones determinadas a un esfuerzo de tracción hasta romperla. A través del mismo se obtienen datos acerca de la elasticidad del material, su plasticidad y su resistencia a la rotura.

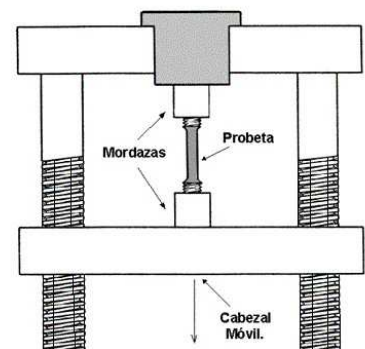
*Probetas*

La norma que regula el ensayo indica con exactitud las dimensiones que debe de tener la probeta a ensayar, pueden ser cilíndricas o prismáticas.



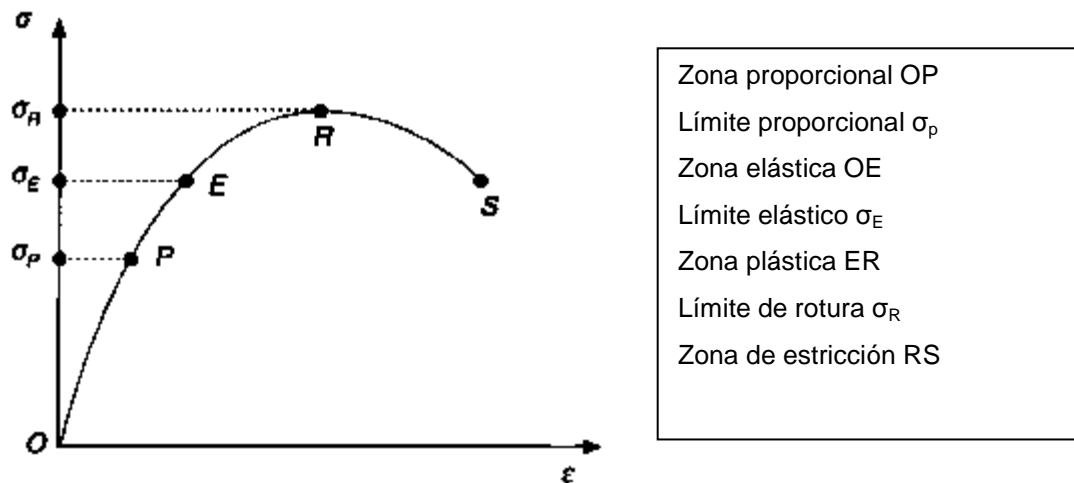
*Máquina de tracción*

Son dispositivos mecánicos o hidráulicos que someten a las probetas a un esfuerzo o tensión de tracción creciente. Esto provoca un desplazamiento de las mordazas que sujetan la probeta, que comienza a alargarse. La máquina detecta, cuantifica y relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones (alargamientos producidos).



*Diagrama de esfuerzos y deformaciones*

Relaciona en una gráfica las tensiones aplicadas y las elongaciones producidas. Todo material tiene un diagrama como el siguiente.



Al comienzo de aplicar cargas el material responde de una manera elástica siendo carga y alargamiento proporcionales, es la denominada **zona proporcional** donde el módulo de Young  $E$  es característico de cada material  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , el límite en que tensión y deformación dejan de ser proporcionales se llama **límite proporcional** y es un dato importante que se obtiene del ensayo  $\sigma_p$ .

Si se continúa aumentando la tensión el material sigue comportándose de manera elástica pero tensión y deformación ya no son proporcionales. Cuando se llega a un valor de tensión **límite elástico**  $\sigma_E$  el material deja de comportarse de forma elástica y al dejar de aplicar la tensión el alargamiento permanece.

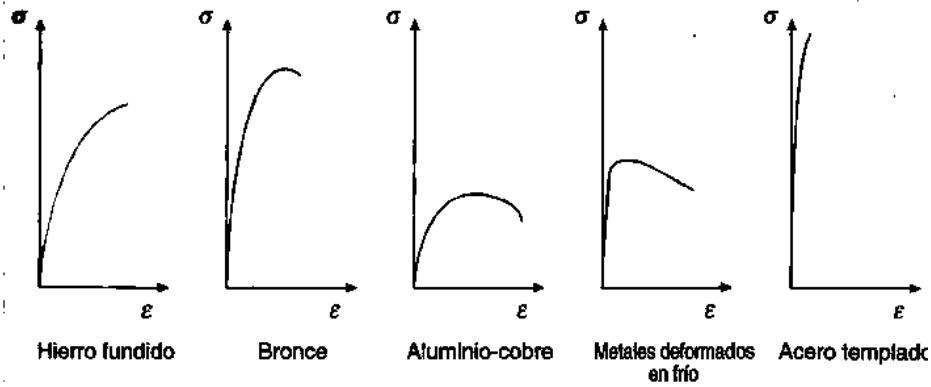
A partir del límite elástico el material tiene un comportamiento plástico, en la gráfica se está en la *zona plástica*. Si se sigue aumentando la tensión llega un momento que el material no resiste y se rompe es el llamado **límite de rotura o tensión de rotura**  $\sigma_R$ . Aunque la probeta no esté visiblemente rota, se considera como límite el valor de tensión a partir del cual se rompe la probeta aunque se siga aplicando una tensión menor.

Zona de estricción, llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada **reducción de la sección de la probeta**, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca.

El coeficiente de estricción es la relación entre la diferencia de secciones de rotura e inicial y la sección inicial.

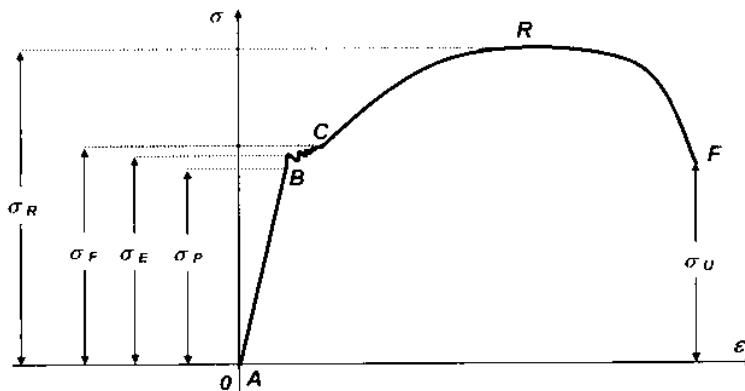
Siendo  $A_0$  la sección inicial,  $A_S$  la sección en el momento de la rotura. El coeficiente de estricción será:

$$Z = \frac{A_0 - A_S}{A_0}$$



Dependiendo de las propiedades del material de elasticidad, plasticidad y resistencia se obtendrá un tipo u otro de gráfica.

Como en Ingeniería los aceros son los principales materiales el ensayo de tracción de los aceros es el más estudiado, en el mismo se obtiene una gráfica de este tipo:



En el diagrama de muchos aceros aparece una zona a continuación del límite elástico donde el material se alarga de una manera muy rápida sin incrementar la tensión, a este fenómeno se le llama **fluencia** ya que el material fluye sin causa aparente. El punto donde desaparece este fenómeno se llama **límite de fluencia o tensión de fluencia**  $\sigma_F$ .

**Tensión de trabajo  $\sigma_T$**

Cuando se diseña una pieza que ha de estar sometida a esfuerzos hay que asegurarse de que esa pieza va a resistir. Además el diseñador tiene que asegurarse de que la pieza no tiene una gran deformación. Podríamos pensar que para cumplir estas condiciones la tensión de trabajo debería de ser inferior a la que marca el límite elástico o el límite proporcional. Pero para asegurarse de que con el tiempo o con la aplicación de esfuerzos imprevistos la pieza sigue resistiendo se emplea un coeficiente de seguridad  $N$ , de manera que una pieza se someterá a una tensión  $\sigma_T$  que cumpla la siguiente expresión.

$$\sigma_T = \frac{\sigma_E}{N}$$

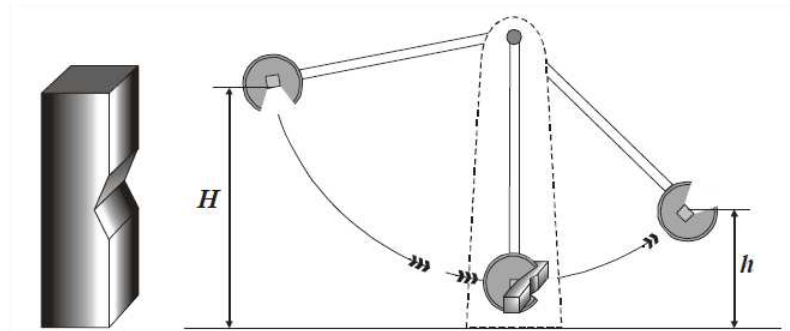
Pudiéndose emplear en la expresión el límite proporcional o incluso el límite de rotura.

| Materiales        | Módulo de elasticidad $E$ (kp/mm <sup>2</sup> ) | Tensión de rotura $\sigma_R$ (kp/mm <sup>2</sup> ) | Tensión del límite elástico $\sigma_E$ (kp/mm <sup>2</sup> ) | Tensión máx. de trabajo para elementos de máquinas $\sigma_t$ (kp/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Hierro soldado    | $2 \cdot 10^4$                                  | 30 : 36                                            | 16 : 20                                                      | 9                                                                                   |
| Hierro homogéneo  | $2 \cdot 10^4$                                  | 35 : 45                                            | 18 : 24                                                      | 9 : 12                                                                              |
| Acero             | $2,2 \cdot 10^4$                                | 40 : 60                                            | 25 : 35                                                      | 12 : 15                                                                             |
| Aceros especiales | -                                               | 90 : 180                                           | 60 : 120                                                     | 15 : 30                                                                             |
| Alambre de acero  | $2,4 \cdot 10^4$                                | 75 : 200                                           | 40 : 50                                                      | 18 : 30                                                                             |
| Fundición         | $1 \cdot 10^4$                                  | 10 : 15                                            | 6                                                            | 3                                                                                   |



### 2.3.- ENSAYO DE RESILIENCIA

El más característico es el ensayo **Charpy**. En este ensayo se utiliza una probeta de sección cuadrada provista de una entalladura que es sometida a la acción de una carga de ruptura por medio de un martillo que se desplaza en una trayectoria circular.



La energía absorbida por la rotura se llama resiliencia  $\rho$  y su unidad en el sistema internacional es el  $J/m^2$

$$\rho = \frac{E_p}{A_0} = \frac{m \cdot g \cdot (H - h)}{A_0}$$

$E_p$  = Energía potencial absorbida en la ruptura en Julios.

$m$  = masa del martillo en Kg.

$g$  = Gravedad terrestre  $9,8 \text{ m/s}^2$

$H$  = Altura desde la que cae el martillo en metros

$h$  = Altura que alcanza el martillo tras la rotura en metros.

$\rho$  = Resiliencia en Julios por metro cuadrado

$A_0$  = Sección de la probeta por la parte de la entalladura en metros cuadrados.

Como en la probeta que se utiliza para el ensayo se practica una *entaya* la sección a tener en cuenta vendrá dada por las medidas de la misma.



## PRINCIPIOS DE DIAGRAMAS DE FASES

### 3.1.- LOS METALES

Aunque en la actualidad se están descubriendo nuevos materiales cerámicos y plásticos que en algunas aplicaciones industriales sustituyen ventajosamente a los metales están muy lejos de sustituirlos plenamente. El principal inconveniente del uso de los metales está en el agotamiento de los yacimientos mineros, nuevas necesidades industriales y la oxidación por corrosión de los mismos por parte de ciertos agentes químicos y atmosféricos. Desde el punto de vista de su uso podemos clasificar los metales en puros y aleaciones.

#### *Metales puros*

El uso de los metales puros se centra en muy pocas aplicaciones, ya que aunque resultan difíciles de obtener tienen buena resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica que los hacen aptos para ciertas aplicaciones muy concretas.

#### *Estructura cristalina de los metales puros*

Una de las características de los metales puros es que solidifican en una estructura cristalina determinada formada a partir de un núcleo. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento, en una pieza determinada se pueden formar más o menos núcleos dando lugar a granos cuyo tamaño determinará ciertas propiedades mecánicas.

### 3.2.- ALEACIÓN

Es todo producto que resulte de la unión de dos o más elementos químicos, uno de los cuales ha de tener carácter metálico. Para que la unión de estos elementos se considere aleación tienen que cumplirse dos condiciones:

- Que los elementos componentes sean totalmente miscibles en estado líquido.
- Que el producto resultante tenga mayoría de enlaces metálicos, (carácter metálico).

Las aleaciones mejoran notablemente las propiedades mecánicas de los metales puros como pueden ser tenacidad, dureza, resistencia a la oxidación, etc; sin embargo se empeoran propiedades como conductividad eléctrica y térmica.

### 3.3.- ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LAS ALEACIONES

En las aleaciones, para que se produzca una solución sólida estable, es necesario que los elementos que la constituyen formen parte de la misma red cristalina.

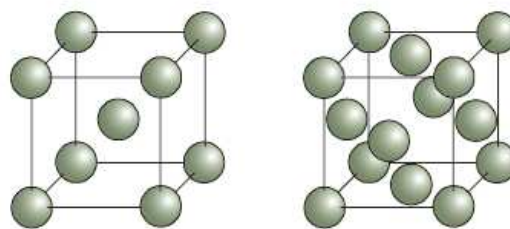
Para una aleación de dos elementos que poseen la misma estructura cristalina, se denomina **solvente** al elemento que entra en mayor proporción, y **soluto** al que lo hace en menor proporción.

Cuando los elementos poseen distinta estructura cristalina, se denomina **solvente** al elemento que proporciona la estructura final de la aleación.

Tal y como se ha dicho, los metales puros solidifican formando una estructura cristalina determinada, por lo tanto los átomos que introducimos han de formar parte de esa estructura cristalina, distinguiéndose dos tipos de soluciones:

**Solución sólida por sustitución:** en este caso, el disolvente y soluto tienen una estructura cristalina similar, por lo que un átomo de soluto ocupa la posición de otro átomo de disolvente en la estructura cristalina final.

**Solución sólida por inserción:** ocurre cuando los átomos de soluto son muy pequeños y ocupan los huecos intersticiales del disolvente. Esto provoca un aumento de la resistencia de la aleación, ya que se hace más difícil la deformación del producto final.



**3.4.-DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO O DE FASES**

Desde el punto de vista estructural, una **fase** de un material, es una parte homogénea del mismo que difiere de las demás en su composición, estado o estructura. Al conjunto de las representaciones de los estados posibles se denomina **diagrama de fases**.

**Regla de las fases de Gibbs**

La ecuación o regla de Gibbs nos permite calcular el número de fases que pueden existir en equilibrio en cualquier sistema.

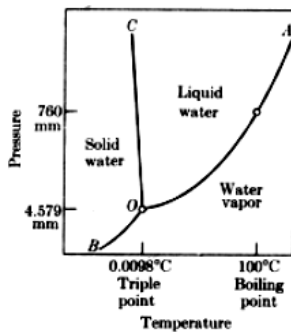
$$f + N = C + 2$$

f = Es el número de fases presentes en el punto de análisis.

N=Grados de libertad, es decir, el número de variables (presión, temperatura o composición en sistemas con más de un componente) que se pueden modificar sin que varíen las fases del sistema.

C= Es el número de componentes del sistema.

**Ejemplo del diagrama de fases del agua**



Las sustancias puras (agua), también tienen su diagrama de fases:

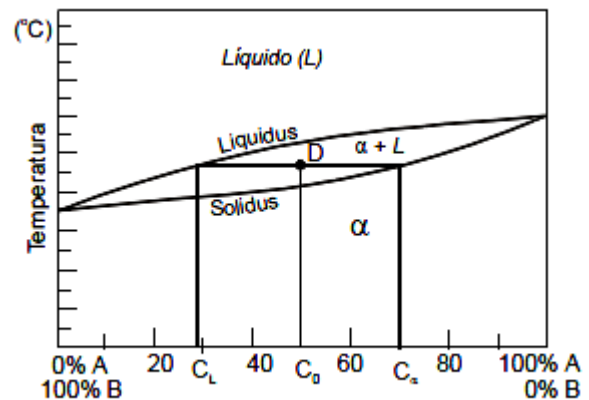
- En el punto triple: F=3; C=1  
 $3+N=1+2$   
 $N=0$   
 Si se varía P o T no se mantienen las tres fases.
- En la curva de vaporización: F=2; C=1  
 $2+N=1+2$   
 $N=1$   
 Puedo variar P o T y seguir manteniendo dos fases.

**Diagramas de equilibrio en las aleaciones (con solubilidad total en fase sólida)**

Si se trata de una aleación de dos metales (A y B), se representa la temperatura en ordenadas y la composición en abscisas. En los diagramas de fases las disoluciones sólidas se suelen representar por las primeras letras del alfabeto griego.

**Línea de liquidus:** es la línea superior del diagrama; representa el inicio de la solidificación y marca la transición entre la fase líquida y la fase líquida + sólida.

**Línea de solidus:** es la línea inferior del diagrama; representa la transición entre la fase líquida + sólido y la fase sólida.



**Regla de la palanca**

Nos sirve para determinar para una temperatura y concentración determinadas de la aleación qué porcentaje de la misma está en estado líquido y sólido. Supongamos que queremos determinar la proporción de líquido y sólido de la aleación en el punto D.

El punto D se encuentra en un estado bifásico en el que coexisten una fase sólida  $\alpha$  y otra líquida L. La proporción de sólido y líquido puede determinarse por la **regla de la horizontal**, trazando una horizontal que pase por el punto D y que corte las líneas de fase.

Si llamamos  $W_L$  al tanto por uno que tenemos de masa líquida en el punto **D** y  $W_\alpha$  al tanto por uno que tenemos de masa sólida en el mismo punto, podemos determinar dichas masas mediante unas ecuaciones, aplicando lo que se conoce como **regla de la palanca**.

$C_0$  = Concentración del elemento A o B correspondiente al punto D.

$C_L$  = Concentración del elemento A o B para la cual la aleación está en estado líquido a la temperatura del punto D.

$C_\alpha$  = Concentración del elemento A o B para la cual la aleación está en estado sólido a la temperatura del punto D.

Si utilizamos concentraciones del elemento A, las ecuaciones correspondientes a  $W_\alpha$  y  $W_L$  son:

$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} \qquad W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

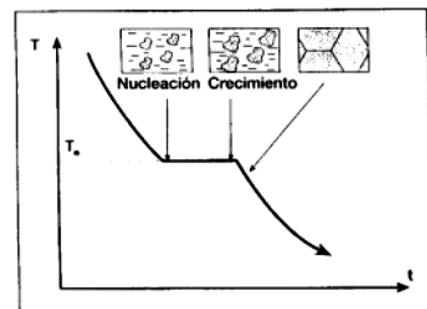
**Proceso de solidificación**

Cuando se enfría un material metálico en estado fundido llega un momento en que se alcanza una determinada temperatura, conocida como temperatura de equilibrio, a la que el material empieza a solidificar.

El proceso de solidificación de un metal o de una aleación metálica puede dividirse en dos etapas:

- Nucleación: en la que se forman pequeños núcleos estables solidificados en el interior del líquido fundido.
- Crecimiento: en la que los núcleos estables crecen hasta dar lugar a la estructura cristalina típica de los metales.

El siguiente gráfico representa la curva de enfriamiento de un metal puro, en ella se observa un escalón que corresponde a la temperatura de equilibrio, en un metal puro los cambios de estado se realizan a temperatura constante. Durante el periodo de tiempo que dura la solidificación se dan las dos fases, líquida y sólida, primero se generan unos pequeños núcleos estables solidificados que, por crecimiento gradual, terminarán formando la estructura cristalina característica.



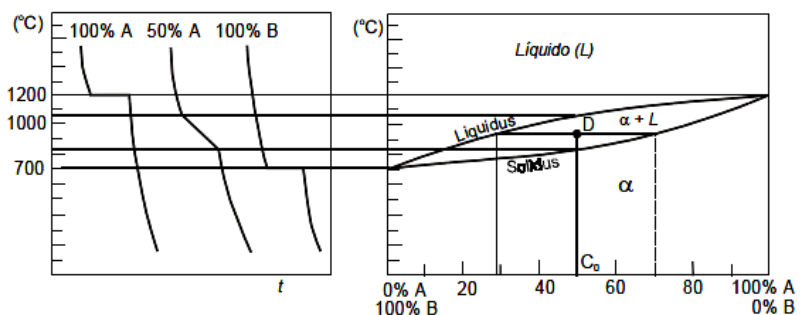
Curva de enfriamiento de un metal puro.

**Curvas de enfriamiento**

Si representamos en unos ejes de coordenadas las temperaturas y el tiempo transcurrido desde el estado líquido al sólido, podemos ver la variación de velocidad de solidificación que experimenta la aleación al pasar por una curva de fase.

En la gráfica siguiente se muestran las curvas de enfriamiento correspondientes al 100% de A, 50% de A y 100% de B. El enfriamiento de la aleación cuando hay una proporción de ambos componentes se da entre dos valores de temperatura. De esta forma se obtiene el diagrama de fases de una aleación.

Cuando la aleación es totalmente soluble en estado sólido se obtiene un diagrama como el de la figura.



El caso más común es que las aleaciones no muestren solubilidad total en estado sólido como veremos a continuación.

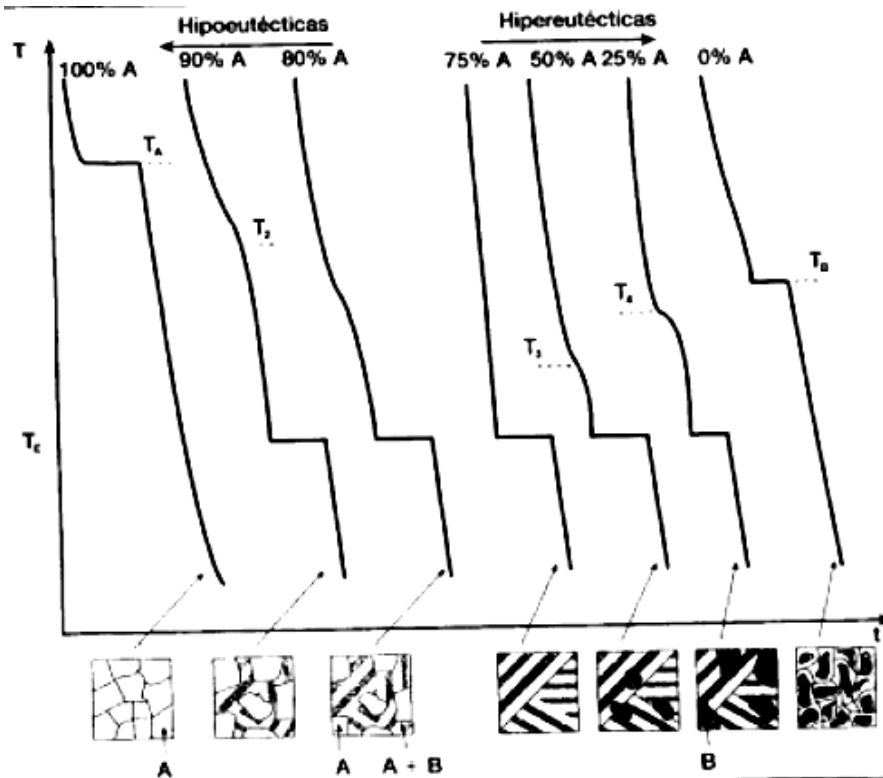
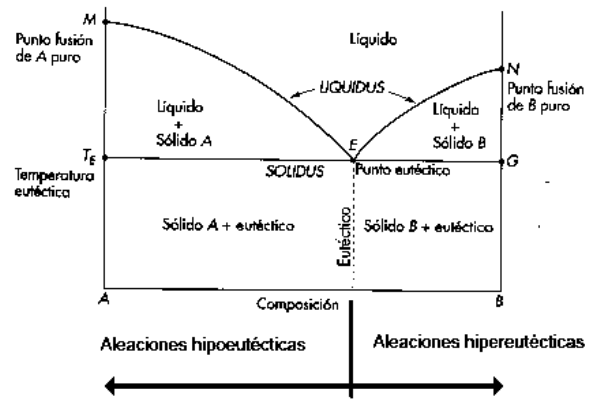
**3.4.1.- Solución con solubilidad total en líquido e insolubilidad total en sólido.**

En la figura se muestra el diagrama de dos metales totalmente insolubles en estado sólido y que dan origen a una *mezcla eutéctica* para una composición de A y B determinada.

Una *mezcla eutéctica* se forma cuando una determinada proporción de ambos componentes posee una alta estabilidad en estado líquido, de tal forma que solidifica a una temperatura más baja que sus componentes puros.

Durante la solidificación de la aleación I (mezcla eutéctica), la mezcla permanece en estado líquido hasta el punto 1, que corresponde a una temperatura inferior a la de solidificación tanto de A como de B. En dicho punto, coexisten las fases sólidas A y B y la fase líquida, teniendo lugar la solidificación a temperatura constante.

Esta solidificación comenzará con la formación de un primer núcleo de metal A, al que seguirá inmediatamente la formación de otro núcleo de metal B, repitiéndose este proceso continuamente a temperatura constante. Debido a este proceso descrito la estructura del *sólido eutéctico* tiene forma de láminas entre mezclas de los constituyentes A y B. Se considera esta mezcla como una única fase.



Las aleaciones situadas a la izquierda del *punto eutéctico* se denominan *hipoeutéticas*, mientras que aquellas que se encuentran a la derecha del *punto eutéctico* se denominan *hipereutéticas*.

La estructura final de una *aleación hipoeutética* estará formada por un constituyente disperso (metal A) que es el primero que solidifica, y un constituyente matriz continuo, que es el *sólido eutéctico* laminar que rodea al constituyente disperso.

La solidificación de una *aleación hipereutéctica* procede de modo análogo a la *hipoeutéctica*, salvo que se forma un primer sólido constituido por metal puro B, rodeado por el constituyente *matriz eutéctica*.

**3.4.2.- Solubilidad total en estado líquido y solubilidad parcial en estado sólido**

En la figura se representa un diagrama característico de este grupo con dos componentes A y B y un punto eutéctico E.

La línea de líquidus es AEB por encima toda la aleación está líquida.

La línea de solidus es la AMENB, por debajo de esta línea, todas las aleaciones están sólidas.

Entre AE y AME y entre EB y ENB, las aleaciones están parcialmente sólidas y parcialmente líquidas.

La solución sólida del metal B en A la llamaremos  $\alpha$ , la máxima proporción de B que puede disolverse en A es m %.

Y los cristales de esta solución saturada los designaremos por  $\alpha_m$ .

La solución sólida A en B la designaremos por  $\beta$ , la máxima proporción de A que puede disolverse en B es de (100 - n) % y la llamaremos  $\beta_n$ .

Vamos a ver el proceso de solidificación de las tres aleaciones I, II y III.

Aleación I: al llegar en su enfriamiento a  $P_1$ , empieza a formarse cristales de solución sólida de B en A ( $\alpha$ ), entre  $P_1$  y  $P_2$ , la aleación estará parte sólida y parte líquida, creciendo las proporciones de solidificación y decreciendo las proporciones del líquido. Al descender la temperatura de  $P_2$  toda la aleación quedará solidificada, quedando formada por cristales  $\alpha$  de solución sólida de  $P_3$  % de B en (100-  $P_3$ ) de A.

Para proporciones de m% de B se formarán cristales saturados de solución sólida de m% B en (100 - m) % de A que hemos llamado  $\alpha_m$ .

Aleación II: al llegar en su enfriamiento al punto  $q_1$ , empieza la formación de cristales  $\alpha$ , de solución B en A, que irán aumentando. En cambio el líquido irá disminuyendo. A medida que descienda la temperatura, aumentará el número y concentración de cristales  $\alpha$ , corrigiéndose la composición de la aleación líquida para que, al llegar a  $q_2$ , la aleación quede formada por las proporciones de metal A y B necesarias para que al solidificarse al descender  $q_2$  quede la totalidad de la parte líquida formando cristales auténticos ( $\alpha_m + \beta_n$ ) en la proporción que fija la eutéctica. Quedando al solidificarse la aleación II formada por cristales de  $\alpha_m$  + cristales eutécticos ( $\alpha_m + \beta_n$ ).

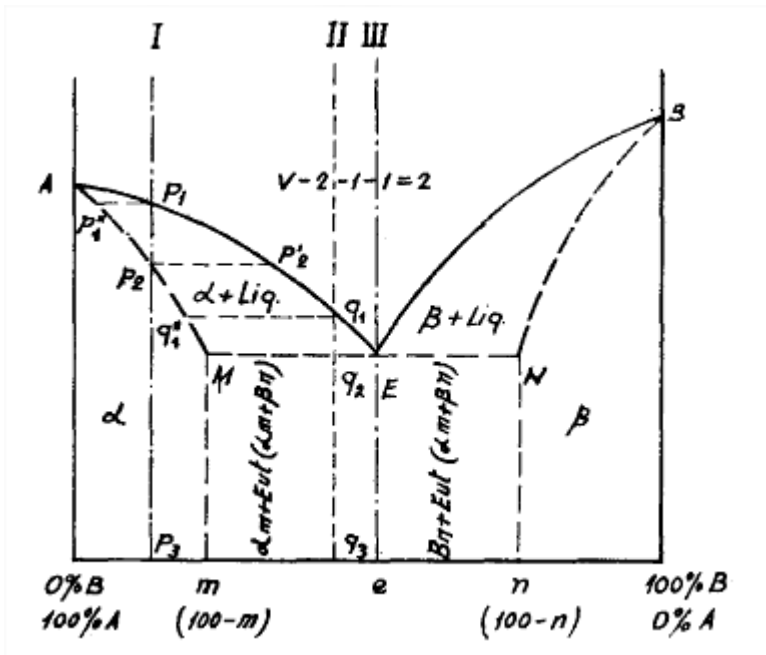
Lo mismo ocurre con todas las aleaciones comprendidas entre e y n; pero en lugar de formarse cristales  $\alpha_m$ , se forman cristales de solución de A en B.

Al terminar la solidificación queda la aleación formada por cristales  $\beta_n$  + cristales eutécticos.

Aleación III: de proporción eutéctica, la solidificación tiene lugar al llegar a E, a una sola temperatura que además es más baja que la de cualquier otra proporción.

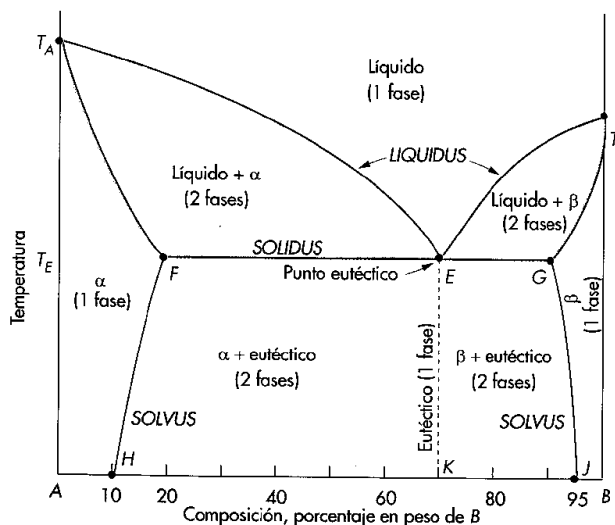
La totalidad de la aleación se solidifica formando cristales eutécticos ( $\alpha_m + \beta_n$ ).

Este es el caso más normal en las aleaciones de los metales con alguna consideración:



- Nunca solidifican A o B puros, sino en forma de sus soluciones  $\alpha$  y  $\beta$ . Estas soluciones limitadas por los ejes se denominan *soluciones sólidas terminales*.
- A las curvas que marcan la máxima solubilidad de B en A o de A en B se les denomina *solvus*.
- Si la temperatura desciende también lo hace la solubilidad por lo cual las líneas Solvus son curvas.
- El punto de corte de estas líneas con el eje de abscisas marca la solubilidad a temperatura ambiente.

El gráfico obtenido sería como el siguiente



### ENFRIAMIENTO EN EQUILIBRIO

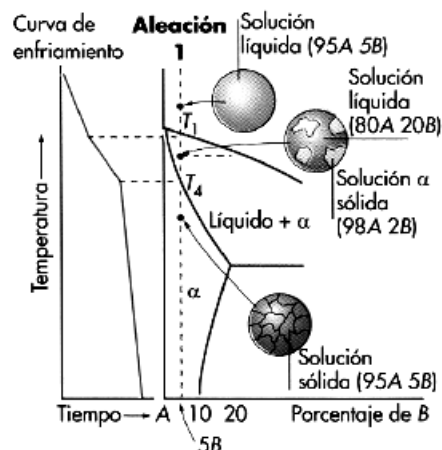
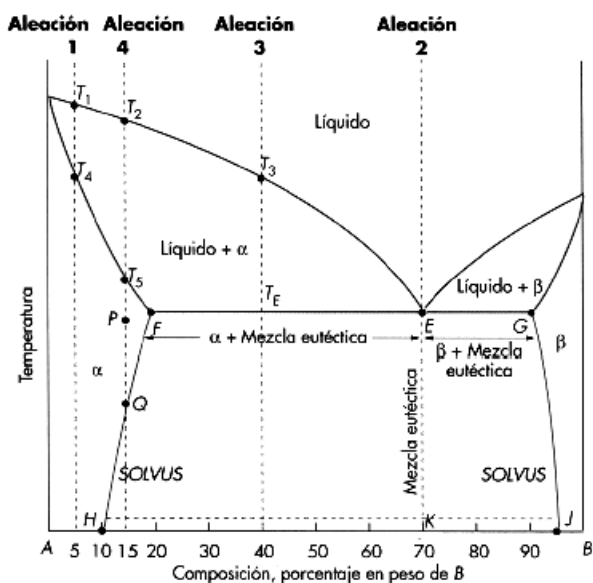


Fig. 20. Enfriamiento de la aleación 1.

#### ALEACIÓN 1:

- Proceso idéntico al de cualquier aleación son solubilidad total en estado líquido y sólido.

#### ALEACIÓN 2:

- Aleación eutéctica.
- Puede aplicarse la regla de la palanca para determinar la composición de cada fase.
- Existe cambio en las cantidades de  $\alpha$  y  $\beta$  al enfriarse porque las líneas solvus son curvas.
- No puede saberse si la mezcla eutéctica está compuesta por A+B o por  $\alpha+\beta$ .

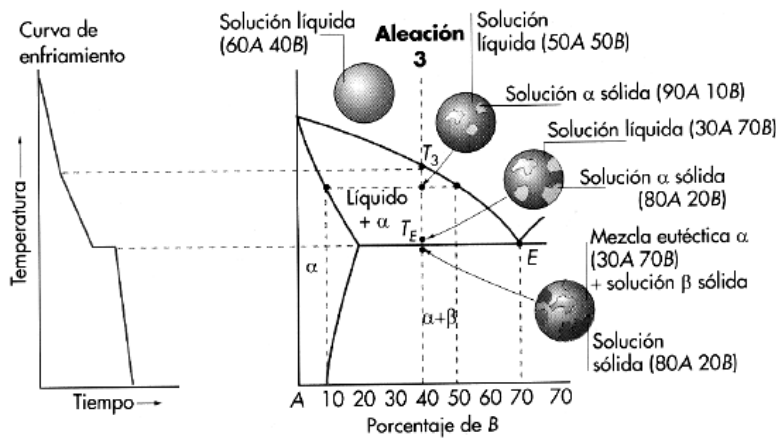


Fig. 22. Enfriamiento de la aleación 3.

**ALEACIÓN 3:**

- Líquido hasta  $T_3$ .
- A partir de  $T_3$  cristaliza  $\alpha$ , rica en A.
- Si la temperatura disminuye, aumenta el porcentaje de  $\beta$  en el líquido.
- En  $T_E$  el líquido que resta sufre la reacción eutéctica ( $\alpha$  y  $\beta$ ) de composición dada por la recta FG.
- Si la temperatura sigue disminuyendo, precipita algo de  $\alpha$  debido al descenso de solubilidad dado por la solvus.

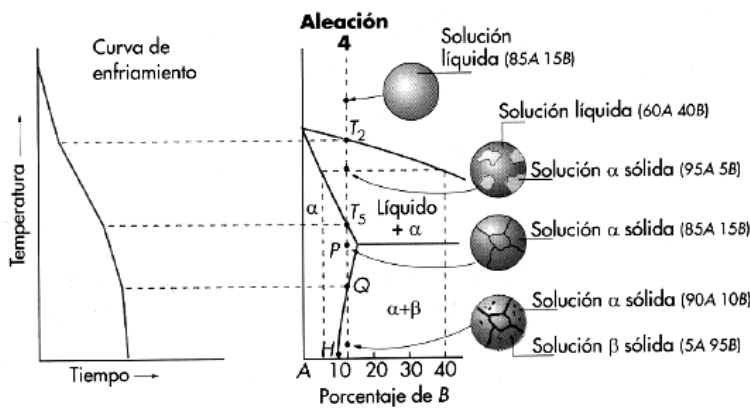


Fig. 24. Enfriamiento de la aleación 4.

**ALEACIÓN 4:**

- Sigue un proceso análogo al de la aleación nº 1.
- En P: solución insaturada.
- En Q: solución saturada de B.
- Si la temperatura sigue disminuyendo, el exceso de B debe salir pero, al ser soluble en A, sale como  $\beta$ .
- La aleación a temperatura ambiente estará constituida por granos de  $\alpha$  con pequeñas cantidades de  $\beta$  alojadas en la frontera de grano.

## DIAGRAMA Fe-C. ACEROS Y FUNDICIONES

El hierro puro apenas tiene aplicaciones industriales. Pero formando aleaciones con carbono y otros elementos es el metal más utilizado en ingeniería. Como paso previo al estudio de las aleaciones hierro-carbono, es necesario el análisis del diagrama de fases porque nos permite:

Conocer la naturaleza y características de las **fases y constituyentes** a distintas temperaturas.

Conocer las características de las **transformaciones**.

Las propiedades mecánicas están íntimamente relacionadas con la microestructura a temperatura ambiente, y el diagrama Fe-C aporta las bases para optimizar el comportamiento de las aleaciones férricas mediante los tratamientos térmicos.

En realidad en el diagrama debe denominarse diagrama hierro-carburo de hierro, porque a temperatura ambiente el carbono está combinado con el hierro en forma de carburo de hierro. Además está trazado para concentraciones menores del 6,67% de carbono, pues a porcentajes mayores las aleaciones carecen de interés industrial.

Las aleaciones con concentraciones menores del 1,76% de carbono se conocen como **aceros**, y las que tienen una composición de carbono comprendida entre el 1,76% y el 6,67% se llaman **fundiciones**.



**Estados alotrópicos del Fe puro.**

Las distintas redes cristalinas que toma un metal dependiendo de la temperatura se denominan **estados alotrópicos**. El hierro puro presenta 4 estados alotrópicos, siendo los más importantes el Fe  $\alpha$  y el Fe  $\gamma$

Fe  $\alpha$ , llamado **ferrita**, hasta 768°, es magnético, forma una red cúbica centrada en el cuerpo BCC, **permite disolver muy poca cantidad de soluto 0,03% de Carbono**.

Fe  $\beta$ , desde 768 a 910°C con la misma red que el anterior pero deja de ser magnético.

Fe  $\gamma$ , también llamado **austenita** desde 910°C a 1400°C, no es magnético, FCC red cúbica centrada en las caras, **permite disolver mayor cantidad de C, hasta 1,76%**.

Fe  $\delta$ , desde 1400°C hasta 1530°C que funde el Fe puro. Vuelve a ser magnético y a red BCC, admite muy poco C en disolución.

| Temperatura   | Formas Alotrópicas | Sistema cristalino | Parámetros | Propiedades Magnéticas |
|---------------|--------------------|--------------------|------------|------------------------|
| HASTA 768°    | $\alpha$           |                    | 2,86Å      | MUY MAGNETICA          |
| 768° a 910°   | $\beta$            |                    | 2,90Å      | DEBILMENTE MAGNETICA   |
| 910° a 1400°  | $\gamma$           |                    | 3,60Å      | NO MAGNETICA           |
| 1400° a 1539° | $\delta$           |                    | 2,93Å      | DEBILMENTE MAGNETICA   |

**Diagrama Fe-C, Fe-Fe<sub>3</sub>C**

El hierro y el carbono constituyen aleaciones únicamente hasta un 6,67% en peso de carbono. Con esta concentración y con concentraciones superiores se crea un compuesto químico denominado **cementita** (Fe<sub>3</sub>C con un 6,67% de C) que no tiene propiedades metálicas. Por lo tanto, únicamente se estudia el diagrama hasta esa proporción de carbono.

La línea de *liquidus* parte de la temperatura de solidificación del Fe puro (1539 °C).

A medida que baja la temperatura el Fe forma el estado alotrópico **Fe  $\gamma$**  que admite una solución de carbono de hasta un 1,76%, a esta fase se le denomina **austenita**.

Con una proporción de carbono de un **4,30%** se crea un **eutéctico** llamado **ledeburita**. Este compuesto solidifica a la menor temperatura de un compuesto Fe-C 1130°C. La **ledeburita** es una fase compuesta por Austenita y cementita que se descompone por debajo de los 723°C en perlita y cementita.

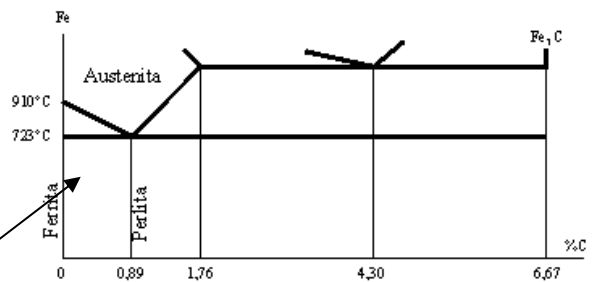
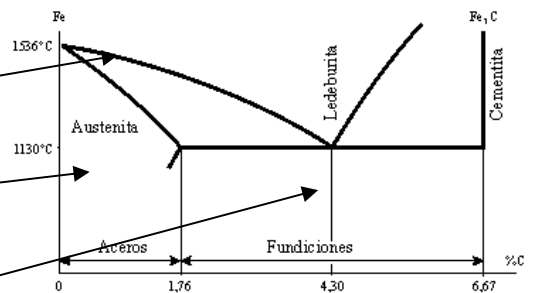
Esto provoca la primera clasificación del sistema hierro-carbono: se habla de **aceros** si la proporción de carbono es inferior a 1,76%, y de **fundiciones** para proporciones entre 1,76 y 6,67%.

Si se continúa bajando la temperatura, cambia el *estado alotrópico* del Fe, pasando a ser Fe  $\alpha$  (con distinta estructura cristalina) de manera que la red admite menor cantidad de átomos de carbono y se expulsa el carbono sobrante en forma de **cementita (Fe<sub>3</sub>C)**.

Cuando la temperatura baja de 910°C el hierro sufre un cambio alotrópico y su red se transforma, la nueva estructura apenas acepta átomos de carbono en su seno; entonces el hierro se denomina **hierro- $\alpha$  o ferrita**.

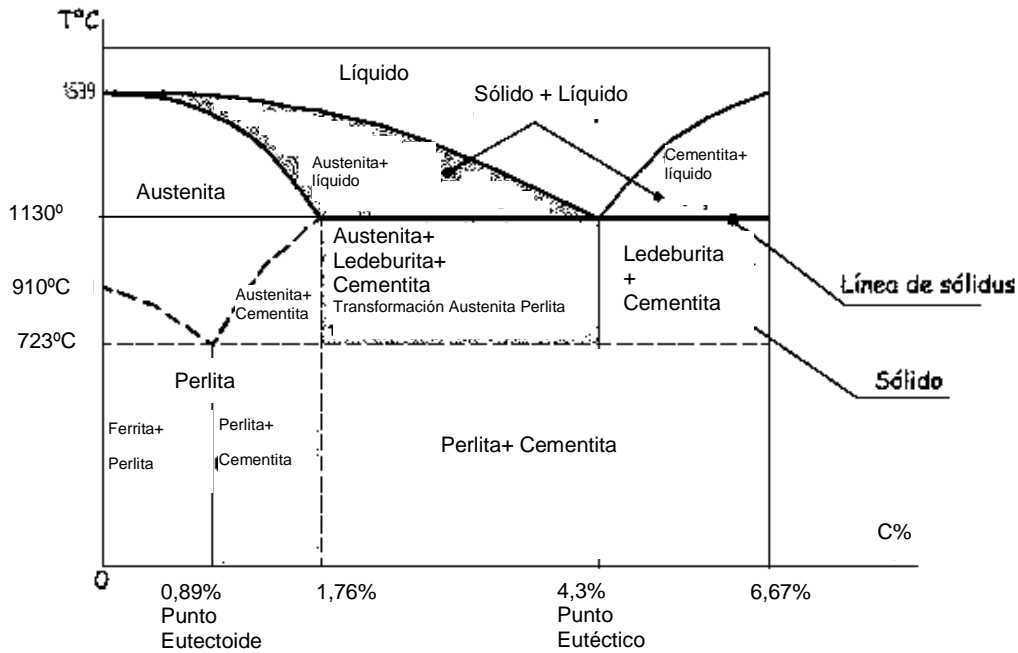
A la temperatura de 723°C y con una proporción de carbono de 0,89% se forma un **eutectoide** llamado **perlita** que está formado por una estructura laminar de **ferrita y de cementita**.

*En la reacción eutectoide una fase sólida genera dos fases sólidas distintas por el cambio de solubilidad de su estructura.*



A los aceros que tienen una proporción menor que 0,89% de carbono se les denomina **hipoeutectoides**, y si tienen entre 0,89 y 1,76% de carbono, **hipereutectoides**.

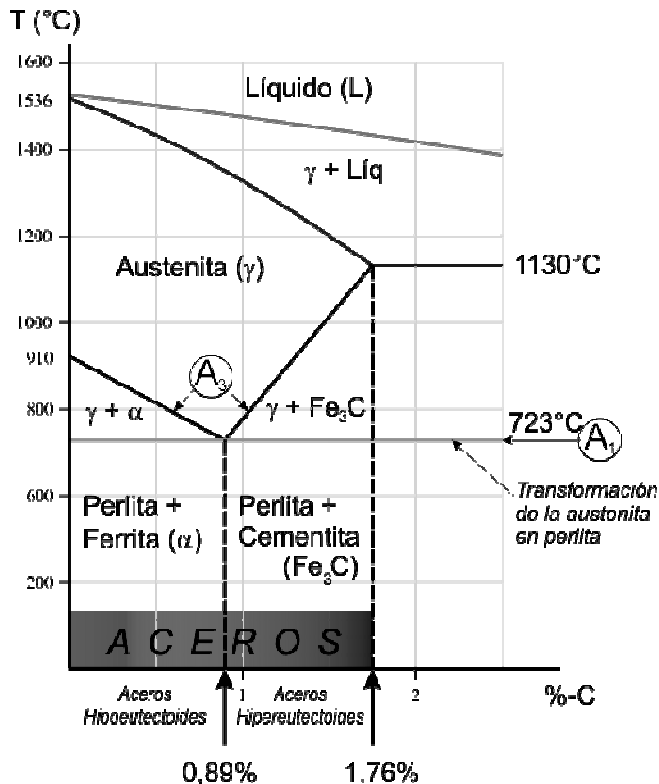
Recopilando todo, el diagrama del sistema hierro-carbono tiene este aspecto:



**Constituyentes de los aceros**

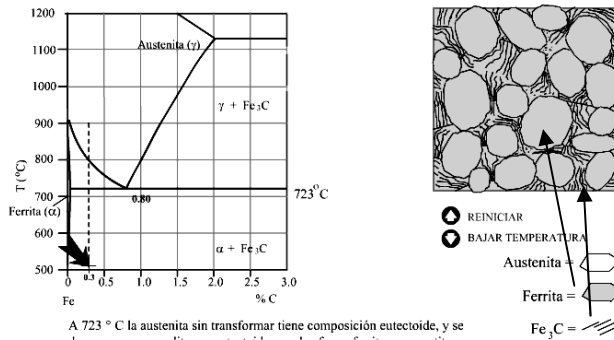
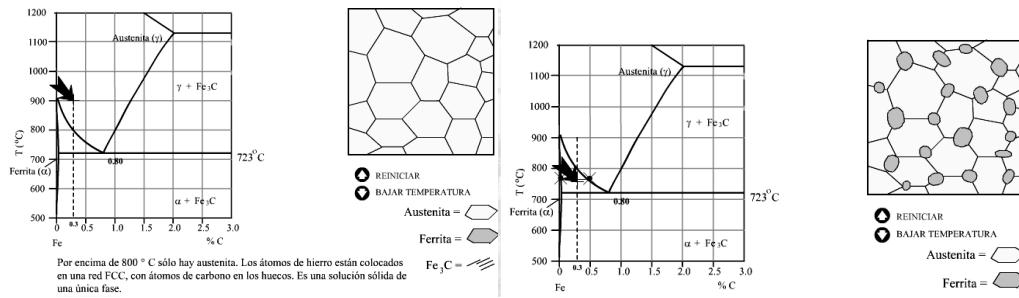
A temperatura ambiente, siempre que el enfriamiento de la aleación sea lento los constituyentes son: **ferrita** y **cementita**, separados o formando **perlita**.

La parte del diagrama correspondiente a los aceros es la siguiente:



Para un acero hipoeutectoide, a medida que se va enfriando la austenita se convierte en ferrita hasta que se alcanza la proporción del eutectoide y la austenita restante se transforma en perlita. La estructura resultante estará formada por cristales de ferrita en una matriz perlítica.

Para aceros hipereutectoides la cementita tiende a formar nódulos o pequeños granos en el seno de la austenita, a esto se le denomina cementita proeutectoide. Cuando se alcanza la proporción del eutectoide la austenita restante se transforma en perlita que rodea a la cementita.



La estructura de los aceros hipereutectoides estará formada por cristales de cementita en una matriz perlítica.

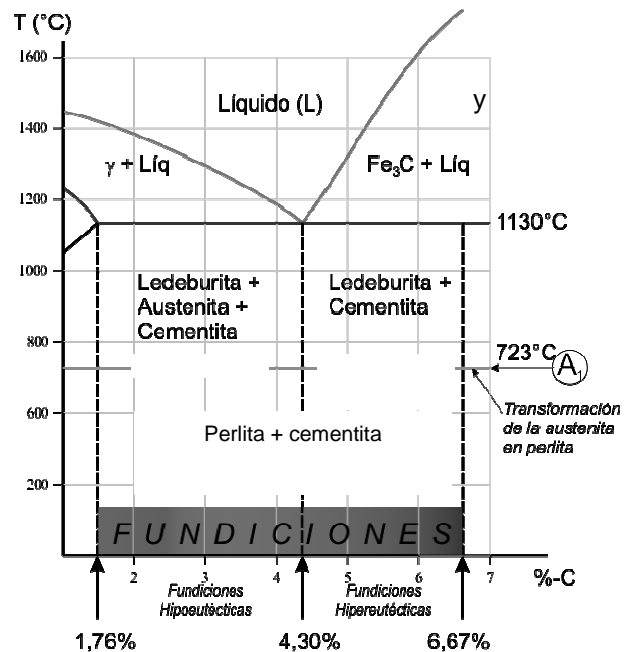
### LAS FUNDICIONES

El diagrama que corresponde a las fundiciones es el siguiente:

Las fundiciones se clasifican de forma básica como **hipoeutécticas** e **hipereutécticas**, tienen la propiedad de que se extienden extraordinariamente cuando se funden y se vierten en un molde. Además, la fundición eutéctica se puede fundir totalmente a 1130° C, la mínima temperatura de fusión de todas las aleaciones férricas.

En las fundiciones obtenidas por enfriamiento lento, durante las transformaciones -en especial la A1- el carbono sobrante es expulsado de la red del hierro en forma de **cementita**. A este tipo de material se le llama **fundición blanca**.

Pero si el enfriamiento es más brusco, el carbono no tiene tiempo de arrastrar átomos de hierro y es expulsado como grafito, en cuyo caso se obtiene la llamada **fundiciones negras** o las **fundiciones grises**.



### CONSTITUYENTES DE LOS ACEROS

Resumiendo lo visto hasta ahora los aceros procedentes de un enfriado lento están constituidos por los siguientes componentes a temperatura ambiente:

- **Ferrita:** solución sólida de hierro alfa con C (es hierro alfa casi puro 0,03% C). Es el más **blando y dúctil** de los constituyentes de los aceros.
- **Cementita:** es un compuesto intermetálico de fórmula  $\text{Fe}_3\text{C}$  (equivalente a 6,67%C). Es el constituyente más **duro y frágil**.
- **Perlita:** solución eutectoide formada por cristales de ferrita y cementita. La estructura laminar confiere elevada dureza y resistencia mecánica.



Ferrita



Ferrita + Perlita

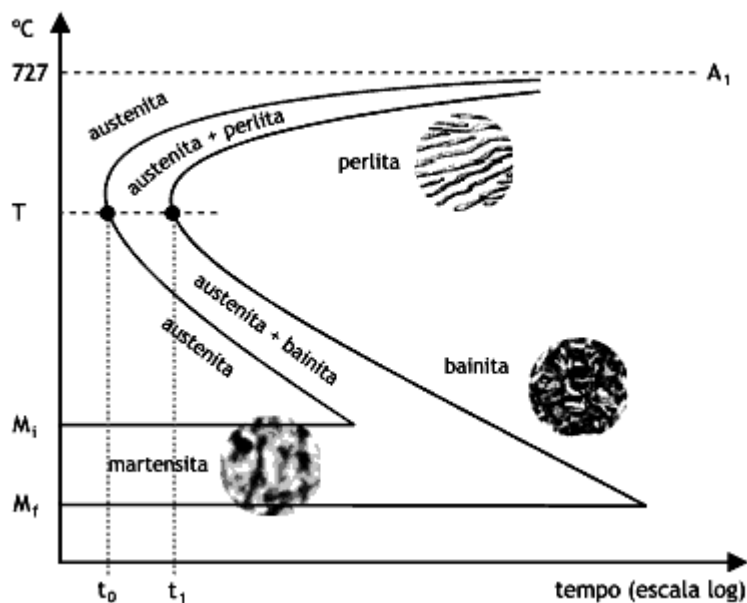


Perlita

Si se produce un enfriamiento rápido aparecen nuevos componentes:

**Martensita** Es el constituyente típico de **aceros templados**. Está formado por una **solución sólida sobresaturada de carbono** o carburo de hierro en hierro  $\alpha$ , y se obtiene por **enfriamiento rápido del acero** desde alta temperatura. Sus propiedades físicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono. Se produce porque un enfriamiento rápido de la austenita impide que salgan los átomos de carbono de su estructura creando una estructura distinta a ferrita + perlita.

La **bainita** es una mezcla de fases de ferrita y cementita y en su formación intervienen procesos de difusión. Forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación. Se produce por un enfriamiento de la austenita a **velocidad intermedia** entre la velocidad de generación de la perlita y de la martensita.



## CLASIFICACIÓN DE ACEROS Y FUNDICIONES

**Los aceros** se pueden clasificar de diferentes formas, una de las principales sería:

Aceros al carbono

- Hipoeutectoides, tienen matriz **ferrítica**, por lo que son dúctiles y tenaces; son aceros de construcción
- Eutectoides
- Hipereutectoides, tienen matriz de **cementita**, por lo que es duro y frágil; son aceros de herramientas

Aceros aleados

- Inoxidables, contienen níquel y cromo que los pasivan ante la corrosión
- Refractarios, con wolframio, titanio, molibdeno y cobalto para resistir altas temperaturas
- Eléctricos, con silicio para reducir la resistencia eléctrica
- Rápidos, con cromo y molibdeno para herramientas de corte

**Las fundiciones** tienen una clasificación similar a esta última de los aceros, y tenemos:

### Fundiciones ordinarias

- Negras, en su fractura se ven nódulos de grafito.
- Grises, el grafito está repartido uniformemente
- Blancas, todo el carbono está en forma de cementita
- Atruchadas, su fractura tiene un aspecto entre gris y blanca

**Fundiciones aleadas**, con elementos que aportan sus propiedades como resistencia a la corrosión o conductividad eléctrica

### Fundiciones especiales

- Nodulares, una fundición gris con magnesio para formar nódulos de grafito
- Maleables, una fundición blanca a la que se calienta y se deja enfriar lentamente

La norma **UNE 36001** establece una nomenclatura a base de una letra seguida por tres números, cuyo significado es el siguiente:

\* La letra puede ser F (para aleaciones férricas), L (para aluminios y otras aleaciones ligeras), C (para aleaciones de cobre).

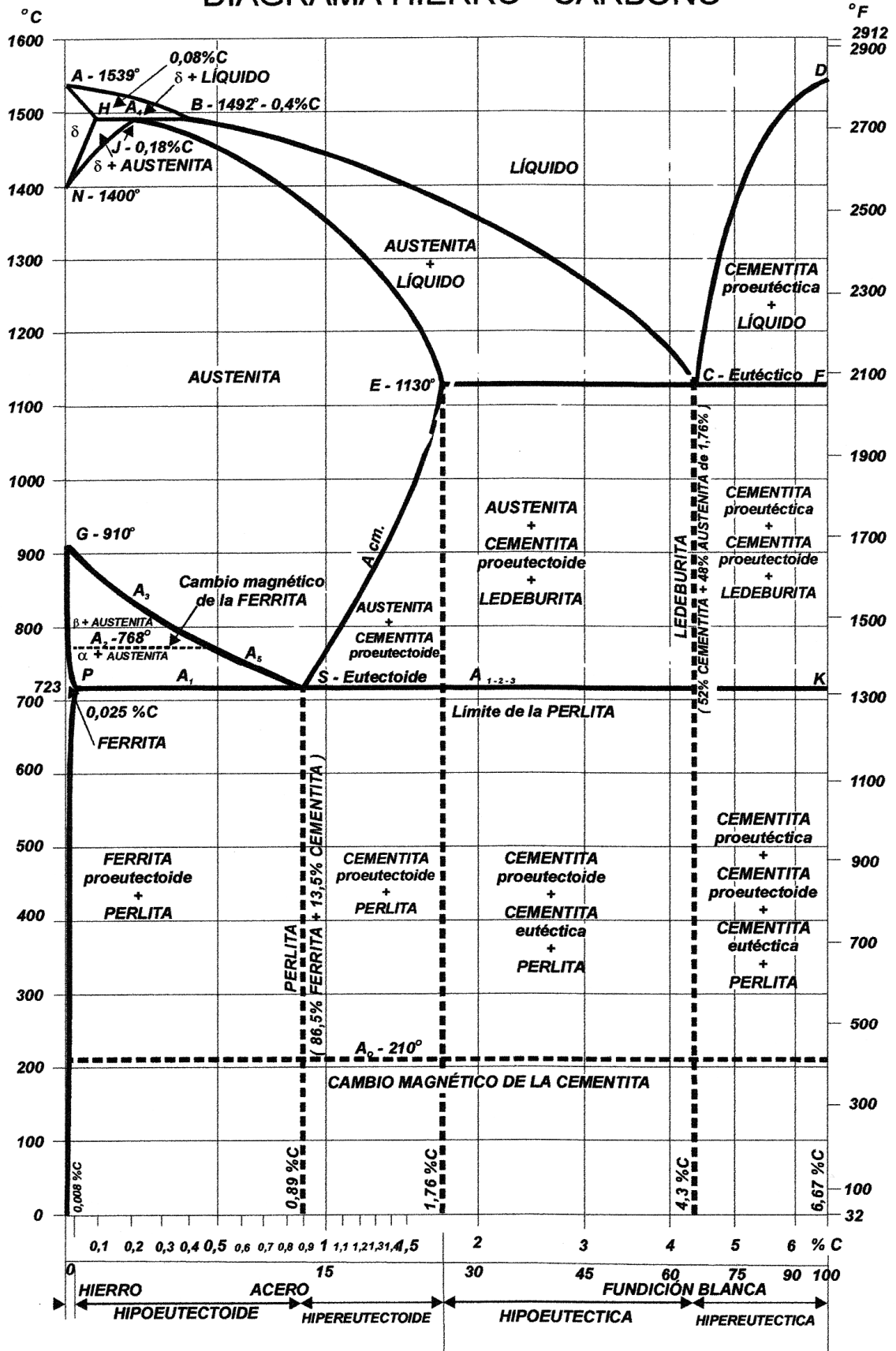
\* El primer número indica la serie o características generales; a los aceros les corresponden las series entre 1 y 7, y las fundiciones pertenecen a la serie 8.

\* El segundo número indica el grupo o las características comunes dentro de cada serie.

\* Por último, el número de las unidades indica el individuo, con una composición y propiedades específicas. Como ejemplo:

|                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Serie F100 (aceros de construcción)</b><br>F110 Aceros al carbono<br>F120 Aceros aleados de temple y revenido para grandes esfuerzos | F130 Aceros para rodamientos, con alto contenido en cromo que los hace resistentes al rozamiento F140 Aceros para muelles, de gran elasticidad<br>F150 Aceros de cementación<br>F170 Aceros de nitruración |
| <b>Serie F200 (aceros especiales)</b><br>F210 Aceros de fácil mecanizado                                                                | F220 Aceros de fácil soldadura<br>F250 Aceros de resistencia a la fluencia                                                                                                                                 |
| <b>Serie F300 (aceros inoxidables)</b>                                                                                                  | F310 Aceros inoxidables<br>F320 Aceros refractarios                                                                                                                                                        |
| <b>Serie F400 (aceros de emergencia)</b>                                                                                                | F410 Aceros de alta resistencia (más de 700 MPa)<br>F430 Aceros para cementar                                                                                                                              |
| <b>Serie F800 (fundiciones)</b><br>F810 Fundiciones grises                                                                              | F830 Fundiciones maleables<br>F860 Fundiciones nodulares<br>F870 Fundiciones especiales                                                                                                                    |

# DIAGRAMA HIERRO - CARBONO



## TRATAMIENTOS DE LOS METALES

Tienen por finalidad modificar las propiedades mecánicas de los metales en general; en algunos casos se pretende aumentar su plasticidad para facilitar el conformado en frío en otros aumentar su dureza o su resistencia.

Se distinguen los siguientes tratamientos: **térmicos, termoquímicos, mecánicos y superficiales**. Todos ellos no deben alterar la composición química de manera notable ya que de lo contrario dejarían de ser tratamientos para convertirse en otros procesos.

### 3.1.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Consisten en operaciones de calentamiento y enfriamiento a una velocidad concreta sin que la química resulte modificada. Por lo tanto las variables que controlamos son la temperatura y el tiempo.

Existen fundamentalmente cuatro tratamientos térmicos que se aplican a los aceros:

**Temple:** es un tratamiento típico de los aceros que consiste en calentarlos hasta una temperatura elevada, superior a la de austenización, seguido de un **enfriamiento lo suficientemente rápido** para obtener una **estructura martensítica**. De esta manera se obtiene un **material muy duro y resistente mecánicamente**.

Por regla general, la forma de realizar el enfriamiento consiste en sumergir la pieza en agua, aceite o aire frío controlando en todo momento la temperatura del fluido. Para conseguir un mejor temple se agita el fluido refrigerante.

**Revenido:** es un tratamiento complementario al temple, con el que se pretende **eliminar tensiones internas producidas durante el temple**; mejora la tenacidad, aunque se reduce la dureza. Consiste en un calentamiento de las piezas previamente templadas a una temperatura inferior a la de **austenización**, para lograr que la **martensita** se transforme en una estructura más estable. El proceso termina con un **enfriamiento relativamente rápido**.

**Normalizado:** se denomina normalizado por que se entiende que con este tratamiento los aceros obtienen sus **propiedades normales**. Se someten a este tratamiento piezas que han sufrido deformaciones en caliente, en frío o bien que han tenido enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos. También nos sirve para eliminar un tratamiento térmico previo. Con el normalizado se reducen tensiones internas provocadas por las causas anteriores, así como una unificación del tamaño de grano.

Consiste en un calentamiento del acero, **50 grados por encima de la temperatura de austenización**, seguido de un enfriamiento al aire. La velocidad de enfriamiento no puede ser elevada evitando la formación de **martensita** y confiriendo al acero una estructura **perlítica y ferrita o cementita de grano fino**.

**Recocido:** consiste en calentar el material hasta una temperatura determinada y mantenerlo a dicha temperatura durante un tiempo previsto y posteriormente **enfriarlo lentamente**. Los objetivos que se persiguen son: eliminar tensiones del temple, aumentar la plasticidad, ductilidad y tenacidad, y conseguir una microestructura específica.

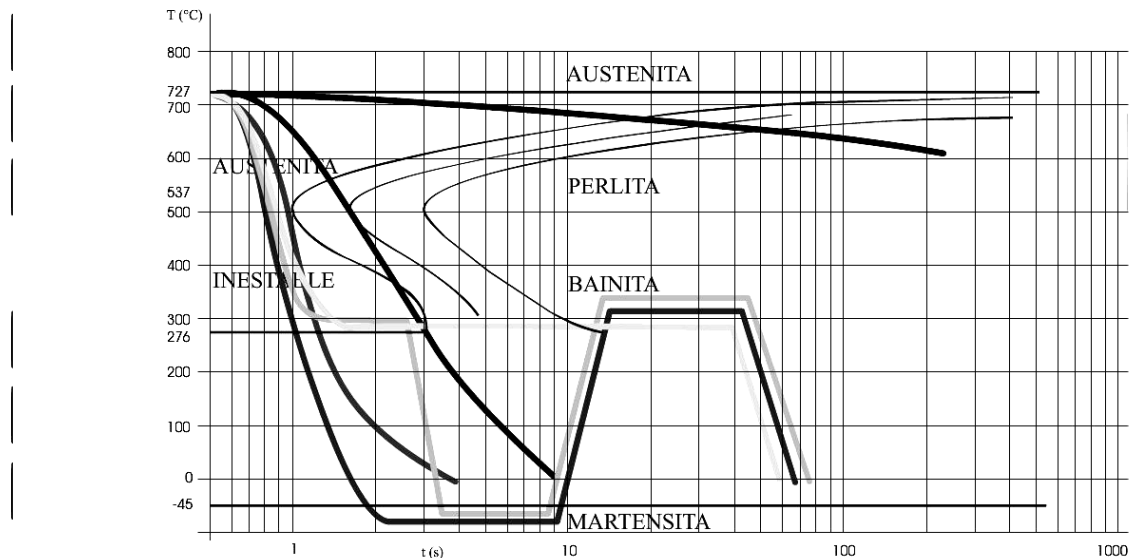
En estos tratamientos, el tiempo constituye la variable fundamental a controlar. En los aceros la temperatura a alcanzar ha de estar entre la temperatura crítica inferior de austenización ( $A_1$ ) y superior ( $A_3$  o  $A_{cm}$ ). Con este tratamiento no se supera la temperatura crítica superior de austenización como ocurre con el normalizado.

El diagrama TTT representa las transformaciones de la austenita en perlita, bainita y martensita, en función de la velocidad de enfriamiento del material.

*Con objeto de analizar las distintas estructuras que se obtienen al variar la temperatura y el tiempo de enfriamiento, se lleva a cabo un ensayo que consiste en calentar un gran número de placas de acero (digamos 100) de una determinada composición por encima de su temperatura  $A_3$ , a fin de que todas las placas se transformen en austenita. A continuación se introduce una serie de placas (por ejemplo 10) en un baño de sales cuya temperatura se mantiene constante. Otra serie (otras 10, por ejemplo) se introducen en otro baño que se mantiene a temperatura diferente, y así sucesivamente. De cada baño se extrae una placa cada cierto tiempo, para templarla y ver su microestructura. De esta forma se anota el tiempo que ha tardado en empezar la transformación, así como el instante*

en que la transformación se ha completado, y se obtienen los diagramas tiempo-temperatura-transformación, conocidos simplemente como **curvas TTT**:

### DIAGRAMA T-T-T DEL ACERO



#### 3.2.- TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Con estos tratamientos obtenemos piezas muy duras superficialmente, capaces de resistir desgastes, y más blandas en el centro, lo que les permite ser más tenaces.

Mediante estos tratamientos se modifica la composición química superficial del material, por lo tanto, las variables que controlamos son la temperatura, el tiempo y la composición química. En general el procedimiento consiste en meter la pieza hasta una temperatura determinada, mantenemos esa temperatura el tiempo necesario para que se produzca una difusión atómica en la superficie de la pieza con una profundidad determinada y enfriamos. Entre los procedimientos más habituales tenemos:

##### Cementación

Consiste en añadir carbono a la superficie del metal, con objeto de aumentar su dureza superficial. Para facilitar la difusión del carbono en el metal, se somete la pieza durante cierto tiempo a una determinada temperatura ( 900 °C en el caso de los aceros). La atmósfera carburante necesaria se puede lograr por medio de agentes sólidos, gaseosos o líquidos que desprendan carbono.

La cantidad de carbono absorbido por la pieza depende de varios factores:

- Composición química inicial del acero.
- Naturaleza de la atmósfera carburante.
- Temperatura.
- Tiempo de exposición.

Una vez sometida una pieza a un proceso de este tipo, puede considerarse constituida por dos zonas:

*Zona exterior*, que es la capa cementada y que posee mayor concentración de carbono que el resto de la pieza. Su espesor es función del tiempo de exposición y la temperatura alcanzada.

*Alma*, que es la zona central donde no se ha producido variación química.

##### Nitruración

Con este tratamiento se consiguen endurecimientos superficiales extraordinarios de los aceros. La pieza que se pretende nitrurar se somete en un horno a una corriente de



amoníaco a una temperatura elevada (en el caso de los aceros próxima a los 500°C). Con este procedimiento, manteniendo la pieza dentro del horno a la temperatura indicada entre 20 y 80 horas, se pueden alcanzar durezas comprendidas entre 650 HV y 1100 HV.

### Cianuración

Es un tratamiento intermedio de los dos anteriores en el que se produce el endurecimiento de la superficie de la pieza sometiéndola a una atmósfera mezcla de carbono y nitrógeno.

### Sulfinización

Consiste en producir una pequeña capa superficial de azufre, nitrógeno y carbono; de esta manera se consigue favorecer la resistencia al desgaste, favorecer la lubricación y evitar el agrietamiento. Las piezas sometidas a este tratamiento pueden aumentar su dureza cinco veces.

### 3.3.- TRATAMIENTOS MECÁNICOS

Mejoran las características de los metales por deformación mecánica, con o sin calor. Cuando el proceso se realiza en caliente recibe el nombre de **forja**.

### 3.4. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Mediante estos tratamientos se modifica la superficie de los metales sin variar su composición química másica. En estos tratamientos no es necesario la aplicación de calor. Los tratamientos superficiales más conocidos son el *cromado* y la *metalización*.

La metalización consiste en pulverizar metal fundido sobre otro, con lo cual, la pieza tratada adquiere las propiedades del primero en su superficie.

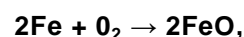
## PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

La interacción entre un material y el ambiente provoca en muchos casos la pérdida o deterioro de las propiedades físicas del material. Estos procesos de deterioro son diferentes según se trate de materiales metálicos, polímeros o cerámicos. El proceso de deterioro que se produce en los metales recibe el nombre de **oxidación y corrosión**.

En los procesos de oxidación, los metales pasan de un estado electrostáticamente neutro a formar cationes (iones positivos) por pérdida de electrones.

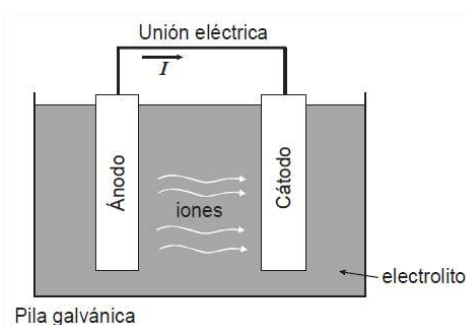


En el proceso de degradación de los metales, la *oxidación directa* resulta de la combinación de los átomos metálicos con los de la sustancia agresiva, por ejemplo



y la *corrosión electroquímica* se caracteriza por la formación de pilas galvánicas en las que el metal actúa como ánodo y por lo tanto se disuelve. Este tipo de corrosión exige la presencia de medios electrolíticos, uniones eléctricas y la presencia de un cátodo.

### Pilas galvánicas



Tenemos dos metales diferentes inmersos en un electrolito y unidos eléctricamente, haciendo que uno de ellos funcione como ánodo y el otro como cátodo.

El ánodo cede electrones al cátodo, por lo tanto algunos átomos del ánodo se ionizan con carga positiva disminuyendo de tamaño. Si este ion se encuentra en la superficie del ánodo podrá abandonarlo y dirigirse, a través del electrolito, hacia el cátodo que se encuentra cargado negativamente gracias a los electrones que le cedió el ánodo. De esta manera el ánodo reduce su tamaño mientras que el cátodo puede aumentar o quedarse igual, ya que el ion al juntarse con el electrón puede depositarse sobre el cátodo, unirse a otros átomos procedentes del ánodo y precipitar al fondo de la pila o combinarse con elementos del electrolito formando un gas que saldría de la pila.

### ***Medidas de protección contra la corrosión***

Los principales medios de protección son:

- Impedir la formación de pilas galvánicas, utilizando aislantes eléctricos.
- Tratar siempre que el área del ánodo sea mayor que la del cátodo.
- Diseñar recipientes para contener líquidos cerrados y procurar que no se acumule líquido estancado.
- Evitar hendiduras o grietas entre los materiales armados o unidos.

### ***Medios de protección***

Todos los medios de protección van destinados a evitar alguna de las causas que provocan la oxidación y corrosión. Entre las más utilizadas destacamos:

#### ***Recubrimientos***

Se utilizan para aislar las regiones del cátodo y del ánodo. Estos aislantes pueden ser de diferente tipo con una acción más o menos prolongada en el tiempo. Los aislantes a corto plazo son las grasas o aceites que se eliminan con facilidad. Los de medio plazo son las pinturas o recubrimientos cerámicos. Los de largo plazo consisten en recubrir metales con un alto grado de corrosión con otros que tengan un grado de corrosión menor, por ejemplo el acero galvanizado que consiste en depositar Zn o Sn sobre la superficie del acero.

#### ***Protección catódica***

Consiste en forzar al metal a comportarse como un cátodo suministrándole electrones. Para ello utilizamos un ánodo de sacrificio, el cual se corroe, ya que aporta electrones al metal a proteger. Los materiales del ánodo de sacrificio son el cinc o el magnesio.

#### ***Inhibidores***

Consiste en interrumpir o reducir el paso de iones desde el ánodo al cátodo; para ello, añadimos al electrolito productos químicos que se depositan en la superficie del ánodo o cátodo impidiendo o reduciendo la salida o llegada de los iones, produciendo una polarización por concentración o resistencia. Por ejemplo, las sales de cromo realizan esta función en los radiadores de los coches

#### ***Protección por selección de materiales***

Es conocido que no todos los metales tienen el mismo comportamiento frente a la corrosión y que hay ciertos metales como el cromo, níquel, platino, oro, plata, wolfranio, etc. que son muy resistentes a la corrosión atmosférica y a la acción de muchos ácidos. No obstante, el empleo de estos metales en estado puro está limitado por sus propias cualidades mecánicas y precio. Se pueden conseguir aleaciones inoxidables si introducimos pequeñas cantidades de estos metales.

#### ***Pasivadores (protección anódica)***

Se dice que un metal tiene pasividad natural cuando al oxidarse se forma una fina capa de óxido que impide la corrosión del mismo, como ocurre con el aluminio, el cobre, etc. Este mismo efecto puede conseguirse de forma artificial en ciertos metales sumergiéndolos en algunos ácidos, por ejemplo si bañamos un acero en ácido nítrico concentrado, este quedará protegido frente al ataque de ácido nítrico de baja concentración. No obstante la aplicación más común de los pasivadores se hace en forma de impregnación como ocurre con el minio ( $Pb_3O_4$ ) o el cromato de cinc ( $ZnCrO_4$ ).

Agradezco a los autores del material recogido en los siguientes enlaces a partir de los cuales se ha podido confeccionar este documento:

[http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies\\_sierra\\_magina/d\\_tecnologia/LIBRO/select.htm](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/LIBRO/select.htm)

<http://cerezo.pntic.mec.es/rlopez33/bach/tecind2/index.html#apuntes>

<http://issuu.com/yanche/docs/libro2correg>