



ALEACIONES METÁLICAS - ACEROS



1.- ALEACIONES METÁLICAS

1.1.- Concepto de aleación metálica

Una aleación metálica es un material compuesto por lo menos por dos elementos químicos uno de los cuales es de “naturaleza metálica”.

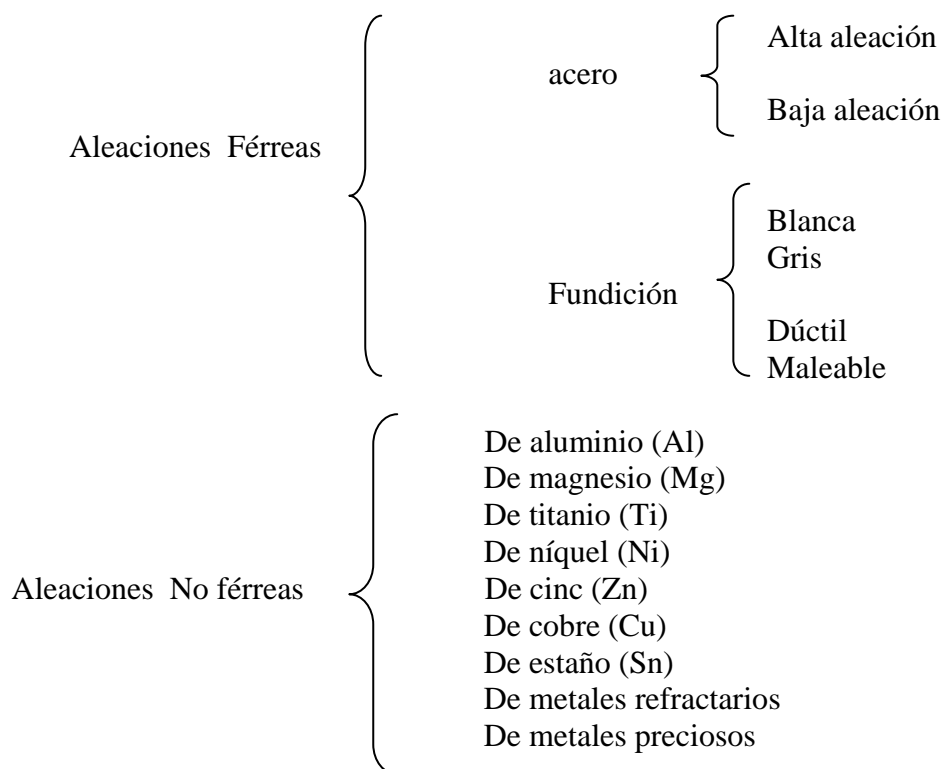
Los elementos químicos de naturaleza metálica están constituidos por átomos que comparten una serie de electrones deslocalizados que producen un “enlace fuerte”, llamado “enlace metálico”.

Esta nube o gas de electrones es la causa de la alta conductividad eléctrica de los metales.

Algunos de los elementos químicos de naturaleza metálica son:

| | | |
|---------------|----------------|---------------|
| Litio (Li) | Manganeso (Mn) | Vanadio (V) |
| Berilo (Be) | Hierro (Fe) | Galio (Ga) |
| Sodio (Na) | Cobalto (Co) | Zirconio (Zi) |
| Magnesio (Mg) | Níquel (Ni) | Cromo (Cr) |
| Potasio (K) | Cobre (Cu) | Mercurio (Hg) |
| Calcio (Ca) | Cinc (Zn) | Plomo (Pb) |
| Selenio (Se) | Plata (Ag) | Aluminio (Al) |
| Titanio (Ti) | Estaño (Sn) | Boro (B) |

Los elementos metálicos mencionados y otros constituyen la base de las diferentes aleaciones ingenieriles. Se distinguen dos tipos de aleaciones, a saber: “férreas” y “no férreas”. Las aleaciones férreas son aquellas que contienen hierro (Fe) como constituyente principal. En cambio, las no férreas, no contienen hierro como constituyente principal, aunque pueden contenerlo como constituyente secundario. Las principales aleaciones metálicas son las siguientes:





1.2.- Aleaciones No Férricas

Aunque el objetivo de esta publicación es el acero, consideramos de interés ingenieril mencionar aunque más no sea brevemente, a las “aleaciones no férricas” en razón de sus importantes propiedades técnicas que les ha significado un lugar preponderante en la industria.

Las aleaciones “no férricas” son los metales que no contienen hierro como constituyente mayoritario. Ya dijimos, se trata de las aleaciones de aluminio, magnesio, titanio, cobre, níquel, cinc, estaño, metales refractarios y metales preciosos. Estos metales desempeñan un importante papel en la tecnología actual. Veremos sus principales propiedades en forma sucinta.

1.2.1.- Aleaciones de Aluminio

Son resistentes a la corrosión, de baja densidad y muy buenos conductores de la electricidad. Posiblemente su principal atractivo reside en la baja densidad y ductilidad de estos metales, lo que ha permitido reducir el peso de los equipos, piezas, mecanismos, etc en donde se los emplea (Vg. en la industria automotriz, aeronáutica). Los principales elementos de aleación con el aluminio son: cobre (Cu), manganeso (Mn), silicio (Si), magnesio (Mg), cinc (Zn).

1.2.2.- Aleaciones de Magnesio

Estas aleaciones tienen menor densidad que las de aluminio y se emplean en aplicaciones estructurales de los diseños aeroespaciales. La densidad del magnesio es $1,74 \text{ g/cm}^3$.

1.2.3.- Aleaciones de Titanio

El titanio (Ti) es altamente resistente a la corrosión. Sus aleaciones también tienen baja densidad aunque mayores que las de aluminio y magnesio. Otra ventaja importante de las aleaciones de titanio es su propiedad de mantener su resistencia mecánica a temperaturas moderadas, Vg. Las que soportan los aviones de alta velocidad. Uno de los elementos de aleación es el vanadio (Va).

1.2.4.- Aleaciones de Cobre

Poseen muchas propiedades sobresalientes: excelente conductividad eléctrica; excelente conductividad térmica; muy resistentes a la corrosión de agua de mar y de otros ambientes corrosivos; elevada ductilidad y conformabilidad; color atractivo desde el punto de vista arquitectónico.

Las familias más importantes de las aleaciones de cobre son: a) Latones: aleaciones Cu-Zn; b) Bronces: aleaciones Cu-Sn; Cu-Al; Cu-Si; c) Cuproníquel, níquel-plata.

Las aplicaciones clásicas de estas aleaciones son: cables eléctricos; radiadores de calor; monedas; instrumentos musicales; joyería; etc.

1.2.5.- Aleaciones de Níquel

Tienen mucho en común con las aleaciones de cobre. El níquel es más duro que el cobre. Por otra parte, el níquel presenta una excelente resistencia a la corrosión y resistencia mecánica a altas temperaturas. Los principales elementos de aleación son el cobre, cromo, hierro, molibdeno, aluminio.



1.2.6.- Aleaciones de Cinc

Las aleaciones de cinc tienen una baja temperatura de fusión y resistencia a la corrosión. Algunas aplicaciones típicas estructurales se encuentran en ciertas piezas de automóviles y de hardware. Una de las aplicaciones más importantes es el “galvanizado” que consiste en recubrir una aleación férrea con zinc. Con el galvanizado se protege a las aleaciones férricas de la corrosión.

1.2.7.- Aleaciones de Plomo

Las aleaciones de plomo son materiales versátiles y durables. Todavía están en uso las cañerías de plomo instaladas por los romanos en Inglaterra, hace más de 2000 años.

Las aleaciones de plomo se identifican por su alta densidad, gran capacidad de deformación y baja temperatura de fusión. Los elementos de aleación son: calcio (Ca); antimonio (An); estaño (Sn); etc.

Algunas de sus aplicaciones son: materiales de soldaduras (aleado con Sn); escudos protectores contra la radiación; rejillas de baterías; etc. Limitan el uso del plomo, su toxicidad.

1.2.8.- Aleaciones Refractarias

Los metales refractarios incluyen el molibdeno (Mo); niobio (Nb); renio (Re); tántalo (Ta) y el wolframio (Wo). Resisten a las altas temperaturas, pero reaccionan con el oxígeno (corrosión) lo cual restringe su empleo a ciertas atmósferas controladas.

1.2.9.- Aleaciones de Metales Preciosos

Incluyen el oro (Au), iridio (Ir), osmio (Os), paladio (Pa), platino (Pl), rodio (Rd); rutenio (Rt) y plata (Ag). Entre las principales propiedades de estas aleaciones se encuentran su excelente resistencia a la corrosión. Las aplicaciones son de elevado coste: circuitos electrónicos; aleaciones dentales; recubrimientos; joyería; etc.

2.- ALEACIONES FERREAS - ACEROS

2.1.- Concepto de acero

El acero es una “aleación férrea”, entre el mineral de hierro como base y el carbono, en donde la proporción de este último varía entre el 0,05% y el 2% en peso.

Como ya se dijo más arriba las aleaciones “no férricas” las constituyen el resto de los metales que no contienen hierro como componente mayoritario.

Las aleaciones férricas, se dividen en dos grandes categorías según la cantidad de carbono presente en las mismas: “aceros” para contenidos de carbono entre el 0,05% y 2% en peso y “fundiciones” cuando el porcentaje de carbono de la aleación se encuentra entre el 2% y el 6,67 % en peso.

A su vez, dentro de la categoría de aceros, se distingue si se emplea o no una cantidad significativa de elementos aleantes distintos del carbono. Se ha establecido un límite arbitrario de un 5% en peso del total de elementos aleantes distintos del carbono para separar los aceros



de “baja aleación” de los de “alta aleación”. El uso de elementos aleantes produce mejoras esenciales en ciertas propiedades del acero, tales como la resistencia mecánica o la resistencia a la corrosión.

2.2.- Empleo del Acero

Probablemente el acero es uno de los materiales que se halla estrechamente vinculado a la profesión del ingeniero por sus propiedades estructurales. Las aleaciones férreas representan una inmensa familia de materiales de ingeniería con un amplio rango de microestructuras y propiedades asociadas. Los diseños de ingeniería que requieren soporte de carga o transmisión de potencia, implican el uso de aleaciones férreas. Las aplicaciones van desde elementales mecanismos hasta las estructuras metálicas de grandes puentes y edificios.

2.3.- Aceros al Carbono de Baja Aleación

La mayoría de las aleaciones férreas son aceros al carbono y de baja aleación. La razón es que este tipo de material es por una parte, suficientemente dúctil para conformarse con facilidad y por otra parte es relativamente económico, frente a otro que contenga importantes cantidades de elementos aleantes.

Una clase interesante de aceros al carbono de baja aleación se conoce como “aceros de baja aleación y alta resistencia” cuyo desarrollo ha emergido en respuesta al requisito de reducción de peso de los vehículos. Las composiciones químicas de muchos de estos aceros, son “reservadas”, especificándose únicamente por sus propiedades mecánicas. Un ejemplo típico de esta categoría de aceros sería uno cuya composición química contenga: 0,2% de carbono más 1% en peso de elementos tales como manganeso (Mn); fósforo (P); silicio (Si); cromo (Cr); níquel (Ni) o molibdeno (Mo).

2.4.- Aceros al Carbono de Alta Aleación

En esta categoría, el total de los elementos aleantes, distintos al carbono, superan el 5% en peso. La adición de elementos aleantes es costosa por tanto su empleo debe estar plenamente justificado. Los aceros “inoxidables” requieren de la adición de aleantes para evitar ser dañados por un ambiente corrosivo. Estos aceros contienen cromo en proporciones que superan el 10% en peso.

Los aceros de herramientas, empleados para cortar, mecanizar o dar forma a otro material, requieren la adición de aleantes tales como el cromo, wolframio y molibdeno, para obtener la dureza requerida por aplicaciones de mecanizado.

Las denominadas “superaleaciones” requieren de elementos aleantes que les confieran estabilidad en aplicaciones a altas temperaturas, tales como los álabes de turbinas.

2.5.- Fundiciones

Son aleaciones férreas cuyo contenido de carbono es superior al 2% en peso. Generalmente contienen hasta un 3% de silicio para controlar la cinética de formación de carburos. Las fundiciones tienen temperaturas de fusión y viscosidad de la fase líquida relativamente baja; no forman capas superficiales indeseadas durante la colada y experimentan una contracción moderada durante la solidificación y enfriamiento.



Una fundición se conforma para obtener una morfología final colando el metal fundido en un molde. Al solidificar, el metal mantiene la forma del molde. Se obtiene un material con una microestructura menos uniforme con algo de porosidad y por tanto con propiedades mecánicas inferiores.

Existen cuatro tipos generales de fundiciones a saber: fundición blanca; fundición gris; fundición dúctil y fundición maleable.

2.5.1.- Fundición Blanca

Es una aleación hierro – carbono en donde el porcentaje de carbono es mayor del 1,7% , hasta un 4,3 %. Tiene una superficie de rotura característica: cristalina y blanca. Durante el moldeo se forman grandes cantidades de cementita (Fe_3C), dando lugar a un material duro y frágil.

2.5.2.- Fundición Gris

En este caso, el porcentaje de carbono es mayor del 4,3 %, hasta un 6,67 %. Tiene una superficie de rotura gris con una estructura formada de finas caras. La presencia de placas afiladas y puntiagudas de grafito, contribuyen a la fragilidad característica de esta fundición.

2.5.3.- Fundición Dúctil

Si al metal fundido de composición correspondiente a la “fundición gris”, se le agrega una pequeña cantidad de magnesio (0.05%), se obtienen precipitados esféricos de grafito en lugar de precipitados de forma de placas. Se obtiene así la “fundición dúctil” debido a la mejora de las propiedades mecánicas.

2.5.4.- Fundición Maleable

Se trata de una fundición blanca que se somete posteriormente a un tratamiento térmico para obtener precipitados nodulares de grafito.

3.- PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ACERO

3.1.- Descripción del Proceso

En términos generales el acero se obtiene a partir de la mezcla de hierro, carbono, elementos aleantes y posterior fundición de estas materias primas.

El hierro se extrae de minerales que se encuentran en estado natural. Los dos más importantes son óxidos de hierro, a saber: hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4). El coque que se obtiene a partir del carbón mineral, provee el carbono. Mezclando los óxidos de hierro con carbono y calentándolos a 1500 °C en el alto horno (Figura N° 1), los óxidos de hierro se reducen a hierro metálico, al combinarse el carbono con el oxígeno para formar dióxido de carbono. En el diagrama de flujo de la Figura N° 2, se indica el proceso productivo. La obtención del “hierro metálico” de la manera descrita se conoce con el nombre de ***fundición***. Los altos hornos son el primer eslabón de la producción de hierro metálico. Los altos hornos son construcciones de gran porte que pueden alcanzar una altura de 30 metros, con paredes de más de 3 m de espesor. La producción en los mismos puede alcanzar 10.000 Tn diarias de hierro metálico.

Junto con el mineral de hierro y coque, también se vierte en el alto horno, piedra caliza. El coque se quema a una temperatura alta y reacciona con el oxígeno produciendo monóxido de carbono. Esto reduce el mineral de hierro a líquido que fluye hacia el fondo del horno.

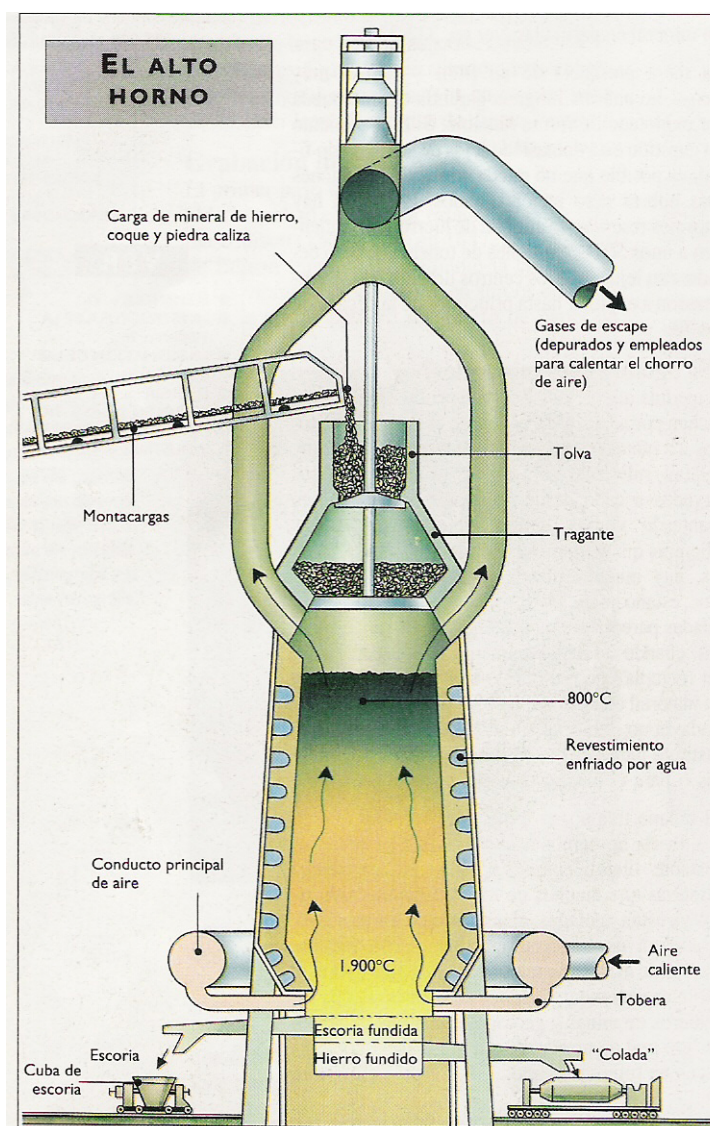


Figura N° 1.- El alto horno

La piedra caliza reacciona con las impurezas del mineral de hierro, principalmente el silicio procedente de arenas, arcillas y piedras y evita que éstas contaminen el hierro. La sílice y la piedra caliza forman la “*escoria*” que es más liviana que el hierro fundido y flota en la superficie del crisol. De vez en cuando se extrae el hierro líquido incandescente por una boca situada al fondo del horno. Esta operación de extracción del hierro líquido se llama *colada*.

La escoria es drenada a intervalos regulares por otra boca situada por encima de la primera. El proceso de producción de hierro metálico es continuo y puede seguir por diez años o más hasta que el revestimiento refractario del horno se deteriora y debe ser reemplazado. El alto horno también puede alimentarse con chatarra.

El hierro obtenido de los altos hornos no es un producto acabado. Es una “materia prima” para producir acero. Para obtener el acero, es necesario refundir los lingotes de hierro ajustando cuidadosamente las proporciones de carbono, silicio y demás elementos que entran en la



aleación. Este proceso se realiza en los llamados “**hornos de acero**”. Los hornos de acero también pueden alimentarse con chatarra. Existen varios procedimientos para obtener el acero, a saber: a) Procedimiento Bessemer en honor a su inventor, el ingeniero inglés Henry Bessemer (1813-1898); b) Procedimiento de horno de solera. Proceso mucho más lento y más controlable que el anterior. En la actualidad ambos procedimientos han sido sustituidos por un proceso que combina la ventaja de los dos: es el Procedimiento “LD” (abreviatura de Linz – Donawitz) con el cual se produce un acero de alta calidad.

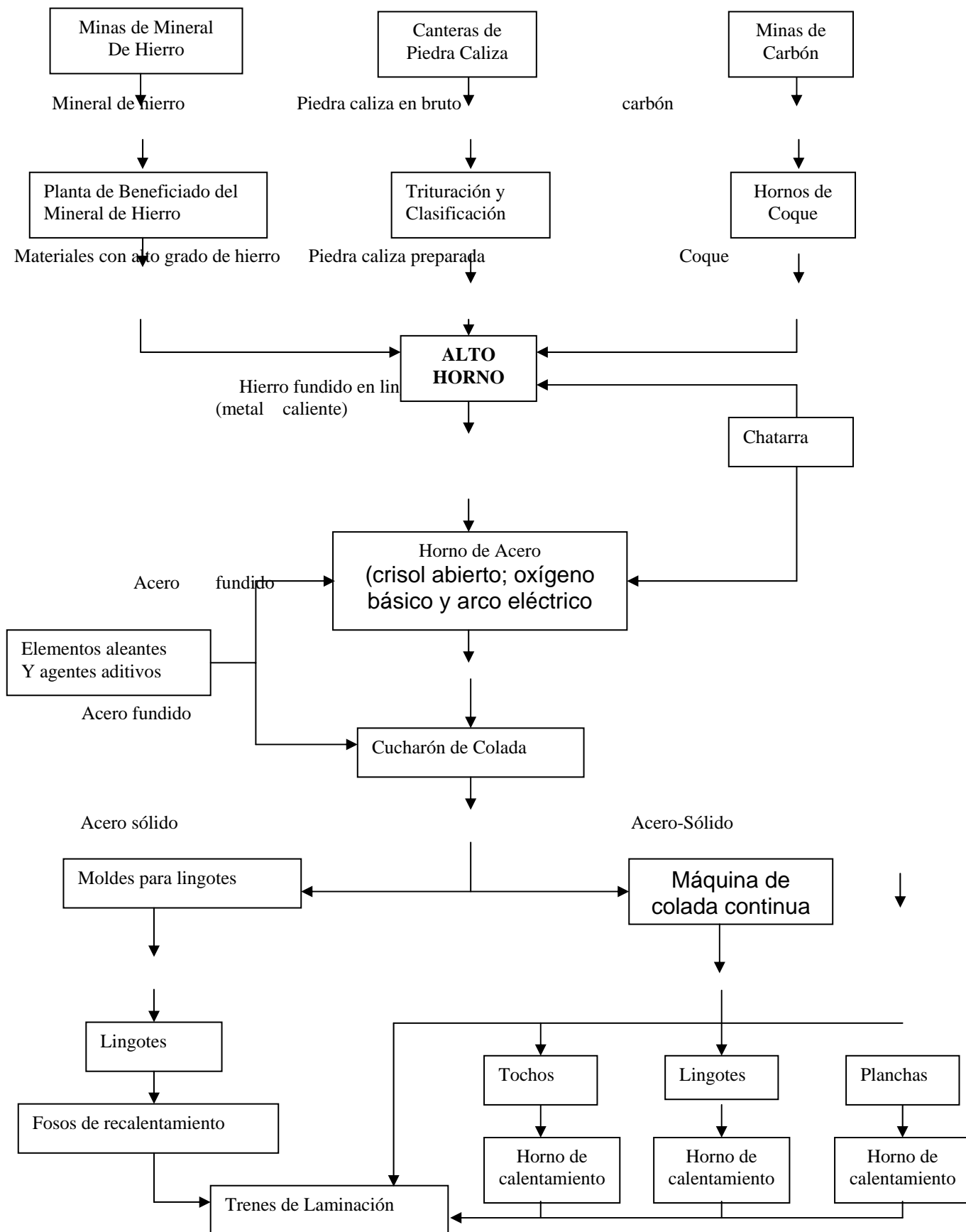
Para la obtención de aceros de mayor calidad, incluidas las aleaciones y los aceros inoxidables, se utilizan hornos de “arco eléctrico”. El calor lo proporcionan tres electrodos de carbono introducidos en una mezcla de chatarra con los elementos de adición propios de cada aleación. El silicio, el manganeso y el fósforo se eliminan como escoria y el carbono se elimina al introducir un poco de mineral de hierro que reacciona exactamente igual que en un alto horno. Los hornos de arco eléctrico pueden fundir cargas constituidas en su totalidad por chatarra. Esto es una gran ventaja para reciclar el acero.

Más tarde, el “**acero fundido**” se deforma por procesos mecánicos diversos, que en su conjunto reciben el nombre de “forja”, hasta obtener la forma final del producto. Un frecuente problema del “moldeo” o “colada” es la presencia de porosidad residual. La deformación mecánica para conseguir la forma final del producto en el proceso de “forja” elimina esta porosidad en su mayor parte.

Las principales técnicas de conformado de metales incluidas en el proceso de “forja” son: laminación; extrusión; conformado; estampado; fraguado; estirado.



Figura N° 2.-Proceso de Obtención del Acero





3.2.- Procesos de Forja

El acero sólido, en forma de tochos, lingotes o planchas es forjado en los trenes laminadores para obtener productos de diversas formas para ser empleado en las diferentes aplicaciones industriales (construcciones mecánicas, civiles, etc.).

Los “trenes de laminación” son de diferentes principios y según el tipo de tren, resulta el producto final, así tenemos:

Trenes de laminación estructurales

Se obtienen perfiles estructurales de diversa forma: I; L; T; Z; U; etc.

Trenes de laminación de rieles

Se obtienen rieles estándar; rieles para grúas, etc.

Trenes de laminación de barras

Se obtienen barras de sección circular, cuadrada, hexagonal, octogonal, triangular, plana, semicircular.

Trenes de laminación de redondos

Se obtienen: alambres, cuerdas, clavos, tela metálica.

Trenes de laminación de tuberías y tubos sin juntas

Se obtienen tuberías y tubos sin costuras de diferente diámetro

Trenes de laminación de planchas para tubos

Se obtienen tuberías de gran diámetro hechas de planchas soldadas eléctricamente.

Trenes de laminación de placas

Se obtienen chapas gruesas de diferentes calibres: Vg. 3/16”; ¼”; ½”; ¾”; 1”; etc.

Trenes de laminación de bandas

Se obtienen chapas delgadas en láminas o en bobinas

4.- DIAGRAMA HIERRO – CARBONO

4.1.- Introducción

El hierro, elemento químico blando y maleable, de peso atómico 55,85, bi y trivalente (Fe_2 y Fe_3), que cristaliza según el sistema cúbico centrado, a la temperatura ambiente, se combina con el carbono para dar compuestos químicos de características definidas.

El primer compuesto que se distingue a la temperatura ambiente es la *ferrita*. Se corresponde con una aleación de 0,008% de carbono. Esta aleación se presenta como un material de poca resistencia a la tracción, blando y muy dúctil. Puede contener impurezas como el fósforo (P) que, cuando alcanza valores del 0,02% la torna quebradiza, perdiendo su ductilidad pero mejorando al mismo tiempo su resistencia a la corrosión.



Al ir aumentando el %C ($C > 0,1\%$), comienza a aparecer una nueva configuración en la estructura del acero conocida con el nombre de **perlita o mezcla eutéctica**. La denominación “mezcla eutéctica” significa que se constituye en proporciones definidas y que contiene en este caso 0,86% de carbono. Se dice entonces, que un acero con dicho porcentaje de carbono es “perlítico”.

De lo expuesto se deduce que todo acero con un porcentaje de carbono menor de 0,86% tendrá una estructura “ferritoperlítica”, predominando una u otra, según el menor o mayor porcentaje de carbono.

Si el contenido de carbono aumenta por encima de 0,86%, se comienza a destacar el “carburo de hierro” llamado **cementita**. La cementita propiamente dicha contiene un 6,67% de carbono. La cementita es uno de los componentes más duro y frágil del acero. Luego, un acero delimitado en la zona 0,86% C - 1,7% C, presentará granos de perlita separados por cementita. Todas estas estructuras atómicas se presentan a temperatura ambiente. Para temperaturas inferiores a 721 °C la estructura de los aceros está constituida por ferrita (hierro con muy poco carbono) y cementita (hierro con 6,67% C), o sea que el tercer componente mencionado, la perlita, se forma por el hecho de que la cementita no es soluble en la ferrita, dispersándose en ésta en forma laminar.

Por efectos de la temperatura, el acero sufre mutaciones en su estructura y constitución que le son características de acuerdo al porcentaje de carbono que contiene. Para su conocimiento e interpretación de estas transformaciones, se recurre al diagrama clásico hierro – carbono que muestra la Figura N° 3. Este diagrama fija el equilibrio de las fases presentes en los distintos estados térmicos de la aleación Fe – C.

La explicación del diagrama Fe-C está fuera del alcance de propósitos de esta publicación. Para profundizar los conocimientos al respecto, remitimos al lector a la bibliografía indicada más adelante.

4.2.- Impurezas de los aceros

Es casi imposible que las aleaciones de hierro carbono no se encuentren acompañadas por otros elementos en forma de impurezas, tales como el azufre, el fósforo y las oclusiones gaseosas. Estos tres elementos son los más perjudiciales para la calidad del acero. Veamos:

Azufre

Forma con el hierro sulfuros, que presentan una temperatura de fusión de 900 °C, que muy próxima a la temperatura de forja (ver parágrafo 3.2). Por tanto, tienden a recubrir los contornos de los granos de acero provocando una decohesión o grietas internas perjudiciales para el material

Fósforo

Forma soluciones sólidas de bajo porcentaje de hierro dando lugar a una heterogeneidad en el material con la consiguiente disminución de resistencia mecánica.

Impurezas gaseosas

Dan lugar a las llamadas “sopladuras” (oclusiones) que influyen más en las piezas moldeadas (sin forja) al constituirse en puntos de debilidad. Pero es mucho mayor el inconveniente que se presenta por la aparición de tensiones internas que provocan deformaciones localizadas en las piezas.

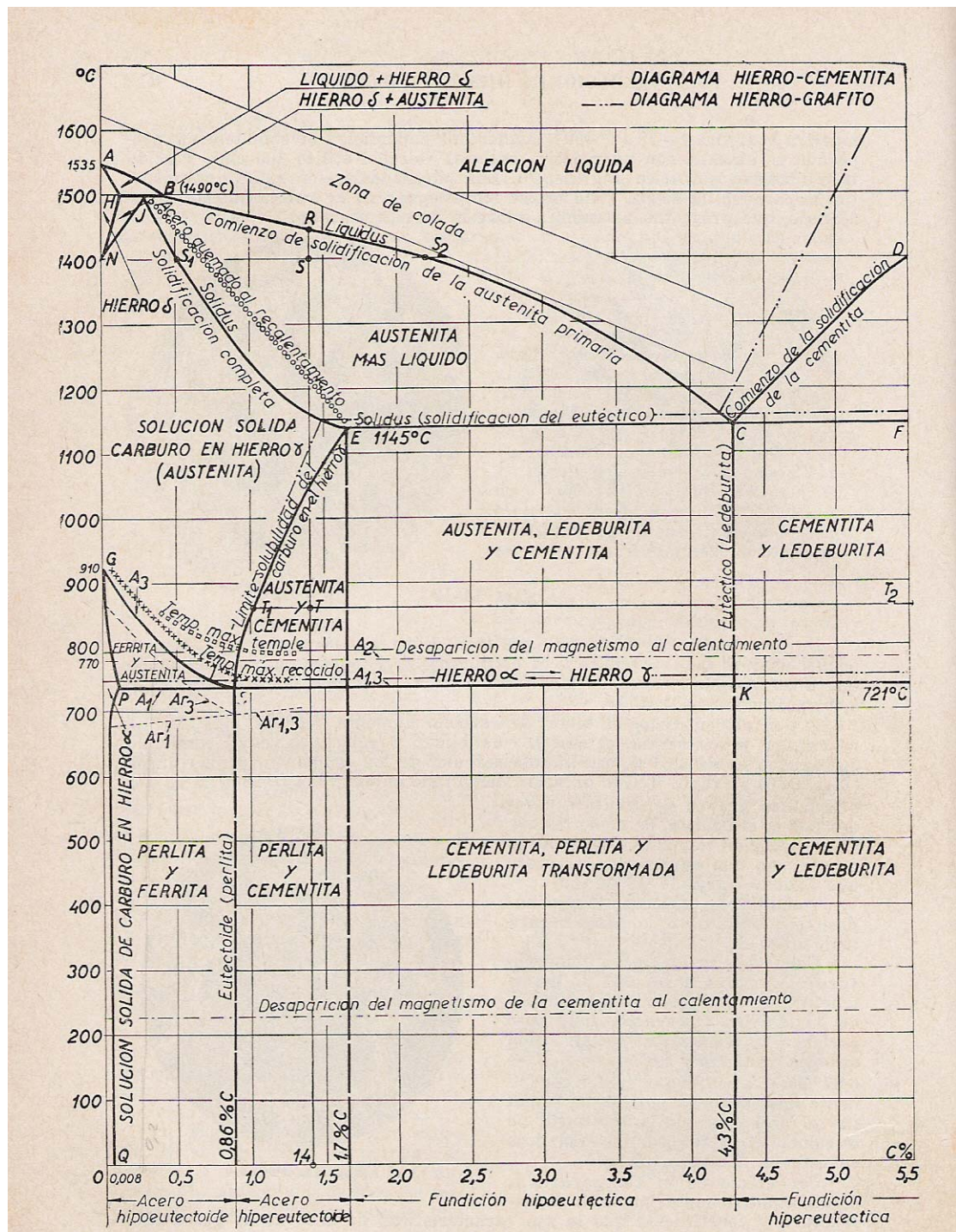


Figura Nº 3: Diagrama Hierro - Carbono



4.3.- Elementos de aleación de los aceros

Los elementos de aleación son aquellos que convenientemente dosificados, se agregan al acero en su proceso de fabricación con el objeto de facilitar la formación de estructuras cristalográficas convenientes durante las transformaciones térmicas a fin de mejorar, por ejemplo, propiedades mecánicas de resistencia a las solicitaciones de los esfuerzos o de resistencia a la corrosión.

Si la cantidad de elementos aleantes es menor del 5%, los aceros se denominan de “baja aleación”. En cambio, si el porcentaje es mayor del 5%, se denominan aceros de “alta aleación”. A continuación se describen los metales más usuales empleados en las aleaciones de acero y las propiedades que los mismos confieren al material, sin perjuicio de los cambios estructurales que provocan y que deben ser considerados a la hora de elegir el tratamiento térmico más apropiado.

Aluminio

Se agrega con fines de desoxidación en los moldeos; impide el crecimiento del grano, obteniéndose un acero de grano fino. Facilita la difusión del nitrógeno en el tratamiento de nitruración y del carbono en el tratamiento de cementación dando lugar a un aumento de la dureza superficial. Por otra parte disminuye la templabilidad del acero.

Boro

En pequeñas proporciones (0,002%) aumenta la templabilidad del acero.

Cromo

Aumenta la resistencia y la templabilidad. Lo hace más resistente a la corrosión.

Cobalto

Aumenta la dureza, siendo notable su mejor comportamiento ante los esfuerzos tangenciales, en especial a altas temperaturas.

Manganeso

Evita la segregación del azufre, con el que forma sulfuros. Aumenta la dureza del acero y la consiguiente resistencia al desgaste. Sin embargo, si se dosifica en exceso, su efecto es contraproducente ya que disminuye la dureza superficial.

Molibdeno

Aumenta la templabilidad, dureza, resistencia y resiliencia, disminuyendo los efectos del creep y la fragilidad del revenido.

Níquel

Principalmente a bajas temperaturas, aumenta la tenacidad y resiliencia. También aumenta la resistencia a la corrosión hasta a temperaturas elevadas.

Nitrógeno

Aumenta la dureza superficial debido a la formación de nitruros.

Silicio

Actúa como un activo desoxidante. Los aceros al silicio tienen preferencial empleo en núcleos de transformadores y rotores para disminuir la histéresis.



Titanio

Es uno de los compuestos del acero inoxidable. Evita la formación de carburos precipitados, estabilizando el carbono.

Tungsteno

Forma carburos muy resistentes al desgaste, aumentando por consiguiente la dureza del acero. Los aceros al tungsteno se emplean para la fabricación de herramientas.

Vanadio

Afina el grano del acero, sobre todo el de bajo tenor de carbono, provocando un aumento de la resistencia mecánica y ductilidad, mejorando su comportamiento a los efectos de la fatiga.

5.- TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO

5.1.- Concepto de tratamiento térmico

El tratamiento térmico del acero es un proceso metalúrgico por el cual este material es calentado y enfriado a ciertas temperaturas rigurosamente controladas al igual que el tiempo en que se llevan a cabo tales procesos.

El objeto de estos tratamientos térmicos, dicho en forma muy general, es la regeneración o modificación de la estructura cristalina o también, el acrecentamiento o variación de algunas de sus características físico – mecánicas en forma total o solamente superficial.

5.2.- Tipos de tratamientos térmicos

Los diferentes tipos de tratamientos térmicos los podemos sintetizar como sigue:

Recocido

Normalizado

Temple

Revenido

Con variación en la composición

5.2.1.- Tratamiento Térmico de Recocido

En la fabricación de perfiles y piezas de máquinas el acero sufre calentamientos cuyas temperaturas dependerán de la índole del proceso, Vg. Para la forja, alrededor de 900 °C; para el moldeo, más de 1500 °C. El enfriamiento posterior por lo general no es muy controlado, obteniéndose un acero de estructura irregular, endurecimientos superficiales incorrectos y hasta con tensiones internas. Estas irregularidades o defectos se subsanan mediante el “recocido”, tratamiento térmico que consiste en calentar el material hasta temperaturas próximas a las llamadas “temperaturas críticas”, para luego enfriarlos lentamente en medios concordantes con el tipo o calidad del acero en cuestión. El recocido elimina tensiones internas y regenera la estructura del material. Sin embargo, al mismo tiempo lo deja blando y dúctil lo que beneficiará a trabajos posteriores (p.e. deformación en frío) pero no a su empleo en esas condiciones.

Un diagrama típico de “recocido” se muestra en la Figura N° 4. Existen diferentes tipos de recocidos en cuyo detalle no entraremos. Las temperaturas de calentamiento oscilan entre 700 °C



y 900 °C. El calentamiento se lleva a cabo de forma lenta y uniforme. Cuando se llega a la temperatura máxima, se deja permanecer a la misma durante un tiempo suficiente para asegurar que toda la masa transforme su estructura. Este tiempo depende de la velocidad de calentamiento y del tamaño de la pieza. El enfriamiento es la parte fundamental del proceso por lo que se procede con mayor rigurosidad y control. Según el tipo de acero y de tratamiento de recocido, el enfriamiento puede realizarse con normal lentitud o tanto más rápidamente cuanto menor es el %C. En otros casos de recocido, cuando no se alcanzan las temperaturas críticas, el enfriamiento no tiene importancia, llevándose a cabo “al aire”.

Temp.(°C)

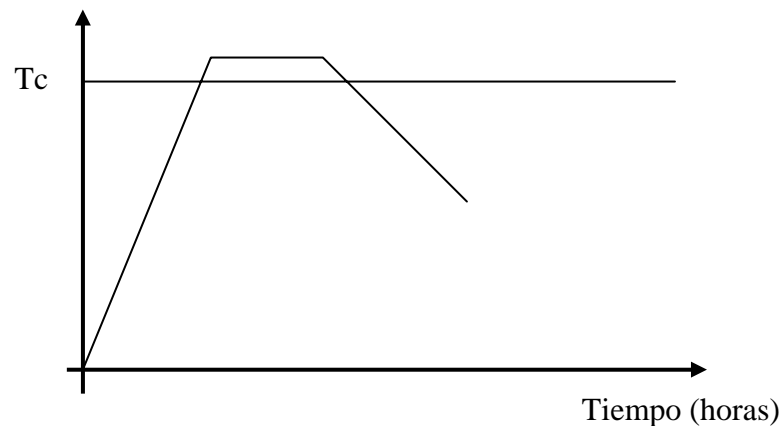


Figura N° 4: Diagrama típico de recocido

5.2.2.- Tratamiento térmico de normalizado

Dijimos en el punto anterior que el recocido deja al acero en condiciones aptas para tratamientos o mecanizados posteriores, pero no para su empleo en las construcciones pues sus propiedades mecánicas están disminuidas. Mediante el “normalizado” se logra mejorar el comportamiento mecánico de los aceros. Se trata de un tratamiento térmico similar al recocido, diferenciándose en que la velocidad de enfriamiento es un poco mayor, a la igual que la temperatura de calentamiento que es de unos 50 a 70 °C por encima de la temperatura crítica

5.2.3.- Tratamiento térmico de temple

El temple o templado es, tal vez, el tratamiento térmico de mayor importancia. Se aplica a aceros aleados de propiedades físico mecánicas muy precisas y de alto costo de fabricación. El tratamiento de templado exige un alto grado de exactitud.

Las condiciones en las que se realiza el calentamiento deben ser tales de no provocar diferencias de temperaturas muy notorias entre las superficies y el centro de las piezas tratadas. El motivo de esta consideración es que dichas diferencias de temperaturas, sobre todo en masas grandes, dan lugar a dilataciones desiguales que originan tensiones que pueden provocar fisuras o grietas internas en la pieza. Por esta razón se acostumbra a controlar rigurosamente el calentamiento procurando que la mayor diferencia de temperaturas no supere los 20°C entre puntos que disten a



25 mm. La duración del calentamiento depende en gran parte de la forma en que se presentan las superficies de las piezas (oxidadas, rugosas, pulidas, etc.)

Las temperaturas máximas para el temple son por lo general, de 40 a 60 °C superiores a su punto crítico y están comprendidas entre las temperaturas de normalizado y recocido. Tanto la temperatura máxima como el tiempo de permanencia en ella se eligen de acuerdo al volumen de la pieza, al tipo de acero y a su estado estructural. El tiempo de mantenimiento del material a la temperatura máxima de temple es, aproximadamente, de media hora por cada 25 mm de espesor, cuando la velocidad de calentamiento fue de una hora para igual profundidad.

Calentado uniformemente el acero a la temperatura conveniente, se procede luego a enfriarlo, siendo ésta la operación más delicada y más compleja. Para grandes velocidades de enfriamiento del orden de 90 °C /segundo o más, se obtiene una estructura llamada “martensítica” que es la que caracteriza el temple correcto. La martensita es un nombre dado a la estructura cristalina en honor del investigador metalúrgico Martens. Se presenta al microscopio como una configuración de agujas entrelazadas. Pero su estructura cristalográfica es la tetragonal.

Diversas causas influyen en el logro de un buen temple: tipo de acero; estado de su estructura; tamaño de la pieza y el medio de enfriamiento.

Los medios refrigerantes típicos en el temple de los aceros son el agua y el aceite. También se emplean el plomo, algunas sales en estado de fusión y por último el mercurio.

En metalurgia se conoce como **templabilidad** a la propiedad del acero de adquirir dureza en mayor profundidad. No debe confundirse la dureza superficial del acero con la templabilidad del mismo. Como se dijo, esta última es la regularidad y normal distribución de la dureza hacia el interior de la pieza.

5.2.4.- Tratamiento térmico de revenido

Se trata de un tipo de tratamiento similar al recocido del cual ya hablamos pero que se realiza como complementario del temple.

El enfriamiento brusco al que hay que someter a un acero para obtener la configuración martensítica, deja al mismo con un estado de tensiones internas impropio para su empleo y, aunque adquiere valores de dureza y de resistencia elevados, disminuyen notablemente su ductilidad y tenacidad.

El mejoramiento de estas propiedades mecánicas depende fundamentalmente de la temperatura alcanzada para el revenido, la que puede estar comprendida, según el tipo de acero, entre 250°C y 550°C.

5.2.5.- Tratamientos térmicos con variaciones de composición

Estos tratamientos térmicos con variaciones de composición han sido una solución para la fabricación de piezas de máquinas que debían reunir una doble condición: suficiente tenacidad para resistir a las sollicitaciones dinámicas por una parte y alta dureza y resistencia al desgaste por la otra. La tenacidad se cumple en los aceros de bajo contenido de carbono, mientras que



valores altos de dureza y de resistencia al desgaste se consiguen en los de alto porcentaje de carbono o en los aceros aleados. Como se ve, en principio ambas condiciones son antagónicas.

La coexistencia de dos tipos diferentes de aceros en la constitución de una sola pieza, es posible en los aceros bajos (0,08% a 0,25% de C) mediante los tratamientos de:

- **Cementación**
- **Carbonitruración**
- **Sulfinización**

Cementación

Consiste en aumentar superficialmente el contenido de carbono de esos metales, sometiéndolos a temperaturas medias de 900 °C en contacto directo con mezclas carburantes. A esa temperatura el hierro γ es ávido de carbono. Se forma así una capa superficial de carburo ($C Fe_3$) llamado cementita que al difundirse en el metal motiva lo que se conoce como “cementación”. La profundidad que se alcanza es variable entre 0,5 mm hasta más de 4 mm.

Carbonitruración

Aplicado con el mismo objeto de la cementación. Se la diferencia por la fijación o absorción simultánea de carbono y de nitrógeno. La temperatura a la que se realiza el proceso varía alrededor de 850 °C y la duración ente 0,5 y 5 horas, se rige por la capa dura a obtener (0,1 mm a 0,6 mm).

Sulfinización

Su principal característica es la de conferir a las superficies tratadas, inmejorables condiciones de resistencia al desgaste sin aumentar su dureza. El azufre en este caso es el elemento fijado y proviene de mezclas de sales una de las cuales sulfito sódico. Las capas sulfinizadas son de reducido espesor: 0,3 mm máximo que se alcanza al cabo de tres horas de tratamiento.

6.- EXAMEN METALOGRAFICO DE LOS ACEROS

6.1.- Objeto de los ensayos metalográficos

Los ensayos metalográficos tienen por objeto poner en evidencia la estructura del material a fin de controlar la efectividad de los tratamientos térmicos, deducir sus propiedades mecánicas o investigar presencia de discontinuidades u oclusiones en el material. También permiten obtener información de tratamientos mecánicos sufridos por el material, presencia de grietas, rechupes, etc.

Los ensayos metalográficos pueden ser *micrográficos o macrográficos*

6.2.- Ensayos micrográfico

Se realizan sobre muestras o probetas de los materiales sometidos a estudio, preparando una superficie que luego de ser pulida a espejo, se ataca con reactivos químicos apropiados a la finalidad del ensayo. Se busca con estos reactivos la revelación por coloración u oxidación de los distintos componentes de una estructura metalográfica a fin de poder diferenciarlos con facilidad. Para la observación de la muestra se emplea un microscopio metalográfico con el cual, aparte de la apreciación directa, es posible tomar fotografías de la estructura llamadas microfotografías.



Por comparación con microfotografías tipo, es posible deducir el contenido aparente de carbono, finura y variedad de los componentes, reconocer inclusiones por defectos de fabricación, etc

6.3.- Ensayos macrográficos

Estos exámenes se llevan a cabo sobre superficies preparadas o no y atacadas químicamente, pero con la observación directa o mediante el empleo de una lupa de 10 aumentos. Los datos que se extraen se refieren a tratamientos mecánicos sufridos, comprobación de defectos como grietas, rechupes, etc.

7.- PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS METALES

Nos referiremos únicamente a las aleaciones férreas y se mencionarán únicamente las propiedades mecánicas relacionadas con la selección de un material para aplicaciones estructurales. A través del conocimiento de estas propiedades se procurará responder a las clásicas preguntas: ¿cuánta resistencia posee? ; ¿ qué deformación se debe esperar para una determinada carga?. Veamos.

7.1.- Resistencia a la Tracción

La resistencia a la tracción de un acero es el esfuerzo unitario o tensión interior que el material presenta en oposición a una sollicitación externa que trata de estirarlo o alargarlo. Esta propiedad mecánica designada como “resistencia a la tracción” se determina a través de un ensayo homónimo que se describe a continuación.

Una probeta o barra de forma cilíndrica de sección transversal A_0 , y longitud calibrada l_0 , es tomada por sus extremos por las mordazas de una máquina de ensayo y es sometida a un esfuerzo de estiramiento denominado “tracción”. **Figura N° 5**

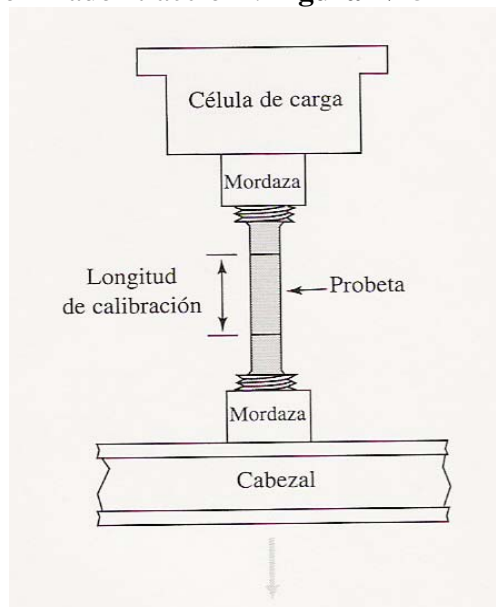


Figura N° 5 : Ensayo de Tracción

A medida de que se ejecuta el ensayo con una velocidad constante, se registran las cargas y las deformaciones correspondientes a aquellas. Se continúa hasta que finalmente el material no resiste más y rompe. Las lecturas carga (N) Vs deformación (mm), se llevan a un gráfico



representativo del comportamiento del material. **Figura N° 6.** Con el objeto de prescindir de las dimensiones de la probeta para obtener una información más general del material, se refieren las cargas y las deformaciones a la geometría inicial de la probeta. De esta manera se trabaja con “tensiones σ ” y “deformaciones específicas ε ”, cuyo significado es:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (\text{MPa}) \qquad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{adimensional})$$

En donde: σ : Tensión aplicada en MPa

ε : Deformación específica (adimensional)

P : es la carga aplicada a la probeta en un instante cualquiera expresada en newton (N)

A₀: es el área transversal inicial de la probeta expresada en cm²

l₀ : es la longitud inicial “calibrada” de la probeta expresada en mm

l : es la longitud de la probeta medida entre las marcas iniciales, para una determinada carga “P”, aplicada en un instante cualquiera. Se expresa en mm.

Las probetas se fabrican de forma tal que el área transversal de la zona calibrada sea uniforme e inferior al área transversal de los extremos en los que se sujeta a las mordazas de la máquina de ensayo. Esta zona calibrada sufre la mayor concentración de tensiones por lo que cualquier deformación significativa frente a una sollicitación elevada, se localiza en esta zona.

El gráfico σ - ε , **Figura N° 7** es similar al gráfico P- Δl de la **Figura N° 6**. Sólo se efectuó un cambio de escala.

En la **Figura N° 7** se diferencian dos zonas: la zona de deformación elástica y la zona de deformación plástica. La **deformación elástica**, como su nombre lo indica, es transitoria mientras se aplique la tensión correspondiente. Al cesar la misma, la probeta recupera sus dimensiones primitivas. La región elástica de la curva “tensión – deformación específica” es el tramo lineal inicial. En

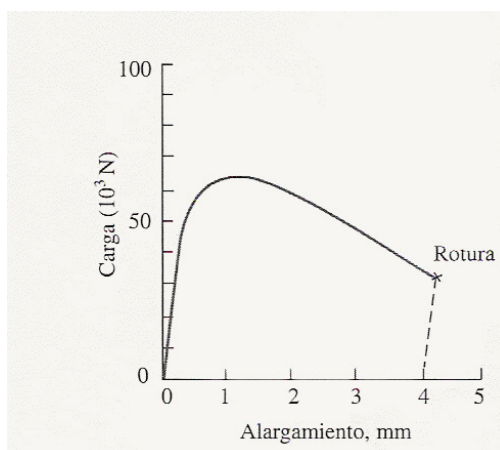


Figura N° 6: Diagrama Carga (N) – Deformación (mm)

cambio, la **deformación plástica** es una deformación permanente, es decir, no se recupera al cesar la aplicación de la carga, aunque sí se recupera una pequeña componente de la deformación elástica.

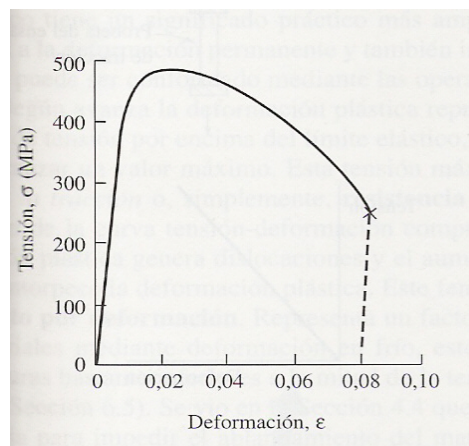


Figura N° 7 : Curva Tensión (MPa) – Deformación Unitaria

La región plástica es el tramo no lineal que se obtiene una vez que la deformación total supera su límite de deformación elástica. A menudo resulta difícil determinar con precisión el punto en el que la curva “tensión deformación” se aparta de la linealidad y entra en la región plástica, por lo que es usual es definir un “**límite elástico convencional $\sigma_{0,2}$** ”. El límite elástico convencional $\sigma_{0,2}$ es la tensión para la cual se obtiene una deformación permanente del 0,2% es decir 0,002. El valor de la tensión convencional $\sigma_{0,2}$ corresponde a la tensión del punto de intersección de la curva de deformación con una línea paralela al tramo elástico y que corta al eje de deformaciones específicas en el valor 0,2 %, ver **Figura N° 8**.

En la **Figura N° 9** se muestra la pequeña recuperación elástica que tiene lugar cuando se retira la carga situada en la región plástica de la curva tensión deformación.

¿Qué ocurre en el material a escala atómica cuando actúan fuerzas externas que operan en c/u de las regiones principales del diagrama “tensiones- deformaciones”?

Los estudios dicen que el mecanismo fundamental asociado a la deformación elástica es la “relajación de los enlaces atómicos”. En cambio el mecanismo fundamental de la deformación plástica es la distorsión y reconstrucción de los enlaces atómicos. Esta distorsión y reconstrucción de enlaces atómicos también recibe el nombre de “**fluencia**” por lo que el “límite elástico convencional o real” se denomina también “**límite convencional de fluencia**” o “**límite de fluencia**”

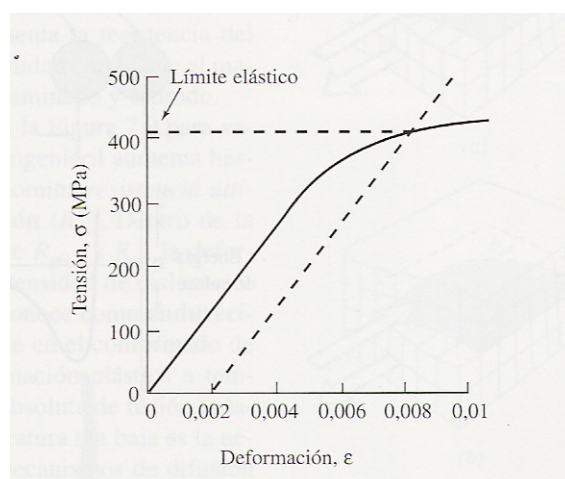


Figura N° 8: Determinación Práctica del Límite Convencional de Fluencia $\sigma_{0,2}$

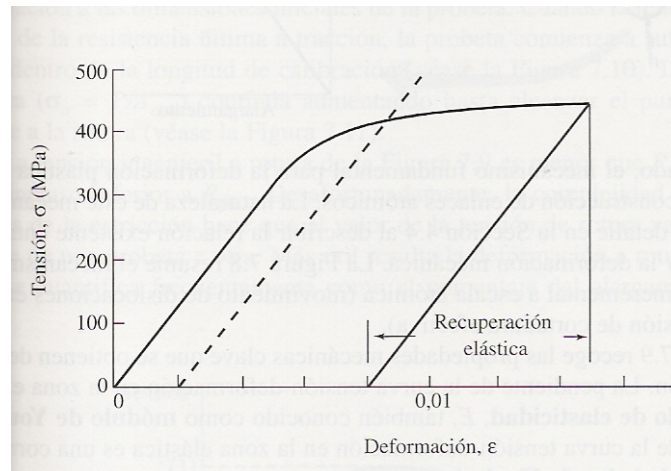


Figura N° 9: Recuperación elástica de una probeta que ya experimentó una deformación plástica

7.1.1.- Ensayo de Tracción. Módulo de Elasticidad Longitudinal

Del ensayo de tracción se obtiene el diagrama ya visto de “tensiones – deformaciones” que se muestra en la **Figura N° 7** y que se repite en la **Figura N° 10**

La pendiente de la curva “tensión – deformación” en la zona elástica es el **módulo de elasticidad longitudinal “E”**, también llamado “**módulo de Young**”.

$$E = \operatorname{tg} \alpha$$

La linealidad de la curva “tensión deformación” en la zona elástica es una corroboración gráfica de la Ley de Hooke:

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

El módulo de elasticidad “E” proporciona una información muy práctica del material. Representa su rigidez, esto es, su resistencia a la deformación elástica.

El módulo de elasticidad promedio del acero vale 2.100.000 Kg/cm². El valor de E para una fundición es de 1.050.000 Kg/cm²

Del mismo modo, el límite elástico o límite de fluencia, representa la resistencia del metal a la deformación permanente y también indica la facilidad con que el material puede ser conformado mediante las operaciones de laminado y estirado.

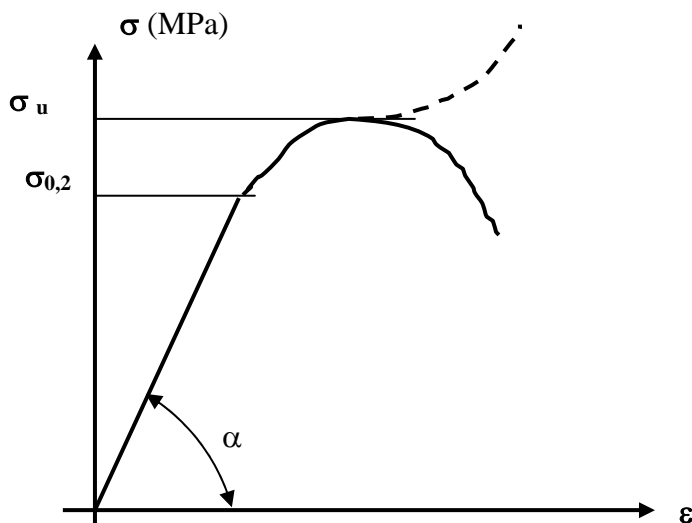


Figura N° 10 : Diagrama Tensiones (MPa) – Deformaciones Unitarias o Específicas

Según avanza la deformación plástica (**Figura N° 10**), para valores de tensión superiores al límite de elasticidad, la tensión ingenieril aumenta hasta alcanzar un valor máximo. Esta tensión máxima se denomina “**resistencia última a la tracción**” o simplemente “**resistencia a la tracción**”. En la Figura N° 10 la hemos indicado como “**σ_u**”

Dentro de la región de la curva comprendida entre el límite elástico y la resistencia última de tracción, la deformación plástica genera dislocaciones y el aumento de la densidad de estas dislocaciones, entorpece la deformación plástica. Este fenómeno se conoce como “**endurecimiento por deformación**”. Representa un factor importante en el conformado de materiales mediante deformación en frío, esto es deformación plástica a temperaturas bastantes inferiores a la mitad de la temperatura absoluta de fusión. La temperatura de fusión es aquella que provoca el ablandamiento del material por mecanismos de difusión atómica, Vg. restauración y recristalización.

Continuando con el análisis de la curva tensión deformación de la **Figura N° 10**, podría parecer que la deformación plástica más allá de la resistencia última de tracción “**σ_u**” ablanda al material debido a que la tensión ingenieril disminuye. Por el contrario, esta disminución de la tensión es el resultado de que tanto la tensión como la deformación están definidas en relación a las dimensiones iniciales de la probeta. En realidad, cuando la tensión alcanza el valor de la resistencia última de tracción “**σ_u**”, la probeta comienza a sufrir una estricción dentro de la longitud calibrada, (ver **Figura N° 11**). La tensión verdadera es:

$$\sigma_{tr} = \frac{P}{A_{real}} \quad (\text{MPa})$$

Esta tensión verdadera continúa aumentando hasta alcanzar el punto correspondiente a la rotura, según se indica en líneas de puntos en la misma **Figura N° 10**.



Figura N° 11: Estricción en una probeta de ensayo a tracción dentro de su longitud calibrada tras un alargamiento superior al correspondiente a la resistencia a tracción

Resulta de interés, por la utilidad práctica, conocer el “**alargamiento o deformación de rotura**”. La ductilidad se cuantifica frecuentemente como el porcentaje de alargamiento a rotura. Este valor indica la capacidad general del metal para ser deformado plásticamente.

La combinación de las propiedades de “resistencia” y de “ductilidad” se designa con el término “**tenacidad**”. La tenacidad se emplea para describir una combinación de dichas propiedades. La **Figura N° 12** muestra que esta propiedad puede definirse como el área total bajo la curva tensión – deformación.

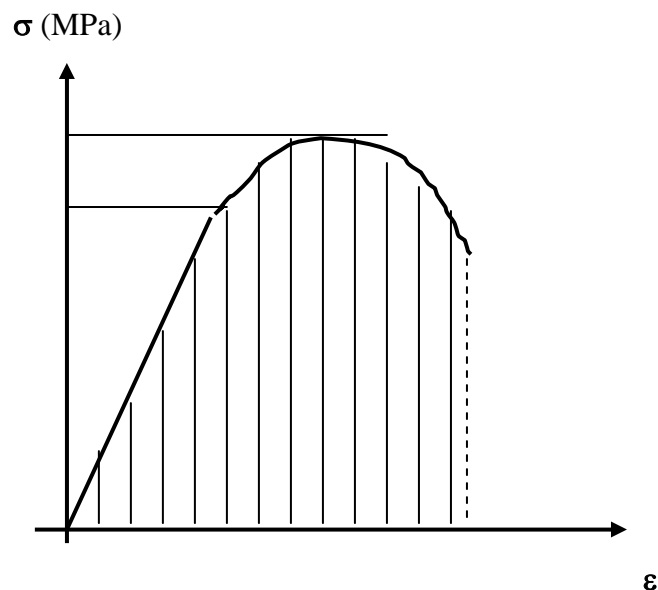


Figura N° 12: Tenacidad = $\int \sigma d\epsilon$ = área bajo el diagrama $\sigma - \epsilon$



La apariencia general de la curva tensión – deformación de la **Figura N° 7**, es la típica para una amplia gama de aleaciones metálicas. En el caso de los aceros de bajo contenido de carbono (0,10% aproximadamente), llamados también “aceros dulces”, el diagrama tensión - deformación típico se muestra en la **Figura N° 13**.

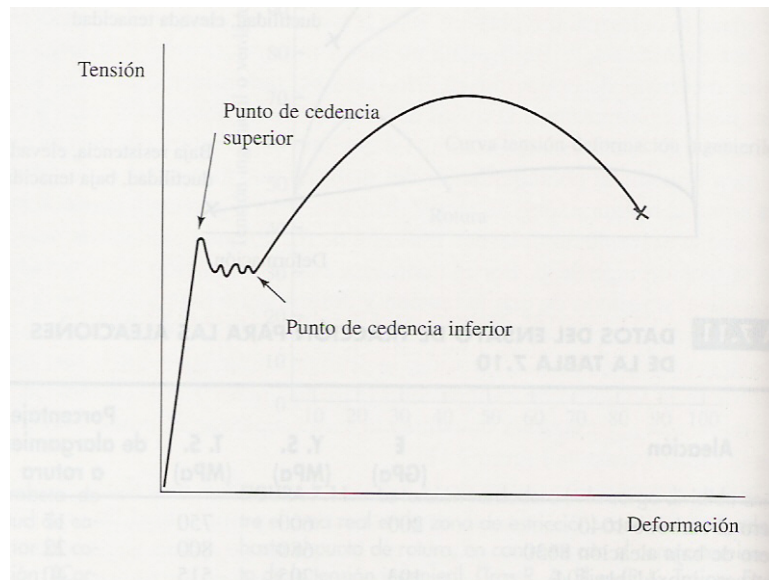


Figura N° 13: Diagrama Tensión – Deformación Unitaria de un acero de bajo contenido de carbono (0,10 %) (Acero Dulce). Se observa con nitidez el período de fluencia

En este diagrama se distingue perfectamente la zona de cedencia o fluencia del material al finalizar la zona elástica. El punto en donde comienza la fluencia se denomina “**punto de cedencia superior**” y el punto donde termina, “**punto de cedencia inferior**”. El tramo ondulado entre ambos puntos, corresponde a la fluencia propiamente dicha. Esta zona está asociada a la deformación no homogénea y acomodamiento de los enlaces a escala atómica. A partir del punto de cedencia inferior continúa la deformación plástica generalizada.

7.2.- Coefficiente de Poisson

Al ensayar una probeta a tracción, se observa una “contracción” transversal al alargamiento, es decir una disminución del diámetro si la probeta tiene forma cilíndrica. En cambio, si el esfuerzo fuese de compresión, ocurriría una “expansión” transversal de la probeta, que en el caso de probeta cilíndrica se traduciría en un aumento del diámetro. **Figura N° 14.**

Este importante aspecto de la deformación elástica está caracterizado por el **coeficiente de Poisson “ ν ”**

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad \text{en donde:}$$

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad : \text{deformación específica longitudinal}$$



$$\epsilon_t = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad : \text{deformación específica transversal}$$

El coeficiente de Poisson, junto con el módulo de elasticidad describen el comportamiento elástico de los materiales de ingeniería.

Los valores de “ ν ” para muchos tipos de aleaciones comunes, varían entre 0,26 y 0,35

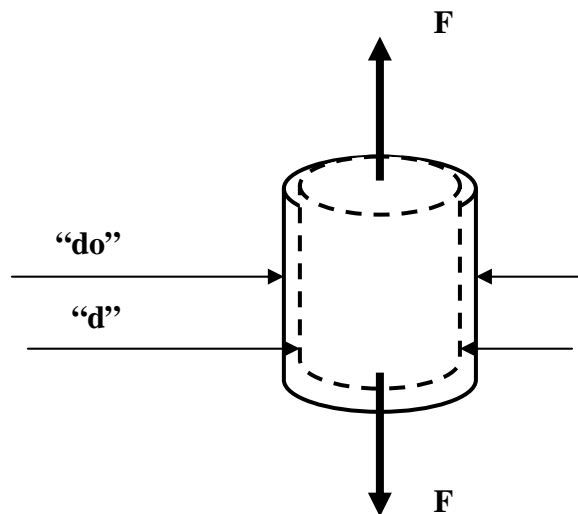


Figura N° 14: El Coeficiente de Poisson “ ν ” caracteriza la contracción lateral, normal al alargamiento producido por un esfuerzo de tracción

7.3.- Módulo de elasticidad transversal

El “**módulo de elasticidad transversal**”, también se denomina “**módulo de cortadura**” o “**módulo de rigidez**”

La **Figura N° 15** ilustra sobre la naturaleza de la deformación elástica bajo una carga “cortante pura”. La **tensión de corte o tensión de cizallamiento “ τ ”** se define como:

Ps

$$\tau = \frac{Ps}{A_s} \quad (\text{MPa})$$

As

En donde: Ps = es la carga aplicada sobre la probeta

As = es el área de la probeta paralela a la dirección de aplicación de la carga

La tensión de corte produce una distorsión (α) junto con la deformación de corte γ , que se define como:

$$\gamma = \text{tg } \alpha = \frac{\Delta y}{Z_0}$$



El módulo de elasticidad transversal o módulo de rigidez “G” se define de manera análoga a σ , de la siguiente manera:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

El módulo de elasticidad transversal promedio para los aceros es $G = 9.500 \text{ Kg/cm}^2$

El módulo de elasticidad transversal “G” y el módulo de elasticidad longitudinal “E”, están relacionados, para pequeños esfuerzos, a través del coeficiente de Poisson:

$$E = 2G (1 + \nu)$$

Como el valor de “ ν ” varía en una estrecha franja, la relación G/E es prácticamente constante para la mayoría de las aleaciones y su valor aproximado es 0,4

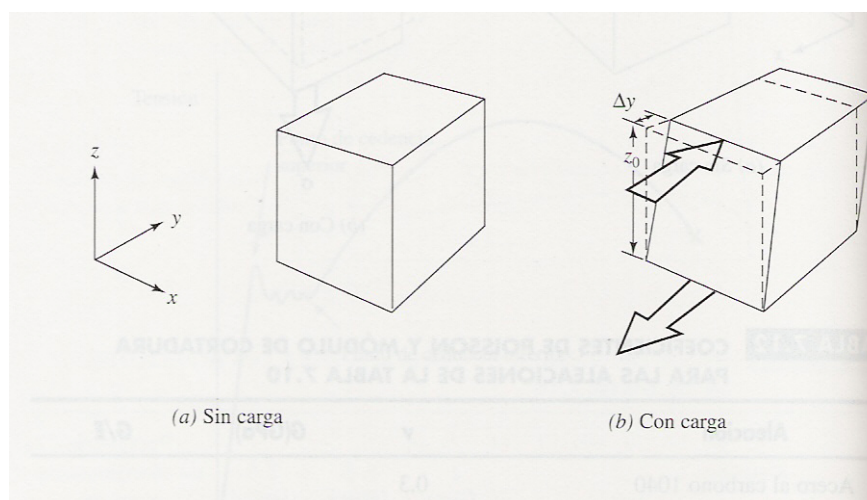


Figura N° 15: Deformación elástica bajo una carga de cortadura

7.4.- Dureza

Se entiende por “dureza” a la propiedad del material de oponerse a la indentación, es decir a la oposición de dejarse penetrar por otro material. La “dureza” indica de forma cualitativa cual es la resistencia de la aleación y más específicamente, cual es su resistencia a la tracción.

El ensayo de dureza se muestra en la **Figura N° 16**. El penetrador puede ser redondeado o puntiagudo y está hecho con un material mucho más duro que el del material que se ensaya, Vg. acero reforzado, o carburo de wolframio o diamante. El ensayo de dureza se considera “no destructivo”, por cuanto su ejecución apenas deja una pequeña impronta en el material ensayado. De esta manera, el ensayo de dureza puede realizarse tanto sobre probetas, muestras o sobre la misma pieza metálica.

Los índices de dureza se calculan a partir de fórmulas adecuadas que emplean las medidas de la geometría de la indentación.



Los índices de dureza más empleados o conocidos son: dureza Rockwell; dureza Brinell; dureza Vickers; etc.

La dureza Rockwell se emplea ampliamente y dispone de muchas escalas, según que el elemento penetrador tenga la forma de un cono (Rockwell C, Rc) o de una esfera o bolilla (Rockwell B, Rb). La dureza Brinell designada como BHN (Brinell Hardness Number) posee una única escala que da cobertura a una amplia gama de dureza de materiales. Además conociendo la dureza Brinell se puede obtener una buena correlación lineal con la resistencia a tracción del material.

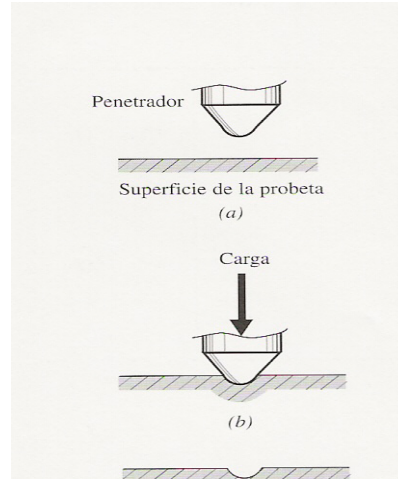


Figura N° 16: Ensayo de Dureza

La dureza Brinell emplea una esfera de 10 mm de diámetro de acero o de carburo de wolframio. La dureza Rockwell se determina o con un cono de diamante de 120° (Rc) o con una esfera de acero de 1/6" de diámetro o con una esfera de acero de 1/8" de diámetro. La dureza Vickers usa una pirámide de diamante de 136°. La máquina para realizar el ensayo de dureza, se conoce con el nombre genérico de durómetro.

La **Figura N° 17**, muestra la correlación entre la dureza Brinell (BHN) y la resistencia a la tracción.

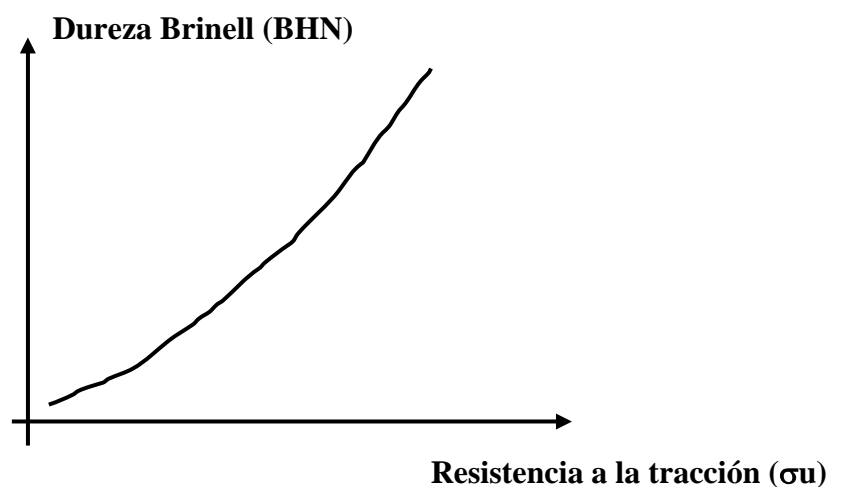


Figura N° 17: Correlación entre la Dureza Brinell (BHN) y la Resistencia a la Tracción (σu)



7.5.- Energía Absorbida en el Impacto (Choque)

Se ha visto que la “dureza” es la analogía de la resistencia medida a través del ensayo de tracción. La “energía absorbida en el impacto” que es la energía necesaria para romper una probeta normalizada sometida a una carga instantánea de impacto o choque, es una analogía similar a la “tenacidad”.

La forma más común de medir en laboratorio la “energía absorbida en el impacto” es el **ensayo de Charpy**, que se ilustra en la **Figura N° 18**. El principio en que se basa el ensayo es sencillo: la energía necesaria para romper la probeta se calcula a partir de la diferencia entre la altura inicial y final del péndulo oscilante. Para poder controlar el proceso de rotura, se mecaniza una entalla a efectos de que se concentren las tensiones en la cara de la probeta sometida a la máxima tensión de tracción. El resultado del ensayo consiste en someter a la muestra a una rápida sucesión de deformación elástica, deformación plástica y rotura. En efecto, el ensayo de tracción se completa rápidamente merced al impacto repentino que origina el martillo al golpear la probeta. La energía de impacto obtenida a partir del ensayo de Charpy, se puede correlacionar con el área encerrada bajo el total de la curva “tensión – deformación” del ensayo de tracción, es decir, la **tenacidad**. (**Figura N° 12**). La temperatura a la cual se realiza el ensayo es un factor importante. Por ejemplo, ciertas aleaciones fallan de forma frágil a temperaturas relativamente bajas y de forma dúctil a temperaturas altas. Algunos aceros de bajo contenido de carbono que eran dúctiles en los ensayos de tracción a temperatura ambiente, se volvieron frágiles al ser expuestos a bajas temperaturas.

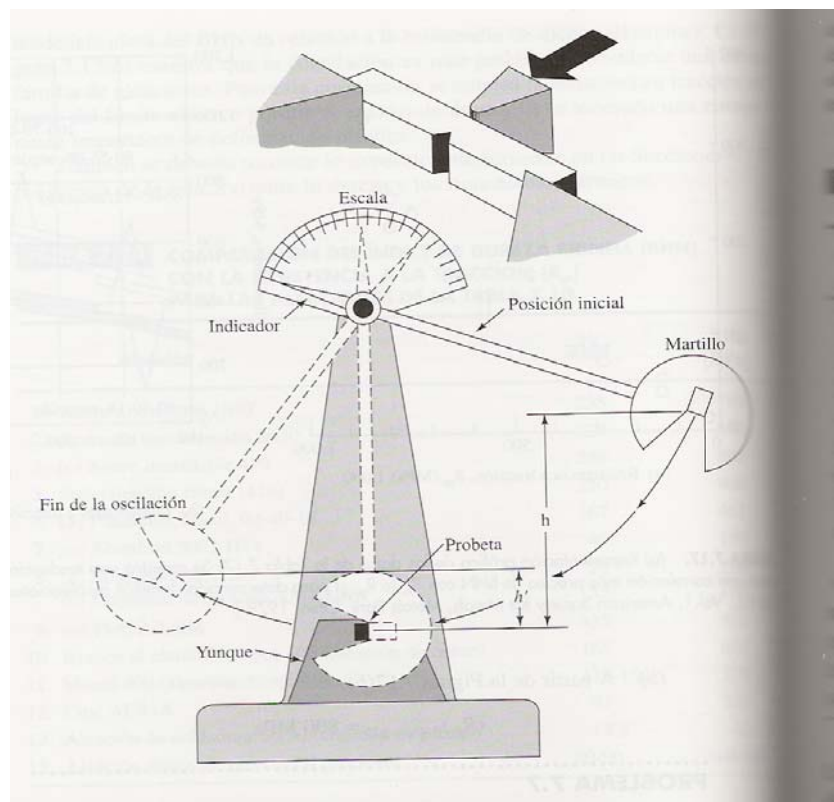


Figura N° 18: Ensayo de Charpy de energía absorbida por impacto



7.6.- Fatiga

Muchas aplicaciones estructurales llevan asociadas una carga cíclica en lugar de estática. La fatiga es el fenómeno general de fallo del material tras varios ciclos de aplicación de una tensión inferior a la tensión última de rotura. El gráfico de la **Figura N° 19** ilustra este concepto.

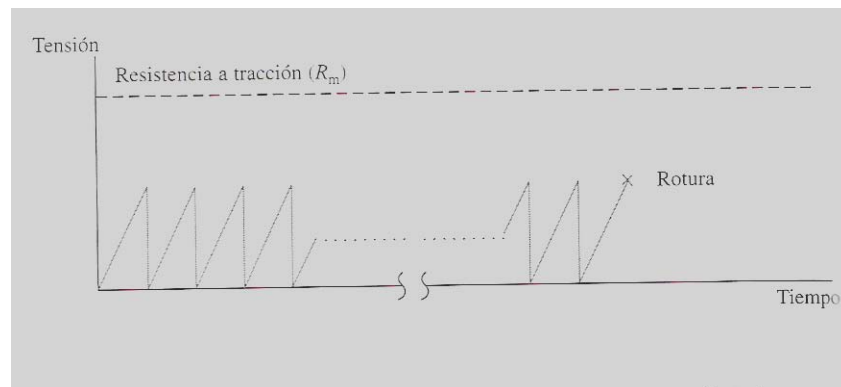


Figura N° 19: La Fatiga se corresponde con la rotura frágil del material tras un total de N ciclos bajo una tensión inferior a la resistencia a la tracción ($R_m \approx \sigma_u$)

La **Figura N° 20** muestra una probeta sometida a un ensayo de fatiga. En este caso la probeta está sometida a un ciclo con un nivel predeterminado de tensiones. Una curva típica de “fatiga” de un material se muestra en la **Figura N° 21**. En este gráfico se representa la “tensión S ” en MPa, frente a un “número de ciclos N ” en escala logarítmica. Los datos indican que mientras el material puede resistir una tensión $R_m = 800$ MPa en una única aplicación, es decir $N = 1$, luego de 10.000 aplicaciones ($N = 10^4$) el material rompe a una tensión inferior del orden de 600 MPa. La razón de esta pérdida de resistencia se explica como sigue: la aplicación reiterada de tensiones puede producir deformación plástica localizada en la superficie del metal. Esta deformación plástica se manifiesta en forma de discontinuidades las que, una vez formadas, continúan su crecimiento en forma de grietas, reduciendo la capacidad del material para soportar la carga y favoreciendo la concentración de tensiones.

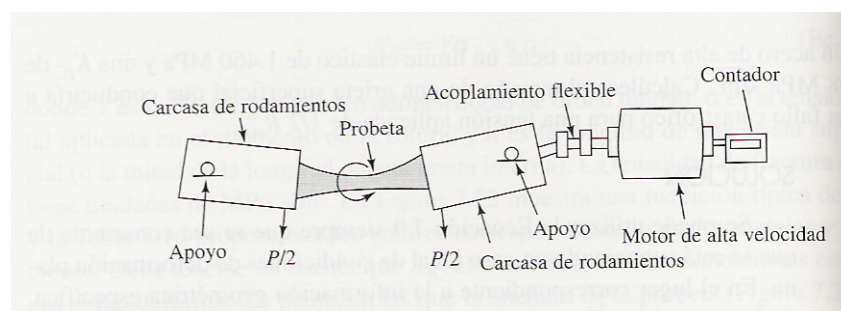


Figura N° 20: Ensayo de Fatiga

La **Figura N° 21** muestra que la pérdida de resistencia con el aumento del número de ciclos, alcanza un límite. Esta **resistencia a la fatiga** es propia de las aleaciones férreas. Las aleaciones no férreas tienden a no tener un límite tan diferenciado. En la práctica, la resistencia a la fatiga de las aleaciones no férreas se define como el valor de la resistencia tras un gran número



arbitrario de ciclos, por lo general $N = 10^8$. La resistencia a la fatiga cae entre la cuarta parte y la mitad de la resistencia a la tracción.

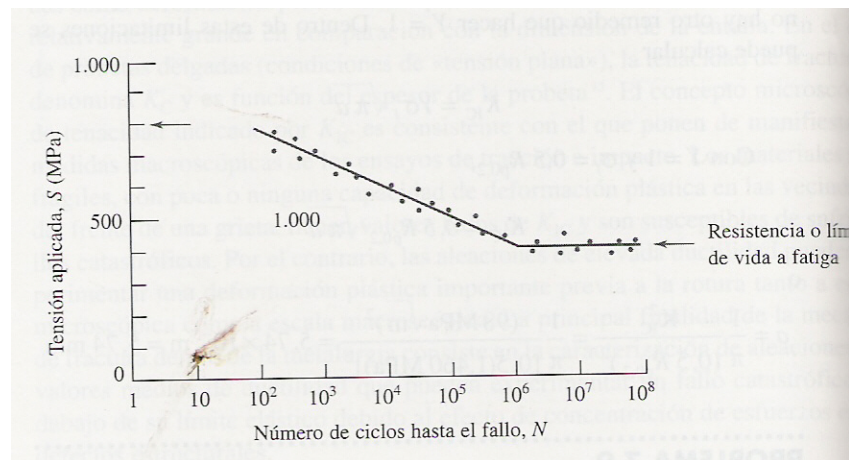


Figura N° 21: Curva de Fatiga Típica

7.7.- Fluencia

Según se ha comprobado, el ensayo de tracción no proporciona toda la información necesaria para el caso de las aleaciones sometidas a cargas cíclicas. De la misma manera, el ensayo de tracción por sí solo no puede predecir el comportamiento estructural de un material empleado a altas temperaturas. La deformación que sufre un metal típico cargado por debajo de su límite elástico a temperatura ambiente se puede calcular mediante la Ley de Hooke (**ver parágrafo 7.1**). Esta deformación no cambiará con el tiempo, como norma general, si la carga se mantiene constante. Si se repite la experiencia a una temperatura elevada, se obtienen resultados totalmente distintos. La **Figura N° 22**, muestra una curva de fluencia típica, en la que la deformación “ ϵ ”, aumenta de forma gradual con el tiempo, tras la primera etapa de carga elástica. La fluencia se define como la deformación plástica o permanente que tiene lugar a temperatura elevada bajo una carga constante y durante un período largo de tiempo. El valor de la “temperatura elevada” está comprendido entre la tercera parte y la mitad de la temperatura absoluta de fusión del material.

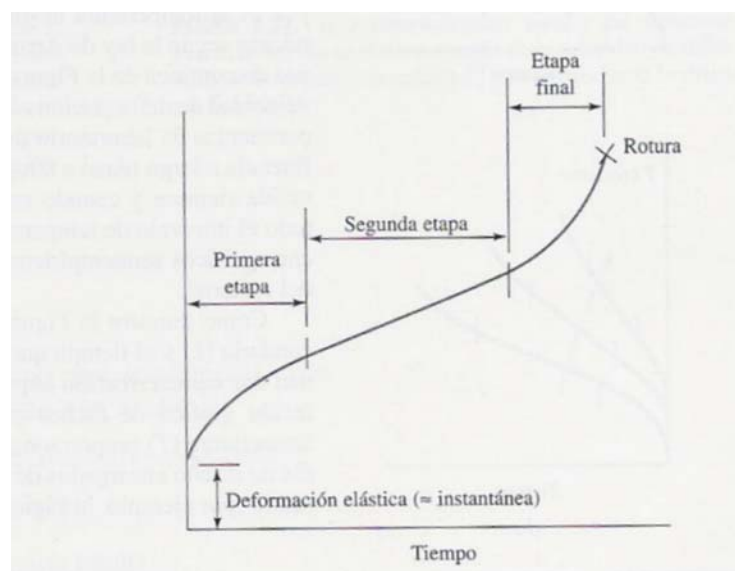




Figura N° 22: Curva de Fluencia.

Tras la deformación elástica inicial ($t \equiv 0$), ocurre la deformación por fluencia en dos o tres etapas según se muestra en la **Figura N° 22**. Las causas de estas deformaciones se explican a escala atómica para c/u de las etapas. En la etapa inicial, dichas deformaciones se deben a una movilidad atómica térmicamente activada que proporciona planos de deslizamientos adicionales para las dislocaciones. La segunda etapa de la deformación por fluencia, es casi una línea recta con velocidad de deformación constante. En esta zona la mayor facilidad de deslizamiento debida a la movilidad atómica asociada a la temperatura elevada, se equilibra con una creciente resistencia al deslizamiento debido a barreras micro estructurales. En la tercera etapa final, la velocidad de deformación aumenta debido al incremento de la tensión verdadera, resultado de la reducción del área transversal por estricción o agrietamiento interno.

La **Figura N° 23** muestra la disposición del ensayo de fluencia. Este ensayo demuestra que por encima de una temperatura aproximadamente igual a la mitad de la temperatura absoluta de fusión, un material adquiere movilidad atómica suficiente para deformarse plásticamente bajo tensiones inferiores al límite elástico a temperatura ambiente.

La curva característica de fluencia (**Figura N° 22**), varía con los cambios en la tensión aplicada o en la temperatura de ensayo.

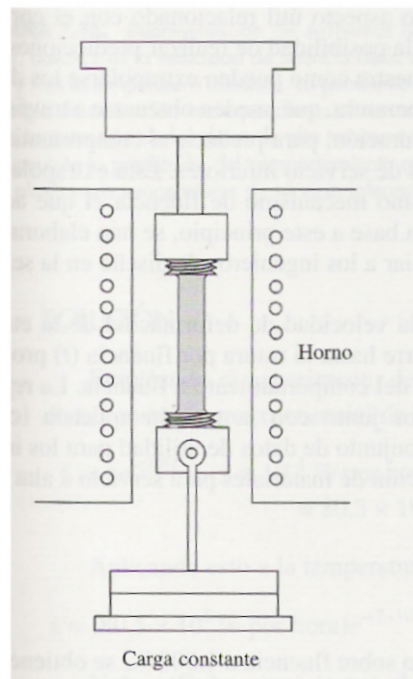


Figura N° 23: Ensayo Típico de Fluencia (Observar que la probeta está dentro de un horno)



8.- DESIGNACIÓN S.A.E DE LOS ACEROS . TIPOS DE ACERO

8.1.- Designación S.A.E. de los aceros

La S.A.E. (Society of Automotive Engineers) emplea números compuestos de cuatro o cinco cifras para designar la inmensa variedad de aceros que se obtienen variando los porcentajes de carbono y sus aleaciones con diferentes elementos metálicos.

El ordenamiento de tales cifras caracteriza o individualiza un determinado tipo de acero. El Significado de dicho ordenamiento es el siguiente:

Primera Cifra:

- 1** : aceros al carbono
- 2** : aceros al níquel
- 3** : aceros al cromo níquel
- 4** : Aceros al molibdeno
- 5** : Aceros al cromo
- 6** : Aceros al cromo vanadio
- 7** : Aceros al tungsteno
- 8** : Aceros al silicio manganeso
- 13** : Aceros al manganeso

Cifra intermedia : **0** : Aceros de simple aleación (el carbono es el único elemento preponderante)

N \neq 0 : Indica el elemento preponderante de la aleación.

Dos últimas cifras: Para los aceros simples indican el porcentaje medio aproximado de carbono

Mediante la designación S.A.E. los aceros al carbono de hasta 1% de carbono pueden ser fácilmente identificables. Por ejemplo un acero SAE 1025 indica lo siguiente:

Primera cifra : **1** : se trata de un acero al carbono

Segunda cifra: **0** : ningún otro elemento aleante predominante

Últimas cifras: **25**: 0,25% de contenido medio aproximado de carbono

En el caso de un acero aleado al níquel, la designación es : acero SAE 2340, cuyo significado es:

Primera cifra : **2** : Acero al níquel

Segunda cifra: **3** : aproximadamente 3% de contenido medio de níquel (3,25% a 3,75%)

Últimas cifras:**40**: aproximadamente 0,40% de contenido medio de carbono (0,35 a 0,45%)

Para ampliar la gama de aceros posibles a designar la S.A.E. los determina en algunos casos con cinco cifras, de manera que la segunda y tercera indiquen el porcentaje del elemento preponderante. Por otra parte, si bien es cierto que la primera cifra (tipo de aleación) y las dos últimas cifras porcentaje de carbono) cumplen casi rigurosamente con lo indicado, no ocurre lo mismo con las cifras intermedias debido a que por necesidad o conveniencia se las elige algunas veces de forma arbitraria.



8.2.- Algunos tipos de aceros

Acero IRAM – SAE 1010

Se trata de un acero al carbono con 0,10% de contenido medio aproximado de carbono.

Baja resistencia a la tracción: Tensión de fluencia ≈ 120 MPa (1200 Kg/cm²)

Tensión de rotura : ≈ 220 MPa (2200 Kg/cm²)

Posee alta tenacidad.

Es soldable

Aplicaciones: chapas; bulones comunes ; perfiles; etc

Acero IRAM – SAE 1045

Se trata de un acero al carbono con 0,45% de contenido medio aprox. de carbono (0,43% a 0,50%). También posee una aleación con manganeso entre 0,60% y 0,90%

Alta resistencia a la tracción: Tensión de rotura ≈ 600 a 800 MPa (6000 a 8000 Kg/cm²)

Tensión convencional de fluencia $\sigma_{0,2} \approx 400$ a 600 MPa (4000 a 6000 Kg/cm²)

Apto para ser templado: adquiere alta dureza y tenacidad.

Aplicaciones: tensores; ejes; árboles

Acero inoxidable SAE 51210

Aleación: C $\approx 0,10\%$; Cr $\approx 1,5\%$ al 21 %; Ni $\approx 8\%$ al 21 %

Principal propiedad: inoxidable

Suministro: chapas; alambres; barras; caños; etc. Aplicación: tuberías; bulonería; revestimientos; etc.

Acero SAE 4140

Aleación: C $\approx 0,38\%$ a 0,43% ; Mn $\approx 0,75\%$ al 1,00 %; Cr $\approx 0,80\%$ al 1,10 %; Mo $\approx 0,15$ al 0,25%

Alta resistencia a la tracción: Tensión de rotura ≈ 900 a 1050 MPa (9000 a 10500 Kg/cm²)

Tensión convencional de fluencia $\sigma_{0,2} \approx 700$ MPa (7000 Kg/cm²)

Alargamiento de rotura: 12%

Suministro: barras redondas; cuadradas; hexagonales; etc.

Aplicación: tensores; bulones de alta resistencia; engranajes; etc.

Acero SAE 11L14

Aleación: acero dulce con plomo. Normalizado. Maquinabilidad mejorada

Resistencia a la tracción: Tensión de rotura ≈ 400 a 540 MPa (4000 a 5400 Kg/cm²)

Tensión convencional de fluencia $\sigma_{0,2} \approx 270$ MPa (2700 Kg/cm²)

Alargamiento de rotura: 7 %

Suministro: En barras redondas; hexagonales; etc.

Aplicaciones: En general se emplea en el maquinado de piezas en tornos de alta velocidad de corte. Una aplicación típica en la construcción la constituye la fabricación de manguitos roscados para el empalme de barras de construcción.-



9.- ACEROS PARA CONSTRUCCION

9.1.- Concepto

Se trata de barras, cordones, alambres y perfiles que se emplean para construir las estructuras de hormigón armado, pretensado y estructuras metálicas en general.

9.2.- Barras de acero para hormigón armado

9.2.1.- Barras de acero conformadas de dureza natural

Se trata de barras de acero cuya forma y propiedades se obtienen por laminación en caliente. La superficie de estas barras presenta salientes para mayor adherencia con el hormigón. Estas salientes consisten en dos nervios longitudinales, uniformes, continuos, paralelos al eje de la barra y diametralmente opuestos. También posee cortos nervios transversales que son salientes discontinuos, no paralelos al eje de la barra, distribuidos uniformemente sobre la periferia en dos filas longitudinales. Ver **Figura N° 24**

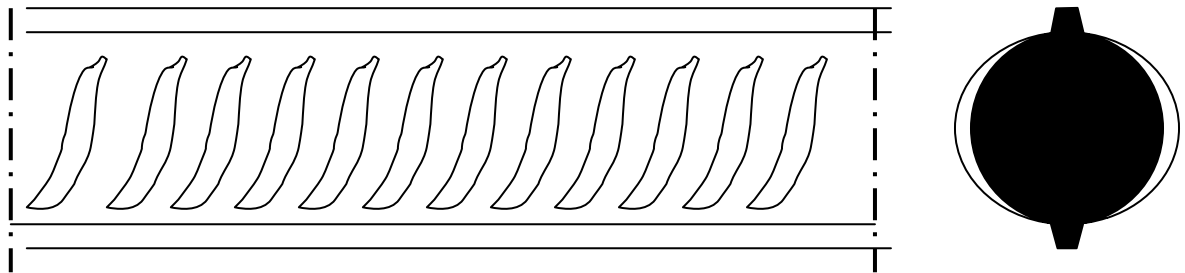


Figura N° 24: Barra de acero conformado de dureza natural

Propiedades mecánicas de las barras

Tensión de fluencia característica: $\geq 420 \text{ MPa}$ ($\geq 4.200 \text{ Kg/cm}^2$)

Resistencia a la tracción característica: $\geq 500 \text{ MPa}$ ($\geq 5000 \text{ Kg/cm}^2$)

Alargamiento de rotura característico: $\geq 12 \%$

Presentación

En barras de 12 m de longitud de diámetros: 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32 y 40 mm

Mandril de doblado

Las barras deben doblarse para tomar las formas adecuadas a las estructuras, constituir ganchos de anclaje, etc. El doblado se realiza con elementos mecánicos llamados mandriles. La barra pivotea en el mandril curvándose conforme al diámetro del mismo. Es necesario que el diámetro del mandril sea el adecuado al diámetro de la barra. Si la barra se dobla con un diámetro demasiado reducido, se corre el riesgo de fisurarla en la zona traccionada del bucle (ver **Figura N° 25**)

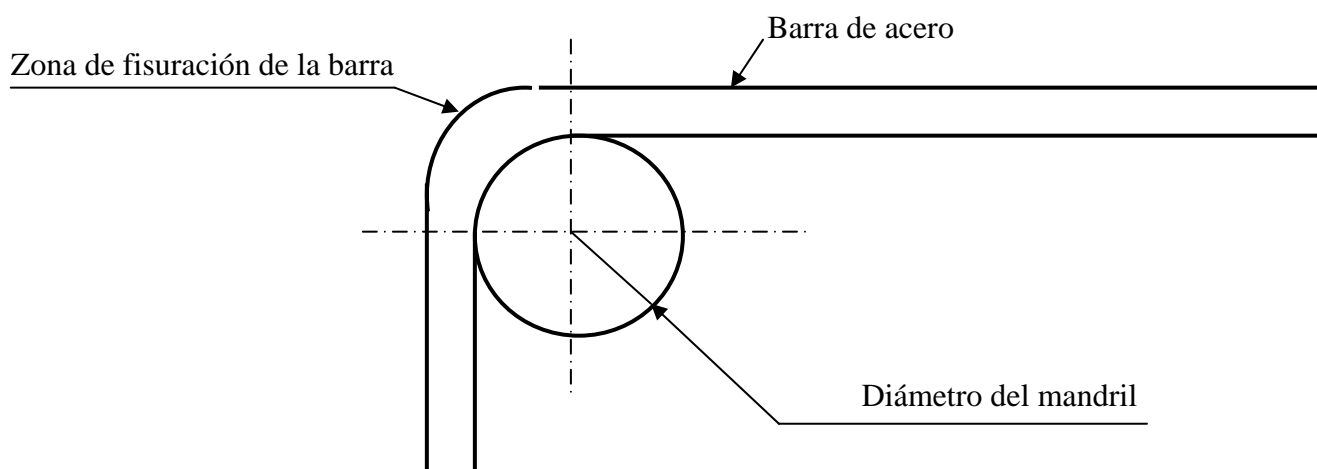


Figura N° 25: Diámetro del mandril de doblado

Los diámetros de mandriles que se deben emplear son los siguientes:

| Diámetro de la barra “D” | Diámetro del mandril |
|---|----------------------|
| $D \leq 25 \text{ mm}$ | 3,5 D |
| $25 \text{ mm} \leq D \leq 32 \text{ mm}$ | 5 D |
| $32 \text{ mm} \leq D \leq 40 \text{ mm}$ | 7 D |

Designación de las barras

Estas barras se designan como acero ADN 420 que quiere decir “acero de dureza natural de 420 MPa de tensión característica de fluencia

9.2.2.- Barras de nervuradas de dureza mecánica ADM 420

Se trata de barras conformadas cuya forma y propiedades son obtenidas por laminación en caliente y luego torsionadas en frío alrededor de su eje longitudinal. Poseen dos salientes uniformes y continuos en forma de hélice sobre la periferia de la barra y diametralmente opuestas. También poseen nervios transversales en forma de salientes discontinuos, no paralelos al eje de la barra, distribuidos uniformemente sobre su periferia en dos filas longitudinales.

Las propiedades mecánicas son similares a las barras de dureza natural. Tienen un alargamiento de rotura un poco menor que aquellas: $\geq 10\%$.

Se proveen barras de doce metros en los mismos diámetros del acero ADN 420. Se especifica un mandril de doblado no menor de 3 veces el diámetro de la barra, para todos los diámetros.

9.2.3.- Barras lisas laminadas en caliente AL220

Son barras lisas de acero de bajo contenido de carbono cuyas propiedades mecánicas son las siguientes:

Tensión de fluencia característica: $\geq 220 \text{ MPa}$ ($\geq 2.200 \text{ Kg/cm}^2$)

Resistencia a la tracción característica: $\geq 340 \text{ MPa}$ ($\geq 3.400 \text{ Kg/cm}^2$)

Alargamiento de rotura característico: $\geq 18 \%$



Presentación

En barras de 12 m de longitud de diámetros: 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32 ; 40 y 50 mm

Diámetro del mandril de doblado: dos veces el de la barra como mínimo.

Aplicaciones

Este acero no se utiliza como armadura resistente. Se lo emplea para fines secundarios por ejemplo, para la confección de ganchos, patas de insertos metálicos; barras de vinculación entre diferentes elementos estructurales; etc.

9.2.4.- Mallas de alambre de acero soldadas para hormigón armado

Se trata de paneles de alambres que se cruzan ortogonalmente formando cuadrados o rectángulos de diferentes dimensiones de lado. Los cruzamientos de los alambres constituyen puntos de unión electrosoldados

Designación

| | |
|--------------------------------|----------|
| Mallas de alambres lisos : | AM 500 L |
| Mallas de alambres perfilados: | AM 500 P |
| Mallas de alambres nervurados: | AM 500 N |

Tipos de mallas

Mallas “**Q**”: forman cuadrados.

Mallas “**R**”: forman rectángulos con el lado mayor paralelo a los hierros longitudinales

Mallas “**T**”: Forman rectángulos con el lado mayor paralelo a los hierros transversales

Dimensiones de los paneles de mallas

Aproximadamente miden 2,15 m de ancho por 5 m de longitud

9.3.- Cordones de acero para hormigón pretensado

Se trata de trenzas y cordones de acero de alta resistencia, cuya función es el de introducir esfuerzos internos en los elementos estructurales, técnica ésta conocida como “hormigón pretensado”.

9.3.1.- Cordón negro 1 x 7

Siete alambres están enrollados helicoidalmente en igual sentido y con un paso uniforme alrededor de un alambre central. Se suministran en diámetros nominales de 9,5 mm (3/8”); 12,7 mm (1/2”) y 15,2 mm (5/8”). La tensión de rotura es del orden de 1800 MPa (18.000 Kg/cm²) y el alargamiento mínimo de rotura especificado es de 3,5%.

Se suministran en bobinas de longitud aproximada a los 3.500 m y peso aproximado a 2.800 Kg.

9.3.2.- Trenzas de dos o tres alambres

Conjunto de dos o tres alambres de igual diámetro enrollados helicoidalmente con paso uniforme, alrededor de un eje imaginario.

Suministro: trenzas de dos alambres de 1,84 mm de diámetro c/u (2 X 1,84)
trenzas de dos alambres de 2,40 mm de diámetro c/u (2 X 2,40)
trenzas de tres alambres de 2,40 mm de diámetro c/u (3 X 2,40)
trenzas de tres alambres de 3,00 mm de diámetro c/u (3 X 3)



La resistencia a la rotura a tracción es del orden de 1800 MPa (18.000 Kg/cm²)
También se presentan en bobinas de 120 a 150 Kg de peso.

9.4.- Aceros para construcciones metálicas

Se trata de aceros laminados en caliente para empleo en estructuras metálicas cuyas uniones se ejecutarán mediante soldadura, roblonado o abulonado.

Los tipos de producto que se emplean son perfiles normalizados : UPN; IPN; PNL;PNT; etc., barras macizas, flejes , planchuelas y chapas de distintos calibres.

10.- SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

10.1.- Concepto de soldabilidad

Es la propiedad que posee el acero de dejarse soldar adecuadamente por fusión u otro método de soldadura. La unión soldada debe resistir los esfuerzos solicitantes en la misma medida en que lo hace el acero original, sin soldaduras.

10.2.- Condición de soldabilidad

En términos generales, un acero puede ser soldado sin dificultad cuando su contenido de carbono es menor de 0,2%. Es decir un acero 1010 por ejemplo, se suelda sin dificultad.

En términos más técnicos, un acero puede soldarse por fusión, sin tomar recaudos especiales, cuando el *contenido de carbono equivalente es menor de 0,55%*

$$\text{Carbono equivalente} = \text{C \%} + \frac{\text{Mn \%}}{6} + \frac{\text{Cr \%} + \text{Mo \%} + \text{V \%}}{5} + \frac{\text{Ni \%} + \text{Cu \%}}{15} \leq 0,55 \%$$

Cuando el carbono equivalente es mayor de 0,55%; los espesores sean mayores de 25 mm; se presume que el acero tiene tensiones internas y cuando la temperatura ambiente sea muy baja próxima a 0 °C, se deben tomar precauciones especiales para poder soldar. Algunas de estas precauciones son: Disponer del equipamiento adecuado; aplicar un procedimiento correcto de soldadura; utilizar un material de aporte (electrodo) adecuado; calificar con anterioridad al operador de soldadura.

---000---



Bibliografía

- 1) Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros de James F. Shackelford. Editorial Prentice Hall
- 2) Tratamientos Térmicos y Termoquímicos de los Aceros y de las Fundiciones de Antonio Enrique Sturla. Editorial Ediciones Técnicas INternacionales
- 3) Laboratorio de Ensayos Industriales de González Arias – Palazón. Editorial Litenia
- 4) Enciclopedia Temática Guinness. Ediciones Folio S.A.
- 5) Norma IRAM - IAS U 500-03 “Cordón de siete alambres para pretensado”
- 6) Norma IRAM – IAS U 500-06 “Mallas de acero para hormigón armado”
- 7) Norma IRAM – IAS U 500-07 “Cordón de dos y tres alambres para pretensado”
- 8) Norma IRAM – IAS U 500-91 “Ensayo de doblado y desdoblado”
- 9) Norma IRAM – IAS U 500- 502 “Barras de acero de sección circular para hormigón armado”
- 10) Norma IRAM-IAS U500-517 “Alambres y barras para hormigón pretensado”
- 11) Norma IRAM-IAS U500-528 “Barras de acero conformadas de dureza natural para hormigón armado
- 12) Norma IRAM-IAS U500-671 “Barras de acero conformadas, de dureza mecánica, para hormigón armado
- 13) Norma IRAM –IAS U500-601 “Soldaduras por arco. Electrodo de acero al carbono
- 14) Norma IRAM –IAS U500-127 “Soldaduras por arco. Electrodo de acero al carbono de baja aleación revestidos
- 15) Reglamento CIRSOC 201 de 1982 “Proyecto Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado, Editorial INTI