

RESUMEN MATERIALES PARA USO EN INGENIERIA 2020

CAPITULO 2 → “Estructura atómica y enlaces interatómicos”

Algunas de las propiedades más importantes de los materiales sólidos dependen de la disposición geométrica de los átomos y de las interacciones que existen entre los átomos y las moléculas constituyentes.

Estructura atómica

Los átomos constan de núcleos muy pequeños que a su vez están compuestos de protones y neutrones. Todo este conjunto está rodeado de electrones en movimiento. Tanto los electrones como los protones están cargados eléctricamente, con una carga del orden de 1.6×10^{-19} Coulomb (de signo negativo para el electrón y positivo para el protón). La masa de los protones y neutrones es prácticamente la misma (1.67×10^{-27} kg), mientras que la del electrón es de 9.11×10^{-31} kg.

Cada elemento se caracteriza de varios parámetros, como son el número atómico, la masa y peso atómico. El número atómico es el número de protones en el núcleo mientras que la masa atómica es la suma de las masas de los protones y neutrones del núcleo ($A = Z + N$). El número de protones y neutrones no siempre es el mismo dentro del átomo de un mismo elemento, por ello a átomos que tienen dos o más masas atómicas se denominan isótopos. El peso atómico puede expresarse de dos maneras distintas, ya sea refiriéndose a la u.m.a o a la noción de mol (Número de Avogadro = número de partículas elementales = 6.023×10^{23}).

Configuración electrónica

Representa el modo como los electrones van ocupando los estados de energía que rodean el núcleo. Dichos estados de energía están determinados por los llamados números cuánticos. El tamaño, la forma y la orientación espacial de la densidad de probabilidades de un electrón están determinados por dichos números. Para cada nivel y subnivel de energía existe un número máximo de electrones que pueden encontrarse. Los electrones de los niveles más externos se denominan electrones de valencia, estos son extremadamente importantes ya que participan en el enlace entre átomos con otros elementos además de definir muchas propiedades físicas y químicas.

Enlace atómico en los sólidos

Aquí encontramos tres tipos de enlaces (iónico, covalente y metálico).

El enlace iónico siempre existe en compuestos formados por elementos metálicos y no metálicos. Los átomos de un elemento metálico dan fácilmente sus electrones de valencia a átomos de un no metal, que a su vez es un buen receptor de estos electrones. En este proceso todos los elementos adquieren la configuración estable del gas inerte. La magnitud del enlace es igual en todas las direcciones alrededor de un ion. Es el enlace predominante en los materiales cerámicos. Los materiales iónicos se caracterizan por la dureza, fragilidad y por ser tanto eléctrica como térmicamente aislantes.

El enlace covalente se consigue compartiendo electrones entre átomos vecinos. El enlace es direccional: existe entre átomos específicos y solo en la dirección que hay electrones compartidos. Este tipo de enlace aparece en sólidos elementales tales como el diamante (Carbono), silicio, germanio y en compuestos sólidos formados por elementos localizados a la derecha de la tabla periódica. Los enlaces covalentes pueden ser muy fuertes (Diamante) o muy débiles (como el bismuto). Este enlace es característico de los materiales poliméricos.

Los metales y aleaciones presentan enlace metálico, es característico de los metales de los grupos IA y IIA y de todos los elementos metálicos. Es un enlace fuerte y no direccional. Son buenos conductores de electricidad y el calor.

CAPITULO 3 → “Estructura de los sólidos cristalinos”

Estructura cristalina

Los materiales sólidos se pueden clasificar según la regularidad con que se sitúan los átomos o iones. En un material cristalino los átomos se sitúan de una manera repetitiva, ordenada y periódica a lo largo de muchas distancias atómicas, están ordenados. Los metales, cerámicos y ciertos polímeros adquieren estas estructuras cristalinas en condiciones normales de solidificación.

Los sólidos donde el orden de largo alcance no existe se denominan no cristalinos o amorfos.

Algunas propiedades de los sólidos cristalinos dependen de la estructura cristalina: la ordenación espacial de átomos, iones y moléculas. Hay un número muy grande de estructuras cristalinas diferentes, estas van desde las relativamente simples de los metales a las excesivamente complejas de los materiales cerámicos y poliméricos. Al describir la estructura cristalina se consideran los átomos como esferas sólidas con diámetros muy bien definidos. Una palabra clave es red, significa disposición tridimensional de puntos coincidentes con las posiciones de los átomos o centros de esferas.

Celdilla unidad

Al describir la estructura cristalina conviene dividirla en las pequeñas entidades llamadas celdillas unidad. Dicha celdilla de la mayoría de las estructuras cristalinas son paralelepípedos o prismas con tres conjuntos de caras paralelas. Se elige para representar la simetría de la estructura cristalina, de manera que las disposiciones de los átomos en el cristal se puedan representar desplazando a distancias discretas la celdilla unidad a lo largo de los ejes.

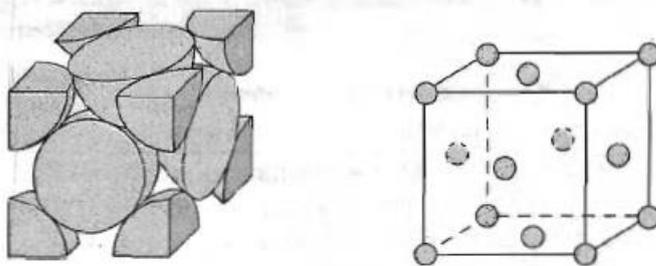
Es la unidad estructural fundamental y define la estructura cristalina mediante su geometría y por la posición de los átomos dentro de ella.

Estructura cristalina de los metales

El enlace atómico de este grupo de materiales es metálico y de naturaleza no direccional, por lo que hay restricciones en cuanto al número y posición de átomos vecinos más próximos, lo cual conduce para la mayoría de los metales a estructuras cristalinas con gran número de vecinos muy próximos y densamente empaquetados. La mayoría de los metales más corrientes cristaliza en una de las tres estructuras cristalinas siguientes: cubica centrada en las caras, cubica centrada en el cuerpo y hexagonal compacta.

Estructura cristalina cubica centrada en las caras o FCC

La estructura exige que muchos metales tengan una celdilla unidad de geometría cubica, con los átomos localizados en los vértices del cubo y en los centros de todas las caras del cubo. Cristalizan en esta estructura el cobre, aluminio, plata, oro, plomo, níquel y platino. Las esferas o cationes están en contacto entre si a lo largo de la diagonal, la longitud de la arista del cubo y el radio atómico R se relacionan mediante: $a = 2R\sqrt{2}$.



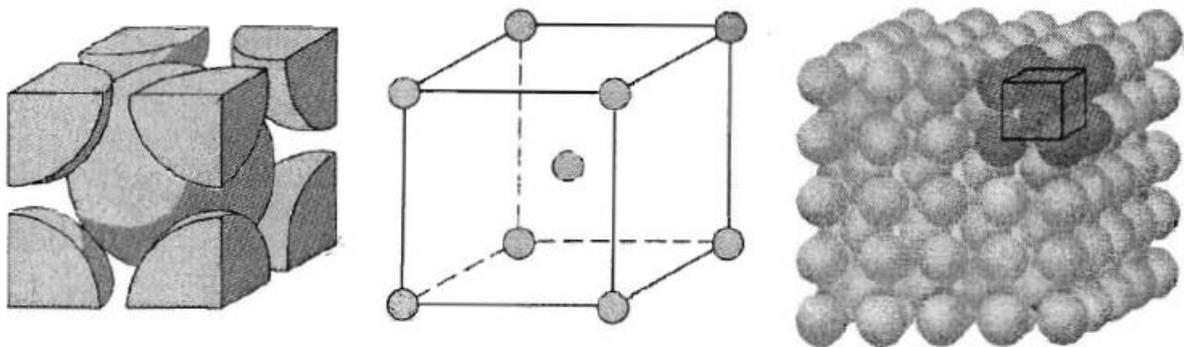
En los cristales FCC cada átomo del vértice es compartido con ocho celdillas unidad, mientras que los átomos centrados en las caras solo son compartidos con dos celdillas. Dos características importantes de las estructuras cristalinas son el número de coordinación y el factor de empaquetamiento atómico FEA. En los metales, cada átomo siempre está en contacto con el mismo número de átomos vecinos, que es el número de

coordinación. El N.C del FCC es 12. El FEA es la fracción de volumen de las esferas rígidas en una celdilla unidad. El FEA de FCC es 0.74.

$$\text{FEA} = \text{volumen de átomos en una celdilla unidad} / \text{volumen total de la celdilla unidad}$$

Estructura cristalina cubica centrada en el cuerpo o BCC

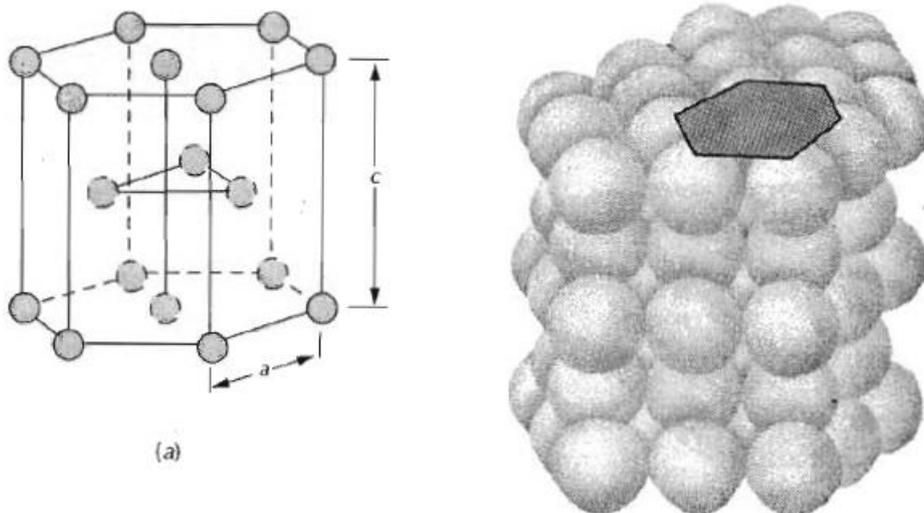
Los átomos se localizan en los ocho vértices y un átomo en el centro. Los átomos del centro y de los vértices se tocan mutuamente a lo largo de las diagonales del cubo y la longitud a de la arista de la celdilla y el radio atómico R se relacionan mediante: $a = 4R/\sqrt{3}$.



Cristalizan en esta estructura el cromo, hierro, tungsteno, molibdeno y tántalo. Cada celdilla unidad tiene asociados dos átomos, un átomo equivalente a un octavo de cada uno de los ocho átomos de los vértices y el átomo central. El número de coordinación es de 8. Mientras que el FEA es de 0.68.

Estructura cristalina hexagonal compacta o HC

Las bases superior e inferior consisten en hexágonos regulares con sus átomos en los vértices y uno en el centro, otro plano que provee de tres átomos adicionales a la celdilla unidad está situado entre ambos planos. Cada celdilla unidad equivale a seis átomos. El número de coordinación es 12 y el FEA es 0.74. Son metales HC cadmio, magnesio, titanio, zinc y cobalto.



Cálculo de densidad

El conocimiento de la estructura cristalina de un sólido metálico permite el cálculo de su densidad ρ mediante la siguiente relación: $\rho = nA/VcN_A$ siendo n el número de átomos asociados a cada celdilla, A el peso atómico, Vc el volumen de la celdilla y N_A el número de Avogadro.

Polimorfismo y alotropía

Algunos metales y no metales pueden tener más de una estructura cristalina, este fenómeno se lo conoce como polimorfismo. Si este fenómeno ocurre en un sólido elemental se denomina alotropía. La existencia de una o más estructura depende de parámetros como la presión y la temperatura. El ejemplo más común es el carbono; el grafito es estable en condiciones ambientales, mientras que el diamante se forma a presiones extremadamente elevadas. El hierro puro tiene estructura BCC a temperatura ambiente y cambia a FCC a 912°C.

Direcciones y planos cristalográficos

Para clasificar las estructuras es conveniente dividir las en grupos de acuerdo con las configuraciones de la celdilla unidad o la disposición atómica. Uno de estos grupos se basa en la geometría de la celdilla unidad, la forma del paralelepípedo. Se establece un sistema x , y y z de coordenadas planas cuyo origen coincide con un vértice de la celdilla. La geometría se define en función de 6 (seis parámetros, tres aristas a , b y c y tres ángulos interaxiales α , β y γ).

Al hablar de materiales cristalinos es conveniente especificar algún plano cristalográfico de átomos en particular o alguna dirección cristalográfica. Una dirección cristalográfica se define por una línea entre dos puntos o por un vector. Se utilizan 3 etapas para determinar los índices de las tres direcciones. Primero, en el origen de coordenadas del sistema se traza un vector de longitud conveniente, todo vector se puede trasladar a través de la red cristalina sin alterarse si se mantiene el paralelismo. Segundo, se determina la longitud del vector proyección en cada uno de los tres ejes y en función de las dimensiones a , b y c de la celdilla unidad. Luego se dividen los números o se multiplican por un factor común para reducirlos a su valor entero menor. Por último, los tres índices, sin separación, se escriben entre corchetes $[uvw]$, estos índices corresponden a las proyecciones a lo largo de los ejes x , y y z respectivamente.

La orientación de los planos cristalográficos de la estructura cristalina se representa de modo similar. También se utiliza un sistema de tres ejes y la celdilla unidad es fundamental. El índice de Miller se utiliza para especificar dichos planos. Constan de 3 índices. El procedimiento utilizado para determinar los valores de los índices es el siguiente: Si el plano pasa por el origen, se traza otro plano paralelo con una adecuada traslación dentro de la celdilla unidad o se escoge un nuevo origen en el vértice de otra celdilla. El plano cristalográfico o bien corta o es paralelo a cada uno de los tres ejes, la longitud de los segmentos de los ejes se determina en función de los parámetros de red. Se escriben los números recíprocos de estos valores, un plano paralelo a un eje se considera que lo corta en el infinito y por lo tanto el índice es cero. Se multiplican o se dividen los tres parámetros por un factor común y finalmente se escriben juntos los índices enteros dentro de un paréntesis (hkl) .

Densidad atómica lineal y planar

La densidad lineal corresponde a la fracción de longitud de línea, de una dirección cristalográfica particular, que pasa a través de los centros de los átomos. Similarmente la densidad planar es simplemente la fracción del área del plano cristalográfico ocupada por átomos. El plano debe pasar a través del centro del átomo para que este se pueda incluir.

Dichas densidades tienen gran importancia para explicar los deslizamientos, que son el fundamento del mecanismo de la plasticidad de los metales. Los deslizamientos ocurren en la mayoría de los planos cristalográficos de máximo empaquetamiento a lo largo de las direcciones que tienen el mayor empaquetamiento atómico.

Materiales cristalinos

Cuando la disposición atómica de un sólido cristalino es perfecta, sin interrupciones a lo largo de toda la muestra, el resultado es un monocristal. La mayoría de los sólidos cristalinos son un conjunto de muchos cristales pequeños o granos, este tipo de material se denomina policristalino.

Anisotropía e isotropía

Las propiedades físicas de algunos monocristales dependen de la dirección cristalográfica tomada para su medida. La direccionalidad de las propiedades se denomina anisotropía y está relacionada con la variación de la distancia atómica según la dirección cristalográfica.

Las sustancias cuyas propiedades son independientes de la dirección de la medida se denominan isotrópicas.

El grado de anisotropía se incrementa al disminuir la simetría estructural. En la mayoría de los materiales policristalinos, las orientaciones cristalográficas de los granos son al azar, en estas circunstancias, aunque cada grano sea anisotrópico, toda la muestra compuesta de un conjunto de granos se comporta isotrópicamente.

Sólidos no cristalinos

Los no cristalinos carecen de un ordenamiento atómico sistemático y regular a distancias relativamente grandes, estos materiales se denominan amorfos. Estos materiales se caracterizan por la relativamente compleja estructura atómica y molecular, que se puede ordenar con relativa dificultad.

Normalmente los metales forman sólidos cristalinos, algunos materiales cerámicos son cristalinos, mientras que otros como los vidrios inorgánicos son amorfos. Los polímeros pueden ser completamente cristalinos, enteramente no cristalinos o una mezcla de ambos.

CAPITULO 4 → “Imperfecciones en sólidos”

Todos los materiales sólidos tienen irregularidades o defectos que perturban la periodicidad del arreglo cristalino de átomos. Muchas de las propiedades de los materiales son muy sensibles al desvío de la perfección cristalina, sin embargo, algunas características específicas se consiguen deliberadamente introduciendo cantidades controladas de defectos particulares. Un “defecto cristalino” es una irregularidad de red en la cual una o más de sus dimensiones son del orden de un diámetro atómico.

Las imperfecciones cristalinas se clasifican según la geometría o las dimensiones del defecto. Los tipos diferentes de imperfecciones incluyen defectos de punto (asociados con una o dos posiciones), los de línea (en una dimensión) y los interfaciales o de límite de grano, que tienen dos dimensiones.

Defectos de punto

El más simple de este tipo de defectos es la vacante o vacante de red, lugar normalmente ocupado por un átomo ahora ausente. Se producen durante la solidificación y también como consecuencia de las vibraciones, que desplazan los átomos de sus posiciones reticulares normales. A temperatura ambiente la concentración de vacancias es pequeña, pero aumenta en forma exponencial con la temperatura, de acuerdo con la fórmula:

$$N_v = N \times \exp\left(\frac{Q_v}{kxT}\right)$$

Siendo T la temperatura absoluta, N el número total de lugares ocupado por átomo, Q_v es la energía de activación y k es la constante de Boltzmann o de los gases.

Un defecto intersticial es un átomo de un cristal que se ha desplazado a un lugar intersticial, es decir, un espacio vacío pequeño que ordinariamente no está ocupado. El aumento de sitios intersticiales ocupados produce un aumento en la resistencia de metales, la cantidad de átomos intersticiales es aproximadamente constante si se cambia la temperatura. Los átomos son de distinto tamaño que los sitios intersticiales por lo cual la región cristalina está comprimida o tensionada.

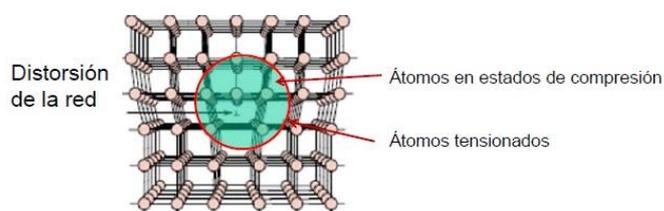
Un defecto sustitucional se origina cuando otro metal o no metal o impurezas se agregan a otro metal. Se genera cuando un átomo es sustituido con un tipo distinto de átomo. El átomo sustitucional ocupa un sitio normal en la red. Estos átomos pueden ser de mayor tamaño, lo que causa una reducción de los espacios interatómicos vecinos. Cuando son de menor tamaño causa que los átomos vecinos tengan distancias mayores. Se introducen en forma de impureza o adición de manera deliberada en una aleación. La cantidad de defectos no varía con la temperatura.

Defectos de línea (dislocaciones)

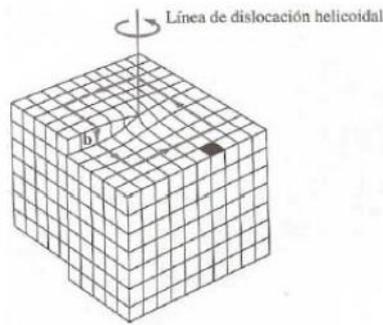
Una dislocación es un defecto lineal o unidimensional en torno a algunos átomos desalineados. Se introducen durante la solidificación del material o cuando se deforma permanentemente. Este defecto está presente en todos los materiales.

Se utilizan para explicar la deformación y el endurecimiento de los metales. Se identifican tres clases de dislocaciones: de borde o cuña, de tornillo o helicoidal y mixta.

Las dislocaciones de borde o cuña se crean por la intercalación de un semiplano extra de átomos. Los átomos situados arriba de la dislocación de línea están comprimidos, mientras que los de abajo están sometidos a tracción. La magnitud de esta dislocación decrece con la distancia a la dislocación de cuña, en las posiciones más alejadas la red cristalina es virtualmente perfecta.



Una dislocación de tornillo o helicoidal se forma al aplicar un esfuerzo cizallante o de corte. Gráficamente puede observarse como una parte de la red cristalina desliza una unidad atómica respecto de la otra parte. La distorsión atómica también es lineal y está situada a lo largo de la línea de la dislocación.



La mayoría de las dislocaciones que existen en materiales cristalinos no son propiamente de cuña ni de hélice, sino que presentan componentes de ambos tipos, se denominan dislocaciones mixtas.

La magnitud y dirección de la distorsión reticular asociada a una dislocación está representada en función del vector de Burgers, designado por la letra b .

Defectos de superficie, interfaciales o de límite de grano

Estos defectos tienen dos direcciones y normalmente separan regiones del material que tienen diferente estructura cristalina y/o orientación cristalográfica. En el límite de grano las regiones tienen diferentes orientaciones.

Los límites de grano, que es la superficie que separa los granos individuales es una zona angosta donde los átomos no tienen la distancia correcta entre sí. Cuando la diferencia de orientaciones es pequeña se denomina límite de grano de ángulo pequeño.

CAPITULO 6 → “Propiedades mecánicas de los metales”

El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (su deformación). Las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

Ensayos de cizalladura y de torsión

En los ensayos de cizalladura se utiliza simplemente una fuerza o carga impuesta paralelamente a las caras superior e inferior de la probeta. La tensión de cizalladura se calcula de acuerdo con: $\tau = \frac{F}{A_0}$ donde F es la fuerza antes mencionada y A_0 es el área de dichas caras.

La deformación de cizalladura se define como la tangente del ángulo de deformación:

$$\gamma = \tan(\theta).$$

Deformación elástica

El grado con que una estructura se deforma depende de la magnitud de la tensión impuesta. Para muchos metales sometidos a tracción, la tensión y la deformación son proporcionales según la “Ley de Hooke”: $\sigma = E\varepsilon$ donde la constante E se denomina módulo de elasticidad de Young. Cuando se cumple que la deformación es proporcional a la tensión la deformación se denomina elástica.

El módulo de elasticidad puede ser interpretado como la rigidez, o sea, la resistencia de un material a la deformación elástica. Cuanto mayor es el módulo, más rígido es el material. Esta deformación no es permanente, cuando se retira la fuerza, la pieza vuelve a la forma original.

La magnitud del módulo de la elasticidad es una medida de la resistencia a la separación de los átomos contiguos.

La tensión y la deformación de cizalladura son proporcionales entre si según la expresión: $\tau = G\gamma$ siendo G el módulo de cizalladura.

Deformación plástica

Cuando la deformación en un material ocurre más allá de un límite, la tensión deja de ser proporcional a la deformación y ocurre deformación plástica, la cual es permanente, no recuperable.

La transición elastoplástica es gradual, se empieza a notar cierta curvatura al comienzo de la deformación plástica, lo cual aumenta más rápidamente al aumentar la carga. Desde un punto de vista atómico, esta deformación corresponde a la rotura de los enlaces entre los átomos vecinos más próximos.

En los materiales cristalinos la deformación tiene lugar mediante un proceso denominado deslizamiento. En los sólidos no cristalinos ocurre por un mecanismo de flujo viscoso.

Fluencia y resistencia a la tracción

El fenómeno de fluencia es el límite donde comienza la deformación plástica. La resistencia a la tracción es la tensión máxima que puede ser soportada por una estructura a tracción. Cuando se alcanza el valor de resistencia a la tracción, la deformación plástica que habría sufrido el material sería tan grande que ya no sería útil.

Ductilidad

Es una medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura. Un material que experimenta poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil.

La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo porcentual o bien el porcentaje de reducción de área.

$\%EL = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$, alargamiento relativo porcentual y $\%AR = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100$, porcentaje de reducción de área.

Resiliencia

Es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicar un esfuerzo. El módulo de resiliencia U_r es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico.

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

Es el área bajo la curva del ensayo de Tracción durante el periodo elástico.

Tenacidad

Es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura.

Es el área bajo la curva del ensayo de Tracción.

Dureza

Es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica localizada.

Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción

$$TS(\text{psi}) = 500 \times HB$$

$$TS(\text{MPa}) = 3,45 \times HB$$

Factor de seguridad

Durante el diseño de piezas o estructuras se debe tener en cuenta la incertidumbre en cuanto a la magnitud de la fuerza aplicada en servicio, ya que usualmente los cálculos de tensiones se basan en aproximaciones. Es por esto que se establece una tensión de seguridad o tensión de trabajo para cada material.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N}$$

Siendo N el factor de seguridad. Es necesario elegir un valor apropiado de N ya que, si este es demasiado grande, entonces el componente puede estar sobredimensionado. Normalmente N está comprendido entre 1,2 y 4,0, siendo 2 un buen promedio.

CAPITULO 7 → “Dislocaciones y mecanismos de endurecimiento”

Conceptos básicos

Los dos tipos básicos de dislocaciones son las de cuña y la helicoidal. En una dislocación de cuña existen distorsiones localizadas de la red alrededor del borde de un semiplano adicional de átomos. Una helicoidal puede ser visualizada como el resultado de una distorsión de cizalladura, la línea de la dislocación pasa a través del centro de una espiral, formada por rampas de planos atómicos.

La deformación plástica corresponde al movimiento de un gran número de dislocaciones. Este proceso se denomina deslizamiento mientras que el plano a lo largo del cual se mueve la dislocación se denomina plano de deslizamiento.

El número de dislocaciones, o sea, la densidad de dislocaciones de un material se expresa como la longitud total de dislocación por unidad de volumen o, el número de dislocaciones que cruzan la unidad de área de una sección al azar.

Características de las dislocaciones

Cuando los metales son deformados plásticamente, una fracción de la energía de deformación (aprox el 5%) es retenida internamente, el resto es disipado en forma de calor. Durante dicha deformación el número de dislocaciones aumenta dramáticamente. Los límites de grano, así como los defectos internos e irregularidades superficiales tales como rayaduras y muescas, actúan como concentradores de tensiones, facilitando así la deformación de dislocaciones durante la deformación.

Sistemas de deslizamiento

Las dislocaciones no se mueven con el mismo grado de facilidad sobre todos los planos cristalográficos de átomos y en todas las direcciones cristalográficas. Normalmente existe un plano preferido, llamado plano de deslizamiento y su dirección, dirección de deslizamiento.

Esta combinación plano-dirección se denomina sistema de deslizamiento.

Depende de la estructura cristalina de los metales y es tal que la distorsión atómica que acompaña al movimiento de una dislocación es mínima, Para una determinada estructura cristalina, el plano de deslizamiento es el plano que contiene la distribución más densa de átomos.

La dirección de deslizamiento corresponde a la dirección, en este plano, que es más compacta, es decir, que tiene mayor densidad lineal.

Los metales con estructuras cristalinas FCC o BCC tienen un número elevado de sistemas de deslizamiento. Estos metales son bastante dúctiles debido a la extensa deformación plástica que puede conseguirse en los varios sistemas. Por el contrario, los metales HC tienen pocos sistemas de deslizamiento activos y son bastante frágiles.

Deslizamiento en monocristales

Las dislocaciones de cuña, helicoidales y mixtas se mueven en respuesta a la cizalladura aplicada a lo largo de un plano de deslizamiento y en una dirección de deslizamiento. Aun cuando el esfuerzo aplicado sea una tracción o compresión pura, existen componentes de cizalladura con excepción de las direcciones paralelas o perpendiculares a la dirección de la tensión. Estas se denominan tensiones de cizalladura resueltas y sus magnitudes dependen tanto de la tensión aplicada como de la orientación del plano y de la dirección de deslizamiento en este plano.

Sigue la fórmula $\tau_R = \sigma \cos(\phi) \cos(\lambda)$ siendo ϕ el ángulo entre la normal del plano de deslizamiento y la dirección de la fuerza aplicada, y sea λ el ángulo entre la dirección de deslizamiento y la dirección de la tensión aplicada y σ dicha tensión. En general, $\phi + \lambda = 90^\circ$ (Generalmente no).

Mecanismo de endurecimiento de los metales

Para entender los mecanismos de refuerzo es importante la relación entre el movimiento de las dislocaciones y el comportamiento mecánico de los metales. En respuesta a un esfuerzo de tracción o compresión, el deslizamiento en un monocristal comienza en un sistema orientado de la forma más favorable cuando la tensión de cizalladura resuelta alcanza un valor crítico, denominado tensión de cizalladura resuelta crítica, esta representa la cizalladura mínima que se requiere para iniciar el deslizamiento.

A medida que el cristal se extiende, tanto el número de líneas de deslizamiento como la altura del escalón aumenta. En el caso de metales FCC y BCC el deslizamiento puede empezar eventualmente en un segundo sistema de deslizamiento, el cual será el siguiente en estar mejor orientado con respecto al eje de la tensión aplicada. Para cristales HC, si el sistema de deslizamiento orientado de forma más favorable es aquel en que la tensión es paralela al plano de deslizamiento o perpendicular a la dirección de deslizamiento, la tensión de cizalladura resuelta será cero.

La capacidad de un metal para deformarse plásticamente depende de la capacidad de las dislocaciones para moverse. Por ello, la resistencia mecánica puede aumentarse reduciendo la movilidad de las dislocaciones. Todas las técnicas de refuerzo se basan en la restricción y el impedimento del movimiento de las dislocaciones, lo que convierte al material en más duro y resistente.

Endurecimiento por reducción del tamaño de grano

El tamaño o el diámetro medio de los granos de un metal policristalino afecta a las propiedades mecánicas. Durante la deformación plástica, el deslizamiento o el movimiento de las dislocaciones debe ocurrir a través del límite de grano.

El límite de grano actúa como una barrera al movimiento de las dislocaciones por dos razones: Suponiendo dos granos A y B, puesto que los dos granos tienen orientaciones distintas, una dislocación que pasara al grano B tendría que cambiar la dirección de su movimiento, esto se hace más difícil a medida que aumenta la diferencia de orientación. Por último, el desorden atómico dentro del límite de grano producirá una discontinuidad en los planos de deslizamiento de un grano a otro.

Un material con grano fino es más duro y resistente que uno que tiene granos gruesos, puesto que el primero tiene un área total de límite de grano mayor para impedir el movimiento de las dislocaciones. Es decir que cualquier dislocación se moverá solamente una distancia corta antes de encontrar una frontera de grano.

En muchos materiales el límite elástico σ_y varía con el tamaño del grano, de acuerdo con la fórmula: $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-\frac{1}{2}}$.

Donde d es el valor del diámetro medio del grano y σ_0 y k_y son constantes que dependen del material.

Endurecimiento mecánico o acritud

En el periodo elástico toda deformación producida provoca un aumento de resistencia, éste fenómeno se conoce como acritud.

CAPITULO 9 → “Diagrama de fases”

En esta sección se emplea frecuentemente el término componente, que es un metal o un compuesto que forma parte de una aleación. Sistema es otro término utilizado en este contexto y tiene dos significados, por un lado, se refiere a un cuerpo específico de un material considerado y, por el otro, se relaciona con una serie de posibles aleaciones consistentes en los mismos componentes, pero sin referirse a las proporciones de los componentes de la aleación.

La disolución sólida consiste en átomos de dos tipos diferentes, los átomos del soluto ocupan posiciones intersticiales o sustitucionales en la red del disolvente y se mantiene la estructura cristalina del disolvente.

Límite de solubilidad

El límite de solubilidad es la concentración máxima de átomos de soluto que se disuelven en el disolvente a una temperatura específica para formar una disolución sólida. La adición de un exceso de soluto a este límite de solubilidad forma otra disolución sólida o compuesto con una composición completamente diferente

Fases

Una fase se puede definir como una porción homogénea de un sistema que tiene características físicas y químicas uniformes y está limitada por una superficie que la separa de cualquier otra porción. Un material puro, un sólido, un líquido, una disolución gaseosa se consideran fases.

Si en un sistema hay más de una fase, cada una de ellas tiene sus propiedades características y un límite que la separa de otras fases. En este límite aparece un cambio discontinuo y abrupto en las características físicas y químicas. Cuando en un sistema hay dos fases, no es necesario que haya diferencias en las propiedades, es suficiente que la disparidad esté en un solo tipo de estas propiedades. Si una sustancia puede existir en dos o más formas, por ejemplo, puede tener estructura FCC como BCC, cada una de estas estructuras es una fase separada porque difieren sus propiedades físicas.

La mayoría de las aleaciones son sistemas de dos o más fases.

Microestructura

Las propiedades físicas y el comportamiento mecánico de un material dependen de la microestructura. En aleaciones metálicas, la microestructura se caracteriza por el número de fases y por la proporción y distribución de esas fases. Depende del número de aleantes, de la concentración de cada uno de ellos y del tratamiento térmico de la aleación.

Equilibrio de fases

El término equilibrio de fases se refiere al equilibrio aplicado al sistema de más de una fase. Se traduce como una constante, a lo largo del tiempo, de las características del sistema. En muchos sistemas metalúrgicos el equilibrio de fases solo implica fases sólidas, en este aspecto el estado de interés se refleja en las características de la microestructura que no solo incluye las fases presentes y su composición sino las cantidades relativas de las fases y su distribución o colocación espacial.

En muchos casos, especialmente en sistemas sólidos, ocurre que el estado de equilibrio nunca se alcanza completamente, ya que la velocidad para llegar al equilibrio es extremadamente lenta, este estado se denomina estado de no equilibrio o metaestable.

Diagramas de equilibrio de fases

La mayor parte de la información sobre el control de la microestructura o estructura de fases de una aleación particular se encuentra recopilada en el llamado diagrama de fases, diagrama de equilibrio o diagrama constitucional. A partir de las transformaciones de fases, de los cambios que ocurren entre fases al modificar la temperatura (generalmente en el subenfriamiento), se originan la mayoría de las microestructuras, lo que implica la transformación de una fase a la otra o la aparición o desaparición de una fase.

Representan la relación entre la estructura y la composición y la cantidad de fases en equilibrio.

Sistemas isomórficos binarios

Se denomina aleación o sistema isomórfico binario a aquel que posee solo dos componentes y ambos tienen la misma estructura cristalina, radio atómico y electronegatividades casi iguales y valencias similares. Isomórfico hace referencia también a la solubilidad total entre los dos componentes en estado sólido y líquido. El sistema más fácil es el cobre-níquel.

Interpretación de los diagramas de fases

Conociendo la composición y la temperatura en equilibrio, los sistemas binarios, en su respectivo diagrama, suministran la siguiente información: las fases presentes, la composición de cada fase y la fracción o porcentaje de cada fase.

Fases presentes: Se traza una línea sobre el diagrama, en el punto de temperatura y composición a la cual se quiere conocer su fase y se identifican las mismas.

Determinación de composiciones de fases (en términos de la concentración de componentes): Consiste en localizar el punto temperatura-composición en el diagrama de fases.

Para el sistema monofásico (1 sola fase) la composición de la fase coincide con la composición total de la aleación.

Para un sistema bifásico (2 fases) se trazan rectas de reparto (isotermas) que se extienden a lo largo de la región bifásica y terminan en un límite de fase en cada extremo y luego, en la intersección de la recta de reparto con cada límite de fase se traza una vertical hacia el eje horizontal de las composiciones. La intersección de la vertical con el eje horizontal determina la composición de las fases presentes.

Determinación de la cantidad relativa de las fases (en términos de fracción o porcentaje): Para la región monofásica es simple, la fracción es del 1 o el porcentaje es del 100%.

Para la región bifásica es necesario aplicar un procedimiento denominado regla de la palanca: Primero se trazan rectas de reparto en el punto temperatura-concentración a través de la región bifásica (la composición total de la aleación está localizada en el segmento de recta de reparto entre límites de fase). Segundo, la fracción se calcula midiendo la longitud del segmento de la recta de reparto desde la composición inicial o central de la aleación hasta el límite de la otra fase y dividiéndolo por la longitud total del segmento. La fracción de la otra fase se determina de la misma manera. Por último, se multiplica por 100 el resultado si se quiere obtener el porcentaje de cada fase. La suma de las cantidades relativas en una región bifásica tiene que dar como resultado 1 o 100%.

La cantidad relativa está determinada por la letra W.

Propiedades mecánicas de aleaciones isomórficas

Dependen de la composición, cuando otras variables como el tamaño de grano permanecen constantes. A temperatura y composición inferiores al punto de fusión del componente de menor temperatura de fusión solo existe una fase sólida, por lo tanto, cada componente experimentará un endurecimiento sólido en disolución o incremento de la resistencia y de la dureza por adición de otro componente y disminución de la ductilidad.

Sistemas eutécticos binarios

Es otro tipo de diagrama de fases de aleaciones binarias muy común. Entre esos se encuentran los diagramas Cobre-Plata, Cobre-Zinc y Plomo-Estaño.

Cabe destacar algunas características de este tipo de diagrama; aparecen fases sólidas, líquidas y una mezcla de éstas, monofásicas y bifásicas. La solubilidad de cada una de estas fases sólidas es limitada. Aparecen la línea solvus, que separa la fase sólida y la mezcla de dos fases sólidas, la línea solidus que separa la fase

sólida con la mezcla de sólido y líquido, y la línea liquidus, que separa la fase líquida de la mezcla líquido-sólido.

La línea solidus horizontal a T_e se denomina isoterma eutéctica. Una fase líquida subenfriada se transforma en dos fases sólidas a la temperatura T_e , este proceso se denomina reacción eutéctica.

Eutéctico significa facilidad de fusión. La solidificación de un eutéctico resulta siempre en un producto bifásico, mientras que la de un compuesto puro origina una monofase.

En la construcción de diagramas de fases binarios hay que tener en cuenta que en un campo solo pueden llegar a existir en equilibrio una o a lo sumo dos fases. En los sistemas eutécticos pueden estar en equilibrio tres fases, pero solo en los puntos de la isoterma eutéctica. Otra regla general es que las regiones monofásicas están separadas por regiones bifásicas, donde aparecen dos fases simples separadas.

Desarrollo de microestructuras en aleaciones eutécticas

Al enfriar lentamente una aleación a partir del sistema eutéctico binario se generan varios tipos diferentes de microestructuras, dependiendo de la composición. Para analizar estas microestructuras se considera el diagrama Plomo-Estaño.

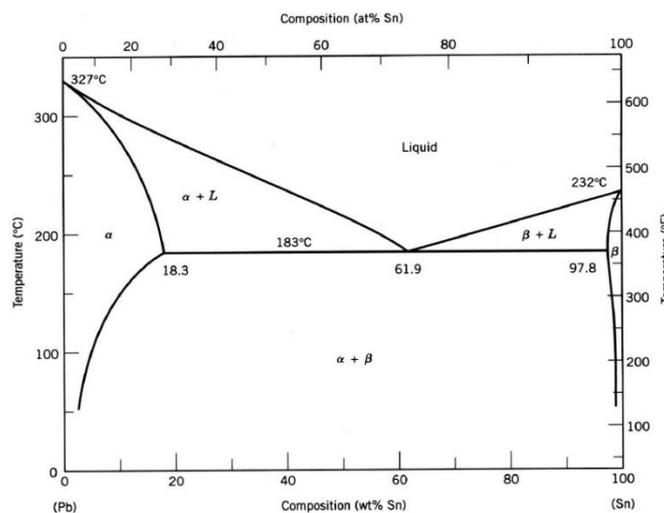
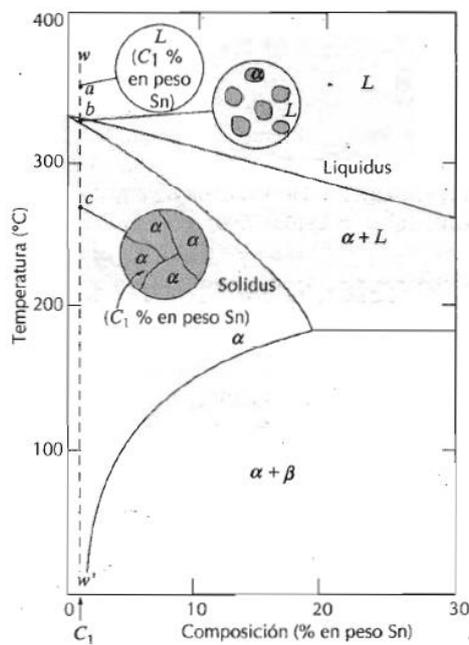
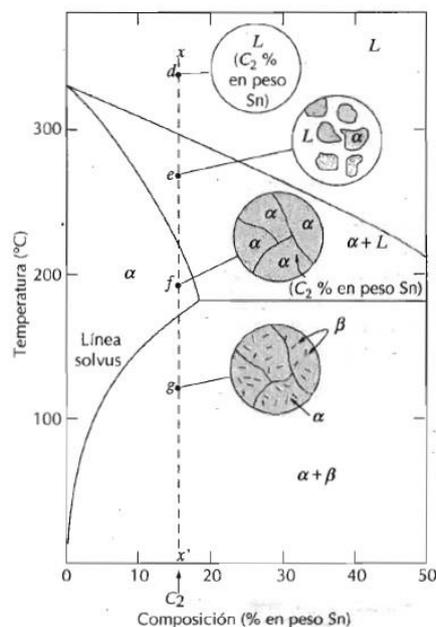


Figura 1. Sistema Plomo – Estaño

El primer caso es para un tramo de composición comprendido entre 0 y 2% en peso de Sn en la fase disolución sólida α . Se considera la aleación de composición C_1 , el enfriamiento lento a partir de la región líquida a unos 350 °C equivale a bajar por la línea ww' . La aleación permanece totalmente líquida hasta cruzar la línea liquidus a 330 °C, donde empieza a formarse fase sólida α . La composición de las fases sólidas y líquidas son distintas, ya que siguen los límites de fase liquidus y solidus. La solidificación termina cuando la línea ww' llega a la línea solidus. La aleación resultante es policristalina con composición uniforme C_1 y no experimenta cambios al enfriar hasta la temperatura ambiente.

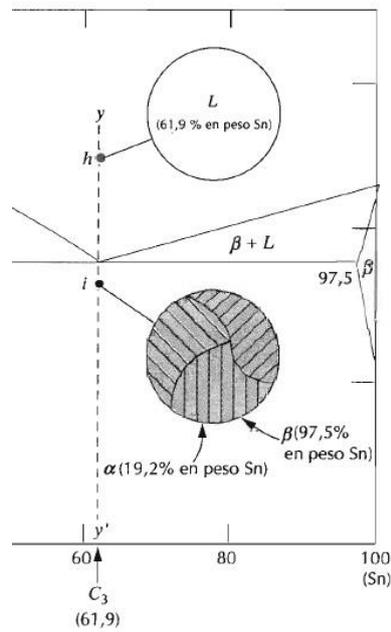


El segundo caso es considerar una composición C_2 entre 2 y 19.2 % en peso Sn y entre 97.5 y 100 % en peso Sn. Se desciende por la línea xx' , antes de la intersección de esta línea con la línea solvus ocurren cambios parecidos al caso anterior, al pasar por los puntos d, e y f. La microestructura del punto f consiste en granos α de composición C_2 . Cruzando la línea solvus, la solubilidad del sólido α disminuye y se forman pequeñas partículas de fase β (punto g).



El tercer caso implica la solidificación de la composición eutéctica, 61,9 % en peso Sn (C_3). Una aleación líquida es enfriada desde 250°C siguiendo la vertical yy' . Al bajar la temperatura no se aprecian cambios hasta llegar a la temperatura del eutéctico (183 °C). Al cruzar la isoterma del eutéctico el líquido se transforma en las fases $\alpha + \beta$ (18.3 y 97.8 % en peso Sn respectivamente). Las fases tienen distinta composición y ninguna coincide con la del líquido, ya que apareció el fenómeno de difusión atómica.

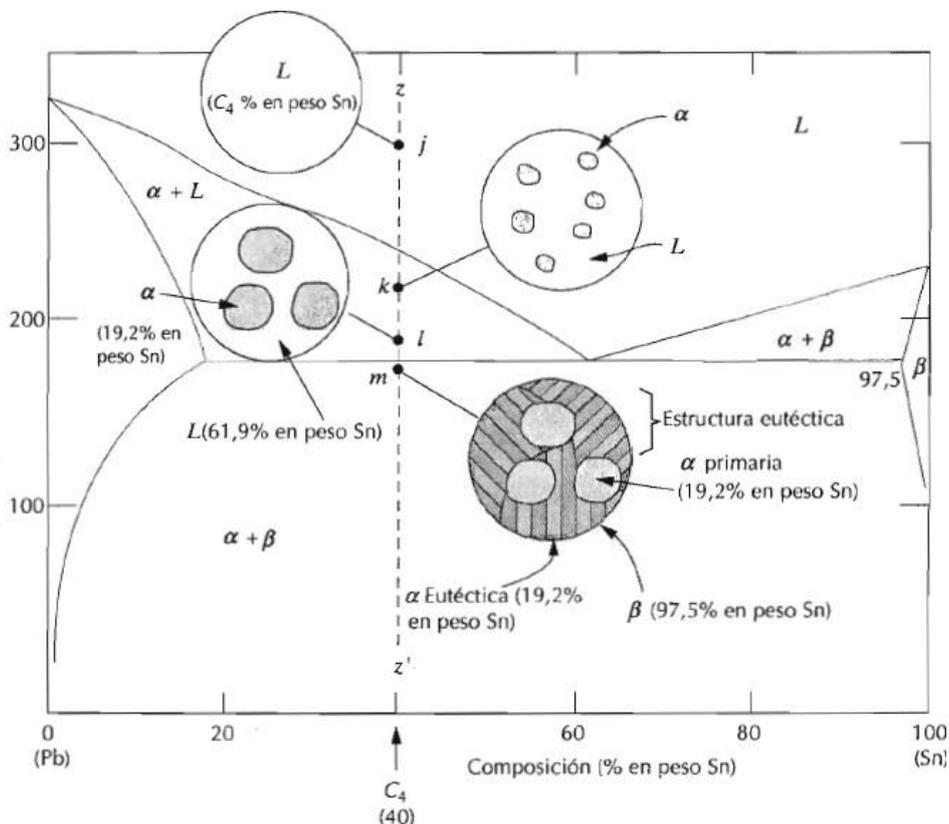
La microestructura resultante consiste en capas alternadas de α y β . Esta microestructura se llama estructura eutéctica y es característica de esta reacción. El enfriamiento de la aleación desde justo por debajo de la T eutéctica solo origina un mínimo de cambios microestructurales



El último caso microestructural incluye todas las composiciones excepto la eutéctica que, al enfriar, cruzan la isoterma eutéctica. Al disminuir la temperatura de una aleación de composición C_4 por la línea zz' a 300°C , podemos observar entre los puntos j y l que el desarrollo microestructural es similar al del segundo caso, antes de cruzar la isoterma eutéctica ya que están presentes las fases α y L y las composiciones son 18.3 y 61.9 % en peso Sn. A temperaturas inferiores, justo por debajo del eutéctico, la fase líquida que tiene la composición del eutéctico (61.9% Sn) se transforma en la estructura eutéctica ($\alpha + \beta$ eutécticos) y la fase α antes de la isoterma eutéctica se denomina α primaria.

Las fracciones α total (W_α eutéctica y primaria) y de β total (W_β) se calculan utilizando la regla de la palanca.

Las aleaciones situadas a la derecha del eutéctico, entre 61.9 y 97.5 % en peso Sn experimentan transformaciones análogas y resultan microestructuralmente parecidas, sin embargo, por debajo de la temperatura eutéctica, la microestructura consta de α y β eutécticos y β primario.



Reacciones eutectoide y peritética

Algunos sistemas de aleaciones tienen otros puntos invariantes, además del eutéctico, que implican tres fases diferentes. Por ejemplo, en el diagrama Cu-Zn, al enfriar la disolución sólida δ se transforma en dos fases sólidas γ y ϵ . La reacción se denomina eutectoide.

El eutectoide se distingue del eutéctico porque en el primero una fase sólida se transforma en dos fases sólidas, mientras que en el segundo es una fase líquida que se transforma en dos sólidas.

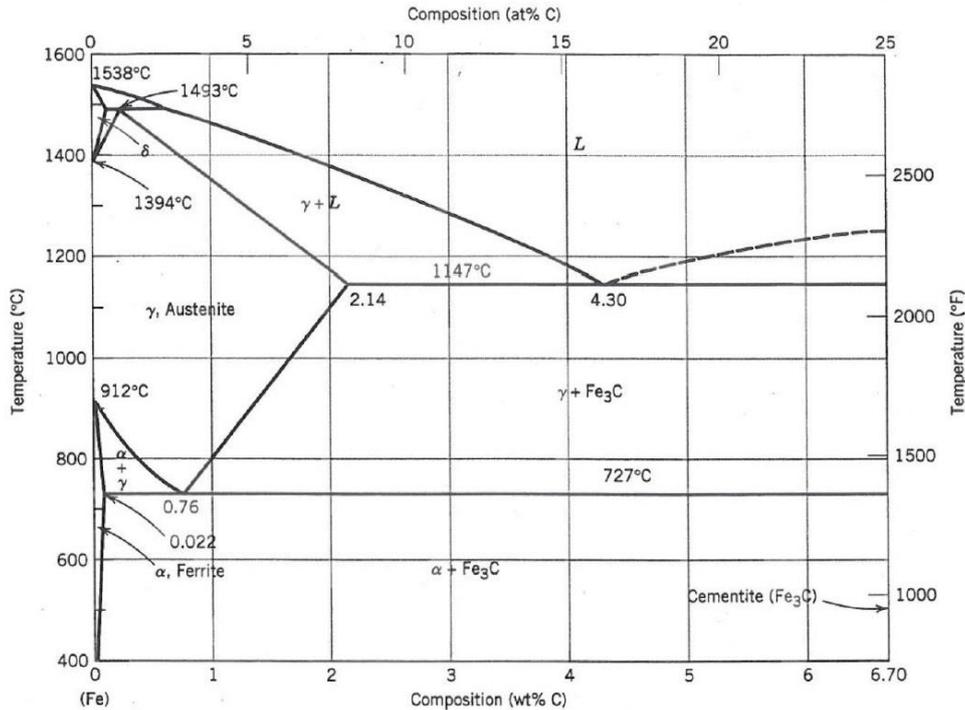
La reacción peritética es una reacción invariante que implica tres fases en equilibrio, una fase sólida se transforma en una fase sólida y en una fase líquida.

Sistema Hierro-Carbono

Es el sistema de aleaciones binario más importante ya que el 90% de las aleaciones metálicas utilizadas en ingeniería son hierro-carbono.

Diagrama de fases Hierro-Carburo de Hierro (Fe-Fe₃C)

El hierro puro al calentarse experimenta dos cambios de la estructura cristalina antes de fundir. A temperatura ambiente la forma estable se llama ferrita o hierro α y posee estructura BCC. La ferrita experimenta a 912 °C una transformación polimórfica a austenita o hierro γ de estructura FCC. La austenita persiste hasta 1394 °C, temperatura a la que la austenita vuelve a convertirse en fase BCC, conocida como ferrita δ , que funde a 1538 °C. Estos cambios se observan a lo largo del eje vertical izquierdo del diagrama.



El eje de composición en peso de C solo llega hasta 6.70% en peso de C, concentración que coincide con la del compuesto intermedio carburo de hierro, **cementita o Fe₃C**. Así, el diagrama se divide en dos partes; una rica en hierro (0 a 6.7% en peso C) y otra parte de composición comprendida entre 6.70 y 100% (grafito puro) en peso de C generalmente no mostrada en los diagramas.

Prácticamente todos los aceros y fundiciones tienen porcentaje de Carbono inferiores a 6.70% C.

El Carbono es un soluto intersticial en el hierro y forma dislocaciones sólidas con la **ferrita α** , con la **ferrita δ** y con la **austenita γ** .

En la **ferrita α** BCC solo son solubles muy pequeñas concentraciones de Carbono, la solubilidad máxima es de 0.022 % en peso C y corresponde a 727 °C. Esta fase es relativamente blanda, estable a temperatura ambiente y magnética por debajo de los 768 °C.

La **ferrita δ** es como la **ferrita α** y solo se diferencian en el rango de temperatura en el cual existen. Solo es estable a altas temperaturas (1394 °C – 1538 °C).

La **austenita** o **fase γ** del hierro no es estable por debajo de los 727 °C. La máxima solubilidad del carbono en **austenita** es 2.14% en peso de C a 1148 °C. Esta solubilidad es casi 100 veces superior que la máxima para la ferrita BCC ya que las posiciones intersticiales de la estructura FCC tienen la forma adecuada para que al llenarse de átomos de carbono la deformación impuesta a los átomos de hierro sea mucho menor. Las transformaciones de fase de la **austenita** son muy importantes en los tratamientos térmicos de los aceros. La **austenita** es no magnética.

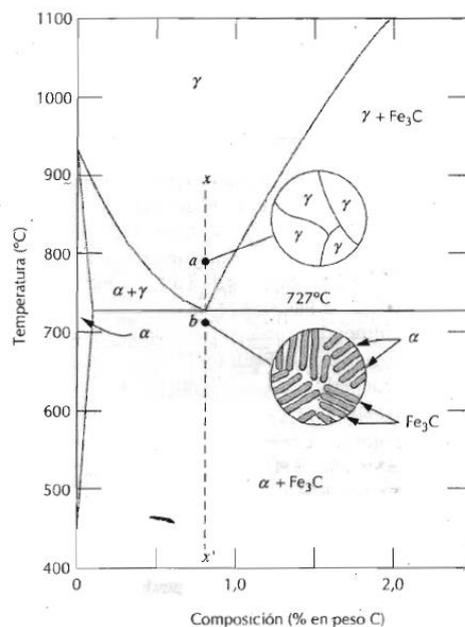
Se forma **cementita o Fe_3C** cuando se excede el límite de solubilidad del carbono en **ferrita α** por debajo de $727\text{ }^\circ\text{C}$, la composición está comprendida en la fase **$\alpha + Fe_3C$** . También se presenta con la fase **austenita γ** entre $727\text{ }^\circ\text{C}$ y $1147\text{ }^\circ\text{C}$. Es solo metaestable, esto es, permanece como compuesto a temperatura ambiente indefinidamente, sin embargo, si se lo calienta durante varios años entre $650\text{ }^\circ\text{C}$ u $700\text{ }^\circ\text{C}$ se transforma en **hierro α y grafito**.

En el diagrama Fe-C se observan regiones bifásicas y un eutéctico a $4,30\%$ en peso C y $1148\text{ }^\circ\text{C}$. La reacción eutéctica implica solidificación de líquido para generar las fases **austenita γ** y **cementita**. Se aprecia la existencia de un punto invariante de $0,77\%$ en peso C y $727\text{ }^\circ\text{C}$, esta reacción eutectoide se puede representar enfriando la fase sólida **austenita γ** , transformándose en **ferrita α** y **cementita**.

Las aleaciones férreas tienen al hierro como principal componente, pero podemos distinguir 3 grupos de acuerdo a la concentración de C. El **hierro puro** contiene menos de $0,008\%$ en peso C. Los **aceros** contienen entre $0,008\%$ y $2,11\%$ en peso C (en la práctica no exceden del $1,0\%$). Las **fundiciones** contienen entre $2,11\%$ y $6,7\%$ en peso C, las comerciales contienen menos del $4,5\%$ en peso C.

Desarrollo de microestructuras en aleaciones Hierro-Carbono

Al enfriar una composición eutectoide ($0,77\%$ en peso C) desde los $800\text{ }^\circ\text{C}$ de la región **austenita γ** equivale a descender por la vertical xx' . Inicialmente la aleación tiene la microestructura austenítica. Al enfriar no ocurre ningún cambio hasta llegar a la temperatura eutectoide $T_e\text{ }727\text{ }^\circ\text{C}$. Por debajo de esta temperatura, la austenita de composición $0,77\%$ C forma **ferrita** ($0,022\%$ C) y **cementita** ($6,7\%$ C). La microestructura formada se denomina **perlita** (es un microconstituyente).

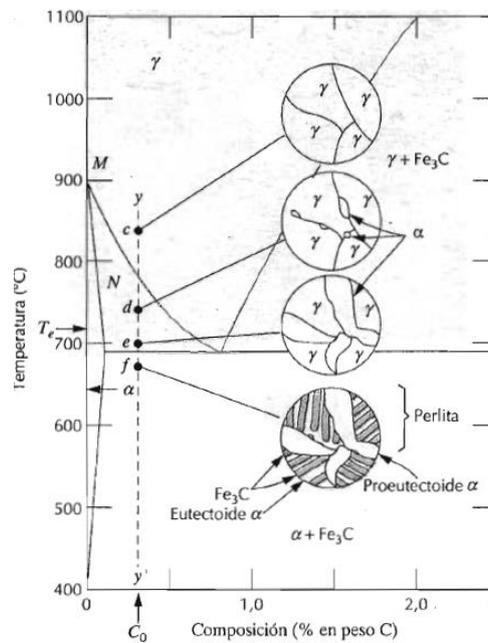


Acero hipoeutectoides

Una aleación de composición C_0 a la izquierda del eutectoide, entre $0,022\%$ y $0,77\%$ en peso C se denomina aleación hipoeutectoide. El enfriamiento de una aleación de esta composición se representa por la recta yy' . Hacia los $875\text{ }^\circ\text{C}$ la microestructura consta de granos fase **austenita γ** . A unos $775\text{ }^\circ\text{C}$ las fases **ferrita** y **austenita** coexisten, con $0,02\%$ C y $0,50\%$ C respectivamente. Cuando se llega cerca del eutectoide, pero dentro de la región **$\alpha + \gamma$** se aprecia un incremento en la composición **α** , obteniendo $0,022\%$ C y $0,77\%$ C respectivamente, trazando la recta de reparto sobre ese punto. Justo por debajo del eutectoide toda la fase **γ** a temperatura T_e y con la composición del eutectoide se transforma en **perlita ($\alpha + Fe_3C$)**. La **ferrita** de la **perlita** se denomina **ferrita eutectoide** y la ferrita formada antes de T_e se denomina **ferrita proeutectoide**.

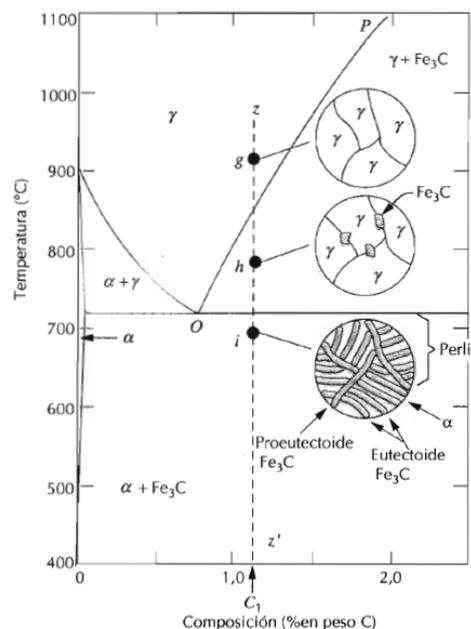
La cantidad relativa de **α proeutectoide** y **perlita** se determina trazando la recta de reparto desde el límite de fase **$\alpha - (\alpha + Fe_3C)$** a la composición del eutectoide y se aplica la regla de la palanca. Las fracciones de

ferrita total (eutectoide + pro) y **cementita** se determinan trazando la recta de reparto en la región $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ desde 0.022% C hasta 6.7% C y aplicando la regla de la palanca.



Aceros hipereutectoides

El enfriamiento desde la fase **austenita γ** de aceros de composición entre 0.77% y 2.11% C origina transformaciones y microestructuras análogas. Al enfriar a lo largo del campo de fase $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$, la fase **cementita** va creciendo. Esta cementita se denomina **cementita proeutectoide**, porque se forma antes del eutectoide. La composición de la **cementita** permanece constante 6.7% C al variar la temperatura. Al descender por debajo de la temperatura eutectoide, toda la **austenita** remanente de composición eutectoide se transforma en **perlita**. La estructura resultante consiste en **perlita** y **cementita proeutectoide**. Las cantidades relativas de microconstituyentes se calcula de modo análogo al caso de aceros hipoeutectoides.



Influencia de otros elementos de aleación

La adición de otros elementos aleantes como Cr, Ni, Ti, etc. cambian el diagrama de fases Hierro-Carbono. La magnitud de las alteraciones depende del elemento de aleación y de su composición. Uno de los cambios más importantes es el desplazamiento de la posición del eutectoide con respecto a la temperatura y a la concentración de carbono. Estos elementos de aleación no solo modifican la temperatura de la reacción eutectoide sino también las fracciones relativas de **perlita** y **fase proeutectoide**.

CAPITULO 10 → “Transformaciones de fase en los metales”

Martensita

El calentamiento y posterior enfriamiento rápido o temple, hasta temperaturas próximas a la ambiental del acero al carbono cuyo contenido es mayor a 0.2 %C, hasta fase austenita origina otro microconstituyente denominado **martensita**, que resulta como una estructura de no equilibrio de la transformación sin difusión de la austenita.

La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas que dificultan la difusión del carbono. Si hubiera difusión se formarían las fases **ferrita** y **cementita**.

La martensita posee estructura BCT o tetragonal centrada en el cuerpo. La celdilla unidad de esta estructura cristalina es un cubo, alargado en una de sus tres dimensiones, centrado en el cuerpo, esta estructura es diferente de la ferrita BCC. Todos los átomos de carbono permanecerán como solutos intersticiales en la martensita y constituyen una disolución sólida capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que implican difusión atómica.

Como la transformación no implica difusión ocurre casi instantáneamente.

Los aceros con microestructura martensítica son los más duros y mecánicamente resistentes, pero también los más frágiles y menos dúctiles. La dureza de estos aceros depende del contenido en carbono.

Martensita revenida

La martensita resultante del temple es muy dura y muy frágil y, por lo tanto, inservible para la mayoría de las aplicaciones.

CAPITULO 12 → “Aleaciones metálicas”

Conformación mecánica

La clasificación de las técnicas de conformación incluye métodos de hechurado, moldeo, pulvimetalurgia, soldadura y mecanizado. Normalmente se utilizan dos o más métodos para terminar una pieza.

Los métodos escogidos dependen de varios factores, los más importantes son las propiedades del metal, el tamaño y forma de la pieza acabada y el precio.

Hechurado

Las operaciones de hechurado cambian la forma de una preforma metálica por deformación plástica.

Las técnicas de hechurado más utilizadas son: forja, laminación, extrusión y trefilado.

La deformación se lleva a cabo mediante una fuerza o tensión externa, cuya magnitud debe exceder al límite elástico del material. Dependiendo de la temperatura a la que se realiza la deformación plástica se denomina hechurado en frío o en caliente.

Si la deformación plástica se realiza a una temperatura superior a la de recristalización el proceso se denomina hechurado en caliente. En dicho hechurado se generan grandes deformaciones puesto que el metal permanece blando y dúctil y es posible la sucesiva repetición. Además, la energía necesaria para la deformación es menor que en el hechurado en frío.

La mayoría de los metales experimentan alguna oxidación superficial, lo que origina pérdida de material y mal acabado superficial.

El hechurado en frío aumenta la resistencia y disminuye la ductilidad. Las ventajas respecto al hechurado en caliente son: alta calidad del acabado superficial, mejores y más variadas propiedades mecánicas, y gran control dimensional de la pieza acabada. Este es un procedimiento caro y laborioso.

Forja

La forja se realiza aplicando súbitamente una fuerza a dos semi-matrices en cuyo interior esta alojada la preforma metálica, de modo que se deforma ocupando la cavidad que dejan las matrices. Las piezas forjadas tienen una extraordinaria microestructura y la mejor combinación de propiedades mecánicas. Llaves para tuercas, ruedas de ferrocarriles y cigüeñales de automóviles son productos típicos que surgen de la forja.

Laminación

Es el proceso de hechurado más utilizado, consiste en pasar una preforma entre dos rodillos. Al aplicar una fuerza de compresión entre ambos rodillos, el espesor de la preforma disminuye. La laminación en frío se utiliza para fabricar laminas, cintas y hojas metálicas con acabado superficial de alta calidad. Barras de sección circular, en forma de I y railes de ferrocarriles se fabrican utilizando cilindros ranurados,

Extrusión

Una gruesa barra metálica se fuerza para que circule a través de un orificio o hilera de extrusión mediante una fuerza de compresión, aplicada con un embolo; la pieza emergente tiene la forma proyectada y ha experimentado una reducción del espesor con el correspondiente incremento de longitud. Tubos y productos tubulares de geometrías transversales más complicadas se suelen hechar por extrusión.

Moldeo

El moldeo consiste en verter un metal totalmente líquido en la cavidad de un molde que tiene la forma prevista. Después de la solidificación, el metal ha adquirido la forma del molde, aunque con alguna contracción. La técnica del moldeo se aplica cuando: La forma acabada es tan grande y complicada que los otros procedimientos son impracticables, no son importantes la calidad y la resistencia, la aleación tiene tan

baja ductilidad que sería difícil el hechurado en caliente y en frío, o, comparado con otros procedimientos el moldeo es el más económico. Normalmente se utilizan diferentes técnicas de moldeo: arena, coquilla o de precisión.

Pulvimetalurgia

Consiste en compactar el metal en polvo y después tratarlo térmicamente con el fin de densificar la pieza. Se conforman piezas prácticamente sin porosidad y propiedades comparables con las del material denso. Es muy apropiado para metales de baja ductilidad, ya que solo es necesario que en las partículas de polvo tenga lugar una pequeña deformación plástica.

Los metales que tienen altas temperaturas de fusión son difíciles de moldear y se conforman mediante pulvimetalurgia, así como las partes que requieren tolerancias dimensionales muy ajustadas, como por ejemplo engranajes y guías.

Soldadura

Se unen dos o más partes metálicas para formar una sola pieza, cuando la obtención de la pieza entera presenta inconvenientes o es cara. Se pueden soldar metales iguales o distintos. El enlace conseguido, más que mecánico, como el remachado o atornillado, es metalúrgico (existe difusión). Existen una gran variedad de procedimientos para soldar, con arco, a gas, dura y blanda.

Aleaciones férreas

Aceros

Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Las propiedades mecánicas dependen del contenido en carbono, que suele ser inferior al 1%.

Los aceros más comunes se clasifican según el contenido de carbono: bajo, medio y alto.

Aceros bajos en carbono

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono (menos de 0.25 %C). La microestructura consiste en ferrita y perlita. Son aceros relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad, son de fácil mecanizado, soldables y baratos.

Se utilizan para fabricar carrocerías de automóviles, vigas en I y laminas para construir tuberías, edificios, puentes y latas estañadas. Suelen tener un límite elástico de 275 MPa, resistencia a la tracción entre 415 y 550 MPa y ductilidad del 25% EL.

Otro grupo de aceros bajos en carbono está constituido por los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), que contienen elementos de aleación como cobre, vanadio, níquel y molibdeno en concentraciones combinadas de aproximadamente el 10% en peso. Poseen mucho mayor resistencia mecánica que los aceros bajos en carbono. Se aumenta la resistencia por tratamiento térmico y el límite elástico excede de 480 MPa, son dúctiles, hechurables y mecanizables. Son más resistentes a la corrosión.

Aceros medios en carbono

Tienen porcentajes en carbono comprendidos entre 0.26 y 0.6 %. Pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido. Se suelen utilizar en la condición de revenidos, con microestructura de martensita revenida.

Se trata de aceros de baja templabilidad, solo tratables en piezas de delgada sección y velocidades de temple muy rápidas. Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así gran variedad de combinaciones resistencia-ductilidad.

Tratados térmicamente son más resistentes que los aceros bajos en carbono, pero menos dúctiles y tenaces.

Se utilizan para fabricar ruedas y railes de trenes, engranajes, cigüeñales y otros componentes estructurales que necesitan alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad.

Aceros altos en carbono

Normalmente contienen entre 0.60 y 1.4 %C y son más duros, resistentes y aun menos dúctiles que los otros aceros al carbono. Casi siempre se utilizan en la condición templada y revenida, en la cual son especialmente resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Las herramientas y las matrices se fabrican con aceros aleados altos en carbono que contienen generalmente cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno.

Estos aceros se utilizan como herramientas de corte y matrices para hechar materiales, así como cuchillos, navajas, hojas de sierra, muelles e hilos de alta resistencia.

Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables resisten la corrosión en muchos ambientes, especialmente en la atmosfera. El cromo es el principal elemento de aleación, en una concentración mínima del 11%. La resistencia a la corrosión mejora con adiciones de níquel y molibdeno.

Se clasifican en función de la microestructura constituyente: martensítica, ferrítica o austenítica.

El tratamiento térmico de los aceros martensíticos genera martensita como principal constituyente. En los aceros inoxidables austeníticos, la austenita (fase γ) permanece estable a temperatura ambiente. Los inoxidables ferríticos están constituidos por la fase ferrita α (BCC).

Los austeníticos y ferríticos endurecen por acritud, ya que no son susceptibles al temple. Los aceros inoxidables son los más resistentes a la corrosión debido al elevado contenido en cromo y a las aleaciones níquel, también son los más utilizados. Los martensíticos y ferríticos tienen comportamiento magnético.

Las turbinas de gas, generadores de vapor, hornos de tratamiento térmico, aviones, misiles y generadores de energía nuclear están construidos con estos aceros inoxidables, debido a su resistencia a la oxidación y a la integridad mecánica en atmosferas oxidantes hasta 1000 °C.

Fundición

Son aleaciones férricas con un contenido en Carbono superior al 2.1%, sin embargo, en la practica la mayoría contiene entre 3 y 4.5 %C.

De acuerdo al diagrama de fases hierro-carburo de hierro, las aleaciones comprendidas entre ese tramo de composición funden a temperaturas entre 1150 y 1300 °C, por este motivo las fundiciones funden y se moldean con facilidad. Además, algunas fundiciones son frágiles y el moldeo es la técnica de conformación más conveniente.

En la mayoría de las fundiciones el carbono aparece como grafito y la microestructura y propiedades mecánica dependen de la composición y del tratamiento térmico.

Los tipos más comunes de fundiciones son: gris, dúctil o esferoidal, blanca y maleable.

Fundición gris

Los contenidos de Carbono y silicio varían entre 2.5 a 4 % y 1 a 3 %, respectivamente. El grafito aparece como escamas o laminas, dentro de una matriz de ferrita o perlita. Mecánicamente son comparativamente frágiles y poco resistentes a la tracción. La resistencia y la ductilidad a los esfuerzos de compresión son muy superiores.

Presentan algunas propiedades muy características y útiles, como por ejemplo la efectividad en el amortiguamiento de energía vibracional. Las bancadas para máquinas y equipos que vibran se suelen

construir de fundición. Además, posee alta resistencia al desgaste. A temperatura de colada tienen elevada fluidez, lo que permite moldear piezas de formas intrincadas y también presentan poca contracción.

Fundición dúctil o esferoidal.

Adicionando pequeñas cantidades de magnesio y/o cerio a la fundición gris en estado líquido producen diferentes microestructuras, en las que el grafito en lugar de escamas (fundición gris) forma esferoides, que originan distintas propiedades mecánicas. De este modo, resulta la fundición dúctil o esferoidal.

Es más resistente y más dúctil que la gris. Tiene propiedades mecánicas parecidas a las del acero, por ejemplo, la fundición dúctil ferrítica tiene una resistencia a la tracción comprendida entre 380 y 480 MPa y una ductilidad del 10 al 20%.

Este material se utiliza para fabricar válvulas, cuerpos de bombas, cigüeñales, pistones y otros componentes del automóvil y de maquinaria.

Fundición blanca y fundición maleable

En las fundiciones bajas en carbono y que contenga menos del 1% de Silicio, a elevadas velocidades de enfriamiento, la mayoría del carbono aparece como cementita en lugar de grafito. La superficie de la rotura de esta aleación tiene una tonalidad blanca y se denomina fundición blanca.

Como consecuencia de la cementita, la fundición blanca es extremadamente dura y muy frágil, hasta el punto de ser inmecanizable. Su aplicación se limita a componentes de gran dureza y resistencia al desgaste y sin ductilidad, como por ejemplo los cilindros de los trenes de laminación.

Generalmente la fundición blanca se obtiene como producto de partida para fabricar fundición maleable. Calentando la fundición blanca a temperaturas entre 800 y 900 °C durante periodos prolongados de tiempo en atmósfera neutra, la cementita se descompone y forma grafito en forma de racimos o rosetas dentro de una matriz ferrítica o perlítica, lo que origina resistencia relativamente alta y apreciable ductilidad o maleabilidad. Sus aplicaciones más representativas son tubos de dirección, engranajes de transmisión y cajas de diferencial para la industria automovilística, rebordes, muelles tubulares y partes de válvulas para ferrocarriles, marina y otros servicios.

Aleaciones no férreas

El acero y otras aleaciones férreas se consumen en cantidades excesivamente grandes debido a la diversidad de propiedades mecánicas, a la factibilidad de fabricación y a la economía de producción. Sin embargo, los principales inconvenientes son: Densidad relativamente elevada, conductividad eléctrica comparativamente baja y susceptibilidad a la corrosión en medios muy comunes.

Por este motivo, para muchas aplicaciones es conveniente utilizar otros metales con una combinación más apropiada de propiedades. Las aleaciones se clasifican según el componente mayoritario o según las características específicas del grupo.

Cobre y sus aleaciones

El cobre sin alear es tan blando y dúctil que es difícil mecanizar y tiene una capacidad casi ilimitada de ser trabajado en frío, además, resiste muy bien la corrosión en la mayoría de los medios.

La aleación más común es el latón, donde el Zinc actúa de soluto como principal elemento de la aleación. Según el diagrama de fases Cu-Zn, la fase α es estable a concentraciones de un 35% Zn. Esta fase tiene estructura FCC y los latones α son relativamente blandos, dúctiles y fáciles de hechar en frío. Los latones con mayor concentración de zinc contienen las fases α y β' a temperatura ambiente. La fase β' tiene estructura BCC ordenada y es más dura y resistente que la fase α . El latón naval, de cartuchería, el metal Muntz y el metal dorado son algunos de los latones más comunes de color amarillo. Sus principales usos son: bisutería, municiones, radiadores de automóvil, instrumentos musicales y monedas.

Los bronce son aleaciones cobre con estaño, aluminio, silicio y níquel. Son más resistentes que los latones y tienen gran resistencia a la corrosión. Generalmente se aplican cuando se requiere elevada resistencia a la corrosión y buena resistencia a la tracción

Aluminio y sus aleaciones

Se caracterizan por su relativamente baja densidad, elevadas conductividades eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios. Muchas de estas aleaciones se hechuran con facilidad debido a la elevada ductilidad.

Los principales elementos de aleación son cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc. Algunas de las aplicaciones más comunes son: partes estructurales de los aviones, latas para bebidas refrescantes, partes de carrocerías de autobuses y de los automóviles (culatas, pistones y colectores de escape).

Magnesio y sus aleaciones

La densidad del magnesio es la menor de los metales estructurales, por lo tanto, las aleaciones se utilizan por su bajo peso. El magnesio tiene estructura HC, relativamente blanda y con pequeño módulo elástico. La conformación se realiza por moldeo o hechurado a temperaturas entre 200 y 350 °C. Químicamente, las aleaciones de magnesio son relativamente inestables y especialmente susceptibles a la corrosión marina y razonablemente resistentes en condiciones atmosféricas.

Aluminio, zinc, manganeso y algunas tierras raras son los principales elementos de aleación. Se utilizan para fabricar aviones, misiles, maletas y ruedas de automóviles.

Titanio y sus aleaciones

Constituyen materiales de ingeniería relativamente nuevos que poseen una extraordinaria combinación de propiedades. Las aleaciones de titanio son extremadamente resistentes, a temperatura ambiente alcanzan hasta 1400 MPa. Además, son muy dúctiles y fácilmente forjables y mecanizables.

La principal limitación es la reactividad química a elevada temperatura con otros materiales. A pesar de esto, la resistencia a la corrosión a temperatura ambiente es extraordinariamente elevada, suelen ser inmunes a ambientes atmosférico, marino y a gran variedad de industriales. Se utilizan extensamente en estructuras de aviones, vehículos espaciales y en industrias petrolíferas y químicas.

Otras aleaciones no férreas

El níquel y sus aleaciones son muy resistentes a la corrosión en la mayoría de los ambientes. Se utiliza como recubrimiento para prevenir la corrosión de otros metales. El monel es una aleación base níquel que contiene 65%Ni y 28%Cu (el resto es Fe), ofrece gran resistencia mecánica y elevada resistencia a la corrosión, utilizada en la fabricación de bombas y válvulas (en contacto con medios ácidos o petróleo).

El plomo, el estaño y sus aleaciones se utilizan como materiales de ingeniería. Son mecánicamente blandos y plásticos, con baja temperatura de fusión, muy resistentes a la corrosión ambiental. Muchas soldaduras son aleaciones de plomo y estaño que tienen puntos de fusión bajos. Las aplicaciones comprenden protección para rayos X, acumuladores y recubrimientos. La principal aplicación del estaño radica en la fabricación de hojalata para contener alimentos.

El zinc puro también es un metal relativamente blando, con baja temperatura de fusión. Es susceptible a corroerse. El acero galvanizado es una lámina de acero al carbono recubierta con una delgada capa de zinc, para protegerlo. Las aplicaciones típicas del acero galvanizado son laminas, vallas, puertas, tornillos, etc. Las aleaciones de zinc se utilizan para fabricar candados, partes del automóvil y equipos de oficina.

“Mecánica de fractura”

Denominamos fractura al fenómeno de separación de un cuerpo en dos o mas partes. La caracterización y estudio de estos fenómenos se denomina mecánica de fractura.

Generalmente la separación de un cuerpo se produce por la propagación de una o mas fisuras o grietas a través del material. Por ello, la mecánica de fractura se dedica al estudio del comportamiento de las fisuras u otros defectos en los materiales.

¿Bajo qué circunstancias una fisura va a propagarse y generar la fractura de un cuerpo?

Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM)

Los materiales poseen defectos que concentran y magnifican las tensiones aplicadas a nivel local. Las fuerzas externas son las que generan el crecimiento de una fisura, mientras que los materiales poseen una resistencia intrínseca al crecimiento de las fisuras. Esta resistencia depende de sus características, composición química, tratamiento termo-mecánico, etc.

La ecuación fundamental de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica relaciona los parámetros del material (K) con la tensión aplicada (σ) y los tamaños de fisura (a).

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \rightarrow \text{Válida para placa infinita con fisura central a tracción}$$

Denominando K como el Factor de Intensidad de Tensiones.

Cada geometría y combinación de cargas y fisuras tiene su propia expresión de K . Para cada situación habrá un factor de intensidad de tensiones aplicado (K_{AP}) en función de la tensión aplicada y el tamaño del defecto presente en la estructura.

Esto nos lleva al Criterio de Fractura:

$$K_{AP} > K_C$$

Siendo K_C el Factor Critico de Intensidad de Tensiones.

Si en un momento dado, el K aplicado supera al K critico se producirá la fractura. El K_C es una propiedad del material y es el limite para todas las combinaciones posibles de tensión-fisura.

No debe confundirse con el Factor de Intensidad de Tensiones K_T que indica como se eleva la tensión por la presencia de discontinuidades geométricas como agujeros o radios de encuentro.

El valor de K está asociado a la tenacidad a la fractura de un determinado material (no debe confundirse con la tenacidad ni tenacidad al impacto).

Determinación del K_C

Se determina de manera experimental a través de ensayos normalizados de alta complejidad. La norma ASTM E-399 define el procedimiento, el instrumental a utilizar y la geometría de las probetas.

Las probetas cuentan con una entalla y se le realiza un proceso de pre-fisuración por fatiga. La probeta es sometida a esfuerzos de tracción de baja intensidad, que forman en la punta de la entalla una fisura. No hay otro método capaz de producir una discontinuidad tan aguda en un material

Luego, la probeta se pre-fisurada se somete a un ensayo de tracción mientras se registra la carga y la apertura de la fisura. Para obtener el valor de K_C :

$$K_C = \left(\frac{F_q}{\sqrt{B \times W}} \right) \times f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Siendo F_q la fuerza máxima en el registro del ensayo, a la longitud de la fisura antes de la propagación, W el ancho de la probeta, B el espesor de la probeta y $f(a/w)$ el factor geométrico en función del tamaño de la probeta y el largo de la fisura.

Limitaciones de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica

La presencia de una fisura genera una elevación de la tensión alrededor de la punta de la misma esto lleva a que la tensión supere la tensión de fluencia del material y se produzca deformación plástica.

Las ecuaciones de las que deriva K requieren que la zona deformada plásticamente en los alrededores de la fisura sea relativamente pequeña. Esto puede llevar a que las probetas sean excesivamente grandes si queremos cumplir con los requisitos de deformación plana

$$a, B, W - a > 2,5 \times \left(\frac{K_C}{\sigma_{fluencia}} \right)^2$$

Siendo a el largo de la fisura, B el ancho de la probeta, $W-a$ el ligamento remanente y $\sigma_{fluencia}$ la tensión de fluencia del material.

Crecimiento estable de fisuras

Relacionando el concepto de K_C con el crecimiento de fisuras por fatiga llegamos a la Ley de Paris:

$$\frac{\partial a}{\partial N} = C (\Delta K)^m$$

La ecuación relaciona la velocidad de crecimiento de la fisura con la variación de K . Las constantes C y m se definen experimentalmente y dependen de las condiciones de carga, ambiente, frecuencia, temperatura, etc.

Al existir una relación entre la tensión y el K aplicado, la aplicación de una carga variable en el tiempo (cíclica) da lugar a una variación cíclica de K .

Vemos que $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ e integrando la ecuación podemos determinar la cantidad de ciclos que puede soportar el material hasta que la fisura llegue al valor crítico, luego:

$$N = \frac{1}{C \pi^{\frac{m}{2}} (\Delta \sigma)^m} \int_a^{a_c} \frac{da}{a^{m/2}}$$

Conociendo las variaciones en las tensiones aplicadas y sabiendo la longitud crítica de fisura para un material, la Ley de Paris puede utilizarse para establecer los intervalos de inspección de equipos y componentes, de tal forma que tengamos tiempo de detectar las fisuras y monitorear su crecimiento.

- K_C es un indicador de la tenacidad a la fractura del material
- K_C se obtiene de ensayos normalizados
- K_C es una propiedad del material
- La fractura se produce cuando $K_{AP} > K_C$
- La ley de Paris predice el crecimiento estable de fisuras en procesos de fatiga
- La LEFM se enfoca en materiales frágiles debido a sus requisitos estrictos de validez.

Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM)

Para poder caracterizar la fractura de materiales de alta ductilidad se llevó al desarrollo de la Mecánica de Fractura Elastoplástica.

En materiales dúctiles la fisura puede propagarse de manera estable, con grandes deformaciones plásticas alrededor de la fisura, lo que se conoce como “crack blunting”.

Criterios de diseño

Debido al desarrollo de la mecánica de fractura, han sido incluidos los defectos de las estructuras y piezas en el diseño. Los dos criterios de diseño basados en la mecánica de fractura son:

Leak-before-leak

Conocido como “filtrar antes de la fractura”, se utiliza en cañerías y recipientes sometidos a presión. El objetivo es diseñar las paredes de un espesor (e) tal que no supere la longitud crítica de la fisura del material (a_c):

$$e < a_c$$

De esta manera, si tenemos una cañería fisurada, la fisura podrá crecer dentro de la pared del caño y llegará al exterior, produciendo una fuga de fluido; la cual podrá observarse en los instrumentos de control o incluso visualmente.

En cambio, si el espesor del caño es mayor que la longitud crítica, la fisura crecerá de manera estable dentro de la pared y cuando alcance el valor crítico, se propagará de manera instantánea; provocando la falla catastrófica del componente.

Como la fisura nunca llega al borde exterior, no tenemos manera de saber qué es lo que está pasando, salvo que hagamos una inspección por ultrasonido o emisión acústica (muy costosas).

Daño tolerable

Se utiliza en aeronáutica y generación de energía nuclear, entre otros rubros de la ingeniería.

Este criterio plantea un enfoque global, en el cual las piezas y componentes de un sistema se diseñan reconociendo la existencia y propagación de fisuras. Para esto, se toman en consideración las propiedades de los materiales (tensión de fluencia, K crítico, etc) y se diseñan las piezas tratando de entorpecer el crecimiento de las fisuras.

Además, se establecen los tamaños aceptables de fisuras, teniendo en cuenta el riesgo asociado y se determinan los intervalos de inspección.

Como ejemplo tenemos el avión comercial Airbus A-380, en el cual su fuselaje está fabricado de un compuesto diseñado para dificultar el crecimiento de las fisuras. Cada componente del avión tiene establecidos intervalos de inspección y longitudes aceptables de fisura, esto quiere decir que se sabe que el avión tiene fisuras, pero se deja que siga volando ya que no hay riesgo de falla.

“Fatiga de metales”

La mayoría de componentes de máquinas y estructuras están sometidos a tensiones que se repiten sistemáticamente y producen la rotura del material (aun para valores menores a los límites elásticos de tracción y compresión).

La fractura se produce en forma brusca y sin deformación previa del metal, este tipo de rotura se denomina de fatiga o rotura por tensiones repetidas.

Los esfuerzos dinámicos que producen las fracturas por fatiga pueden ser de tracción, compresión, torsión y flexión, varían de un máximo a un mínimo y pueden presentarse en forma simple o combinada. En general, pueden repetirse en tiempos distintos, aunque sin representados en forma de senoide (en términos de ciclos por segundo).

Se pueden considerar tres formas de sollicitación en función del tiempo:

Alternadas

Pueden ser simétricas y valores extremos iguales de signo contrario. La amplitud del ciclo estará dada por la diferencia entre los valores límites

$$R_m = \frac{a_1 + (-a_2)}{2} = 0 ; R_a = a_1 + a_2$$

También pueden ser simétricas, siendo:

$$R_m = \frac{a_1 + (-a_2)}{2} > 0 ; R_a = a_1 + a_2$$

Intermitentes

Los esfuerzos siempre poseen el mismo sentido y varían a un valor positivo o negativo:

$$R_m = \frac{a_1}{2} ; R_a = a_1$$

Pulsatorias

El valor mínimo es diferente de cero y tiene lugar entre un valor medio no nulo, ya sea positivo o negativo:

$$R_m = \frac{a_1 + a_2}{2} ; R_a = a_1 - a_2$$

Observación: Si se representan los esfuerzos y las deformaciones, se obtienen diagramas cíclicos; correspondiendo un ciclo a una alternancia o periodo de esfuerzo.

Si el esfuerzo estático es menor que la amplitud del alternativo, se obtienen solicitaciones alternadas, mientras que, si es igual a la amplitud del esfuerzo alternativo, el esfuerzo es intermitente; finalmente, si el esfuerzo estático es superior a la amplitud del alternativo, las sollicitaciones son pulsatorias.

Proceso de la fatiga

Se desarrolla en diferentes etapas, cuyo desarrollo es altamente dependiente de la preexistencia de fisuras en el componente y del nivel de tensiones aplicados.

Si las tensiones se mantienen por debajo del límite elástico, lo cual insumirá hasta la falla al menos $>10^4$ ciclos. Esto se denomina “Fatiga de altos ciclos” (ejes rotativos). Mientras que, si el proceso involucra ciclos de carga superiores al límite elástico, esto provoca la fractura en $<10^4$, proceso conocido como “Fatiga de bajos ciclos” (componentes de turbinas, estructuras de aviones).

Período de “Nucleación”

Comienza en la iniciación de la aplicación de los esfuerzos alternados que se traduce en deslizamientos plásticos a nivel microestructural, más o menos extensos, actuando sobre la amplitud y la temperatura del material. Cuando el esfuerzo se mantiene durante demasiado tiempo se produce la rotura por descohesión, este es el comienzo de la fisuración.

La fisura se nucleará en sitios donde el material presente fallas, defectos microscópicos o zonas de concentración de tensiones. Todo esto no es válido si el cuerpo tiene fisuras preexistentes o si el esfuerzo supera el límite elástico (la fisuración se produce desde el comienzo).

Considerando la situación de cuerpos sin fisuras preexistentes y niveles de cargas por debajo del límite elástico, la fisuración dependerá de las características geométricas de las superficies. Esta condición es descrita por el **Factor de Concentración de Tensiones**.

Factor de Concentración de Tensiones

Cuando una pieza sufre la acción de una carga, se desarrollan en su interior tensiones que transmiten sus efectos a todos los puntos del material. No siempre se distribuyen en forma regular y homogénea por toda la pieza, sino que influyen en su propagación los obstáculos que se opongan a su normal transmisión, ver figura:

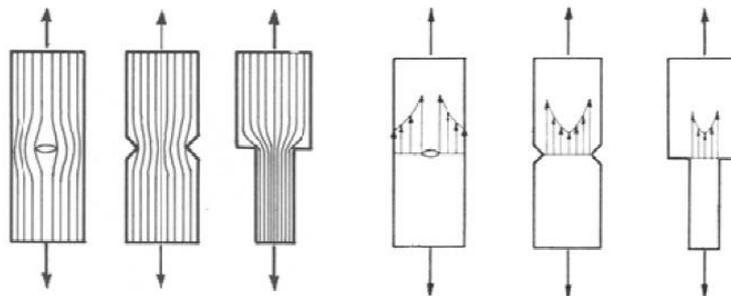


Figura 2: Izq) líneas de tensión en una barra traccionada con entalla o cambio de sección. Der) esquema de distribución de tensiones.

La relación entre la máxima tensión en el punto de concentración de tensiones y el promedio que soporta el material en la sección mínima se denomina Factor de Concentración de Tensiones K_T

$$K_T = \frac{R_m}{R_0}$$

Donde R_m es la tensión máxima y R_0 la tensión promedio.

Si el cuerpo sometido a tensiones cíclicas posee un concentrador de tensiones : $K_T = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$

Siendo a la semilongitud del concentrador de tensiones y ρ_t el radio mínimo del concentrador de tensiones.

Para la determinación del Factor de Concentración de Tensiones existen numerosas tablas y esquemas que permiten obtenerlos para diferentes tipos de piezas y posición y formas geométricas de concentradores.

Periodo de “fisuramiento”

En este periodo conocido como “dañado” o “fisuración progresiva”, la fisura que se ha desarrollado en el periodo anterior se propaga de manera estable por el material bajo la acción de esfuerzos repetidos.

La propagación está controlada por el Factor Crítico de Intensidad de Tensiones K_C (mientras el factor K se mantenga por debajo del factor crítico). El crecimiento de fisuras en función del número de ciclos, se relacionan con la variación de K mediante la Ley de Paris:

$$\frac{\partial a}{\partial N} = C (\Delta K)^m$$

Siendo a la longitud de la fisura, N el número de ciclos y C y m constantes.

Periodo de Crecimiento Inestable de la Fisura

Cuando la fisura haya progresado hasta alcanzar una longitud crítica, se inicia la fractura. Aquí el factor K alcanza el valor crítico, entonces la fisura se inestabiliza y crece a velocidad de sonido y produce una fractura frágil. La fractura se producirá de manera abrupta, se produce por la reducción progresiva de la sección resistente.

Límite de fatiga

Para cada metal sometido a esfuerzo variable, se admite que existe un límite de resistencia a la fatiga, que corresponde a la máxima amplitud del esfuerzo que puede aplicarse “indefinidamente” sin provocar la rotura.

Límite Restringido de Fatiga

Se considera la amplitud máxima de la carga que corresponde a la rotura o no rotura al cabo de un número dado de ciclos. El número de ciclos tiene en cuenta las condiciones de servicio.

Frecuentemente se traduce el número de ciclos por “duración de la vida”, que corresponde a la utilización normal de la máquina, expresada en horas.

Diagrama de Smith

Cuanto mayor es la carga estática, menor es la carga alternativa que constituye el límite de fatiga. Si se quieren representar las variaciones del límite de fatiga en función del valor del esfuerzo estático, y cuando el valor medio de los esfuerzos aumenta, el margen límite disminuye de manera proporcional.

El diagrama de Smith presenta igual escala de tensiones en sus ejes coordenados. En el eje X (abscisas) se muestra la variación del valor medio del esfuerzo alternativo, y en el eje Y (ordenadas) el rango de esfuerzos máximos y mínimos (tracción o compresión) para alcanzar el límite de fatiga.

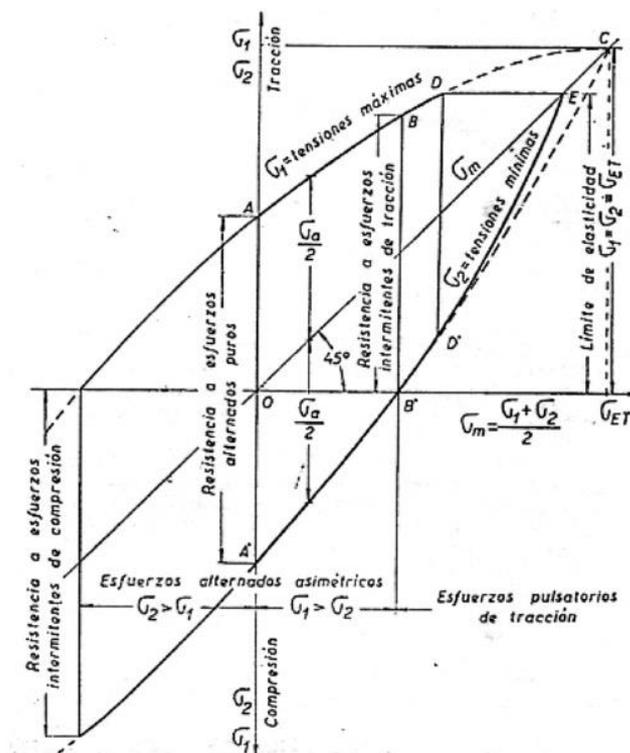


Diagrama de Fatiga de Whöler

Presenta en su eje Y los esfuerzos y el número de ciclos acumulados en el eje X. Los resultados de los ensayos de fatiga se sitúan sobre una curva que presenta una asíntota (para los aceros) y que divide el plano del diagrama en dos regiones: Una región superior correspondiente a condiciones para las cuales las probetas no hubieran podido resistir sin romperse y otra región inferior en la que las probetas no se rompen.

El Límite de Fatiga corresponde a la asíntota horizontal de la curva.

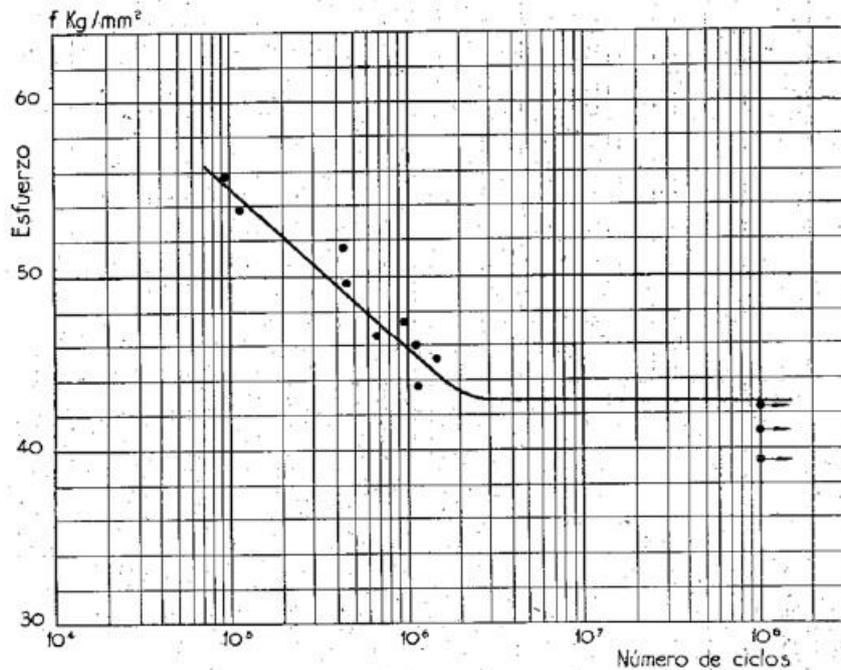


Fig. 7: curva de fatiga en abscisas logarítmicas para un acero con 0,1 %C, 3% Ni, 0,5 % Cr; templado en aceite.

Los números de ciclos se representan en escala logarítmica. La curva presenta una parte recta e inclinada mientras NO se alcanza el Límite de Fatiga y una parte recta, cuando se alcanza el mismo.

Detección de las grietas de Fatiga

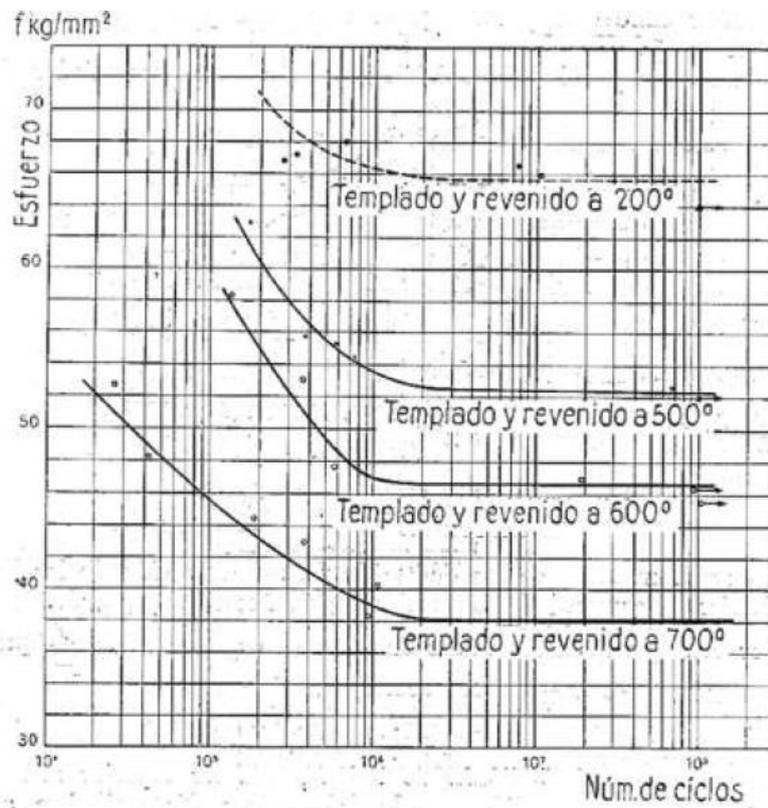
Al ser las grietas de fatiga extremadamente finas, su detección es una operación muy delicada. Cuando es posible percibirla a simple vista la pieza está condenada a una rotura inminente. Algunos métodos de detección de grietas pueden ser: Examen superficial (inspección macroscópica), examen enarenado (sumergir la pieza en petróleo y arenado), examen por fluorescencia (tintas penetrantes), partículas magnéticas, método de ultrasonido, rayos X, etc.

Efectos que varían la Resistencia a la Fatiga

Efecto del tratamiento térmico

Los valores de fatiga varían con la composición del material, estructura del grano y tratamiento térmico.

Se comprobó que los aceros de aleación o con alto contenido de carbono mejoran su resistencia hasta un 200% al ser tratados térmicamente.



Efectos de la superficie

Prácticamente todas las fracturas en metales se inician en la superficie.

El grado de terminado superficial que se les da a las probetas es de gran importancia en el ensayo de fatiga. La vida de aquellos que presentan sus superficies pulidas al máximo es mayor que las de pulido corriente y ofrecen mayor resistencia que las que están simplemente torneadas (por el trabajo de torno, la resistencia a fatiga disminuye como consecuente del arranque de viruta, afectando a la superficie hasta cierta profundidad).

Efectos metalúrgicos

Las propiedades de Fatiga se correlacionan con las propiedades de tracción. Dicha relación se suele llamar "relación de fatiga". En general, el límite de fatiga para aceros laminados o forjados es aprox. igual al 50% de la resistencia a tracción para probetas NO entalladas, mientras que del 20 al 30% para entalladas.

Efectos de la corrosión

Si la probeta es atacada por un agente corrosivo, la resistencia disminuye, pudiendo reducirse hasta una tercera parte que un ensayo al aire. El ataque corrosivo produce generalmente la picadura de las superficies metálicas, las cuales actúan como entallas y aminoran la resistencia a fatiga.

Efectos de tipo de cargas

La resistencia a la tracción-compresión es la misma que para flexión. La resistencia a la fatiga por torsión es menor que la obtenida por flexión, en un valor medio de 55% para aceros al carbono.

Ensayos

Ensayo de tracción

Es uno de los ensayos mecánicos esfuerzo-deformación más comunes. Este ensayo sirve para determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño.

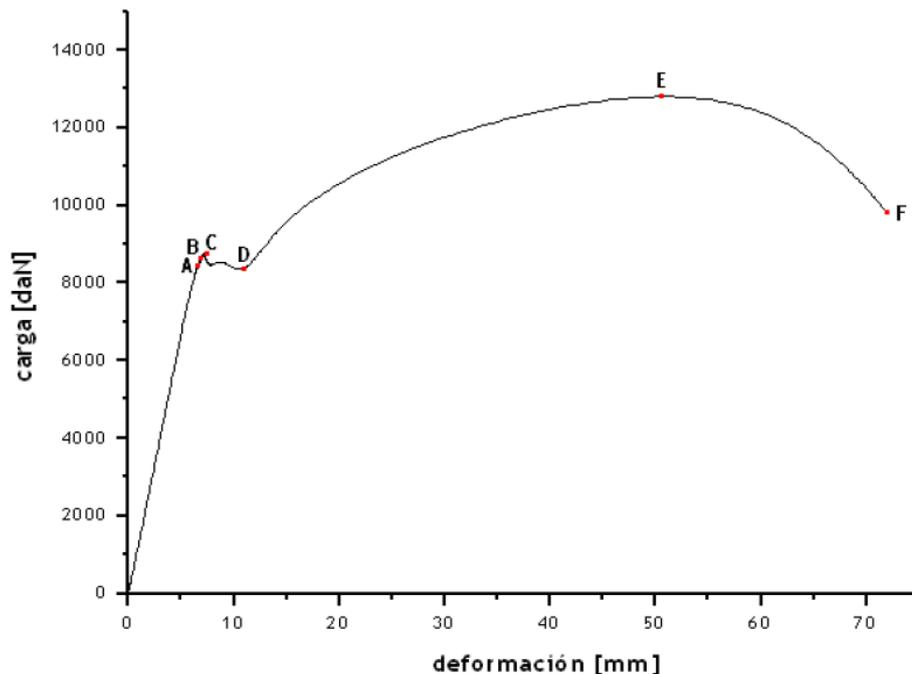
El ensayo consiste en deformar una probeta hasta su punto de rotura, con una carga de tracción que aumenta gradualmente y que es aplicada uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta. Generalmente la sección de la probeta es circular, pero también se utilizan probetas de sección rectangular.

Durante el ensayo la deformación esta confinada en la región más estrecha del centro, la cual tiene una sección uniforme a lo largo de su longitud. Para minimizar los factores geométricos que afectan el ensayo, la carga y el alargamiento son normalizados para obtener los parámetros de tensión y deformación nominales.

La tensión nominal se define mediante la relación: $\sigma = \frac{F}{A_0}$ siendo F la carga instantánea aplicada perpendicularmente a la sección de la probeta y A_0 el área de la sección original.

La deformación nominal se define como $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ siendo l_0 la longitud inicial y Δl la diferencia entre la longitud inicial y la longitud instantánea, es decir, el alargamiento producido por deformación.

Diagrama carga-deformación



El gráfico se divide en dos partes: “Periodo elástico” desde 0 hasta el punto C y “Periodo elastoplástico” desde C hasta F.

Periodo elástico

En este periodo existe una proporcionalidad entre las cargas y los alargamientos. Hasta el punto B el material retoma su longitud inicial al cesar la aplicación de la carga, esta zona se denomina “zona de proporcionalidad”.

Es válida la “Ley de Hooke” que dice que la tensión es proporcional a la deformación ($\sigma = E \times \varepsilon$), siendo E el Módulo de elasticidad de Young. El valor de E es una constante propia de cada material, independiente del contenido de carbono y de su microestructura.

El %C cambia el valor del limite elástico y la capacidad de deformación.

El punto B es el punto donde se obtiene la máxima tensión hasta la cual el alargamiento es elástico, el material recuperara las dimensiones y forma inicial. Se conoce como límite elástico.

Periodo elasto-plástico

Cuanto mayor sea el incremento del estado de tensión, mayores serán los desplazamientos atómicos y la deformación sufrida. A partir del punto B, la tensión aleja tanto a los átomos de sus vecinos que se rompe el enlace atómico y el cristal o grano se deforma permanentemente, dando inicio al periodo elasto-plástico.

Pasando el punto B, las deformaciones crecen más rápidamente, esto se extiende desde C a D, es la llamada "Zona de fluencia" y los puntos C y D "límites superior e inferior de fluencia". Esta zona se caracteriza porque las deformaciones crecerán más rápidamente sin aumento considerable de carga, el material "fluye" o cede sin aumento de tensión.

Luego del punto D las cargas vuelven a incrementarse y los alargamientos se hacen más notables (periodo de grandes deformaciones), las cuales son uniformes en toda la probeta hasta llegar al punto E, la carga máxima. Punto donde puede calcularse la "resistencia máxima a la tracción".

A partir del punto E la deformación se concentrará en una determinada región de la probeta (zona de estricción: reducción del diámetro de la probeta) y conduce a la rotura en el punto F.

Rotura

En los aceros dúctiles y moderadamente dúctiles la rotura se produce con estricción (de tipo copa). Mientras que en materiales frágiles la fractura presenta una estructura sedosa con pequeñas rebabas.

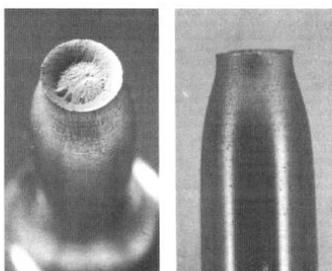


Fig.10: fractura copa y cono de probeta de acero dúctil.

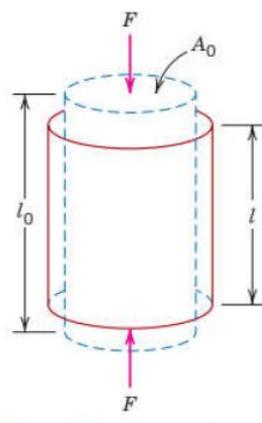


Fig.12: a) y b) fractura de aceros duros poco dúctiles, c) aleación frágil.

Ensayo de compresión

Se realiza de forma similar a uno de tracción, excepto que la fuerza es compresiva y la probeta se contrae a lo largo de la dirección de la fuerza. Las fórmulas de tensión y deformación nominales también se utilizan para este tipo de ensayos, solo que la fuerza de compresión se considera negativa y como la longitud inicial es mayor que la final, la deformación también produce un esfuerzo negativo.

Consiste en deformar una muestra cilíndrica para producir un cilindro de mayor diámetro y mas bajo.



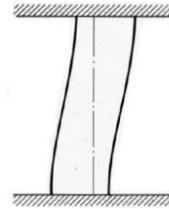
Es un método conveniente para determinar la respuesta de tensión-deformación de los materiales a grandes deformaciones, debido a que el material no está limitado por la estricción. Puede ser conveniente usar el

ensayo porque la probeta es relativamente fácil de confeccionar y no requiere gran cantidad de material. Se usa con frecuencia junto con la evaluación de la trabajabilidad de los materiales, especialmente a T elevada. Se usa con materiales frágiles.

Dificultades inherentes al ensayo

Pandeo del espécimen

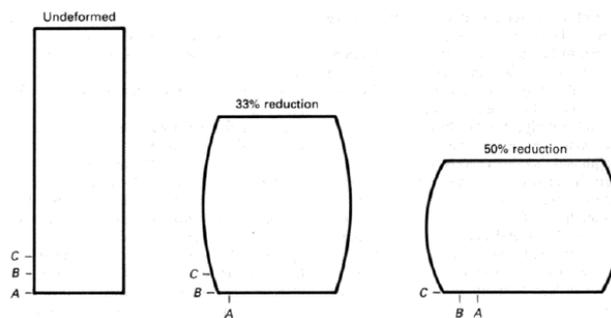
Es una falla caracterizada por la desviación lateral inestable del material causado por las tensiones de compresión que producen una distribución de tensiones no uniforme y dificultan el análisis.



Se usa la relación $L/D < 2$ para evitarlo. También es importante la alineación del sistema de cargar y el paralelismo entre las caras de la probeta.

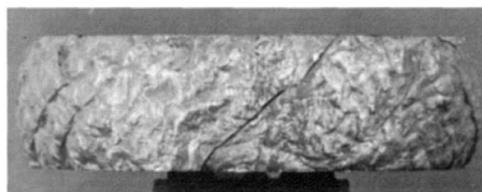
Efecto barril

Es la generación de una superficie convexa en el exterior de la región central de un cilindro a compresión. La sección transversal adquiere forma de barril, causado porque únicamente en el centro hay solo tensiones de compresión, mientras que los extremos no pueden deformarse.



Rotura

Para un material dúctil, puede formarse una fractura en la superficie de una probeta abarrilada debido a la fricción. Estas fracturas crecen lentamente y pueden no conducir a la separación completa de la muestra. Si posee tamaño grande desarrollan un cambio de topografía denominado “piel de naranja”.



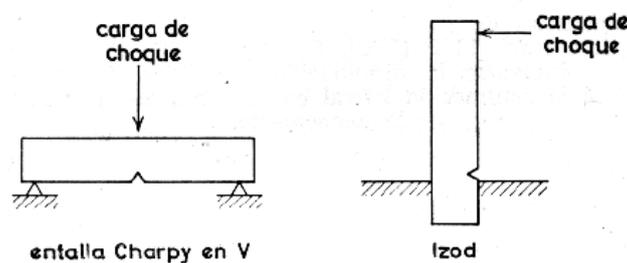
Para materiales frágiles o de baja ductilidad la fractura ocurre catastróficamente por corte. La falla ocurre a lo largo de un gran plano de corte.



Ensayo de flexión dinámica

Los ensayos de choque determinan la capacidad de un material de absorber cargas instantáneas. En estos ensayos se busca que el metal actúa en las mas severas condiciones posibles, para lo cual se le realiza una entalla, la cual genera un estado compuesto de tensiones y provoca una mayor disminución de su plasticidad, debido a la desigualdad en los valores de tensiones originados por la acción instantánea de la carga.

Los mas utilizados son el ensayo Charpy y el Izod.



Rotura

La rotura por choque se inicia a partir de la entalla, este proceso absorbe determinada energía que varia para un mismo material, con el tipo y profundidad de la entalla. El trabajo de iniciación de rotura es mayor que el de propagación, por lo que cualquier causa que interrumpa la propagación de la grieta obligará a iniciarla nuevamente, pero requerirá un aporte de energía. Esto sucede con las fracturas dúctiles.

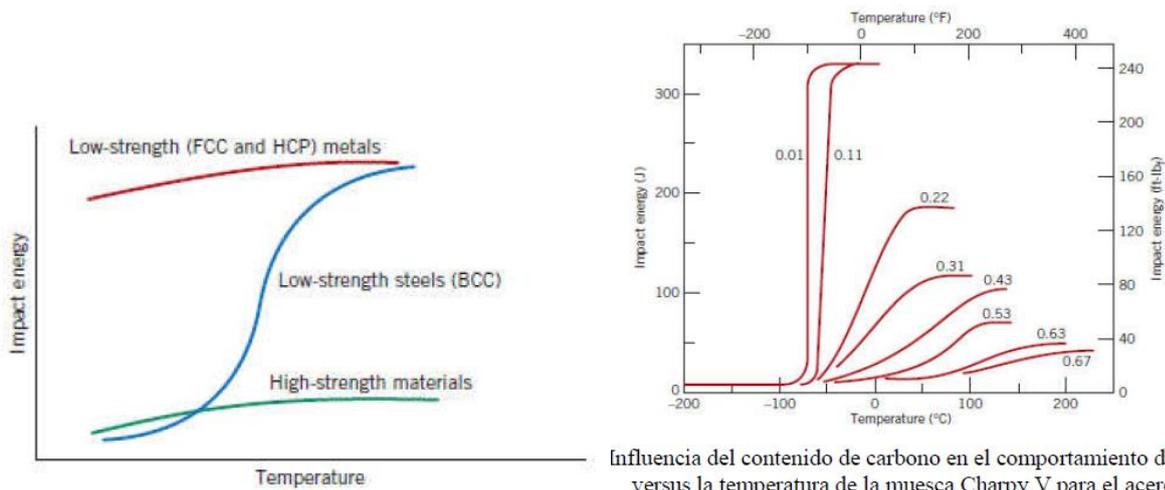
En las roturas frágiles no varía la energía con estos factores, dado que la grieta una vez iniciada se auto propaga.

Si la superficie de fractura es fibrosa, se denomina fractura por cizallamiento y si es granular, fractura por descohesión.

En ensayo es interesante cuando se realiza sobre un intervalo de temperaturas, para poder medir la temperatura de transición dúctil-frágil. Cuando fractura ocurre con poca deformación plástica se considera frágil y la superficie presenta una apariencia cristalina o granular y cuando la deformación plástica es considerable se dice que la falla es dúctil y tiene una apariencia fina y sedosa.

De este ensayo se desprenden que los metales FCC de baja resistencia y HCP no experimentan transición dúctil a frágil (mantienen energías de alto impacto con temperaturas decrecientes), este comportamiento se encuentra en los aceros de baja resistencia de estructura BCC. Para materiales de alta resistencia la energía de impacto es relativamente insensible a la T.

Para los aceros de baja resistencia, la temperatura de transición es sensible tanto a la composición de la aleación como a la microestructura. Reducir el tamaño de grano da como resultado una disminución de la T de transición, por el contrario, aumentar el contenido de carbono o la deformación plástica en frio, aumenta la T de transición.



Influencia del contenido de carbono en el comportamiento de la energía versus la temperatura de la muesca Charpy V para el acero.

Dureza

La dureza es la resistencia de un cuerpo a ser rayado o penetrado por otro. Es la resistencia a la deformación local permanente (raya o impronta). Generalmente se realiza la comparación con otro elemento, más o menos duro.

Ensayos para determinar la dureza

Por rayado

Se utiliza un penetrador cónico, se elige una carga fija y se produce el desplazamiento a una velocidad V del penetrador, lo que produce una raya.

La dureza depende del ancho de la raya o de la carga. El inconveniente es que aparece la variable velocidad de movimiento.

Ejemplo: Durómetro de Martens

Por impresión o penetración

Se emplean distintos tipos de penetrador o indentador (cónico, esférico o piramidal). Se utiliza una carga fija. La dureza depende del tamaño de la impronta.

Por desgaste

Consiste en medir el espesor o pesar la muestra, someterla a un proceso de desgaste por fricción o abrasión y volver a medir. Por comparación se determina el valor de dureza.

Por maquinado

Se evalúa la resistencia a ser limado, aserrado o agujereado. Son valores poco precisos.

Por rebote

Se hace impactar sobre la muestra una esfera patrón, desde una altura fija o con una velocidad determinada. La dureza depende de la altura del rebote y de la relación de velocidades antes y después del impacto.

Método Brinell

Consiste en aplicar una fuerza determinada sobre un penetrador esférico de tamaño establecido, el valor de la dureza se calcula a partir del diámetro de la impronta dejada sobre la muestra.

No se recomienda el uso para durezas superiores a 500 HB.

Método Vickers

Es una alternativa al Brinell, pero el penetrador es una pirámide de base cuadrada. El valor de dureza es cociente entre la carga aplicada y el área proyectada de la impronta, calculada en función del valor de la diagonal de la misma.

Debido a la geometría piramidal del penetrador, la correlación entre la profundidad y diagonal de impronta es constante y no depende de cuánto haya penetrado. La sensibilidad es independiente del tamaño o profundidad de la impronta y se adapta para materiales duros y de pequeño espesor o cargas muy bajas.

Método Knoop

Es una alternativa al Vickers, utilizando un formato alargado y poco profundo de la pirámide de diamantes. Fue diseñado para ser usado bajo fuerzas de prueba inferiores a Vickers. Es más preciso en materiales frágiles o delgados.

Utiliza una pirámide romboidal, para aumentar la sensibilidad de las determinaciones.

Método Rockwell

A fin de adecuarse a todos los campos de aplicación, este método consta de diferentes penetradores, tanto bolillas esféricas como conos de diamante que se combinan con una amplia selección de valores de carga.

Eligiendo la escala y consultando en tablas se puede determinar el tipo de penetrador y la carga en kg a utilizar. Por ejemplo:

Rockwell C: Utiliza penetrador cónico de diamante y 150 kg de carga. Se utiliza para hierro colado duro, hierro perlítico dúctil, titanio, acero templado y acero duro.

Rockwell B: Utiliza una esfera de 1/16" y una carga de 100 kg. Se utiliza para aleaciones de cobre y aluminio, aceros blandos, hierro dúctil, etc.

Durómetro Leeb

Se basa en el rebote de una bolilla de acero de 3mm de diámetro, que se dispara cargada por un resorte, para que impacte sobre la superficie cuya dureza se desea conocer. El valor de dureza es el cociente entre la velocidad de rebote y la velocidad de impacto multiplicado por 1000.

No hay forma de correlacionarlo con otros métodos, debido a que la velocidad de rebote depende del módulo elástico. Su principal ventaja es que es absolutamente portátil, no deja impronta y es sencillo y rápido.

Durómetro Shore

Se utiliza un percutor en forma de cilindro, dotado de una punta redonda y fuerte, generalmente de diamante. Se deja caer dicho percutor y posteriormente se observa la altura que alcanza cuando rebota en la pieza. Mientras más flexible resulte la pieza, menor será la altura de rebote.

Polímeros

Los plásticos y gomas tienen como ingrediente principal una o más sustancias de muy alto peso molecular, denominadas polímeros.

Existen polímeros duros, blandos, rígidos, flexibles, densos, ligeros, transparentes, opacos, pegajosos, antiadherentes, impermeables, absorbentes, conductores, aislantes, etc.

Polímeros. Moléculas formadas por la unión química, generalmente enlace covalente, de una gran cantidad de átomos. Se obtienen por síntesis a partir de monómeros, formados por unos pocos átomos.

Una primera clasificación podría ser en Orgánicos (formado por la unión de monómeros orgánicos) e Inorgánicos.

Polimerización: reacción de formación de polímeros a partir de monómeros.

Forma de obtención

Pueden obtenerse mediante distintas formas; A partir de la síntesis química de sustancias de bajo peso molecular, usando un proceso de polimerización o a través de la mezcla de polímeros naturales.

Luego, a partir de una mezcla de polímeros en donde se modifican químicamente, la adición de aditivos y cargas o esfuerzos se llega a la producción de plásticos.

Clasificación

Termoplásticos

Se presentan en estado sólido a bajas temperaturas, siendo procesados por el moldeo de cualquier pieza por calentamiento de los moldes. Este procedimiento puede ser repetido de modo que la pieza moldeada puede ser reutilizada reciclando material y transformándolo en moldes adecuados.

Se disuelven en solventes apropiados. Las propiedades mecánicas son afectadas notablemente por pequeños cambios en temperatura.

Presentan una excelente resistencia química, pero tienen propiedades mecánicas que no pueden competir con los materiales termoestables a T elevadas.

Estructura molecular

Se componen de moléculas individuales lineales y/o ramificadas.

Termoestables

Se generan a partir de sustancias líquidas viscosas, que con la adición de productos químicos (acelerantes, catalizadores, etc) se transforman a un estado sólido. Una vez alcanzado su estado sólido, no podrá ser transformado nuevamente a estado líquido.

Insolubles en solventes. La T puede afectar la rigidez y la dureza.

Se dividen en termorígidos y elastómeros.

Estructura molecular

Se caracterizan por el entrecruzamiento molecular. Termorígidos poseen densidad alta de entrecruzamientos mientras que los elastómeros densidad baja.

Factores moleculares que determinan propiedades

Los factores que afectan a ambos tipos de polímeros son su composición (estructura química de la unidad básica), configuración (ubicación espacial de átomos) y conformación (la forma que adoptan en el espacio las moléculas con igual configuración debido a la rotación y flexión de los enlaces).

Para el caso de los termoplásticos el peso molecular (longitud y distribución de longitudes de las moléculas). Para los termoestables la característica de la red molecular, densidad de entrecruzamiento, proporción de gel, ramas pendientes, lazos, etc.

Polímeros de ingeniería

Los más utilizados en la ingeniería son poliéster, poliamidas y poliuretanos.

Termoestables: termorígidos

Estructura altamente entrecruzada. Son muy rígidos con comportamiento mecánico frágil en todo el rango de T de uso. Los más utilizados:

Fenoles: Aislantes eléctricos, base de enchufes, botones de mando asas y mangos aislantes.

Aminas: Son resinas de formaldehído y otros compuestos como urea o melamina. Interruptores, clavijas, útiles de cocina, adhesivo.

Resinas de poliéster: Polimeriza a temperatura ambiente con ayuda de un endurecedor. Se refuerzan con fibras de vidrio. Depósitos, chapas, tirantes, piscinas, muebles de exterior, aislantes.

Resinas epoxi: pueden ser reforzadas con fibras de vidrio o carbono. Materiales deportivos, hélices y alas de aviones, aislantes, revestimientos y adhesivos.

Termoestables: elastómeros

Cauchos: Naturales o sintéticos. Neumáticos, pisos, mangueras, juntas estancas, artículos de goma.

Neoprene: Mangueras especiales, juntas, correas, cierres, aislantes eléctricos, trajes submarinos.

Poliuretanos: Elasticidad y densidad variable. Goma espuma, piel sintética, recubrimientos de protección, ruedas, selladores.

Siliconas: Estables y resistentes a altas y bajas T. Juntas y cierres herméticos, prótesis, válvulas, sondas y tubos de uso médico, selladores, recubrimientos impermeables.

Cerámicos

Los cerámicos son compuestos químicos o soluciones complejas inorgánicas, que contienen elementos metálicos y no metálicos. La palabra cerámica representa una gama amplísima de materiales que se obtienen por horneado de distintos componentes y que poseen una estructura con densidad baja. Todos se caracterizan por no tener una naturaleza metálica.

Características

Pueden ser desde compuestos sencillos a mezclas de muchas fases complejas. Debido a sus enlaces iónicos o covalentes son por lo general duros, frágiles con elevada resistencia a la compresión, baja conductividad eléctrica y térmica, alto punto de fusión y buena estabilidad química y térmica. En general, poseen un costo alto de fabricación y maquinado, debido a la dureza y resistencia a la abrasión muchos requieren la utilización de herramientas diamantadas costosas. No soportan cargas de impacto y no son tan tenaces como los metales.

Clasificación de acuerdo a su función y aplicación

Tradicionales: ladrillos, recubrimientos, refractarios, abrasivos, vajillas, piezas cerámicas, cemento.

Avanzados: electrocerámicos; ópticos, magnéticos, piezoeléctricos, dieléctricos.

Clasificación de acuerdo a su estructura

Es en función del ordenamiento de corto o largo alcance de agrupaciones de átomos.

Monocristalinos: la estructura es un cristal único con ordenamiento de largo alcance.

Policristalinos: la estructura está formada por agrupaciones de cristales, iguales o diferentes en su composición y tamaño.

No cristalinos: estructura amorfa.

Clasificación según los productos

Cerámica roja: productos de arcilla cocida, generalmente porosos. Ladrillos, tejas, bloques, cañerías, revestimientos.

Cerámica blanca: Productos de caolinita, feldespato, cuarzo, porosos o no. Lozas, porcelanas, sanitarios, etc.

Refractarios: Resistentes a temperaturas elevadas.

Vidrios: no cristalinos, generalmente transparentes o translúcidos. Vidrios planos, envases, vajilla, fibras, esmaltes.

Cementos: productos de características aglomerantes y adhesivas al ser mezclado con agua.

Abrasivos: alta dureza usados para cortar y pulir. Carburo de silicio, diamante, carburos metálicos, etc.

Clasificación de acuerdo a su composición química

Componente único: Carbono, azufre.

Componentes principales: Oxígeno más otro elemento: Pueden ser óxidos o silicatos. No metal más otro elemento no óxido: Carburos, nitruros.

Propiedades mecánicas de las cerámicas

Comportamiento elástico casi ideal. A temperaturas bajas no presentan deformaciones plásticas y cumplen la ley de Hooke hasta la rotura. Son muy frágiles, particularmente a T bajas. Poseen una resistencia a la fractura baja debido a muchas imperfecciones como grietas, poros, bordes de grano, etc. Cualquier imperfección limita la capacidad para resistir esfuerzos.

Poseen baja tenacidad (poca capacidad para absorber energía antes de la fractura).

Maderas

Es el material de estructura compleja y de carácter anisótropo (propiedades varían de acuerdo a la dirección en la que son examinadas) que forma el tejido leñoso del árbol abatido, fisiológicamente inactivo. Proviene de fustes, raíces y ramas de los árboles desprovistos de su corteza.

Se dividen en Resinosas (madera blanda, 3/4 de la producción mundial) y Latifoliadas (madera dura, 1/4 de la producción mundial).

Debido a la compleja estructura de la madera, ésta resulta anisotrópica. Si observamos un corte de un tronco podemos identificar una dirección axial, una radial y otra tangencial, con propiedades y morfología diferentes.

Como se trata de un ser vivo, se va desarrollando y creciendo. Dicho crecimiento depende de la humedad, luz, calor, viento, suelo y de la intervención humana.

Anomalías

Defectos

Afectan a la estética y a las propiedades mecánicas. Pueden ser: acebollado, medula excéntrica, rajaduras, nudos, taladrado.

Alteraciones

Afectan a la composición química. Pueden o no afectar las propiedades mecánicas. Pueden ser: manchas y pobredumbres.

Deformaciones

Alabeo y torsionado.

Hormigón

Rocas

Las rocas están constituidas por **partículas minerales de dimensiones variables**. En ellas se pueden distinguir su **estructura**, que corresponde a su aspecto exterior y su **contextura**, que se refiere al modo en que se encuentran ordenados los cristales.

Clasificación por su composición

Simples

Cuando están constituidas por **un solo compuesto** (Caliza o Carbonato de calcio).

Compuestas

Cuando la integran **varios componentes** (Granito, formado por feldespato, mica y cuarzo).

Clasificación por su origen

Ígneas o eruptivas

Se forman por enfriamiento de magmas.

Cuando el enfriamiento se produce lentamente en el seno del magma, favoreciendo la formación de cristales, **se originan las rocas intrusivas**, como el granito.

Cuando el enfriamiento se produce por enfriamiento rápido, debido al magma que sale al exterior, se produce una rápida consolidación del material con formación de vidrio o material amorfo, sin cristalización perfecta, **se originan las rocas efusivas**, como el basalto.

Sedimentarias

Se forman por la sedimentación de partículas de rocas, generalmente se encuentran lejos de las que dieron origen. Se consideran tres periodos: Desintegración de rocas existentes, transporte de los productos de la desintegración (por aire o por agua) y sedimentación con consolidación o sin aglomeración. Pueden ser silíceas, arcillosas o cálcicas.

Según la forma en la que se ha producido la sedimentación:

Mecánica: Formada por fragmentos de rocas existentes. Pueden **ser incoherentes**, como la arena y el canto rodado. **Están formadas por partículas redondeadas debido a su traslación por medio del agua.** En su recorrido van dejando material inestable, de ahí su gran estabilidad. También pueden ser **coherentes**, **donde las partículas están unidas por un elemento cementante**, dándole la característica de piedra.

Química: Formada por la precipitación de sales. Por ejemplo: Yeso (sulfato de calcio), Calizas (carbonato de calcio).

Biológica: Formada por acumulación de restos orgánicos. El proceso se denomina litificación.

Metamórficas

Su origen puede ser ígneo o sedimentario, pero han sufrido un proceso de transformación por acción de alta temperatura y presión. Por ejemplo: cuarcita, rocas silíceas, mármol. Se produce una recristalización, originando compuestos de mayor dureza y resistencia respecto de la roca de origen.

Propiedades físicas de las rocas

Estructura

De acuerdo a los distintos procesos de formación se obtienen distintas estructuras, algunas visibles a simple vista y otras a través de microscopio.

Los principales tipos son: granular, laminar, vítrea, porfídica y estratificada

Fractura

Es el aspecto que presenta la superficie de rotura de una roca, depende del tipo de estructura. Sirve para dar idea de su aptitud para la trituración.

Tipos: plana, escalonada, ondulada y concoide.

Dureza

Es la resistencia que opone una roca a ser rayada por otro cuerpo. Se mide con la escala mineralógica de Mohs. De menor a mayor dureza: Talco, yeso, calcita, fluorita, apatita, feldespato, cuarzo, topacio, corindón, diamante.

Humedad

Es la cantidad de agua contenida dentro de la roca. Para conocerla se pesa el cuerpo (P húmedo), luego se lleva a estufa a 105-110 °C hasta peso constante (P seco). La humedad existente será $\frac{Ph-Ps}{Ph} \times 100$.

Inhibición

Es la capacidad que posee una roca de absorber agua, es el poder de saturación de la misma.

Densidad

Es la relación entre el peso de la roca y su volumen. Densidad aparente: considerando su volumen con huecos o vacíos. Densidad absoluta: excluyendo sus oquedades.

La densidad absoluta se la denomina peso específico y es siempre mayor que la aparente. La densidad aparente es proporcional a su dureza.

Compacidad

Es la relación entre la densidad aparente y la absoluta o real. Hace referencia a lo “compacta” que es una roca. Si la compacidad tiene un valor de 1 significa que la roca no posee huecos ni vacíos.

Porosidad

Es la relación entre el volumen total de los huecos o vacíos existentes en una roca y su volumen aparente.

Cuando la compacidad tiende a 1, la porosidad tiende a 0.

En la porosidad absoluta se consideran los huecos accesibles e inaccesibles, mientras que en la porosidad aparente solo corresponde incluir los huecos accesibles.

Helicidad

Debido a que los huecos pueden estar ocupados por agua y que ésta aumenta su volumen al cambiar de fase, ésta puede ejercer dentro de la masa de la roca presiones que originen la desintegración de la misma.

Depende del coeficiente de saturación. $S = \frac{\text{Presión aparente}}{\text{Presión real}} \leq 0,7$

Propiedades mecánicas de las rocas

Una roca que será destinada a la obtención de agregados para hormigón debe cumplir los siguientes requisitos mecánicos:

Resistencia a la compresión

Debe ser mayor o igual que la de la pasta cementicia (generalmente es mucho mayor). Se considera que en un ensayo la resistencia a compresión de una roca debe ser como mínimo 600 kg/cm^2 para ser utilizada en hormigones.

El ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas de medidas normalizadas extraídas de un bloque.

Resistencia al impacto (Tenacidad)

Es la resistencia de una roca a la fallar por impacto. Se expresa con un número adimensional que indica la altura de caída de un martillo normalizado sobre una muestra que produce la rotura de la misma.

Resistencia al desgaste por frotamiento.

Se utiliza la prueba de abrasión Dorry, la cual da un valor entre 0 y 20. El valor 0 (imposible) implicaría el desgaste total de la muestra. Las rocas de buena calidad oscilan entre 17 y 20. Las rocas con menos de 15 se las califica como pobres.

Agregados

Se pueden clasificar según su origen en naturales o artificiales.

Los naturales provienen de la trituración o desintegración de rocas mientras que los artificiales tienen su origen en procesos industriales o son desechos de otras industrias.

Según su peso se clasifican en: de peso normal, pesados y livianos. Los primeros son los más comunes, en el 90% o más de las construcciones se los utiliza. Proviene de rocas con peso unitario (PUV) aproximado de 1000 a 1800 kg/m³. Aquellos materiales con un peso superior a los 2000 kg/m³ los llamados pesados, que provienen de la desintegración de rocas o minerales que contienen elementos pesados, por ejemplo: el hierro, el bario, el plomo. En el otro extremo tenemos los agregados livianos cuyo peso está por debajo de los 1000 kg/m³ (800 ó 700 kg/m³ son pesos unitarios habituales).

Obtención de agregados naturales de peso normal

Se clasifican en 2 grandes grupos: áridos directos (se obtienen en yacimientos) e indirectos (en canteras). Los directos son aquellos que solo necesitan las operaciones de extracción y clasificación. Los indirectos necesitan un proceso intermedio de elaboración o trituración.

Los yacimientos son depósitos de gravas y arenas donde el material se encuentra prácticamente suelto. Estos yacimientos proceden de depósitos fluviales, glaciares, eólicos o marinos.

En las canteras el arranque de áridos se realiza por medio de escarificadores o explosivos.

Forma y textura superficial

Desde el punto de vista de la trabajabilidad es conveniente que las partículas sean redondeadas y lisas, además se busca que dejen la menor cantidad de vacíos entre partículas. Los agregados de forma poliédrica requieren mayor cantidad de pasta.

Cuanto mejor sea el vínculo generado entre el agregado y la pasta, más resistente será el hormigón. Si un agregado es más rugoso, habrá mayor superficie de contacto con la pasta.

Granulometría

Es la distribución por tamaños de las partículas que constituyen un material granular. El estudio se realiza mediante un tamizado. La granulometría se determina haciendo pasar muestras del agregado a través de una serie de tamices de aberturas sucesivas cada vez menores y pesando el material retenido en cada tamiz.

La serie de Abrams comienza por el menor de todos, que es el de 149 micrones (Nº 100) y se completa con tamices cuya abertura es el doble de la anterior, o sea: 149 μ (Nº 100); 297 μ (Nº 50); 590 μ (Nº 30); 1,2 mm (Nº 16); 2,4 mm (Nº 8); 4,8 mm (Nº 4); 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ "); 19 mm ($\frac{3}{4}$ "); 38 mm (1½"); 76 mm (3"). El tamiz Nº 4 divide los agregados gruesos y finos.

Tamaño máximo nominal

Es la abertura de malla del tamiz de menor abertura que deja pasar el 95% del agregado o retiene el 5%.

Módulo de finura

Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados sobre TODOS los tamices de la serie de Abrams. Es mayor cuanto más grueso es el agregado.

Cemento

Material con propiedades adhesivas y cohesivas que lo hacen capaz de vincular fragmentos minerales dando por resultado un material compuesto. Es un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece.

El cemento portland es el producto obtenido de mezclar íntimamente materiales calcáreos y arcillosos, calcinarlos a una T del orden de 1400-1600 °C y moler finamente este material al que se le adiciona una cierta cantidad de yeso.

Composición

Las dos materias primas por excelencia son: la piedra caliza, que es una roca sedimentaria cuyo principal componente es el carbonato de calcio y la arcilla, que está formada por hidrosilicatos de alúmina e hidróxido de hierro. El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura aproximada de 1400°C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente formando un material granular conocido como clinker. Para obtener el cemento portland, el clinker se debe enfriar, triturar hasta obtener un polvo fino y para controlar el fraguado, añadir sulfato de calcio en pequeñas cantidades.

Elemental

Es la composición química del cemento, en porcentajes de los óxidos de los elementos constituyentes. Cal, Sílice, Alúmina y Óxido férrico componen el 90%, el resto corresponde a óxidos secundarios tales como Oxido de magnesio, Cal libre, Oxido de titanio, manganeso, potasio.

Potencial

Debido a que los constituyentes del cemento no se presentan en forma de óxidos libres, los óxidos forman parte de compuestos más complejos, que son los que determinan las propiedades del cemento.

Los componentes potenciales son Silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferro aluminato tetracálcico. Cada uno de los componentes posee características propias que le confieren propiedades al cemento.

Silicato tricálcico (C₃S)

Es el compuesto más importante. Aporta resistencia desde las primeras 24 horas del contacto entre cemento y agua hasta los 28 días de edad. Su hidratación rápida desarrolla un alto calor total de hidratación en un tiempo relativamente breve.

Silicato dicálcico (C₂S)

Es el responsable del aumento de resistencia a largo plazo del hormigón. Su calor de hidratación es bajo.

Aluminato tricálcico (C₃A)

Aporta una resistencia despreciable, es el responsable del fraguado del cemento. Posee alto calor total de hidratación a muy alta velocidad.

Ferro aluminato tetracálcico (C₄AF)

Actúa como fundente en el horno y limita la cantidad de C₃A producido.

Finura

Es el tamaño de las partículas del cemento portland. La última etapa de fabricación es la molienda del clinker con yeso. La velocidad de hidratación depende de la finura del cemento, cuando se desee un rápido

desarrollo de resistencia será necesaria una gran finura y un alto contenido de C_3S . Una mayor finura confiere al hormigón un desarrollo de mayor resistencia a temprana edad, una menor exudación y contribuye a una mejor trabajabilidad del mortero, pero tiene un mayor costo de molienda.

Hidratación

Varía en función de las proporciones de componentes en el cemento, la finura, la temperatura, la relación agua/cemento y la presencia de aditivos.

En presencia de agua los silicatos y aluminatos forman productos de hidratación que con el tiempo producen una masa firme y dura. Para una relación a/c baja, la resistencia será superior, debido al menor volumen de poros de la pasta.

Fabricación del cemento portland

Obtención de materias primas

Se obtienen generalmente de depósitos naturales. La localización de las canteras de rocas calizas de alta pureza resulta de suma importancia al momento de decidir la ubicación de una fábrica de cemento.

Proceso de fabricación

Las materias primas son sometidas a un tratamiento de triturado si es necesario y luego son almacenadas. Para un cemento de composición definida será necesario calcular las proporciones en que deberán utilizarse las materias primas.

El mezclado y molido de materias primas puede hacerse en seco o con agua.

Para el proceso seco la caliza suele triturarse hasta un grado de finura e introducida junto a los restantes materiales en molinos para ser reducidos a polvo, el que es bombeado y almacenado en silos.

Para el proceso húmedo la caliza es triturada para entrar al molino junto a la arcilla suspendida en agua. El molido final es en régimen húmedo. Al final de la molienda se obtiene un barro que es conducido a grandes piletas. Este proceso mejora la homogeneidad del conjunto.

La mezcla preparada denominada “crudo” es calcinada, obteniendo un material en forma de granos denominado Clinker.

El clinker es enfriado violentamente. Luego es transportado y molido junto con el yeso. En esta etapa también se incorporan adiciones minerales que pueda incluir el cemento. El producto final es almacenado.

Hormigón en estado fresco

El hormigón es una mezcla homogénea constituida por cemento, agua, árido grueso, árido fino y aire. De endurecimiento gradual. Posee 3 estados: fresco, fraguado y endurecido.

Estado fresco: Sus principales características son la cohesión y la trabajabilidad. Pero también debe poseer la consistencia necesaria para ser compactado.

Cohesión

Es la propiedad del hormigón fresco por el cual sus componentes se mantienen formando una mezcla uniforme. Es la capacidad del hormigón de mantener su homogeneidad durante el transporte, colocación y compactación.

La pérdida de homogeneidad está asociada a dos fenómenos: segregación y exudación.

La segregación es la separación de los componentes del hormigón, de modo que la mezcla no es más uniforme. En el primer tipo de segregación el agregado grueso se separa del mortero (agua + cemento + fino). En el segundo tipo de segregación, que se da en mezclas muy fluidas, se separa el árido fino y grueso de la pasta cementicia (agua + cemento).

Puede deberse a una mala graduación de los agregados (mala granulometría o mala relación agua-cemento) o a causas independientes al hormigón (transporte, colocación y compactación).

La exudación es una forma especial de segregación donde parte del agua de mezclado tiende a subir hacia la superficie del hormigón recién colocado. Es causado por la incapacidad de los constituyentes sólidos de retener toda el agua de mezclado cuando se asientan. El agua es el componente de menor densidad de la mezcla.

Como consecuencia de esto la parte superior del hormigón posee una relación a/c mayor, es porosa, débil al desgaste y a la congelación. El agua que sube arrastra muchas partículas finas y blandas que debilitan la parte superior.

Es posible controlar y minimizar la exudación incorporando adiciones minerales, reduciendo a/c, bajos contenidos de agua, buena distribución granulométrica, mayor finura en el cemento e incorporación de aire.

Trabajabilidad

Es la propiedad del hormigón de ser transportado, colocado, compactado y terminado superficialmente con cierta facilidad y sin perder cohesión, es decir que posea buena resistencia a la segregación.

Podemos decir que la trabajabilidad es el conjunto de cualidades que hacen al hormigón más o menos fácil de ser colocado en una estructura, en función del equipo disponible de compactación y del tipo de estructura al cual estará destinado. Para cada obra existe una trabajabilidad adecuada.

Está estrechamente relacionada con la consistencia, es decir, la facilidad con que el hormigón puede fluir. En general, los métodos para evaluar la trabajabilidad solo miden la consistencia de la mezcla.

Ensayo de Asentamiento o cono de Abrams

Es el ensayo de consistencia más utilizado. No mide la trabajabilidad, pero define rangos de consistencia y es muy útil para detectar variaciones en la uniformidad de la mezcla en obra.

El ensayo consiste en llenar un molde con forma de cono de 30cm de altura y de diámetros 10cm superior y 20cm inferior con hormigón fresco en tres capas de igual volumen, compactando cada una de ellas con 25 golpes de varilla de acero de 16mm de diámetro con punta redondeada. El molde debe ser sujetado firmemente contra la base. Una vez lleno se enrasa la superficie y se lo levanta lentamente mientras el hormigón se asienta deformándose.

La pérdida de altura del centro de la cara superior del cono es llamado asentamiento. Es válido el asentamiento medido entre 2 y 18 cm. Si es menor a 2 cm el ensayo carece de sensibilidad. Si es mayor a 18 cm se llega al colapso de la masa (mezcla muy fluida).

Si el ensayo da como resultado que una parte del cono se corta y se desliza por un plano inclinado debe ser repetido, si en la réplica se observa el mismo fenómeno, ello indica una mezcla deficiente en material fino (falta cohesión).

Es recomendable una vez medido el asentamiento golpear los costados del hormigón con la varilla y ver si continúa deformándose plásticamente o si se corta. En este último caso se estará en situación de cohesión límite, será aconsejable aumentar el agregado fino. Lo mismo si al golpear se desprenden con facilidad partículas de árido grueso.

Si aparece una aureola acuosa alrededor de la masa de hormigón: si la aureola es de pasta de cemento, señala una granulometría deficiente del agregado y falta de retención de líquido. Indica exudación importante. Se lo corrige aumentando la proporción de árido fino.

Si la aureola es de agua limpia señala que el cemento tiene algún defecto y no retiene agua.

Factores que afectan la trabajabilidad

Contenido de agua

Agregados

Indirectamente: afectan la cantidad de pasta necesaria para llenar los espacios vacíos que deja el esqueleto granular.

Directamente: En un agregado bien granulado, las partículas más pequeñas hacen el papel de rodamiento para las mayores. Si faltan tamaños intermedios las partículas se traban y disminuye la movilidad de la mezcla.

Tiempo y temperatura de transporte y colocación.

Hormigón en estado endurecido

Las propiedades fundamentales son **resistencia y durabilidad**. Al analizar las características estructurales, aparecen como aspectos primordiales que el hormigón endurecido: es un material compuesto y heterogéneo, su matriz es porosa, la porosidad se modifica con el tiempo y existen zonas con mayor porosidad.

Resistencia

Como todo material poroso, la resistencia estará inversamente afectada por el volumen de vacíos. Abrams determinó que a medida que se aumenta el contenido de agua para la misma cantidad de cemento, se obtienen mezclas cada vez menos resistentes.

La Ley de Abrams establece que “Para un determinado conjunto de cemento-agregados, y para las mismas condiciones de mezclado, curado y ensayo, la resistencia de un hormigón de consistencia plástica dependerá de la razón entre la cantidad neta de agua y la de cemento contenidas en la mezcla”.

La vinculación entre la relación a/c y la resistencia solo se cumple para un nivel de compactación adecuado.

La evolución de la resistencia depende tanto de la relación a/c como del tipo de cemento, el contenido de aire, las condiciones de curado, de las proporciones del hormigón, la temperatura y del tipo y tamaño del agregado.

El curado del hormigón tiene por finalidad promover la hidratación completa del cemento, impedir la pérdida de agua y controlar la temperatura y los movimientos de humedad hacia dentro y fuera del hormigón. El fin último del curado es lograr que el espacio en la pasta fresca, originalmente lleno de agua, sea ocupado por los productos resultantes de la hidratación del cemento.

La resistencia a compresión depende de la calidad del mismo, así como también de la forma y dimensiones de la probeta y condiciones de ensayo. En Argentina, el ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, el TMN no supera el tercio del diámetro del molde. La resistencia es la relación entre la carga que produce la rotura y el área transversal de la probeta.

Las probetas se deben llenar en tres capas compactadas con 25 golpes de varilla cada una. Se deben colocar sobre una superficie plana y dejarlas 24 hs. Se desmoldan, se identifican y se almacenan en cámara húmeda para ser curadas hasta la edad del ensayo.

Tipos de sollicitación

El hormigón resiste a las sollicitaciones de compresión, tracción y flexión. La característica mecánica más medida es la resistencia a la compresión, siendo esta sollicitación la más frecuente. En pavimentos, trabaja a flexo-tracción.

Durabilidad

Actualmente se está requiriendo una vida en servicio mayor a 100 años, por ello, los materiales seleccionados para construir deberán tener una velocidad de degradación que no los altere significativamente durante ese periodo de vida.

El deterioro del hormigón no se puede evitar, pudiendo afectar no solo sus propiedades, sino también la funcionalidad de la estructura y su aspecto visual.

La disminución de la vida en servicio depende de factores físicos, químicos, biológicos o mecánicos.

Dosificación de hormigones

El proyecto o dosificación consiste en determinar las cantidades en que deben mezclarse los materiales que componen al hormigón (cemento, agua, agregados fino y grueso y eventualmente aditivos) de manera que reúna las condiciones necesarios para comportarse satisfactoriamente en las estructuras a que está destinado.

Las condiciones fundamentales que se persiguen en la dosificación de un hormigón en su estado fresco son trabajabilidad y cohesión y en el estado endurecido resistencia y durabilidad. Además, se agrega la economía.

Tipos de dosificaciones

Empíricas

Son los procedimientos que no tienen en cuenta en absoluto las características de los agregados. Se emplea en obras de muy pequeña importancia (para bajas tensiones de trabajo).

La relación habitualmente utilizada en hormigones fluidos es 1:3:3. Es decir, 1 parte de cemento, 3 de arenaa y 3 de agregado grueso.

Semiempíricas

Se mantiene fija la relación agua-cemento en peso. Consiste en mezclar la pasta cementicia con distintas cantidades de agregados fino y grueso, mediante tanteos sucesivos hasta obtener la trabajabilidad y consistencia requeridas.

Racionales

Mediante un estudio previo cuidadoso de las propiedades físicas y mecánicas de todos los componentes, pueden determinarse los volúmenes absolutos o solidos ocupados por cada uno de los materiales y el cálculo posterior de los contenidos en peso. El método más utilizado es el del Ing. Juan García Balado.

Aditivos

Cuando se hace necesario contrarrestar las características indeseables de los agregados, hacer frente a condiciones meteorológicas anormales, moldear estructuras de características especiales o se prevé que el hormigón endurecido habrá de estar sometido a la acción de agentes agresivos se implementan sustancias denominadas aditivos.

Los más utilizados son: Incorporadores de aire, reductores del contenido de agua, retardadores de fraguado, aceleradores de endurecimiento y superfluidificantes.

Incorporadores de aire

Mejora el comportamiento del hormigón ante los efectos alternativos de congelamiento y deshielo. La presencia de aire en hormigones hace que se comporten mejor ante la acción de agentes agresivos a pesar de tener un peso unitario menor.

En el hormigón fresco las burbujas de aire se comportan como un agregado fino de módulo de finura nulo y actúan como lubricante de la mezcla, esto mejora la trabajabilidad y evita la segregación, con lo cual se obtiene un hormigón más homogéneo y, dado que para igualdad de consistencia se necesita menos agua, disminuye la contracción por fragüe.

En el hormigón endurecido se impide la penetración de líquidos que puedan actuar en forma agresiva, impermeabilizando el hormigón, al mismo tiempo se disminuye su peso unitario.

Efectos sobre la resistencia

La resistencia mecánica depende de la relación vacíos/cemento. Se entiende por vacíos a los espacios ocupados por agua, aire incorporado y aire que ocupa huecos macroscópicos.

La adición de aire no reduce significativamente la resistencia final del hormigón. Los hormigones con aire incorporado no siguen las mismas curvas de resistencia en función de la relación a/c de los hormigones comunes, están desplazada.

Ajuste de las dosificación

Reducción del contenido de agua: Proporcional al contenido de aire a incorporar. Se recomienda reducir el contenido de agua entre 2 y 4 % por cada unidad porcentual de aire incorporado.

Reducción del contenido de arena: Debido a que el aire incorporado actúa como agregado fino, puede reducirse el contenido de arena, en general, en una unidad porcentual por cada unidad porcentual de aire incorporado.

Aumento de agregado grueso: Se produce como consecuencia de la disminución de agua y arena.

Reductores del contenido de agua

Al ser incorporados permiten mantener las características del hormigón en estado fresco con menor contenido de agua. Mantiene el asentamiento y mejora la trabajabilidad.

Se produce debido al efecto lubricante del aditivo y al aumento que se produce en el contenido de arena para compensar la disminución de agua.

También puede usarse sin redosificación, sin disminuir el contenido de agua, puede lograrse un aumento razonable de la fluidez, manteniendo la resistencia a la compresión.

Retardadores de fraguado

Aumentan el tiempo disponible para el manipuleo del hormigón en estado fresco, sin afectar la resistencia final. Se justifica su empleo cuando los tiempos de transportes son prologados y cuando las estructuras son de gran volumen.

Aceleradores de endurecimiento

Acortan el tiempo necesario para la terminación del periodo de fraguado y aumentan las resistencias mecánicas a edades tempranas respecto a los hormigones originales.

Las ventajas que se logran con los aceleradores también pueden obtenerse utilizando los siguientes recursos: Disminución de la relación a/c, uso del cemento de alta resistencia inicial y procedimientos especiales de curado.

Superfluidificantes

Mejoran en modo importante la forma de colocación y permite trabajar con una fuerte reducción de agua, en cantidad muy superior a los plastificantes normales.

El hormigón presenta un asentamiento mayor a 14 cm, no presenta exudación o segregación, tampoco altera el periodo de fragua ni aumenta el porcentaje de aire incluido. A pesar de su gran fluidez presenta cohesión, plasticidad y es casi autonivelante.

Deben dosificarse cuidadosamente, con un asentamiento inicial no mayor a 8 cm (previo a agregar el aditivo).

Es útil para aumentar el asentamiento sin modificar la relación a/c ni variar la resistencia.

FINAL MPUI 8 ABRIL 2021 (Tomado por Valea y Priano)

Parte Valea: Diagrama Hierro-Carbono, puso la imagen y me dejó que hable todo lo que sabía sobre el diagrama. Puso el diagrama de temple, que están las curvas de martensita y me dejó hablar también. Después me hizo hablar sobre lo que sabía de fatiga y dureza. Me preguntó cuáles eran los materiales más usados en ingeniería (metales, polímeros, maderas y cerámicos). Por último, me hizo una pregunta sobre un caso real para analizar sobre cuál pieza necesitaba dureza más que las otras.

Parte Priano: Me preguntó los ingredientes principales del cemento (caliza y arcilla, ni los potenciales ni los esenciales), después preguntas sobre casos reales, que recomendaría hacer. Preguntas sobre asentamiento y cono de abrams. Preguntas sobre aditivos. Muchos ejemplos reales te toma, para que analices qué harías como ingeniero si te llega un hormigón de tal y cual forma.