

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**



---

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS  
MATERIALES UTILIZADOS EN LA MANUFACTURA.**

**M O N O G R A F Í A**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**I N G E N I E R O I N D U S T R I A L**

P R E S E N T A:

**D Í A Z      L Á Z A R O      A D R I A N A**

DIRECTOR DE MONOGRAFÍA: ING. JOSÉ MANUEL  
HERNÁNDEZ ARREOLA

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, AGOSTO, 2008.

# ÍNDICE

|  | Pag. |
|--|------|
| Objetivo   | 1    |
| Antecedentes   | 2    |
| Introducción   | 3    |
| <br>   |      |
| Capítulo 1: Fundamento de los materiales: su comportamiento y propiedades de manufactura | 5    |
| <br>   |      |
| 1.1 ¿Qué son los metales?  | 5    |
| 1.2 Propiedades Físicas  | 7    |
| 1.3 Propiedades Químicas   | 7    |
| 1.4 Estructura Electrónica   | 7    |
| 1.5 Estructura de los metales  | 9    |
| 1.6 Estructura cristalina de los metales   | 9    |
| 1.7 Deformación y resistencia de monocristales   | 12   |
| 1.7.1 Imperfecciones en la estructura cristalina de los metales                          | 14   |
| 1.7.2 Endurecimiento por trabajo (Endurecimiento por deformación)                        | 16   |
| 1.7.3 Granos y fronteras de granos   | 17   |
| 1.7.4 Tamaño de grano  | 18   |
| 1.7.5 Influencia en las fronteras de grano   | 20   |
| 1.8 Deformación elástica de los metales policristalinos                                  | 21   |
| 1.9 Deformación plástica de los metales policristalinos                                  | 23   |
| 1.9.1 Recuperación, recristalización y crecimiento de granos                             | 24   |
| 1.10 Trabajo en frío, trabajo en tibio y trabajo en caliente                             | 27   |
| <br>   |      |
| Capítulo 2: Propiedades mecánicas de los materiales                                      | 29   |
| <br>   |      |
| 2.1 Tensión  | 29   |
| 2.1.1 Ductilidad   | 34   |
| 2.1.2 Esfuerzo real y deformación real   | 35   |
| 2.1.3 Efectos de la rapidez de deformación   | 35   |
| 2.1.4 Efectos de la presión hidrostática   | 36   |
| 2.1.5 Efectos de la radiación  | 37   |
| 2.2 Compresión   | 37   |
| 2.3 Torsión  | 39   |
| 2.4 Doblado (Flexión)  | 40   |
| 2.5 Dureza   | 41   |
| 2.5.1 Ensayos de dureza  | 42   |
| 2.5.2 Dureza y Resistencia   | 47   |
| 2.6 Fatiga   | 48   |
| 2.7 Cedencia   | 49   |
| 2.8 Impacto  | 50   |
| 2.9 Falla y fractura en los materiales de manufactura y en el servicio                   | 51   |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.9.1  | Fractura dúctil  | 52 |
| 2.9.2  | Fractura frágil  | 54 |
| 2.10   | Esfuerzos residuales   | 57 |
| 2.11   | Trabajo, calor y temperatura                                   | 59 |
| Capítulo 3: Propiedades físicas de los materiales  |  | 60 |
| 3.1  | Densidad   | 60 |
| 3.2  | Punto de fusión  | 65 |
| 3.3  | Calor específico   | 66 |
| 3.3.1  | Concepto de calor  | 66 |
| 3.3.2  | Fundamentos físicos  | 67 |
| 3.4  | Conductividad térmica  | 69 |
| 3.4.1  | Coeficiente de conductividad termica                           | 71 |
| 3.5  | Dilatación térmica   | 71 |
| 3.6  | Propiedades eléctricas   | 72 |
| 3.6.1  | Conductores  | 73 |
| 3.6.2  | Resistencia dieléctrica  | 74 |
| 3.6.3  | Semiconductores  | 74 |
| 3.6.4  | Súper conductores  | 75 |
| 3.6.5  | Polarización electrónica                                       | 75 |
| 3.6.6  | Polarización iónica  | 76 |
| 3.6.7  | Polarización molecular   | 76 |
| 3.6.8  | Efecto piezoeléctrico  | 77 |
| 3.7  | Propiedades magnéticas   | 78 |
| 3.8  | Propiedades ópticas  | 80 |
| 3.8.1  | Fenómenos ópticos  | 80 |
| 3.8.2  | Fenómenos de emisión   | 83 |
| Capítulo 4: Propiedades Químicas de los materiales |  | 89 |
| 4.1  | Resistencia a la corrosión                                     | 89 |
| 4.1.1  | Corrosión  | 90 |
| 4.1.2  | Definiciones básicas   | 91 |
| 4.1.3  | Aproximación a la corrosión de los metales                     | 92 |
| 4.1.4  | Protección contra la corrosión                                 | 94 |
| 4.1.5  | Elección del material  | 95 |
| 4.1.6  | Concepción de la pieza   | 95 |
| 4.1.7  | Dominio del ambiente   | 95 |
| 4.2  | Inhibidores de la corrosión                                    | 96 |
| 4.2.1  | Aislamiento del medio  | 97 |
| 4.2.3  | Galvanismo anódico o protección catódica                       | 97 |
| 4.3  | Galvanoplastia   | 98 |
| 4.4  | Aplicación de inhibidores asociados a una película de fijación | 98 |
| 4.5  | Exposición a soluciones reductoras                             | 99 |
| 4.6  | Tipos de corrosión   | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Capítulo 5: Propiedades tecnológicas o de manufactura | 104 |
| 5.1 Soldabilidad                                      | 104 |
| 5.1.1 soldadura ordinaria o de aleación               | 105 |
| 5.1.2 Soldadura por fusión                            | 106 |
| 5.1.3 Soldadura por gas                               | 106 |
| 5.1.4 Soldadura por arco                              | 106 |
| 5.1.5 Soldadura aluminotérmica                        | 108 |
| 5.1.6 Soldadura por presión                           | 108 |
| 5.1.7 Soldadura por resistencia                       | 108 |
| 5.2 Templabilidad                                     | 109 |
| 5.3 Recocido  | 109 |
| 5.4 Maquinabilidad                                    | 110 |
| 5.5 Isotropía   | 111 |
| 5.6 Colabilidad                                       | 111 |
| 5.7 Conformabilidad                                   | 112 |
| Glosario de términos                                  | 113 |
| Conclusiones  | 117 |
| Bibliografía  | 118 |
| Cibergrafía   | 119 |

## **OBJETIVO**

Recopilar información básica sobre las características, propiedades y comportamiento de los materiales utilizados en la manufactura con base en diferentes fuentes de información, para así obtener conocimientos sobre este tema, ya que estos nos permiten saber la forma correcta de utilizarlos, manejarlos y procesarlos.

## **ANTECEDENTES.**

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. En efecto, las primeras civilizaciones se conocen por el nombre del material que usaban (Edad de Piedra, Edad de Bronce).

El hombre primitivo sólo tuvo acceso a muy reducido número de materiales presentes en la naturaleza: piedras, maderas, arcilla, cuero, etc. Con el transcurso del tiempo, descubrió técnicas para producir materiales con nuevas propiedades superiores a las de los naturales (principalmente aleaciones).

Hace relativamente poco tiempo que los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento, adquirido en los últimos 200 años aproximadamente, los ha capacitado, en alto grado, para modificar o adaptar las características de los materiales. Quizá uno de los científicos más relevantes en este campo haya sido Willard Gibbs al demostrar la relación entre las propiedades de un material y su estructura.

Se han desarrollado decenas de miles de materiales distintos con características muy especiales para satisfacer las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad, se trata de metales, plásticos, vidrios y fibras.

Una de las grandes revoluciones de esta ciencia fue el descubrimiento de las diferentes fases térmicas de los metales y, en especial, del acero. Actualmente los adelantos electrónicos más sofisticados se basan en componentes denominados materiales semiconductores.

Es de suma importancia conocer las características de los diferentes materiales a detalle ya que esto nos permite utilizarlos, manejarlos y procesarlos teniendo un resultado óptimo en cualquiera de los procesos donde se utilizan y de tal forma crear un producto de buena calidad.

## INTRODUCCIÓN.

En ingeniería, las propiedades mecánicas, físicas, químicas y tecnológicas o de manufactura de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otros, desde el punto de vista del comportamiento de los materiales, también hay que tener en cuenta el comportamiento que puede asumir un material en los diferentes procesos de mecanizados. Entre estas características mecánicas y tecnológicas destacan:

Resistencia a esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión, así como desgaste y fatiga, dureza, resistencia, elasticidad, tenacidad, fragilidad, cohesión, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, porosidad, magnetismo, las facilidades que tenga el material para soldadura, mecanizado, tratamiento térmico así como la resistencia a los procesos de oxidación, corrosión. Asimismo es interesante conocer el grado de conductividad eléctrica y la conductividad térmica y las facilidades para formar aleaciones.

Aparte de estas propiedades mecánicas y tecnológicas cabe destacar cuando se elige un material para un componente determinado, la densidad de ese material, el color, el punto de fusión la disponibilidad y el precio que tenga.

Debido a que cada material tiene características diferentes, es necesario analizar su comportamiento mediante pruebas experimentales.

Entre las propiedades mecánicas más comunes que se mide en los materiales están la resistencia a tracción, a compresión, la deformación, el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad o módulo de Young.

En el capítulo 1 se verán las características y propiedades de los materiales como lo son físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas; así como la estructura de los metales, estructura cristalina, su deformación y resistencia y sus imperfecciones de una forma introductoria ya que en los siguientes capítulos se hablara específicamente cada uno de los temas mencionados.

El capítulo 2 consta de las propiedades mecánicas de los materiales como la tensión, la ductilidad, el esfuerzo real y la deformación real; sus efectos, la torsión, el doblado (flexión), dureza; los diferentes tipos de ensayo de dureza, la dureza y resistencia, la fatiga, la cedencia, el impacto, la falla y fractura en los materiales, los tipos de fractura, los esfuerzos residuales y el trabajo, calor y temperatura.

En el capítulo 3 veremos las propiedades físicas de los materiales como son: densidad, punto de fusión, calor específico, el concepto de calor, los fundamentos físicos, la conductividad térmica; su coeficiente, la dilatación térmica así como las propiedades eléctricas, los conductores, la resistencia dieléctrica, los semiconductores, los superconductores, la polarización electrónica, iónica y molecular, el efecto piezoeléctrico y por último las propiedades magnéticas y ópticas.

El capítulo 4 habla de las propiedades químicas de los materiales como son: corrosión y sus tipos, aproximación a la corrosión y algunos inhibidores, diseño de la pieza, dominio del ambiente, galvanoplastia, exposición a soluciones reductoras.

En el capítulo 5 veremos las propiedades tecnológicas o de manufactura de los materiales como soldabilidad, templabilidad, maquinabilidad, isotropía, colabilidad y conformabilidad.

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS DE LOS MATERIALES: SU COMPORTAMIENTO Y PROPIEDADES DE MANUFACTURA.

### 1.1. ¿QUÉ SON LOS METALES?

Los metales, a modo de definición, son un grupo de elementos químicos que presentan todas o gran parte de las siguientes propiedades físicas: estado sólido a temperatura normal, excepto el mercurio que es líquido; opacidad, excepto en capas muy finas; buenos conductores eléctricos y térmicos; brillantes, una vez pulidos, y estructura cristalina en estado sólido. Como otra definición más sencilla podemos decir que los metales son elementos simples que se caracterizan por poseer un brillo especial, por una buena conductividad del calor y de la electricidad, un cierto grado de plasticidad y una tendencia clara a formar cationes (grupos de átomos con carga positiva).

Existen 80 metales, llamándose el resto de los elementos, no metales.

Entre los metales se distinguen varios grupos o familias, que ocupan lugares en el sistema periódico.

- metales alcalinos
- metales normales
- metales de transición
- metales ferroaleables
- metales no ferrosos
- metales preciosos
- metales nucleares

Metales y no metales se encuentran separados en el sistema periódico por una línea diagonal de elementos. Los elementos a la izquierda de esta diagonal son los metales, y los elementos a la derecha son los no metales. Los elementos que integran esta diagonal —boro, silicio, germanio, arsénico, antimonio, telurio, polonio y astato— tienen propiedades tanto metálicas como no metálicas. Los elementos metálicos más comunes son los siguientes: aluminio, bario, berilio, bismuto, cadmio, calcio, cerio, cromo, cobalto, cobre, oro, iridio, hierro, plomo, litio, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, osmio, paladio, platino, potasio, radio, rodio, plata, sodio, tantalio, talio, torio, estaño, titanio, volframio, uranio, vanadio y cinc. Los elementos metálicos se pueden combinar unos con otros y también con otros elementos formando compuestos, disoluciones y mezclas. Una mezcla de dos o más metales o de un metal y ciertos no metales como el carbono se denomina aleación. Las aleaciones de mercurio con otros elementos metálicos son conocidas como amalgamas.

Los metales muestran un amplio margen en sus propiedades físicas. La mayoría de ellos son de color grisáceo, pero algunos presentan colores distintos; el bismuto es rosáceo, el cobre rojizo y el oro amarillo. En otros metales aparece más de un color, y este fenómeno se denomina *pleocroísmo*. El punto de fusión de los metales varía entre los  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$  del mercurio, a los  $3.410\text{ }^{\circ}\text{C}$  del tungsteno. El iridio, con una densidad relativa de 22,4, es el más denso de los metales. Por el contrario, el litio es el menos denso, con una densidad relativa de 0,53. La mayoría de los metales cristalizan en el sistema cúbico, aunque algunos lo hacen en el hexagonal y en el tetragonal. La más baja conductividad eléctrica la tiene el bismuto, y la más alta a temperatura ordinaria la plata. La conductividad en los metales puede reducirse mediante aleaciones. Todos los metales se expanden con el calor y se contraen al enfriarse. Ciertas aleaciones, como las de platino e iridio, tienen un coeficiente de dilatación extremadamente bajo.

## **1.2 PROPIEDADES FÍSICAS**

Los metales suelen ser duros y resistentes. Aunque existen ciertas variaciones de uno a otro, en general los metales tienen las siguientes propiedades: dureza o resistencia a ser rayados; resistencia longitudinal o resistencia a la rotura; elasticidad o capacidad de volver a su forma original después de sufrir deformación; maleabilidad o posibilidad de cambiar de forma por la acción del martillo; resistencia a la fatiga o capacidad de soportar una fuerza o presión continuadas y ductilidad o posibilidad de deformarse sin sufrir roturas.

## **1.3 PROPIEDADES QUÍMICAS**

Es característico de los metales tener valencias positivas en la mayoría de sus compuestos. Esto significa que tienden a ceder electrones a los átomos con los que se enlazan. También tienden a formar óxidos básicos. Por el contrario, elementos no metálicos como el nitrógeno, azufre y cloro tienen valencias negativas en la mayoría de sus compuestos, y tienden a adquirir electrones y a formar óxidos ácidos.

Los metales tienen energía de ionización baja: reaccionan con facilidad perdiendo electrones para formar iones positivos o cationes. De este modo, los metales forman sales como cloruros, sulfuros y carbonatos, actuando como agentes reductores (donantes de electrones).

## **1.4 ESTRUCTURA ELECTRÓNICA**

En sus primeros esfuerzos para explicar la estructura electrónica de los metales, los científicos esgrimieron las propiedades de su buena conductividad térmica y eléctrica para apoyar la teoría de que los metales se componen de átomos ionizados, cuyos electrones libres forman un 'mar' homogéneo de carga negativa. La atracción electrostática entre los iones positivos del metal y los electrones libres, se consideró la responsable del enlace entre los átomos del metal. Así, se pensaba que el libre movimiento de los electrones era la causa de su alta conductividad eléctrica y térmica. La principal objeción a esta

teoría es que en tal caso los metales debían tener un calor específico superior al que realmente tienen.

En 1928, el físico alemán Arnold Sommerfeld sugirió que los electrones en los metales se encuentran en una disposición cuántica en la que los niveles de baja energía disponibles para los electrones se hallan casi completamente ocupados. En el mismo año, el físico suizo estadounidense Felix Bloch, y más tarde el físico francés Louis Brillouin, aplicaron esta idea en la hoy aceptada 'teoría de la banda' para los enlaces en los sólidos metálicos.

De acuerdo con dicha teoría, todo átomo de metal tiene únicamente un número limitado de electrones de valencia con los que unirse a los átomos vecinos. Por ello se requiere un amplio reparto de electrones entre los átomos individuales. El reparto de electrones se consigue por la superposición de orbitales atómicos de energía equivalente con los átomos adyacentes. Esta superposición va recorriendo toda la muestra del metal, formando amplios orbitales que se extienden por todo el sólido, en vez de pertenecer a átomos concretos. Cada uno de estos orbitales tiene un nivel de energía distinto debido a que los orbitales atómicos de los que proceden, tenían a su vez diferentes niveles de energía. Los orbitales, cuyo número es el mismo que el de los orbitales atómicos, tienen dos electrones cada uno y se van llenando en orden de menor a mayor energía hasta agotar el número de electrones disponibles. En esta teoría se dice que los grupos de electrones residen en bandas, que constituyen conjuntos de orbitales. Cada banda tiene un margen de valores de energía, valores que deberían poseer los electrones para poder ser parte de esa banda. En algunos metales se dan interrupciones de energía entre las bandas, pues los electrones no poseen ciertas energías. La banda con mayor energía en un metal no está llena de electrones, dado que una característica de los metales es que no poseen suficientes electrones para llenarla. La elevada conductividad eléctrica y térmica de los metales se explica así por el paso de electrones a estas bandas con defecto de electrones, provocado por la absorción de energía térmica.

## **1.5 ESTRUCTURA DE LOS METALES.**

La estructura de los metales es el arreglo de los átomos dentro de ellos. La estructura de los metales influye de manera importante en su comportamiento y propiedades.

La estructura nos guía en el control y la predicción del comportamiento y desempeño de los metales en diversos procesos de manufactura. La estructura de los metales también nos permite predecir y evaluar sus propiedades. Esto nos ayuda a hacer selecciones apropiadas para aplicaciones específicas bajo condiciones externas y de entorno particulares, como fuerza y temperatura.

Además de la estructura atómica, varios factores también influyen en las propiedades y el comportamiento de los metales. Entre ellos esta la composición del metal, las impurezas y vacancias en la estructura atómica, el tamaño del grano, las fronteras del grano, el entorno, el tamaño y estado superficial del metal, y los métodos mediante los cuales los metales y las aleaciones se han convertido en productos útiles.

## **1.6 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES.**

Cuando los metales se solidifican a partir de un estado líquido, los átomos se reorganizan en varias configuraciones ordenadas, llamados cristales. Este arreglo de los átomos en el cristal se conoce como estructura cristalina.

El grupo más pequeño de átomos que muestra la estructura de red característica de un metal particular se conoce como celda unitaria. Es el bloque constructivo de un cristal, y un monocristal puede tener muchas celdas unitarias.

A continuación se muestran tres arreglos atómicos básicos y algunos de los metales que utilizan cada uno de ellos:

1. Cúbico centrado en el cuerpo (bcc) hierro alfa, cromo, molibdeno, tantalio, tungsteno, y vanadio. Figura 1.2
2. Cúbico centrado en la cara (fcc) hierro gama, aluminio, cobre, níquel, plomo, plata, oro, platino. Figura 1.3
3. Hexagonal compacto (hcp) berilio, cadmio, cobalto, magnesio, titanio alfa, zinc, y circonio. Figura 1.4

Los metales forman estructuras cristalinas diferentes a fin de minimizar energía requerida para ajustarse entre sí formando un patrón regular. El tungsteno, por ejemplo, forma una estructura bcc porque dicha estructura involucra menos energía que otras.

Por la misma razón, el aluminio forma una estructura fcc. A diferentes temperaturas, sin embargo, un mismo metal puede formar estructuras diferentes, debido a un requerimiento menor de energía a dicha temperatura. Por ejemplo, por debajo de  $912^{\circ}\text{C}$  ( $1674^{\circ}\text{F}$ ) y por encima de  $1394^{\circ}\text{C}$  ( $2541^{\circ}\text{F}$ ) el hierro forma una estructura bcc (hierro alfa), pero entre  $912^{\circ}\text{C}$  y  $1394^{\circ}\text{C}$  forma una estructura fcc (hierro gama).

La presencia de más de un tipo de estructura cristalina se conoce como alotropismo o polimorfismo (que significa muchas formas). Dado que las propiedades y el comportamiento del metal dependen de manera importante de su estructura cristalina, el alotropismo es un factor importante en el tratamiento térmico de los metales y en operaciones de trabajo de metal y de soldadura.

Tabla 1.1. Estructuras cristalinas de elementos metálicos a 25°C.

| Estructura cristalina        | Elemento                       |
|------------------------------|--------------------------------|
| Hexagonal compacta           | Be, Cd, Co, Mg, Ti, Zn         |
| Cúbica compacta              | Ag, Al, Au, Ca, Cu, Ni, Pb, Pt |
| Cúbica centrada en el cuerpo | Ba, Cr, Fe, W, alcalinos       |
| Cúbica-primitiva             | Po                             |

Fuente:<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-ionico/estructura-metales>.

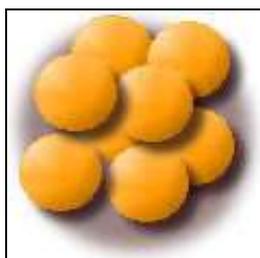


Figura 1.2. Estructura cúbica centrada en el cuerpo.

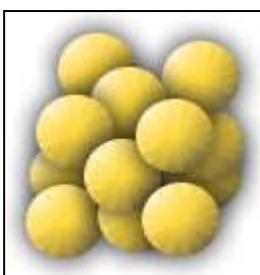


Figura 1.3 Estructura cubica centrada en las caras.

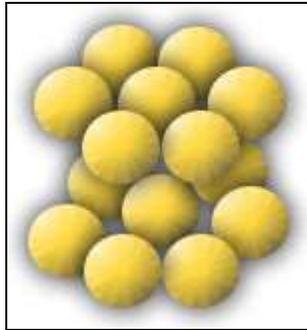


Figura 1.4 Estructura hexagonal compacta

Fuente:<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-ionico/estructura-metales>

### **1.7 DEFORMACIÓN Y RESISTENCIA DE MONOCRISTALES.**

Cuando se sujeta un cristal a una fuerza externa, primero sufre una deformación elástica, esto es, al eliminarse la fuerza vuelve a su forma original. Sin embargo, si la fuerza sobre la estructura cristalina se incrementa lo suficiente, el cristal sufre una deformación plástica o deformación permanente, o sea, no vuelve a su forma original al eliminar la fuerza.

Existen dos mecanismos básicos en estructuras cristalinas mediante los cuales puede ocurrir la deformación plástica. Una es el deslizamiento de un plano de átomos sobre un plano adyacente (plano de deslizamiento) bajo un esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante es la relación de la fuerza cortante aplicada al área de la sección transversal que se está cortando. Un cristal requiere de cierta cantidad de esfuerzo cortante (esfuerzo cortante crítico) para sufrir una deformación permanente. Así que para que ocurra una deformación plástica, debe existir un esfuerzo cortante de magnitud suficiente dentro del cristal.

El segundo mecanismo de deformación plástica es el maclado, en el cual una porción de cristal forma una imagen e espejo de sí mismo a través del plano de maclado. Las maclas se forman de una manera abrupta y son la causa de un sonido de ruptura ("chillido de metal) que ocurre cuando una varilla de

estaño o de zinc es doblada a la temperatura ambiente. El maclado por lo general ocurre en metales hcp.

Sistemas de deslizamiento. La combinación de un plano de deslizamiento y su dirección de deslizamiento se conoce como sistema de deslizamiento. En general, los metales son sistemas de deslizamiento, cuando son 5 o más son dúctiles, en tanto que aquellos con sistemas de deslizamiento por debajo de 5 no lo son.

1. En los cristales cúbicos centrados en el cuerpo, existen 48 posibles sistemas de deslizamiento. Por tanto, es alta la probabilidad de que un esfuerzo cortante externamente aplicado opere en uno de esos sistemas y cause deslizamiento. Sin embargo, en el cristal, el esfuerzo cortante requerido es alto. Los metales con estructura bcc comúnmente tienen buena resistencia y una ductilidad moderada.
2. En los cristales cúbicos centrados en la cara, existen 12 sistemas de deslizamiento. La probabilidad de deslizamiento es moderada, y el corte requerido es bajo. Comúnmente, estos metales tienen una resistencia moderada y buena ductilidad.
3. El cristal hexagonal compacto tiene tres sistemas de deslizamiento, por lo que tiene baja probabilidad de deslizamiento. Sin embargo, a temperaturas elevadas se activan más sistemas de deslizamiento. Los metales con estructuras hcp, son por lo general frágiles a temperatura ambiente.

Con el uso de la microscopía electrónica, se ha podido observar que lo que aparece como un solo plano de deslizamiento es realmente una banda de deslizamiento, formada por un número de planos de deslizamiento.

### 1.7.1 IMPERFECCIONES EN LA ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS METALES.

La resistencia real de los metales es aproximadamente de uno o dos órdenes de magnitud inferior a los niveles de referencia obtenidos en los cálculos teóricos. Esta discrepancia ha sido explicada en función de defectos e imperfecciones en la estructura cristalina. A diferencia de los modelos idealizados, los cristales metálicos reales contienen un gran número de defectos e imperfecciones, que se clasifican como sigue:

- Defectos de línea, conocidos como dislocaciones; ver figura 1.6
- Defectos de punto, como una vacante (átomo faltante), un átomo intersticial (un átomo adicional dentro de la red) o una impureza (átomo extraño) que ha reemplazado al átomo de metal puro; ver figura 1.5
- Imperfecciones de volumen, como las cavidades o inclusiones (elementos no metálicos como óxidos, sulfuros y silicatos);
- Imperfecciones planares, como son las fronteras de grano.

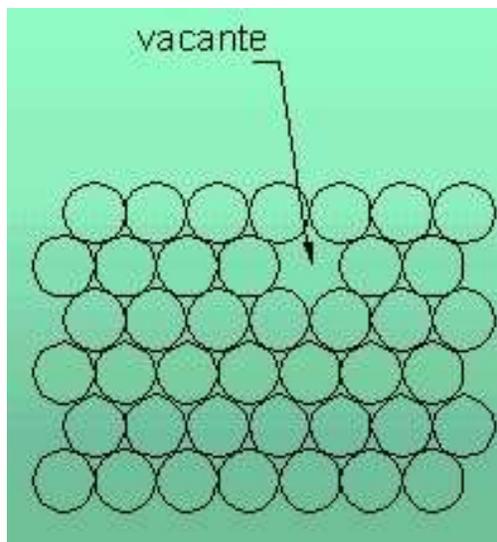


Figura 1.5. Esquema de una vacante como defecto puntual

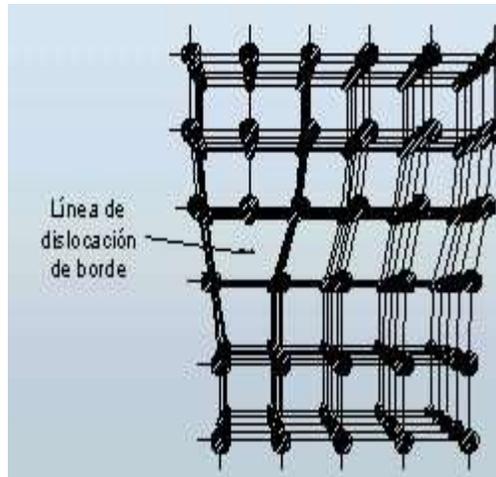


Figura 1.6. Dislocación de borde en una estructura cristalina.

Fuente: W. G. Moffatt. Estructura y propiedades de los materiales. Vol 1, John Niley, 1976.

Las propiedades mecánicas y eléctricas de los metales, como es la cedencia, la resistencia, la fractura y la conductividad eléctrica, son afectadas de manera adversa por estos defectos y se conocen como propiedades sensibles a la estructura; por otra parte, sus propiedades físicas y químicas, como punto de fusión, calor específico, coeficiente de dilatación térmica y constantes elásticas (por ejemplo, el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez) no son sensibles a estos defectos; se conocen como propiedades insensibles a la estructura.

Dislocaciones. Observadas por primera vez en la década de 1930, las dislocaciones son defectos del arreglo ordenado de la estructura atómica de un metal. Son los defectos más significativos, que ayudan a explicar la discrepancia entre la resistencia real y teórica de los metales. Un plano de deslizamiento que contiene una dislocación requiere menos esfuerzo cortante para permitir el deslizamiento que un plano en una red perfecta.

Existen dos tipos de dislocaciones: de borde y en tornillo. Un ejemplo utilizado para describir el movimiento de una dislocación de borde es la lombriz de tierra, que se mueve hacia delante mediante un engrosamiento que se inicia en la cola y que se traslada hacia la cabeza.

Otro ejemplo de una dislocación de borde es el movimiento de un tapete grande formando una onda en un extremo y moviéndola hacia el otro extremo.

La fuerza requerida para mover un tapete de esta manera es mucho menor a la requerida para deslizar todo el tapete sobre el piso. Las dislocaciones en tornillo se llaman así porque los planos atómicos forman una rampa en espiral.

### **1.7.2 ENDURECIMIENTO POR TRABAJO (ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN)**

Aunque la presencia de una dislocación reduce el esfuerzo cortante requerido para causar deslizamiento, las dislocaciones pueden:

1. Enmarañarse e interferir entre sí; y
2. Quedar restringidas por barreras, como fronteras de grano e impurezas e inclusiones dentro del material.

Los enmarañamientos y las restricciones incrementan el esfuerzo cortante requerido para el deslizamiento. El enmarañamiento es igual a mover dos arrugas a ángulos diferentes a través de un tapete: donde se cruzan, las dos arrugas interfieren entre sí, y su efecto combinado es dificultar el movimiento del tapete.

El efecto de un aumento del esfuerzo cortante que causa un incremento en la resistencia general del metal se conoce como endurecimiento por trabajo o endurecimiento por deformación. Mientras mayor sea la deformación, mayor será el número de enmarañamientos, de ahí el incremento de la resistencia del metal. El endurecimiento por trabajo se utiliza de manera común para aumentar la resistencia de los metales en los procesos de trabajo de metal a temperatura ambiente. Ejemplos típicos son la producción de metal laminado para carrocerías de automóviles y fuselajes de aeronaves mediante el laminado.

### **. 1.7.3 GRANOS Y FRONTERAS DE GRANOS.**

Los metales comúnmente utilizados para la manufactura de varios productos consisten en muchos cristales individuales orientados al azar (granos). Estamos tratando con estructuras metálicas que no son monocristales, sino que son policristales.

Cuando una masa de metal fundido empieza a solidificarse, comienzan a formarse cristales de manera independiente uno del otro, en varios sitios dentro de la masa líquida, tienen orientaciones aleatorias y no relacionadas. Cada uno de estos cristales crece formando una estructura cristalina es decir un grano. El número y tamaño de los granos desarrollados en la unidad de volumen del metal depende de la tasa a la cual ocurre la nucleación (la etapa inicial de formación de los cristales). El número de sitios diferentes en el cual se empiezan a formar los monocristales y a la velocidad a la cual crecen estos cristales influyen de forma importante el tamaño medio de los granos que se desarrollan.

Si la rapidez de nucleación del cristal es elevada, será grande el número de granos por unidad de volumen de metal; en consecuencia, el tamaño del grano será pequeño. Por lo mismo, si la velocidad de crecimiento de los cristales es elevado (comparado con su rapidez de nucleación), habrá menos granos por unidad de volumen y su tamaño será más grande.

Por lo general, un enfriamiento rápido produce granos más pequeños, en tanto que un enfriamiento lento produce granos más grandes. Las superficies que separan estos granos individuales se conocen como fronteras de grano.

Cada grano está formado, ya sea por un monocristal (para metales puros) o en un agregado policristalino (para aleaciones).

El comportamiento ideal de una pieza de metal policristalino es isotrópico porque sus granos tienen orientaciones cristalográficas aleatorias.

### 1.7.4 TAMAÑO DE GRANO.

El tamaño de grano influye de manera significativa en las propiedades mecánicas de los metales. A temperatura ambiente, un tamaño de grano grande por lo general se asocia con una baja resistencia, una baja dureza, y una baja ductibilidad. Los granos grandes, particularmente en los metales laminados, también causan una apariencia superficial áspera una vez que el metal ha sido estirado. El tamaño de grano por lo general se mide contando el número de granos en un área dada, o contando el número de granos que se cruzan en la longitud de una línea dibujada al azar en una fotografía ampliada de los granos. El tamaño de grano también puede determinarse comparándolo con un diagrama estándar.

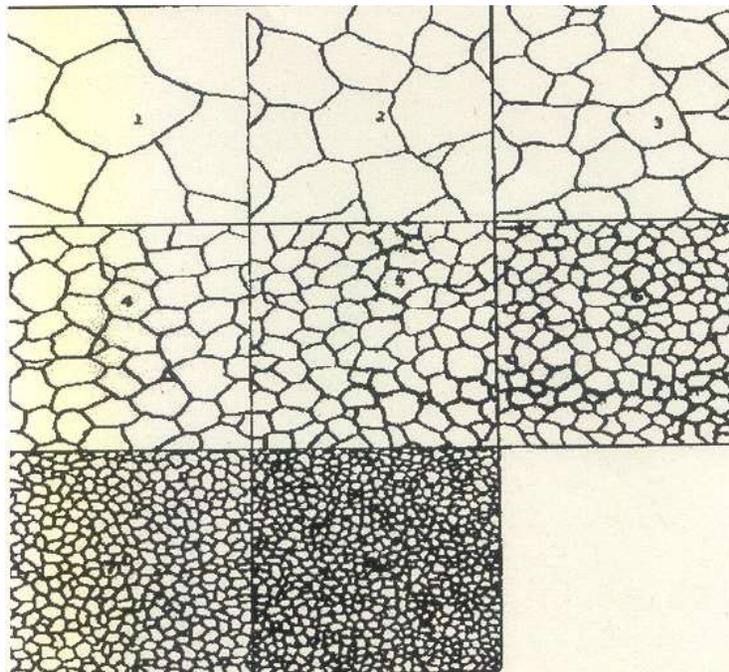


Figura 1.7 Tamaño de grano sobre una superficie de 0.01mm

Fuente: L. Van Vlack, Materials for Engineering, 4a Edición.

El número ASTM (The American Society for Testing and Materials) de tamaño de grano,  $n$ , está relacionado con el número de granos  $N$  por pulgada

cuadrada en una ampliación 100X (igual a 0.0645 mm<sup>2</sup> de área real) mediante la fórmula

$$N=2^{n-1}.$$

Dado que por lo general los granos son extremadamente pequeños, muchos de ellos pueden ocupar una unidad volumétrica típica de metal. Los tamaños de grano entre 5 y 8 comúnmente se consideran granos finos.

Un tamaño de grano de 7 es aceptable para los metales laminados en la fabricación de carrocerías de automóvil, enseres domésticos, y utensilios de cocina. Los granos pueden ser tan grandes que son visibles a simple vista, como los de zinc en la superficie de las láminas de acero galvanizado.

Tabla 1.8 Tamaño de granos

| No.ASTM<br>No de tamaño<br>de grano | Granos/mm <sup>2</sup> | Granos/mm <sup>3</sup> |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
| -3                                  | 1                      | 0.7                    |
| -2                                  | 2                      | 2                      |
| -1                                  | 4                      | 5.6                    |
| 0                                   | 8                      | 16                     |
| 1                                   | 16                     | 45                     |
| 2                                   | 32                     | 128                    |
| 3                                   | 64                     | 360                    |
| 4                                   | 128                    | 1020                   |
| 5                                   | 256                    | 2900                   |
| 6                                   | 512                    | 8200                   |
| 7                                   | 1024                   | 23000                  |
| 8                                   | 2048                   | 65000                  |
| 9                                   | 4096                   | 185000                 |
| 10                                  | 8200                   | 520000                 |
| 11                                  | 16400                  | 1500000                |
| 12                                  | 32800                  | 4200000                |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4<sup>a</sup> Edición.

### **1.7.5 INFLUENCIA DE LAS FRONTERAS DE GRANO.**

Las fronteras de grano tienen una influencia importante en la resistencia y ductilidad de los metales.

Dado que interfieren con el movimiento de las dislocaciones, las fronteras de grano también influyen en el endurecimiento por deformación. Estos defectos dependen de la temperatura, la rapidez de deformación, y del tipo y cantidad de impurezas presentes a lo largo de las fronteras de grano.

Las fronteras de grano son más reactivas que los granos mismos, ya que los átomos a lo largo de las fronteras de grano están empaquetados de una manera menos eficiente y más desordenada. Como resultado, tienen una energía más elevada que los átomos en la red ordenada dentro de los granos. Por esta razón, una superficie pulida y atacada químicamente puede hacerse áspera.

A temperaturas elevadas, y en materiales cuyas propiedades dependen de la rapidez de deformación, ocurre también la deformación plástica mediante el deslizamiento de fronteras de grano. El mecanismo de cedencia plástica, elongación bajo el esfuerzo a lo largo de un periodo de tiempo por lo general a temperaturas elevadas; cedencia es el resultado del deslizamiento de fronteras de grano.

Fragilización de las fronteras de grano. Cuando se pone en contacto atómico íntimo con ciertos metales de bajo punto de fusión, un metal normalmente dúctil y resistente puede agrietarse bajo esfuerzos muy bajos. Ejemplos son aluminio humedecido con una amalgama de mercurio y zinc o de galio líquido; y cobre a temperatura elevada, humedecido con plomo o bismuto.

El término fragilización por metal líquido se utiliza para describir este fenómeno, dado que el elemento fragilizador aparece en estado líquido. Sin embargo, la fragilización también puede ocurrir a temperaturas muy por debajo

del punto de fusión del elemento fragilizador, y este fenómeno se conoce como fragilización de metal sólido.

Fragilidad en caliente es causada por la fusión local de un constituyente o de una impureza en la frontera de grano a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal mismo. Cuando esta sujeta a deformación plástica a temperaturas elevadas (trabajo en caliente), la pieza de metal se desmorona y se desintegra a lo largo de las fronteras de grano. Ejemplos son antimonio en el cobre, aceros al plomo y el latón al plomo.

A fin de evitar la fragilidad, el metal es trabajado a temperatura inferior, a fin de evitar el reblandecimiento y la fusión a lo largo de las fronteras de grano.

Otra forma de fragilización es el de revenido de los aceros aleados, causado por la segregación de las impurezas a las fronteras de grano.

## **1.8 DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LOS METALES POLICRISTALINOS.**

Deformación elástica o reversible el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. En este tipo de deformación, el sólido, al variar su estado tensional y aumentar su energía interna en forma de *energía potencial elástica*, solo pasa por cambios termodinámicos reversibles.

Comúnmente se entiende por materiales elásticos, aquellos que sufren grandes elongaciones cuando se les aplica una fuerza, como la goma elástica que puede estirarse sin dificultad recuperando su longitud original una vez que desaparece la carga. Este comportamiento, sin embargo, no es exclusivo de estos materiales, de modo que los metales y aleaciones de aplicación técnica, piedras, hormigones y maderas empleados en construcción y, en general, cualquier material, presenta este comportamiento hasta un cierto valor de la fuerza aplicada; si bien en los casos apuntados las deformaciones son pequeñas, al retirar la carga desaparecen.

Al valor máximo de la fuerza aplicada sobre un objeto para que su deformación sea elástica se le denomina límite elástico y es de gran importancia en el diseño mecánico, ya que en la mayoría de aplicaciones es éste y no el de la rotura, el que se adopta como variable de diseño (particularmente en mecanismos). Una vez superado el límite elástico aparecen deformaciones plásticas (remanentes tras retirar la carga) comprometiendo la funcionalidad de ciertos elementos mecánicos.

Una medida cuantitativa de la elasticidad de un material podría lógicamente expresarse como el grado al que el material puede deformarse dentro del límite de la acción elástica; pero, pensando en términos de esfuerzos que en deformación, un índice práctico de la elasticidad es el esfuerzo que marca el límite del comportamiento elástico.

El comportamiento elástico es ocasionalmente asociado a otros dos fenómenos; la proporcionalidad lineal del esfuerzo y de la deformación, y la no-absorción de energía durante la variación cíclica del esfuerzo. El efecto de absorción permanente de energía bajo esfuerzo cíclico dentro del rango elástico, llamado histéresis elástica o saturación friccional, es ilustrado por la decadencia de la amplitud de las vibraciones libres de un resorte elástico; estos dos fenómenos no constituyen necesarios criterios sobre la propiedad de la elasticidad y realmente son independientes de ella.

Para medir la resistencia elástica, se han utilizado varios criterios a saber: el límite elástico, el límite proporcional y la resistencia a la cedencia. El límite elástico se define como el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin que ocurra la deformación permanente al retirar el esfuerzo. El límite proporcional se define cómo el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin desviarse de la proporcionalidad rectilínea entre el esfuerzo y la deformación; se ha observado que la mayoría de los materiales exhiben esta relación lineal entre el esfuerzo y la deformación dentro del rango elástico.

## **1.9 DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LOS METALES POLICRISTALINOS.**

Si una pieza de cristal policristalino con granos equiaxiales uniformes (que tienen iguales dimensiones en todas direcciones) es sujeto a la deformación plástica a la temperatura ambiente (trabajo en frío), los granos se deforman y alargan. El proceso de deformación se puede llevar a cabo ya sea comprimiendo el metal, como se hace en la forja para fabricar un disco de turbinas o poniéndolo a la tensión, como se hace al estirar el metal laminado para fabricar la carrocería de un automóvil.

Durante la deformación plástica, las fronteras de grano se mantienen intactas y se conserva la continuidad de la masa. El metal deformado exhibe una mayor resistencia debido al enmarañamiento de dislocaciones con las fronteras de grano. El incremento en resistencia depende de la cantidad de deformación a la cual se sujeta el metal; mientras mayor es la deformación, más resistente se hace el metal. Además, el incremento de la resistencia es más elevado para los metales con granos más pequeños, porque tienen un área de frontera de grano más grande por unidad volumétrica de metal.

Anisotropía (textura). Como resultado de una deformación plástica, los granos se han alargado en una dirección y se han contraído en la otra. En consecuencia, esta pieza de metal se ha convertido en anisotrópica, y sus propiedades en dirección vertical son diferentes a las correspondientes a la horizontal.

Muchos productos desarrollan anisotropía de las propiedades mecánicas una vez procesados utilizando técnicas de conformado metálico. El grado de anisotropía depende de que tan uniformemente haya sido deformado el metal.

Orientación preferida. También conocida como anisotropía cristalográfica. Cuando un cristal de metal se sujeta a tensión, los bloques en deslizamiento giran hacia la dirección de la fuerza de estirado. Como resultado, los planos de deslizamiento y bandas de deslizamiento tienden a alinearse en la dirección de la deformación. De manera similar, en un agregado policristalino con granos en varias ubicaciones, todas las orientaciones de deslizamiento tienden a alinearse en la dirección de la fuerza de estirado. De la misma manera, los planos de deslizamiento bajo compresión tienden a alinearse en dirección perpendicular a la trayectoria de la fuerza de compresión.

Formación mecánica de fibras. La formación mecánica de fibras resulta de la alineación de impurezas, inclusiones (estrías), y huecos en el metal durante la deformación. Dado que las impurezas debilitan las fronteras de grano, una pieza de metal sería débil y menos dúctil al ser probada en la dirección vertical.

Un ejemplo es el triplay, que es resistente a la tensión a lo largo de su dirección planar, pero que se despegará fácilmente cuando se sujeta a la tensión en dirección a su espesor.

### **1.9.1 RECUPERACIÓN, RECRISTALIZACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRANOS.**

La deformación plástica a temperatura ambiente causa la deformación de los granos y de las fronteras de los granos, un incremento general en resistencia, y una reducción en ductibilidad causa a su vez un comportamiento anisotrópico. Estos efectos pueden ser invertidos, y las propiedades del metal pueden ser devueltas a sus niveles originales, calentando la pieza en un rango específico de temperatura durante un periodo de tiempo.

Este proceso por lo general se conoce como recocido. El rango de temperatura y cantidad de tiempo depende del material y de otros factores. Estos eventos ocurren consecutivamente durante el proceso de calentamiento:

1. Recuperación. Durante la recuperación, que ocurre a un cierto nivel de temperatura por debajo de la temperatura de cristalización del metal, se eliminan los esfuerzos en las regiones altamente deformadas. Se empiezan a formar fronteras de subgrano, sin ningún cambio apreciable en las propiedades mecánicas como dureza y resistencia.
2. Recristalización. El proceso, identificado como recristalización, en el cuál, a cierto rango de temperatura, se forman nuevos granos equiaxiales y libres de deformación, reemplazando a los granos antiguos.

La temperatura de recristalización se define generalmente como la temperatura a la cual ocurre la recristalización completa en aproximadamente una hora. La recristalización reduce la densidad de las dislocaciones, baja la resistencia y eleva la ductilidad del metal. El plomo, el estaño, el cadmio y el zinc se recristalizan a la temperatura ambiente; como resultado, al ser trabajado en frío, no se endurecen por el trabajo.

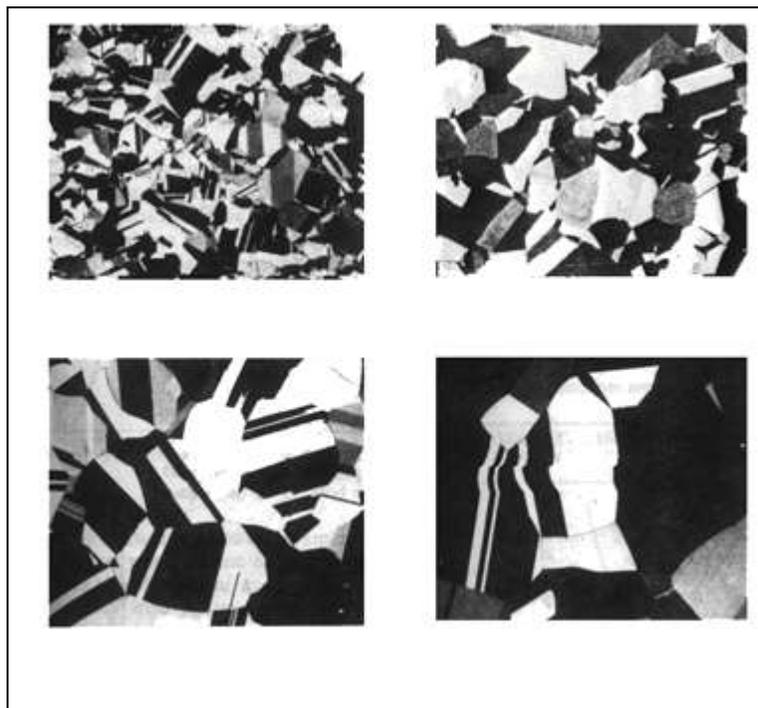


Figura 1.9. Muestra micrografías de latón en un proceso de recristalización.

Fuente: <http://www2.ing.puc.cl/icm cursos/metalurgia/apuntes/cap2/23/>

La recristalización depende del grado del trabajo en frío anterior (endurecimiento por trabajo): mientras más trabajo en frío, menor será la temperatura requerida para que ocurra la recristalización. Conforme se incrementa el trabajo en frío, también se incrementa el número de dislocaciones y la cantidad de energía almacenada en dichas dislocaciones (energía almacenada). Esta energía suministra el trabajo requerido para la recristalización.

La recristalización es una función del tiempo, ya que involucra la difusión, o sea, movimiento o intercambio de átomos a través de las fronteras de grano.

Los efectos sobre la recristalización de la temperatura, del tiempo y de la reducción en el espesor o la altura de la pieza de trabajo mediante el trabajo en frío son como sigue:

- a. Para una cantidad constante de deformación por trabajo en frío, el tiempo requerido para recristalización se reduce con una mayor temperatura;
  - b. Mientras mayor sea el trabajo en frío anterior, menor será la temperatura requerida para la recristalización;
  - c. Mientras mayor sea la cantidad de deformación, menor será el tamaño del grano después de la recristalización, este efecto es un método común de convertir una estructura de grano grande a una con un grano más fino, y por tanto, con mejores propiedades;
  - d. La anisotropía debida a la orientación preferida por lo general persiste después de la recristalización. Para restaurar la isotropía, pudiera ser necesaria una temperatura más elevada que la requerida para la recristalización.
3. Crecimiento del grano. Si seguimos incrementando la temperatura del metal, los granos empiezan a crecer, y su tamaño puede eventualmente exceder el tamaño del grano original.

Este fenómeno se conoce como crecimiento del grano, y afecta las propiedades mecánicas. Los granos grandes producen una apariencia superficial áspera en los metales laminados.

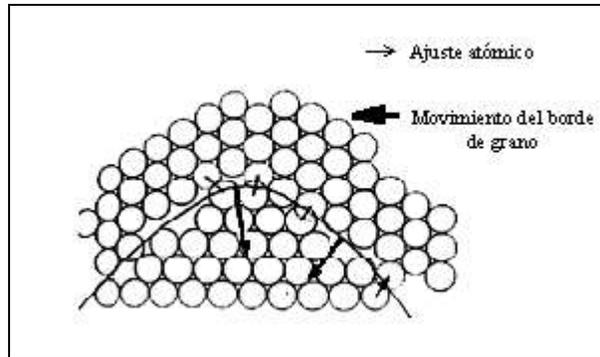


Figura 1.10 Crecimiento del grano.

Fuente: L. Van Vlack, Materials for Engineering, 4a Edición.

### **1.10 TRABAJO EN FRÍO, TRABAJO EN TIBIO Y TRABAJO EN CALIENTE.**

El trabajo en frío se refiere a la deformación plástica que se lleva a cabo normalmente, aunque no necesariamente, a la temperatura ambiente. Cuando la deformación se efectúa por encima de la temperatura de recristalización, se conoce como trabajo en caliente. Ver figura 1.12.

Como el nombre implica, el trabajo en tibio se lleva a cabo a temperaturas intermedias. Por lo que el trabajo en templado es un punto intermedio entre el trabajo en frío y el trabajo en caliente.

Los rangos de temperatura para estas tres clases de deformación plástica aparecen en la siguiente tabla en función de relaciones, donde  $T$  es la temperatura de trabajo y  $T_m$  es el punto de fusión del metal, ambos en la escala absoluta.

Aunque se trata de una cantidad sin dimensiones, esta relación se conoce como la temperatura homóloga.

TABLA 1.11 Rangos de temperatura homóloga para varios procesos.

| Procesos            | $T/T_m$   |
|---------------------|-----------|
| Trabajo en frío     | <0.3      |
| Trabajo en tibio    | 0.3 a 0.5 |
| Trabajo en caliente | >0.6      |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

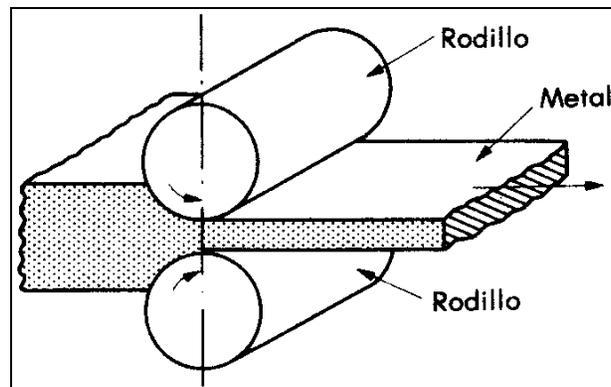


Figura 1.12. Mecanismo de trabajo en caliente (laminado).

Fuente:

<http://www.geocities.com/CollegePark/Den/1108/laminado/laminado02.html>

## CAPÍTULO 2

### PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.

#### 2.1 TENSIÓN.

La prueba de tensión es la más común para determinar las propiedades mecánicas de los materiales como resistencia, ductilidad, tenacidad, módulo elástico y endurecimiento por deformación. El ensayo primero requiere la preparación de un espécimen de prueba, se prepara según las especificaciones apropiadas de las organizaciones correspondientes. A pesar que la mayor parte de los especímenes de prueba a la tensión son sólidos y redondos, algunos son de hoja plana o tubular.

Un ejemplo es un espécimen de prueba de tensión estándar antes y después de haber sido estirado, que muestra la longitud de calibración original y final.

El espécimen se monta entre las mordazas de una máquina de ensayo a la tensión. Estas máquinas están equipadas con varios controles, de manera que el espécimen puede ser ensayado a velocidades diferentes de deformación y temperatura.

#### Curvas de esfuerzo-deformación

Una secuencia típica de deformación del espécimen de ensayo a la tensión es cuando se aplica la carga, al principio el espécimen se alarga en proporción con la carga. Este efecto se conoce como comportamiento elástico lineal. Si se retira la carga, el espécimen regresa a su longitud y forma original, en un proceso elástico similar al estiramiento de una banda de hule y su liberación.

El esfuerzo ingenieril, o esfuerzo nominal se define como la relación de la carga  $P$  aplicada con el área transversal  $A_0$  del espécimen.

Esfuerzo de ingenieril,  $\sigma = P/A_0$

La deformación ingenieril se define como:

Deformación ingenieril,  $e = (l - l_0)/l_0$ ,

Donde  $l$  es la longitud instantánea del espécimen.

Conforme se incrementa la carga, el espécimen empieza, a cierto nivel de esfuerzo, a sufrir una deformación permanente o plástica. Más allá de ese nivel, el esfuerzo y la deformación ya no son proporcionales como lo eran en la región elástica. El esfuerzo al cual ocurre este fenómeno se conoce como el esfuerzo de cedencia del material. El término límite proporcional también es utilizado para especificar el punto donde el esfuerzo y la deformación dejan de ser proporcionales.

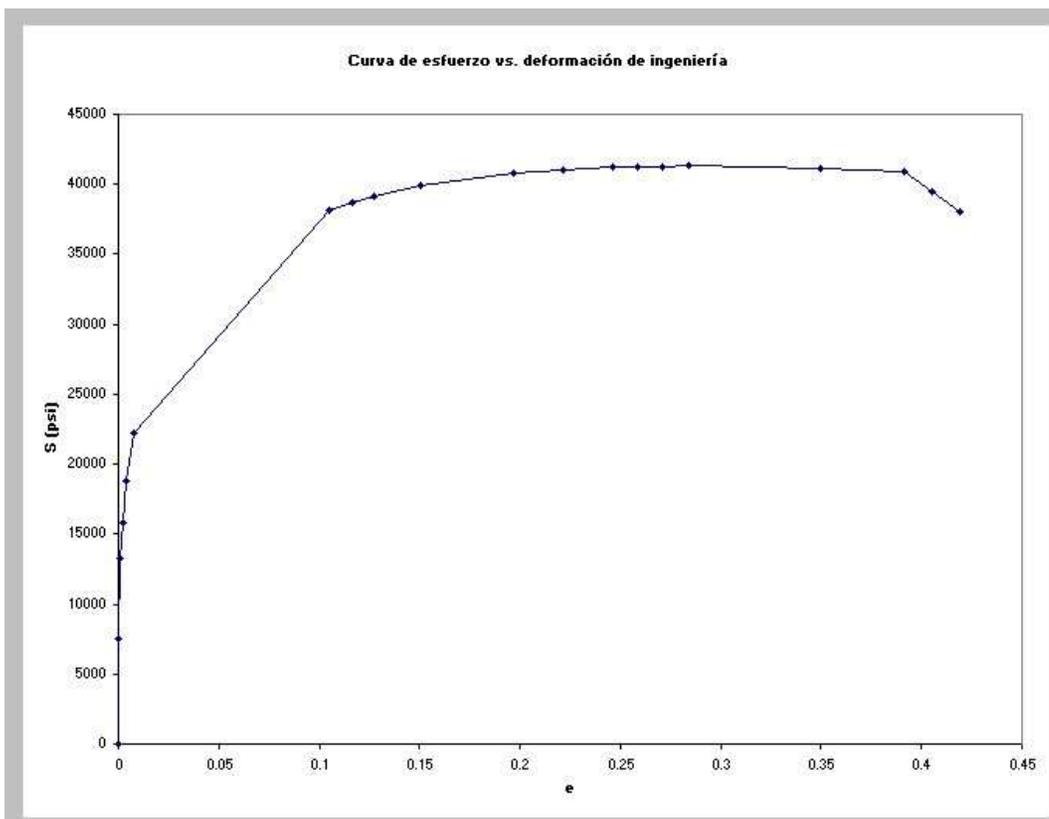


Figura 2.1. Una curva de esfuerzo-deformación típica, obtenida de una prueba de tensión, mostrando varias características.

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 4ª Edición.

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de varios materiales a temperatura ambiente.

| Metales Forjados           | E (GPa)<br>Modulo de elasticidad | Y(MPa)<br>Esfuerzo-Deformación. | UTS(MPa)<br>Resistencia tensil máxima | Elongación en 50milímetros (%) |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Aluminio y sus aleaciones  | 69-79                            | 35-550                          | 90-600                                | 45-4                           |
| Cobre y sus aleaciones     | 105-150                          | 76-1100                         | 140-1310                              | 65-3                           |
| Plomo y sus aleaciones     | 14                               | 14                              | 20-55                                 | 50-9                           |
| Magnesio y sus aleaciones  | 41-45                            | 130-305                         | 240-380                               | 21-5                           |
| Molibdeno y sus aleaciones | 330-360                          | 80-2070                         | 90-2340                               | 40-30                          |
| Níquel y sus aleaciones    | 180-214                          | 105-1200                        | 345-1450                              | 60-5                           |
| Aceros                     | 190-200                          | 205-1725                        | 415-1750                              | 65-2                           |
| Titanio y sus aleaciones   | 80-130                           | 344-1380                        | 415-1450                              | 25-7                           |
| Tungsteno y sus aleaciones | 350-400                          | 550-690                         | 620-760                               | 0                              |
| Materiales no metálicos.   |                                  |                                 |                                       |                                |
| Cerámica                   | 70-1000                          | ----                            | 140-2600                              | 0                              |
| Diamante                   | 820-1050                         | ----                            | ----                                  | ----                           |
| Vidrio y Porcelana         | 70-80                            | ----                            | 140                                   | 0                              |
| Hules                      | 0.01-0.1                         | ----                            | ----                                  | ----                           |
| Termoplástico              | 1.4-3.4                          | ----                            | 7-80                                  | 1000-5                         |
| Termoplástico, reforzados  | 2-50                             | ----                            | 20-120                                | 10-1                           |
| Termoestables              | 3.5-17                           | ----                            | 35-170                                | 0                              |
| Fibras de boro             | 380                              | ----                            | 3500                                  | 0                              |
| Fibras de carbono          | 275-415                          | ----                            | 2000-3000                             | 0                              |
| Fibras de vidrio           | 73-85                            | ----                            | 3500-4600                             | 0                              |

|                  |        |      |      |   |
|------------------|--------|------|------|---|
| Fibras de Kevlar | 62-117 | ---- | 2800 | 0 |
|------------------|--------|------|------|---|

Nota: En la tabla superior los valores más bajos para E, Y, y resistencia tensil máxima, así como los valores más elevados de elongación se refiere a metales puros. Multiplique gigapascales (Gpa) por 145000 para obtener libras por pulgadas cuadradas, (psi) y megapascales (Mpa) por 145 para obtener psi. Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

Para materiales blandos y dúctiles, quizá no sea fácil determinar el punto exacto en la curva esfuerzo deformación donde inicie la cedencia, porque la pendiente de la porción recta de la curva empieza a disminuir lentamente. Por tanto, definimos (Y) como el punto de la curva esfuerzo-deformación que esta compensada por una deformación de 0.0002, es decir, por una elongación del 0.2%.

Conforme, bajo una carga creciente, sigue el espécimen alargándose más allá de (Y), su área transversal se reduce de manera permanente y uniforme en toda la longitud de calibración. Si el espécimen es descargado de un nivel de esfuerzo más elevado que el nivel de cedencia, la curva sigue una línea recta hacia abajo y paralela a la pendiente original conforme se incrementa aun más la carga, el esfuerzo ingenieril finalmente llega a un máximo y entonces empieza a disminuir. El esfuerzo ingenieril máximo se conoce como resistencia a la tensión.

Si el espécimen se carga más allá de la resistencia tensil máxima, empieza a formarse un cuello.

El área transversal del espécimen ya no es uniforme a lo largo de su longitud calibrada y es más pequeño en la región del cuello. Conforme avanza la prueba, los esfuerzos ingenieriles disminuyen aun más y el espécimen finalmente se fractura en la región del cuello. El esfuerzo ingenieril a la fractura se conoce como esfuerzo de ruptura o de fractura.

La relación de esfuerzo a la deformación en la región elástica se conoce como el módulo de elasticidad,  $E$ , o módulo de Young (según T. Young, 1773-1829):

$$\text{Módulo de elasticidad, } E = \sigma / e.$$

Esta relación lineal se conoce como la ley de Hooke (según R. Hooke, 1635-1703). El módulo de elasticidad es esencialmente una medida de la pendiente de la porción elástica de la curva y por tanto de la rigidez del material obsérvese que en la ecuación anterior que, dado que la deformación ingenieril carece de dimensiones,  $E$  tiene las mismas unidades que el esfuerzo. Mientras más elevado sea el valor de  $E$ , más alta será la carga requerida para estirar el espécimen la misma cantidad, y por tanto más rígido será el material.

La elongación del espécimen bajo tensión es acompañado de una contracción lateral; este efecto se puede observar al estirar una banda de hule. El valor absoluto de la relación en este espécimen de la deformación lateral en relación con la deformación longitudinal se conoce como la relación de Poisson (según S. D. Poisson, 1781-1840) y se identifica con la letra  $\mu$ .

En los siguientes diagramas se muestran algunos de los procedimientos comunes para aplicar las pruebas de resistencia al corte, la compresión, la fatiga o durabilidad, el impacto, la torsión y de dureza.

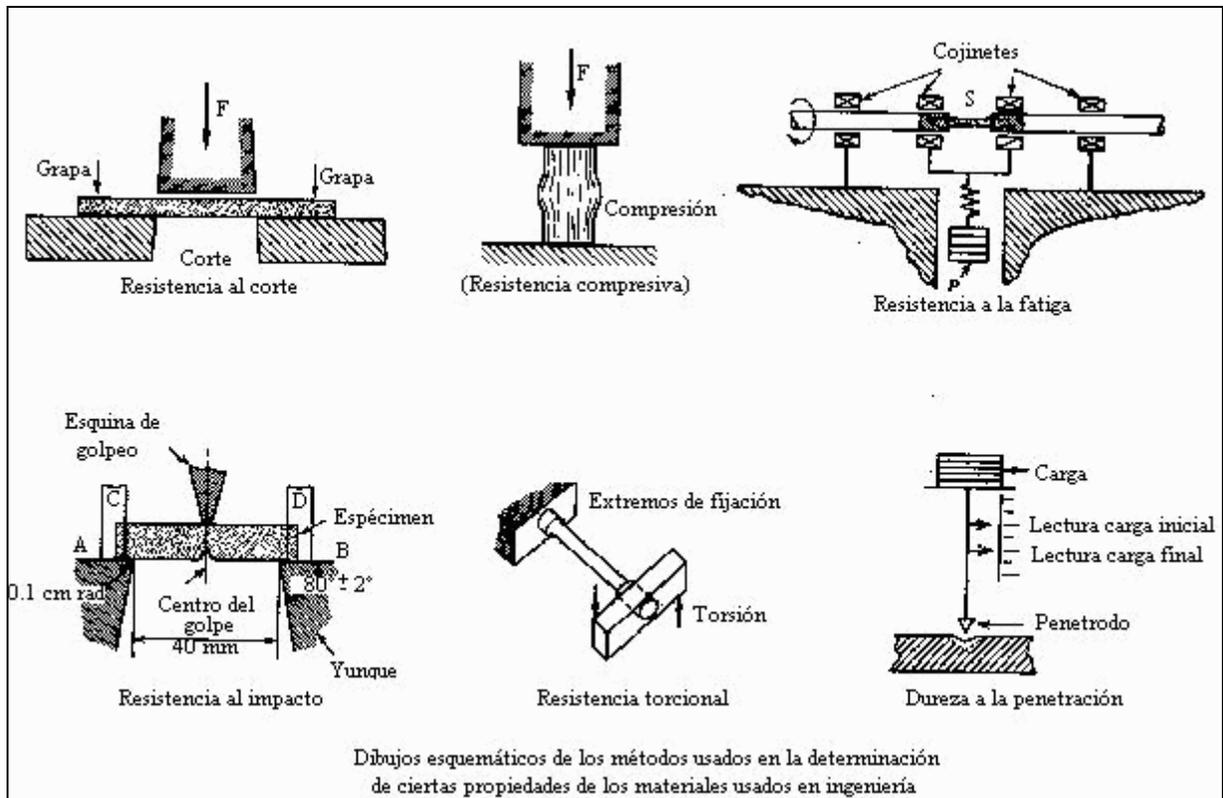


Figura 2.3 Ensayos mecánicos de los materiales.

Fuente: "Procesos básicos de manufactura", Begeman

### 2.1.1 DUCTILIDAD.

Un comportamiento importante observado durante una prueba de tensión es la ductilidad, esto es, la cantidad de deformación plástica que sufre el material antes de ser fracturada.

Existen dos medidas comunes de ductilidad. La primera es la elongación total del espécimen, y la segunda medida es la reducción de área. La reducción del área y la elongación por lo general están interrelacionados para algunos metales de ingeniería típicos.

Por lo que la ductilidad de una pieza de gis es cero, porque no se estira de ninguna manera ni se reduce un su sección transversal; en comparación, un espécimen dúctil, como una pieza de arcilla o de goma de mascar, se estira se

forma un cuello considerable antes que falle. La reducción del área a tensión ha sido demostrada para predecir la capacidad de doblado y de formado de lámina de los metales.

### **2.1.2 ESFUERZO REAL Y DEFORMACIÓN REAL.**

El esfuerzo ingenieril se basa en el área transversal original del espécimen. Sabemos, sin embargo, que el área transversal instantánea del espécimen se hace más pequeña conforme se alarga, igual que el área en una banda de hule. Por lo que el esfuerzo ingenieril no represente el esfuerzo real al cual esta sujeto el espécimen.

El esfuerzo real se define como la relación de la carga (P) al área transversal real por tanto verdadera (A) del espécimen:

$$\text{Esfuerzo real, } \sigma = P / A.$$

Para la deformación real, primero consideramos la elongación del espécimen e incrementos de cambios instantáneos en la longitud. Después, podemos demostrar que la deformación real se calcula de la forma

$$\text{Deformación verdadera } \epsilon = \ln (l / l_0).$$

A diferencia de las deformaciones de ingenieriles, las deformaciones reales corresponden a los fenómenos físicos reales en la deformación de los materiales.

### **2.1.3 EFECTOS DE LA RAPIDEZ DE DEFORMACIÓN.**

Algunas máquinas, como las prensas hidráulicas, conforman los materiales a baja velocidad; otras como las prensas mecánicas, lo hacen a alta velocidad. A fin de simular estas diferencias, el espécimen se puede deformar a una

velocidad que corresponda a la que va a experimentar en el proceso real de manufactura.

La rapidez de deformación se define como la velocidad a la cual el ensayo de la tensión se efectúa. La velocidad de deformación por otra parte, es función de la longitud del espécimen. Un espécimen corto se alarga proporcionalmente más durante el mismo periodo de tiempo que un espécimen largo.

Tabla 2. 4 Rangos típicos de rapidez y velocidad de deformación en los procesos de manufactura.

| Proceso                        | Deformación real | Rapidez de deformación (m/s) |
|--------------------------------|------------------|------------------------------|
| Trabajo en Frio                |                  |                              |
| Forja, laminado                | 0.1-0.5          | 0.1-100                      |
| Estirado de alambre y de tubo  | 0.05-0.5         | 0.1-100                      |
| Formado explosivo              | 0.05-0.2         | 10-100                       |
| Trabajo en caliente y en Tibio |                  |                              |
| Forjado, laminado              | 0.1-0.5          | 0.1-30                       |
| Extrusión                      | 2-5              | 0.1-1                        |
| Maquinado                      | 1-10             | 0.1-100                      |
| Formado de lámina metálica     | 0.1-0.5          | 0.05-2                       |
| Formado súper plástico         | 0.2-3            | $10^{-4}$ - $10^{-2}$        |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

#### 2.1.4 EFECTOS DE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Se han llevado a cabo varias pruebas bajo presión hidrostática para determinar el efecto de esta en las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados indican que el incremento de la presión hidrostática aumenta la deformación a la fractura de una manera sustancial, tanto para materiales dúctiles como para frágiles.

Este efecto benéfico de la presión hidrostática ha sido explotado en los procesos de trabajado de metal, particularmente en la presión hidrostática y en la compactación de polvos metálicos.

### **2.1.5 EFECTOS DE LA RADIACIÓN**

A partir del uso de muchos metales y aleaciones en aplicaciones nucleares, se han llevado a cabo extensos estudios sobre los efectos de la radiación en las propiedades mecánicas. Los cambios típicos en las propiedades de los aceros y otros metales expuestos a radiaciones de alta energía son el incremento del esfuerzo para cedencia, resistencia a la tensión y dureza, así como una reducción en ductilidad y tenacidad. La radiación tiene un efecto nocivo similar sobre el comportamiento de los plásticos.

### **2.2 COMPRESIÓN.**

Muchas operaciones en la manufactura, particularmente procesos como la forja, el laminado y la extrusión se llevan a cabo sujetando a la pieza de trabajo a fuerzas de compresión. La prueba de compresión o ensayo de compresión, en el cual el espécimen queda sujeto a dicha carga, nos da información útil para estos procesos.

Este ensayo por lo general se lleva a cabo comprimiendo un espécimen cilíndrico sólido entre dos dados planos. Debido a la fricción entre el espécimen y los dados planos, la superficie cilíndrica del espécimen se abomba; este efecto se conoce como barrilado. La fricción impide que las superficies superior e inferior se expandan con libertad.

Dado que el área transversal del espécimen cambia ahora a lo largo de su altura, con una máxima en la parte media, resulta difícil la obtención de curvas de esfuerzo deformación a la compresión. Además la fricción disipa energía, por lo que la fuerza de compresión es mas elevada de lo que por otra parte

tendría que ser, a fin de suministrar el trabajo requerido para vencer la fricción. Con una lubricación efectiva se puede minimizar la fricción, y es posible mantener un área transversal razonablemente constante durante el ensayo.

Cuando se comparan los resultados del ensayo a la compresión y a la tensión en metales dúctiles, las curvas reales de esfuerzo deformación de ambos ensayos coinciden. Esta comparación no se presenta en materiales frágiles, que son por lo general más resistentes y más dúctiles a la compresión que a la tensión.

Cuando un metal con un cierto esfuerzo de cadencia tensil es sujeto a tensión en el rango plástico, y entonces la carga se libera y se aplica a compresión, el esfuerzo de cadencia a compresión es inferior al correspondiente a la tensión. Este fenómeno es conocido como el efecto Bauschinger (según J. Bauschinger, que lo detectó en 1881), y ocurre en varios grados en todos los metales y aleaciones. Dado el menor esfuerzo de cadencia en dirección opuesta a la aplicación original de la carga, este fenómeno también se conoce como reblandecimiento por deformación o reblandecimiento por trabajo.

Ensayo de disco. Para materiales frágiles como los cerámicos o los vidrios, se ha desarrollado un ensayo de disco, en el cual el disco se sujeta a la compresión entre dos platinas planas endurecidas.

Cuando el material se carga, se desarrollan esfuerzos a la tensión perpendiculares a la línea central vertical a lo largo del disco, se inicia la fractura, y el disco se parte por la mitad verticalmente. El esfuerzo a la tensión en el disco es uniforme a lo largo de la línea central. A fin de evitar una falla prematura en los puntos de contacto, entre el disco y la platina se colocan tiras delgadas de metal blando. Estas tiras también protegen las platinas contra daño durante el ensayo. La fractura en el centro del espécimen ha sido utilizada en la manufactura de tubería sin costura.

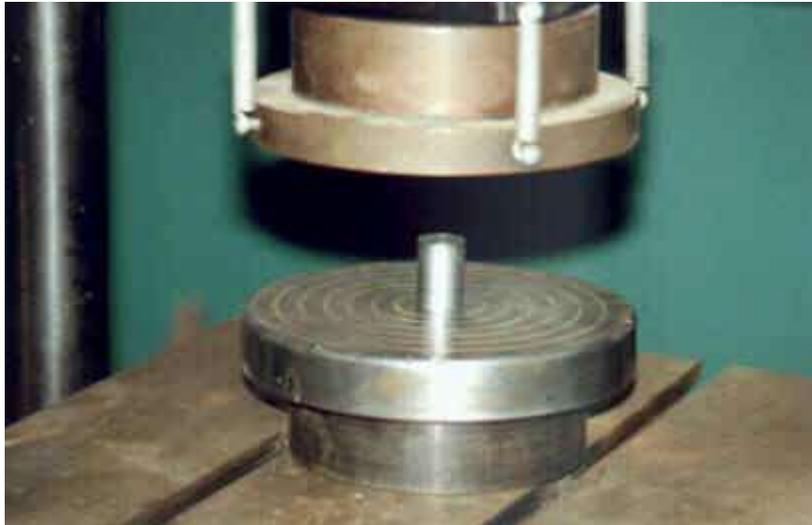


Figura 2.5 Ensayo de compresión del metal

Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/santa-fe-sur/ensayodemateriales/Ensayos/Compres.htm>.

### **2.3 TORSIÓN.**

Además de la tensión y la compresión, una pieza de trabajo puede quedar sujeta a deformaciones cortantes como el punzonado de orificios en metales laminados y en el corte de metales. El método de ensayo utilizado generalmente para la determinación de las propiedades de los materiales por cortante es el ensayo de torsión. A fin de obtener una distribución de esfuerzo y deformación aproximadamente uniforme a lo largo de la sección transversal, esta prueba por lo general se lleva a cabo en un espécimen tubular delgado.

El espécimen de torsión por lo general tiene una sección transversal reducida, a fin de confinar la deformación a una zona angosta.

La relación del esfuerzo cortante a la deformación cortante en el rango elástico se conoce como modulo de corte, es decir, el modulo de rigidez, una cantidad que esta relacionada con el modulo de elasticidad.

El ángulo de torsión a la fractura en la torsión de barras sólidas redondas a temperaturas elevadas también resulta útil en la estimación de la capacidad

de forja de los metales. Mientras mayor sea el número de vueltas antes de la falla, mayor será la capacidad de forja.

## **2.4 DOBLADO (FLEXIÓN).**

La preparación de especímenes a partir de materiales frágiles, como los cerámicos y los carburos, es difícil en razón de los problemas involucrados en el formado y maquinado de los mismos a las dimensiones correctas. Además, debido a su sensibilidad a los defectos y muescas superficiales, es difícil la sujeción de especímenes de ensayo frágiles para su prueba. Una alineación inadecuada del espécimen de prueba puede resultar en una distribución de esfuerzos no uniforme a lo largo de la sección transversal del espécimen.

Un método de ensayo comúnmente utilizado para los materiales frágiles es el ensayo de flexión. Por lo general involucra un espécimen que tiene una sección transversal rectangular y está soportado en sus extremos. La carga es aplicada verticalmente, ya sea en un punto o en dos; como resultado, estos ensayos se conocen como flexión en tres puntos o en cuatro puntos, respectivamente. Los esfuerzos longitudinales en estos especímenes son a tensión en sus superficies inferiores y a la compresión en sus superficies superiores.

Los esfuerzos a la fractura en flexión se conoce como módulo de ruptura, o resistencia a la ruptura transversal, debido al mayor volumen del material sujeto al mismo momento de flexión en la siguiente figura, existe una posibilidad más elevada de que existan defectos.

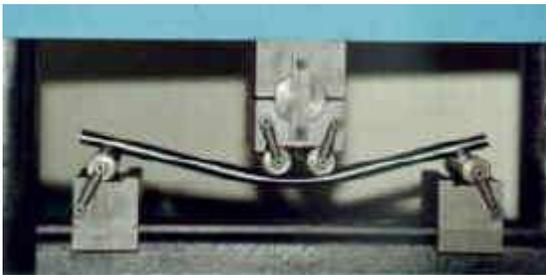
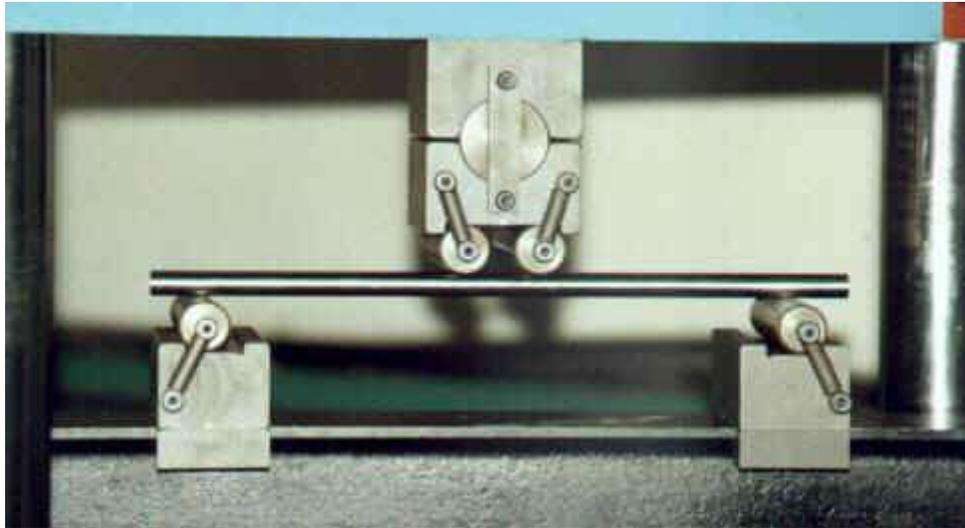


Figura 2.6. Flexión de materiales frágiles: Probeta sometida a Flexión.

Fuente:<http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/santa-fe-sur/ensayodemateriales/Ensayos/Compres.htm>.

## 2.5 DUREZA.

La dureza es una propiedad usada comúnmente; da una indicación general de la resistencia del material y de su resistencia al rayado y al desgaste. De manera más específica, la dureza por lo general se especifica como la resistencia a la indentación o impresión permanente. Por lo que, por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio, y el aluminio es más duro que el plomo, la dureza no es, sin embargo, una propiedad fundamental, dado que la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada.



Figura 2.7 Durómetro, instrumento utilizado para medir la dureza de los materiales.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza>

### **2.5.1 ENSAYOS DE DUREZA.**

Se han desarrollado varios métodos para medir la dureza, utilizando diferentes materiales y formas para el indentador. Los ensayos comunes de dureza se describen a continuación.

Ensayo Brinell. Introducido por J.A. Brinell en 1900, este ensayo involucra la compresión de una bola de acero de carburo de tungsteno, de un diámetro de 10 mm (0.4 pulg), contra una superficie, con una carga de 500 kilos, 1500 kilos o 3000 kilos. El número de dureza Brinell (HB), antes BHN) se define como la relación de la carga  $P$  al área de superficie curvada de la indentación o impresión. Mientras más duro sea el material que se va a ensayar, menor será la impresión, por lo que en general se recomienda una carga de 1500 o de 3000 kg a fin de obtener impresiones lo suficientemente grandes para lograr una medición precisa.

Dependiendo del estado del material, se desarrollaron uno o dos tipos de impresiones en la superficie después de realizar un ensayo de dureza. Las impresiones en los metales aleados por lo general tienen un perfil redondeado; en metales trabajados en frío tienen un perfil afilado.

**Ensayo Rockwell.** Desarrollado por S.P. Rockwell en 1922, este ensayo mide la profundidad de penetración, en vez del diámetro de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con una carga menor y después con una carga mayor. Las diferencias en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material.

**Ensayo Vickers.** El ensayo de dureza Vickers, desarrollado en 1922 y antes conocido como ensayo de dureza de la pirámide de diamante, utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide y una carga que va desde 1 kilo hasta 20 kilos. El número de dureza Vickers se indica mediante HV (antes DPV). Las impresiones obtenidas son típicamente inferiores a 0.5 milímetros (0.020 pulgadas) en diagonal. El ensayo Vickers da esencialmente el mismo número de dureza, independientemente de la carga, y es adecuado para el ensayo de materiales con una amplia gama de dureza, incluyendo los aceros tratados térmicamente.

**Ensayo Knoop.** El ensayo Knoop desarrollado por F. Knoop en 1939, utiliza un indentador de diamante en forma de una pirámide alargada, con cargas aplicadas que van generalmente de 25 gramos a 5 kilogramos. El número de dureza Knoop queda indicado por HK (antes KHN). Debido a las bajas cargas que se aplican, se trata de un ensayo de micro dureza. Por tanto, es adecuado para especímenes muy pequeños o muy delgados, y para materiales frágiles, como carburos, cerámicas y vidrios.

Este ensayo también es utilizado para medir la dureza de los granos y componentes individuales en una aleación de metal. El tamaño de la

indentación se encuentra generalmente en el rango de 0.01 mm a 0.10 mm (0.0004 pulg a 0.004 pulg); en consecuencia, la preparación de la superficie es muy importante. Debido a que el número de dureza depende de la carga aplicada, los resultados del ensayo Knoop siempre deben citar cual fue la carga utilizada.

Escleroscopio. El escleroscopio (del griego Skleros, que significa duro) es un instrumento en el cual un indentador de punta de diamante (martillo) encerrado en un tubo de vidrio, es dejado caer desde cierta altura sobre el espécimen. La dureza está relacionada con el rebote del indentador: mientras más alto sea el rebote, más duro será el material. La impresión que hace un escleroscopio es muy pequeña; en consecuencia, a menudo es utilizado para superficies recubiertas, como rodillos para laminado de metales. El instrumento es portátil, y simplemente se coloca sobre la superficie de la pieza; por tanto, resulta útil para medir la dureza de objetos grandes, que de lo contrario no cabrían en el espacio limitado de los ensayadores de dureza convencionales.

Dureza Mohs. Desarrollado en 1822 por F. Mohs, este ensayo se basa en la capacidad de un material de rayar a otro. La dureza Mohs se basa en una escala de 1 a 10, siendo 1 la medida del talco y 10 la del diamante (la sustancia mas dura conocida). Un material con un número de dureza Mohs mas elevado siempre rayara a otro con un número más bajo.

Los metales blandos tienen una dureza Mohs de 2 a 3, los aceros endurecidos de aproximadamente 6, el óxido de aluminio (utilizado para herramientas de corte y como abrasivo en las ruedas de esmeril) de 9. Aunque la escala de Mohs es cualitativa, y es utilizada principalmente por los mineralogistas, se relaciona con la dureza Knoop.

Tabla 2.8 Escala Mohs creada por el austríaco Friedrich Mohs, que mide la resistencia al rayado de los materiales.

| Dureza | Mineral                               |
|--------|---------------------------------------|
| 1      | Talco ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ )      |
| 2      | Yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )         |
| 3      | Calcita ( $CaCO_3$ )                  |
| 4      | Fluorita ( $CaF_2$ )                  |
| 5      | Apatita ( $Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ ) |
| 6      | Feldespato ( $KAlSi_3O_8$ )           |
| 7      | Cuarzo ( $SiO_2$ )                    |
| 8      | Topacio ( $Al_2SiO_4(OH, F)_2$ )      |
| 9      | Corindón ( $Al_2O_3$ )                |
| 10     | Diamante (C)                          |

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza>

Durómetro. La dureza de los hules, plásticos y materiales no metálicos similares, blandos y elásticos, por lo general se mide con un instrumento conocido como durómetro. Este es un ensayo empírico, en el cual un indentador es oprimido contra la superficie y luego se le aplica una carga constante. La profundidad de la penetración se mide después de 1 segundo; la dureza está inversamente relacionada con la penetración. Existen dos escalas diferentes para este ensayo. El tipo A tiene un indentador obtuso y una carga de 1 kg, se utiliza para los materiales más blandos, el tipo B tiene un indentador más agudo y una carga de 5 kg; se utiliza para materiales más duros. Los números de dureza en estos ensayos van del 0 al 100.

Dureza en caliente. La dureza de los materiales a temperaturas elevadas es importante en las aplicaciones en las cuales se involucran temperaturas

elevadas, como en el uso de herramientas de corte en el maquinado y de dados en operaciones de trabajo en caliente y en fundición.

Los ensayos de dureza se pueden llevar a cabo a temperaturas elevadas utilizando los probadores convencionales, con algunas modificaciones, como es encerrar el espécimen y el indentador en un pequeño horno eléctrico.



Figura 2.9. Muestra del funcionamiento del ensayo Rockwell. El ensayo se realiza en una máquina especialmente diseñada que aplica la carga a través de un sistema de pesas y palancas.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza>

El indentador o "penetrador" puede ser una bola de acero o un cono de diamante con una punta ligeramente redondeada. El valor de la dureza, según se lee en un indicador calatular especialmente graduado, es un número arbitrario que está inversamente relacionado con la profundidad de la huella.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza>

Tabla 2.10 Escalas de dureza Rockwell

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

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

### 2.5.2 DUREZA Y RESISTENCIA.

Dado que la dureza es la resistencia contra un indentador permanente, podemos asimilarlo con llevar a cabo un ensayo a compresión en un pequeño

volumen de un bloque de material. Los estudios han demostrado que, en las mismas unidades, la dureza de un metal trabajado en frío, es aproximadamente 3 veces su esfuerzo a la cedencia, para metales recocidos, es de aproximadamente 5 veces.

## **2.6 FATIGA**

Diversas estructuras y componentes en las operaciones de manufactura, como las herramientas, dados, engranes, levas, flechas y resortes, están sujetos a cargas en rápida fluctuación (cíclicas o periódicas), además de cargas estáticas. Los esfuerzos cíclicos pueden ser causados por cargas mecánicas en fluctuación, como los causados sobre los dientes de los engranes, o por esfuerzos térmicos, como en un dado frío en repetido contacto con piezas de trabajo calientes. Bajo estas condiciones, la pieza falla a un nivel de esfuerzo por debajo del cual fallaría bajo una carga estática. Este fenómeno se conoce como falla por fatiga, y es responsable de la mayor parte de las fallas de los componentes mecánicos.

Los métodos de ensayo a la fatiga involucran la prueba de especímenes bajo varios estados de esfuerzo, por lo general en una combinación de tensión y compresión en torsión.

La prueba se lleva a cabo con varias amplitudes de esfuerzo (S); queda registrado el número de ciclos (N) que se necesitan para causar la falla total del espécimen o de la pieza. La amplitud del esfuerzo se define como el esfuerzo máximo, en tensión y en compresión, a la cual se sujeta un espécimen. El esfuerzo máximo al cual se puede sujetar el material sin falla a la fatiga, independientemente del número de ciclos, se conoce como límite de resistencia o fatiga, o límite a la fatiga.

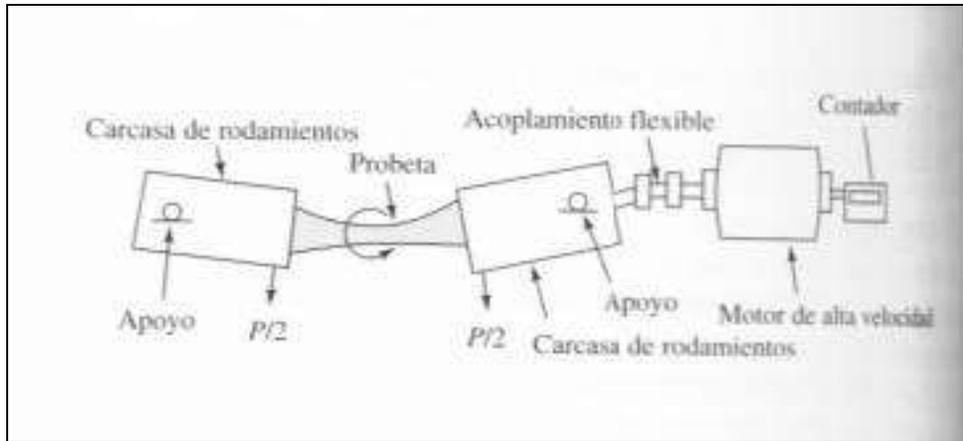


Figura 2.11. Esquema de la máquina típica para realizar un ensayo de fatiga. Aquí la probeta está sujeta a tensiones de compresión y extensión alternas de igual magnitud mientras se rota. Se cuenta el número de ciclos que soporta la muestra antes de fallar y se realiza una gráfica Tensión vrs número de ciclos ( en escala logarítmica).

Fuente:<http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml>

## 2.7 CEDENCIA.

La cedencia es la elongación permanente de un componente bajo una carga estática mantenida durante un cierto periodo de tiempo. Es un fenómeno de los metales y de ciertos materiales no metálicos, como los termoplásticos y los hules, y puede ocurrir a cualquier temperatura. El plomo, por ejemplo, fluye bajo una carga a la tensión constante a temperatura ambiente. Para los metales y sus aleaciones, los flujos de importancia ocurren a temperaturas más elevadas. El mecanismo de cedencia a temperaturas elevadas en los metales por lo general se atribuye al deslizamiento de fronteras de grano.

La cedencia es especialmente importante en aplicaciones de alta temperatura, como alabes de turbinas de gas y componentes similares en motores a chorro. También están sujetos a cedencia las tuberías de vapor de alta presión y los

elementos de combustible nuclear. La deformación por cedencia también puede ocurrir en herramientas y dados sujetos a elevados esfuerzos a temperaturas elevadas durante operaciones de trabajo en caliente, como la forja y la extrusión.

El ensayo de cedencia típicamente consiste en sujetar un espécimen a una carga constante a tensión (de ahí un esfuerzo ingenieril constante) a una cierta temperatura y medir los cambios en la longitud de varios incrementos en el tiempo. Eventualmente el espécimen falla, debido a formación de cuello y fractura, conocida como ruptura o ruptura por fluencia. La velocidad de fluencia se incrementa con la temperatura y la carga aplicada.

El diseño a fin de evitar la cedencia por lo general involucra un conocimiento del rango secundario (lineal) y de su pendiente, dado que la velocidad de fluencia se puede determinar de manera confiable únicamente cuando la curva tiene una pendiente constante. Por lo general, la resistencia a la cedencia se incrementa con la temperatura de fusión de un material; este hecho sirve como una guía general para propósitos de diseño. En aplicaciones donde se requiere la resistencia a la cedencia, se utilizan de manera común aceros inoxidable, superaleaciones y metales y aleaciones refractarios.

Relajación del esfuerzo. La relajación del esfuerzo esta relacionada íntimamente con la cedencia. En la relajación del esfuerzo, los esfuerzos resultados de una carga de un componente estructural se reducen en magnitud a lo largo de un periodo de tiempo, aun cuando las dimensiones del componente se conservan constantes.

## **2.8 IMPACTO.**

En muchas operaciones de manufactura, así como durante la vida de los componentes, los materiales están sujetos a cargas por impacto (o cargas dinámicas). Un ensayo de impacto típico consiste en colocar un espécimen

con muesca en un probador de impacto, y romperlo con un péndulo en oscilación.

Las pruebas de impacto son particularmente útiles en la determinación de la temperatura de transición dúctil frágil de los materiales. Los materiales que tienen una elevada resistencia de impacto son comúnmente aquellos que tienen una elevada resistencia y ductilidad, y por tanto, una elevada tenacidad. La sensibilidad a los defectos superficiales es importante; reduce de manera significativa la tenacidad al impacto.

## **2.9 FALLA Y FRACTURA EN LOS MATERIALES DE MANUFACTURA Y EN EL SERVICIO.**

La falla es uno de los aspectos de mayor importancia del comportamiento de los materiales, ya que influye de manera directa en la selección de un material para una cierta aplicación, los métodos de manufactura y la vida de servicio del componente.

Debido a muchos factores involucrados, la falla y fractura de los materiales es un área compleja. Existen dos tipos generales de falla:

1. Fractura y separación del material, debido ya sea a grietas internas o externas, la fractura se subclasifica aún mas en dos categorías generales, dúctil y frágil.

2. Pandeado.

Aunque la falla de los materiales por lo general se considera como no deseable, algunos productos se diseñan de manera que la falla sea esencial en su función.



Figura 2.12 ilustración esquemática de los tipos de falla en los materiales (a) formación de cuello y fractura de los materiales dúctiles; (b) pandeado de los materiales dúctiles bajo una carga a compresión; (c) fractura de los materiales frágiles a compresión; (d) ruptura de la superficie abarrilada de los materiales dúctiles a compresión.

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml>

### **2.9.1 FRACTURA DÚCTIL.**

La fractura dúctil se caracteriza por la deformación plástica que antecede a la falla de la pieza. En un ensayo a tensión, en materiales altamente dúctiles como es oro y el plomo se pueden formar el cuello hasta un punto antes de fallar. En la mayor parte de los metales y las aleaciones, sin embargo se forma un cuello a un área finita y después falla. La fractura dúctil por lo general ocurre a lo largo de planos en los cuales el esfuerzo cortante es máximo. En torsión, por ejemplo, un metal dúctil se fractura a lo largo de un plano perpendicular al eje de torsión; esto es, el plano en el cual el esfuerzo cortante es máximo. La fractura por corte, en contraste, es un resultado de un deslizamiento excesivo entre los planos de deslizamiento entre granos.

Cerca de la superficie de una fractura dúctil podemos ver un patrón fibroso con hoyuelos, como si sobre la superficie de fractura se hubieran efectuado un cierto número de ensayos muy pequeños a la tensión. La falla se inicia con la formación de pequeños huecos, por lo general alrededor de pequeñas inclusiones o de huecos preexistentes, que entonces crecen y se juntan desarrollándose en grietas que crecen en tamaño y que llevan a la fractura. En un espécimen de ensayo a la tensión, la fractura se inicia en el centro de la región del cuello, como resultado del crecimiento y la unión de las cavidades. La región central se convierte en una grieta grande, esta grieta se propaga hasta la periferia de la región del cuello. Debido a su apariencia, la superficie de la fractura en un espécimen de prueba a la tensión se conoce como fractura en copa y cono.

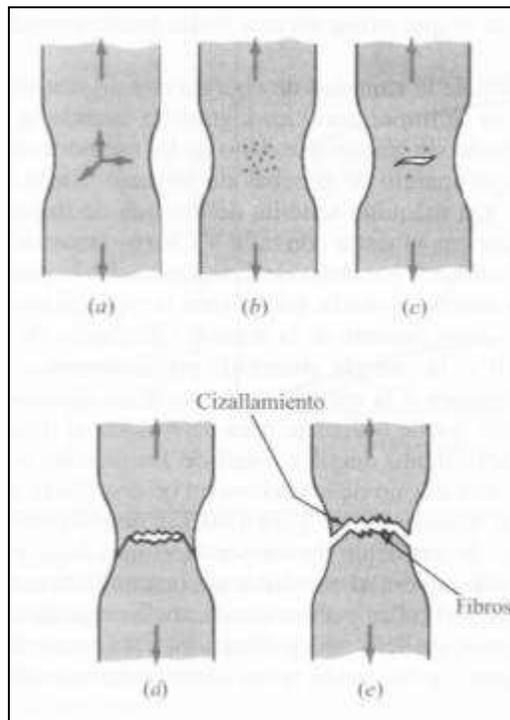


Figura 2.13 Fractura dúctil

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

## 2.9.2 FRACTURA FRÁGIL.

La fractura frágil ocurre con muy poca o ninguna deformación plástica. A la tensión, la fractura ocurre a lo largo de un plano cristalográfico en el cuál el esfuerzo normal a la tensión es máximo. Los metales cúbicos centrados en la cara por lo general no fallan por fractura frágil, en tanto que los metales cúbicos centrados en el cuerpo si fallan por clivaje. En general, las bajas temperaturas y una alta velocidad de deformación promueve la fractura frágil.

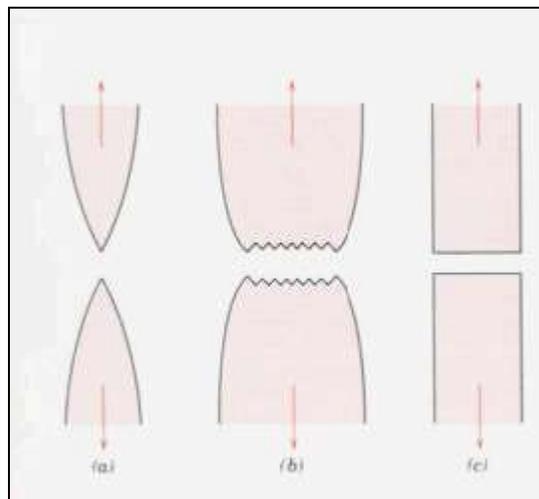


Figura 2.14 Superficies dejadas por diferentes tipos de fractura. a) Fractura dúctil, b) Fractura moderadamente dúctil, c) Fractura frágil sin deformación plástica

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

En un cristal policristalino bajo tensión, la superficie de fractura tiene una apariencia granular brillante, debido a los cambios en dirección de los planos de separación conforme se propaga la grieta de un grano a otro. La fractura frágil de un espécimen a compresión es más compleja; incluso puede seguir una trayectoria teóricamente a un ángulo de  $45^\circ$  en relación con la dirección de la fuerza aplicada.

Defectos. Un factor importante en la fractura es la presencia de defectos, como rayaduras, hendiduras y grietas externas o internas preexistentes. Bajo tensión, la aguda punta de la grieta queda sujeta a elevados esfuerzos tensiles, lo que propaga la grieta rápidamente, por lo que el material tiene poca capacidad para disipar la energía.

La presencia de defectos es esencial en la aplicación de porque los materiales frágiles exhiben tal debilidad a la tensión.

Fractura por fatiga. La fractura por fatiga ocurre típicamente en los materiales de naturaleza básicamente frágil. Se desarrollan grietas diminutas, externas o internas en los defectos preexistentes en el material; estas grietas entonces se propagan y finalmente, llevan a la falla total de la pieza. La superficie de la fractura por fatiga por lo general se caracteriza por el término marcas de playa por su apariencia.

Mejoría de la resistencia a la fatiga. La vida a la fatiga es influenciada de manera importante por el método de preparación de las superficies de la parte o del espécimen. En general, la resistencia a la fatiga de productos manufacturados se puede mejorar utilizando los métodos siguientes:

- a. induciendo esfuerzos residuales a compresión sobre la superficie, por ejemplo, mediante la granalla de acero o el bruñido con rodillo.
- b. Endurecimiento superficial (cementación) mediante diversos métodos;
- c. Proporcionando un acabado superficial fino, y por tanto, reduciendo el efecto de muescas y otras imperfecciones superficiales;
- d. Seleccionando materiales apropiados y asegurándose que están libres de cantidades significativas de inclusiones, huecos e impurezas.

Por el contrario, los factores y procesos siguientes pueden reducir la resistencia a la fatiga: descarburación, picaduras superficiales que actúan

como elevadores de esfuerzos, fragilización por hidrogeno, galvanización y electrodeposición.

Agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Un metal que por cualquier otra razón es dúctil, puede fallar por fragilidad por agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Las piezas libres de defectos pueden desarrollar grietas, ya sea a lo largo de un período de tiempo o pronto después de haber sido manufacturadas a un producto. La propagación de grietas puede ser intergranular o transgranular.

La susceptibilidad de los metales a las grietas de esfuerzo-corrosión depende principalmente del material, de la presencia y magnitud de esfuerzos residuales tensiles y del entorno. el entorno puede incluir medios corrosivos como el agua salada u otros productos químicos. El procedimiento usual para evitar las grietas de esfuerzo-corrosión es relevar el esfuerzo de la pieza justo después de haber sido formada. Se puede llevar a cabo un recocido completo, pero este tratamiento reduce la resistencia de piezas trabajadas en frío.

Fragilización por hidrógeno. La presencia de hidrógeno puede reducir la ductilidad y causar una fragilización severa y la falla prematura en muchos metales, aleaciones y materiales no metálicos.

Este fenómeno se conoce como fragilización por hidrógeno, y es especialmente severa en aceros de alta resistencia. Se presentan fuentes posibles de hidrógeno durante la fusión del metal, durante el limpiado químico, y durante la electrólisis, durante la electrodeposición; otras son vapor de agua en la atmósfera y los electrodos húmedos y los fundentes utilizados en la soldadura. El oxígeno también puede causar fragilización, particularmente en aleaciones de cobre.



Figura 2.15 Vista en Perspectiva. Puede verse la deformación típica de copa y cono para falla dúctil en el diámetro mayor, acompañada de estrías "chevrons" que indican el lugar desde donde se propagan las grietas. El sector 1 muestra el primer plano de propagación de falla, a velocidad media. El sector 2, por su baja rugosidad, indica una rápida propagación de las grietas. En el sector 3, se puede observar una alta rugosidad en el material libre de corrosión, que falló por sobrecarga en tensión al final.

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml>

## **2.10 ESFUERZOS RESIDUALES.**

Cuando las piezas de trabajo se sujetan a una deformación no uniforme a lo largo de la pieza, desarrollan esfuerzos residuales. Se trata de esfuerzos que quedan dentro de la pieza una vez formada y eliminadas todas las fuerzas exteriores.

El momento de flexión primero produce una distribución de esfuerzo lineal elástica. Conforme se incrementa el momento externo, las fibras exteriores de la pieza llegan a un nivel de esfuerzo lo suficientemente elevado para causar cedencia. Dado que no hay ninguna fuerza externa aplicada, las fuerzas

internas resultado de estos esfuerzos residuales deben estar en equilibrio estático.

El equilibrio de los esfuerzos residuales puede ser en algún momento alterado, debido a la eliminación de una capa de material de la pieza.

Los esfuerzos residuales pueden también ser causados por gradientes de temperatura dentro de un cuerpo, como ocurre durante el enfriamiento de una fundición o de una forja. Las expansiones y contracciones locales causadas por los gradientes de temperatura dentro del material producen una deformación no uniforme.

Por lo general no son deseables los esfuerzos residuales tensiles de la superficie de una pieza, porque reducen la vida a la fatiga y la resistencia a la fractura de la misma. Estas situaciones resultan porque una superficie con esfuerzos residuales tensiles, no pueden sostener esfuerzos tensiles adicionales tan elevados provenientes de fuerzas externas, como los que soportaría una superficie libre de esfuerzos residuales.

Este debilitamiento es particularmente característico de materiales frágiles (o menos dúctiles), en los cuales ocurre la fractura con muy poca o casi ninguna deformación plástica anterior. Los esfuerzos residuales tensiles pueden conducir, a lo largo de un periodo de tiempo, a grietas por esfuerzo y corrosión de los productos manufacturados.

Los esfuerzos residuales a compresión de una superficie, por otra parte, son por lo general deseables. De hecho, como hemos dicho anteriormente, a fin de incrementar la vida a la fatiga de los componentes, se imparten esfuerzos residuales a compresión de las superficies mediante técnicas como el granallado y el bruñido.

Reducción y eliminación de esfuerzos residuales. Los esfuerzos residuales se pueden reducir o eliminar mediante el recocido de eliminación de esfuerzos o mediante una deformación adicional de la pieza, como su estirado. Dado un tiempo suficiente, los esfuerzos residuales también pueden disminuir a temperatura ambiente, mediante la relajación de los esfuerzos residuales. El tiempo requerido para la relajación puede reducirse de manera importante elevando la temperatura de la pieza de trabajo.

## **2.11 TRABAJO, CALOR Y TEMPERATURA.**

Prácticamente todo el trabajo mecánico de deformación en el trabajo plástico se convierte en calor. Esta conversión no es completa, porque una porción de este trabajo queda almacenado dentro del material deformado como energía elástica. Ese trabajo residual se conoce como energía almacenada, y representa comúnmente 5 o 10% de la energía total de entrada, en algunas aleaciones, sin embargo, puede ser tan alto como 30%.

En un proceso simple sin fricción, suponiendo que el trabajo se convierte totalmente en calor, la elevación de temperatura teórica,  $\Delta T$ , esta dada por

$$\Delta T = u/pc,$$

Donde  $u$  es la energía específica,  $p$  es la densidad, y  $c$  es el calor específico del material. Se puede observar que están asociadas las temperaturas más elevadas. Debe observarse que estas propiedades como calor específico y conductividad térmica también dependen de la temperatura y deben ser tomadas en consideración en los cálculos.

En operaciones reales, el calor se pierde en el entorno, a las herramientas y dados y hacia cualquier lubricante y refrigerante que se haya utilizado.

Si el proceso se lleva a cabo con mucha rapidez, estas pérdidas pueden ser relativamente pequeñas en dicho período. Si el proceso se lleva a cabo lentamente, la elevación real de temperatura será únicamente una pequeña porción del valor calculado.

## CAPÍTULO 3

### PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES.

#### 3.1 DENSIDAD

La densidad de un material es la masa por unidad de volumen. Otra manera de expresar la densidad de un material es en relación con la del agua; esta cantidad se conoce como gravedad específica, y no tiene unidades.

En las tablas 3.1 y 3.2 aparece el rango de densidad para una variedad de materiales a temperatura ambiente, además de otras propiedades.

El ahorro en peso es de particular importancia para estructuras de aeronaves y naves espaciales, para carrocerías automotrices y sus componentes, y para otros productos donde la mayor preocupación es el consumo de energía y las limitaciones de la misma.

La situación del material en función del ahorro en peso y en la economía es un factor importante en el diseño, tanto de equipo y maquinaria avanzada como en productos como los automóviles.

La densidad juega un papel significativo en la resistencia específica (*relación de resistencia a peso*) y en la rigidez específica (*relación de rigidez a peso*) de materiales y estructuras.

La tabla a continuación muestra la relación del esfuerzo de cedencia máxima a densidad para una diversidad de aleaciones metálicas.

TABLA 3.1 Propiedades físicas de materiales seleccionados a temperatura ambiente.

| <b>Material</b>         | <b>Densidad<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Punto de<br/>fusión<br/>(°C)</b> | <b>de<br/>Calor<br/>específico<br/>(J/kg K)</b> | <b>Conductividad<br/>térmica<br/>(W/m K)</b> |
|-------------------------|--|-------------------------------------|---|--|
| Aluminio                | 2700                                   | 660                                 | 900   | 222  |
| Aleaciones de aluminio  | 2630-2820                              | 476-654                             | 880-920   | 121-239                                      |
| Berilio                 | 1854                                   | 1278                                | 1884  | 146  |
| Colombio (niobio)       | 8580                                   | 2468                                | 272   | 52   |
| Cobre                   | 8970                                   | 1082                                | 385   | 393  |
| Aleaciones de cobre     | 7470-8940                              | 885-1260                            | 377-435   | 29-234                                       |
| Hierro                  | 7860                                   | 1537                                | 460   | 74   |
| Aceros                  | 6920-9130                              | 1371-1532                           | 448-502   | 15-52  |
| Plomo                   | 11,350                                 | 327                                 | 130   | 35   |
| Aleaciones de plomo     | 8850-11,350                            | 182-326                             | 126-188   | 24-46  |
| Magnesio                | 1745                                   | 650                                 | 1025  | 154  |
| Aleaciones de magnesio  | 1770-1780                              | 610-621                             | 1046  | 75-138                                       |
| Aleaciones de molibdeno | 10,210                                 | 2610                                | 276   | 142  |
| Níquel                  | 8910                                   | 1453                                | 440   | 92   |
| Aleaciones de níquel    | 7750-8850                              | 1110-1454                           | 381-544   | 12-63  |
| Aleaciones de tantalio  | 16,600                                 | 2996                                | 142   | 54   |
| Titanio                 | 4510                                   | 1668                                | 519   | 17   |
| Aleaciones de titanio   | 4430-4700                              | 1549-1649                           | 502-544   | 8-12   |
| Tungsteno               | 19,290                                 | 3410                                | 138   | 166  |
| Zinc                    | 7140                                   | 419                                 | 385   | 113  |
| Aleaciones de zinc      | 6640-7200                              | 386-525                             | 402   | 105-113                                      |

| <b>No metálicos</b> |           |          |  |           |         |
|---------------------|-----------|----------|--|-----------|---------|
| Cerámicos           | 2300-5500 | -----    |  | 750-950   | 10-17   |
| Vidrios             | 2400-2700 | 580-1540 |  | 500-850   | 0.6-1.7 |
| Grafito             | 1900-2200 | -----    |  | 840       | 5-10    |
| Plásticos           | 900-2000  | 110-330  |  | 1000-2000 | 0.1-0.4 |
| Madera              | 400-700   | -----    |  | 2400-2800 | 0.1-0.4 |

**TABLA 3.2** Propiedades físicas de los materiales, en orden descendente.

| <b>Densidad</b> | <b>Punto de fusión</b> | <b>Calor específico</b> | <b>Conductividad</b> |                           | <b>Conductividad Eléctrica</b> |
|-----------------|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|
|                 |                        |                         | <b>Térmica</b>       | <b>Dilatación térmica</b> |                                |
| Platino         | Tungsteno              | Madera                  | Plata                | Plásticos                 | Plata                          |
| Oro             | Tantalio               | Berilio                 | Cobre                | Plomo                     | Cobre                          |
| Tungsteno       | Molibdeno              | Porcelana               | Oro                  | Estaño                    | Oro                            |
| Tantalio        | Colombio               | Aluminio                | Aluminio             | Magnesio                  | Aluminio                       |
| Plomo           | Titanio                | Grafito                 | Magnesio             | Aluminio                  | Magnesio                       |
| Plata           | Hierro                 | Vidrio                  | Grafito              | Cobre                     | Tungsteno                      |
| Molibdeno       | Berilio                | Titanio                 | Tungsteno            | Acero                     | Berilio                        |
| Cobre           | Cobre                  | Hierro                  | Berilio              | Oro                       | Acero                          |
| Acero           | Oro                    | Cobre                   | Zinc                 | Cerámicas                 | Estaño                         |
| Titanio         | Plata                  | Molibdeno               | Acero                | Vidrio                    | Grafito                        |
|                 |                        |                         |                      |                           | Cerámicas                      |
| Aluminio        | Aluminio               | Tungsteno               | Tantalio             | Tungsteno                 | Vidrio                         |
| Berilio         | Magnesio               | Plomo                   | Cerámicas            |                           | Plásticos                      |
| Vidrio          | Plomo                  |                         | Titanio              |                           | Cuarzo                         |
| Magnesio        | Estaño                 |                         | Vidrio               |                           |                                |
| Plásticos       | Plásticos              |                         | Plásticos            |                           |                                |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

En la tabla 3.1 se muestra el rango de resistencia y rigidez específico a temperatura ambiente, para una variedad de materiales metálicos y no metálicos. Nótese las posiciones de los materiales compósitos, en comparación con la de los metales, en lo que se refiere a estas propiedades; estas ventajas han hecho que los compósitos se han hecho de los materiales más importantes.

A temperaturas elevadas, la resistencia y la rigidez específicas también son importantes consideraciones, dadas las temperaturas a las cuales operan ciertos componentes y sistemas, como motores automotrices y de propulsión a chorro y turbinas de gas; en la tabla 3.2 se dan rangos típicos para una diversidad de materiales.

Tabla 3.3 Muestra el esfuerzo máximo de cedencia, para una variedad de materiales.

| <b>Aleación</b> | <b>Esfuerzo máximo de cedencia/<br/>densidad (pulgx10<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------|--|
| Titanio         | 1250   |
| Aluminio        | 800  |
| Acero           | 750  |
| Magnesio        | 675  |
| Níquel          | 550  |
| Cobre           | 500  |
| Tantalio        | 375  |
| Molibdeno       | 215  |
| Plomo           | 5  |

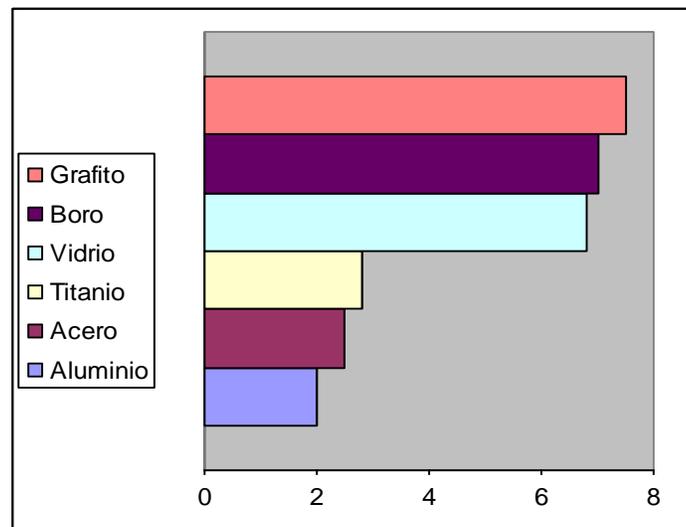
Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

La densidad es un factor importante en la selección de materiales para equipos de alta velocidad; obsérvese, por ejemplo, el uso del magnesio en

maquinaria de imprenta y textil, muchos de los componentes de dicha maquinaria operan normalmente a velocidades muy levadas. Para obtener tiempos de exposición de 1-400s en cámaras sin sacrificar la precisión, los obturadores de algunas cámaras de alta calidad de 35 mm están hechos de titanio.

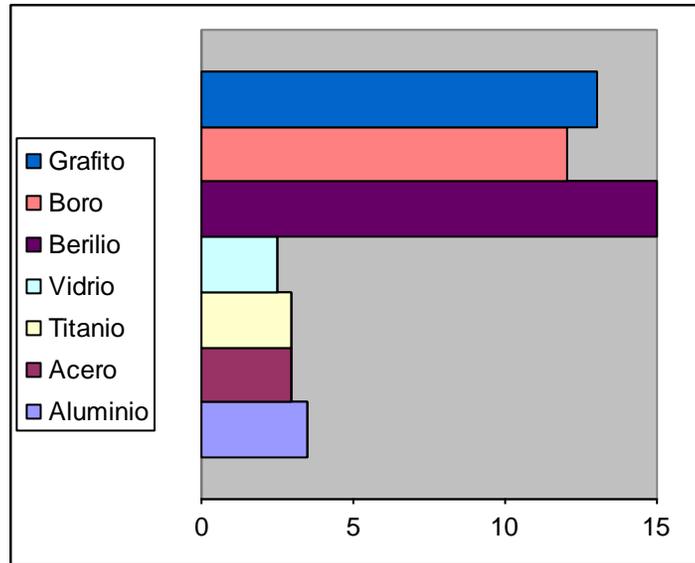
La baja masa resultante de los componentes en estas operaciones de alta velocidad reducen las fuerzas de inercia que de otra manera conducirían a vibraciones, a falta de precisión e incluso, a lo largo del tiempo, a la falla de la pieza.

Gracias a su baja densidad, los cerámicos están siendo utilizados ahora para componentes de maquinaria automatizada de alta velocidad y en máquinas herramientas.



a)  $m \times 10^4$

Resistencia a la tensión/densidad (pulg x 10<sup>6</sup>)



b)  $m \times 10^6$

Módulo elástico/densidad (pulg x 10<sup>8</sup>)

Figura 3.4 Resistencia especifica. (Resistencia a la tensión/densidad) y rigidez especifica (módulo elástico/densidad) para varios materiales a temperatura ambiente.

Fuente: M. J. Salkind.

### 3.2 PUNTO DE FUSIÓN

El punto de fusión de un metal depende de la energía requerida para separar sus átomos. Como lo muestra la tabla 3.2, la temperatura de fusión de una aleación puede tener una amplia gama, a diferencia de un metal puro, que tiene un *punto* de fusión definido. Los puntos de fusión de las aleaciones dependen de su composición particular.

El punto de fusión de un metal tiene un número de efectos indirectos en operaciones de manufactura. La elección de un material para aplicaciones de alta temperatura es el efecto mas obvio, en aplicaciones como motores a chorro y hornos, donde ocurre o se genera calor.

Debido a que la temperatura de recristalización de un metal esta relacionada con su punto de fusión, el tratamiento térmico como el recocido y el trabajo en

caliente requiere conocer los puntos de fusión de los materiales involucrados. Este factor influencia a su vez, la selección de las herramientas y del material de los dados en las operaciones de manufactura.

El punto de fusión también tiene influencia importante en la selección del equipo y de la práctica de fusión en las operaciones de fundición. Mientras mas elevado sea el punto de fusión del material, es mas difícil esta operación. En el proceso de maquinado por electroeroción, los puntos de fusión de los materiales quedan relacionados con la tasa de eliminación del material y el desgaste de los electrodos.

El rango de temperatura dentro del cual un componente o una estructura se ha diseñado para funcionar, es una consideración importante para la selección de materiales. Los plásticos, por ejemplo, tienen el rango de temperatura útil mas bajo, en tanto que el grafito y las aleaciones refractarias tienen los rangos útiles mas elevados.

### **3.3 CALOR ESPECÍFICO**

La temperatura es la sensación física que nos produce un cuerpo cuando entramos en contacto con él.

Observamos cambios en los cuerpos cuando cambian su temperatura, por ejemplo, la dilatación que experimenta un cuerpo cuando incrementa su temperatura. Esta propiedad se usa para medir la temperatura de un sistema. Pensemos en los termómetros que consisten en un pequeño depósito de mercurio que asciende por un capilar a medida que se incrementa la temperatura.

#### **3.3.1 CONCEPTO DE CALOR**

Cuando dos cuerpos A y B que tienen diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico, después de un cierto tiempo, alcanzan la condición de

equilibrio en la que ambos cuerpos están a la misma temperatura. Un fenómeno físico análogo son los vasos comunicantes.

Supongamos que la temperatura del cuerpo A es mayor que la del cuerpo B,  $T_A > T_B$ .

Entonces, tenemos que la temperatura de B se eleva hasta que se hace casi igual a la de A. En el proceso inverso, si el objeto B tiene una temperatura  $T_B > T_A$ , el baño A eleva un poco su temperatura hasta que ambas se igualan.

Cuando un sistema de masa grande se pone en contacto con un sistema de masa pequeña que está a diferente temperatura, la temperatura de equilibrio resultante está próxima a la del sistema grande.

Decimos que una cantidad de calor  $DQ$  se transfiere desde el sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura.

- La cantidad de calor transferida es proporcional al cambio de temperatura  $DT$ .
- La constante de proporcionalidad  $C$  se denomina capacidad calorífica del sistema.

$$DQ = C \cdot DT$$

Si los cuerpos A y B son los dos componentes de un sistema aislado, el cuerpo que está a mayor temperatura transfiere calor al cuerpo que está a menor temperatura hasta que ambas se igualan

Si  $T_A > T_B$

- El cuerpo A cede calor:  $DQ_A = C_A \cdot (T - T_A)$ , entonces  $DQ_A < 0$
- El cuerpo B recibe calor:  $DQ_B = C_B \cdot (T - T_B)$ , entonces  $DQ_B > 0$

### 3.3.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS

Cuando varios cuerpos a diferentes temperaturas se encuentran en un recinto adiabático se producen intercambios caloríficos entre ellos alcanzándose la temperatura de equilibrio al cabo de cierto tiempo. Cuando se ha alcanzado

este equilibrio se debe cumplir que la suma de las cantidades de calor intercambiadas es cero.

Se define calor específico  $c$  como la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de sustancia para que eleve su temperatura en un grado centígrado. En el caso particular del agua  $c$  vale  $1 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$  ó  $4186 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$ . La unidad de calor específico que más se usa es  $\text{cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$  sin embargo, debemos de ir acostumbrándonos a usar el Sistema Internacional de Unidades de Medida, y expresar el calor específico en  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . El factor de conversión es 4186.

TABLA 3.5 Calor específico de algunas sustancias

| Sustancia | Calor específico<br>(J/kg·K) |
|-----------|------------------------------|
| Acero     | 460                          |
| Aluminio  | 880                          |
| Cobre     | 390                          |
| Estaño    | 230                          |
| Hierro    | 450                          |
| Mercurio  | 138                          |
| Oro       | 130                          |
| Plata     | 235                          |
| Plomo     | 130                          |
| Sodio     | 1300                         |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

### **3.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos.

Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por eso aislantes térmicos.

Para que exista conducción térmica hace falta una sustancia, de ahí que es nula en el vacío ideal, y muy baja en ambientes donde se ha practicado un vacío elevado.

En algunos procesos industriales se trabaja para incrementar la conducción de calor, utilizando materiales de alta conductividad o configuraciones con una elevada área de contacto.

En otros, el efecto buscado es justo el contrario, y se desea minimizar el efecto de la conducción, para lo que se emplean materiales de baja conductividad térmica, vacíos intermedios, y se disponen en configuraciones con poca área de contacto.

Tabla 3.6 Capacidad de ciertos materiales para la transmisión del calor

| Material | $\Lambda$   | Material             | $\Lambda$ | Material | $\Lambda$   |
|----------|-------------|----------------------|-----------|----------|-------------|
| Acero    | 47-58       | Corcho               | 0,04-0,30 | Mercurio | 83,7        |
| Agua     | 0,58        | Estaño               | 64,0      | Mica     | 0,35        |
| Aire     | 0,02        | Fibra de vidrio      | 0,03-0,07 | Níquel   | 52,3        |
| Alcohol  | 0,16        | Glicerina            | 0,29      | Oro      | 308,2       |
| Alpaca   | 29,1        | Hierro               | 1,7       | Parafina | 0,21        |
| Aluminio | 209,3       | Ladrillo             | 0,80      | Plata    | 406,1-418,7 |
| Amianto  | 0,04        | Ladrillo refractario | 0,47-1,05 | Plomo    | 35,0        |
| Bronce   | 116-186     | Latón                | 81-116    | Vidrio   | 0,6-1,0     |
| Cinc     | 106-140     | Litio                | 301,2     |          |             |
| Cobre    | 372,1-385,2 | Madera               | 0,13      |          |             |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

La tabla 3.6 se refiere a la capacidad de ciertos materiales para transmitir el calor. El coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ) caracteriza la cantidad de calor necesario por  $m^2$ , para que atravesando durante la unidad de tiempo, 1 m de material homogéneo obtenga una diferencia de 1 °C de temperatura entre las dos caras. La conductividad térmica se expresa en unidades de  $W/(m \cdot K)$  ( $J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$ ).

Es una propiedad intrínseca de cada material que varía en función de la temperatura a la que se efectúa la medida, por lo que suelen hacerse las mediciones a 300 K con el objeto de poder comparar unos elementos con otros.

Es un mecanismo molecular de transferencia de calor que ocurre por la excitación de las moléculas se presenta en todos los estados de la materia pero predomina en los sólidos.

### **3.4.1 COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA**

Es una característica de cada sustancia y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. Su símbolo es la letra griega  $\lambda$ .

En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se mide en Vatio / metro  $\times$  Kelvin (W/m·K), en kilocaloría / hora  $\times$  metro  $\times$  Kelvin (kcal/h·m·K), en el sistema técnico y en BTU / hora  $\times$  pie  $\times$  Fahrenheit (BTU/h·ft·°F), en el sistema anglosajón. El coeficiente de conductividad térmica expresa la cantidad o flujo de calor que pasa a través de la unidad de superficie de una muestra del material, de extensión infinita, caras plano paralelas y espesor unidad, cuando entre sus caras se establece una diferencia de temperaturas igual a la unidad, en condiciones estacionarias. Este coeficiente varía con las condiciones del material (humedad que contiene, temperatura a la que se hace la medición), por lo que se fijan condiciones para hacerlo, generalmente para material seco y 15°C (temperatura media de trabajo de los materiales de construcción) y en otras ocasiones, 300 K (26,84 °C).

### **3.5 DILATACIÓN TÉRMICA**

La dilatación térmica de los materiales puede tener varios efectos significativos. Por lo general, el coeficiente de dilatación térmica es inversamente proporcional al punto de fusión del material. Los elementos de aleación tienen un efecto relativamente menor en la dilatación térmica de los

materiales. Los *ajustes por contracción* utilizan la dilatación y contracción térmica. Una pieza con una perforación, por ejemplo, una brida o un brazo de palanca, que debe ser montada sobre una flecha, es calentada y después se le desliza sobre la flecha o huesillo fríos. Cuando posteriormente se le deja enfriarse, la pieza se encoje y el ensamble se hace efectivamente integral.

Tabla 3.7 Coeficientes de dilatación.

| Material      | $\alpha$ ( ° C <sup>-1</sup> ) |
|---------------|--------------------------------|
| Hormigón ~    | $1,0 \times 10^{-5}$           |
| Hierro, acero | $12 \times 10^{-6}$            |
| Plata         | $2,0 \times 10^{-5}$           |
| Oro           | $1,5 \times 10^{-5}$           |
| Plomo         | $3,0 \times 10^{-5}$           |
| Zinc          | $2,6 \times 10^{-5}$           |
| Aluminio      | $2,4 \times 10^{-5}$           |
| Latón         | $1,8 \times 10^{-5}$           |
| Cobre         | $1,7 \times 10^{-5}$           |
| Vidrio ~      | $0,7 \times 10^{-5}$           |
| Cuarzo        | $0,04 \times 10^{-5}$          |
| Hielo         | $5,1 \times 10^{-5}$           |

Concreto 10 acero 11.5 hierro 11.7

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

### 3.6 PROPIEDADES ELÉCTRICAS.

Describen el comportamiento eléctrico del metal, el cual en muchas ocasiones es más crítico que su comportamiento mecánico. La conductividad eléctrica y las propiedades dieléctricas de los materiales son de gran importancia no solo en equipo y maquinaria eléctrica, sino también en procesos de manufactura, tales como el formado por pulsos magnéticos de metales laminados y en el

maquinado por electroerosión y esmerilado electroquímico de materiales duros y frágiles.

Las unidades de conductividad eléctrica son el mho/metro o el mho/pie, donde el *mho* es la inversa de *ohm*, la unidad de resistencia eléctrica.

Los elementos de aleación tienen un efecto de importancia en la conductividad eléctrica de los metales; mientras más elevada sea la conductividad del elemento de aleación, mas alta será la conductividad de la aleación.

### 3.6.1 CONDUCTORES.

Los materiales con alta conductividad, como los metales, por lo general, se conocen como conductores. La resistividad eléctrica es la inversa a la conductividad, los materiales con elevada resistividad se conocen como aisladores.

Existe también el comportamiento dieléctrico, propio de los materiales que impiden el flujo de corriente eléctrica, que va más allá de simplemente proporcionar aislamiento.



**(A)** cable o conductor compuesto por un solo alambre rígido de. cobre.

**(B)** cable o conductor compuesto por varios alambres flexibles de. cobre.

Ambos tipos de conductores poseen un forro aislante de PVC.

Figura 3.8 Dos tipos de conductores.

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml>

### **3.6.2 RESISTENCIA DIELECTRICA.**

La resistencia dieléctrica de un metal en su resistividad a la corriente eléctrica directa. Se define como voltaje requerido por unidad de distancia para la ruptura eléctrica, y tiene unidades de volts/metro o volts/pie.

Los electrones son los portadores de carga en los materiales conductores, semiconductores y muchos de los aislantes; en los compuestos iónicos son los iones quienes transportan la mayor parte de la carga. La movilidad de los portadores depende de los enlaces atómicos, de las imperfecciones de la red, de la microestructura y, en los compuestos iónicos, de las velocidades de difusión.

### **3.6.3 SEMICONDUCTORES.**

Las propiedades eléctricas de los semiconductores, como son los monocristales de silicio, germanio y arseniuro de galio, son extremadamente sensibles a la temperatura y a la presencia y tipo de diminutas impurezas, por lo que al controlar la concentración y tipo de impurezas (dopantes), como por ejemplo, el fósforo y el boro en el silicio, se puede controlar la conductividad eléctrica.

Esta propiedad es utilizada en los dispositivos semiconductores (de estado sólido) de manera amplia en circuitos electrónicos miniaturizados.

Son muy compactos, muy eficientes y relativamente poco costosos; consumen muy poca energía; y para su operación no requieren de ningún período de calentamiento.

### **3.6.4 SÚPER CONDUCTORES.**

La superconductividad es el fenómeno de una resistividad eléctrica casi cero, que se presenta en algunos metales y aleaciones por debajo de una temperatura crítica. Las temperaturas involucradas a menudo están cerca del cero absoluto (0 K, -273 °C, o -460 °F); a la fecha la temperatura más elevada a la cual se ha encontrado superconductividad es de 150 K (-123 °C, -190°F), y se sigue progresando.

Estos desarrollos indican que la eficiencia de componentes eléctricos como grandes imanes de alta energía, líneas de energía de alto voltaje, y componentes electrónicos y de computo pueden ser mejorados de manera importante.

La aplicación de un campo magnético genera la formación y el movimiento de dipolos contenidos en el material.

Estos dipolos son átomos o grupos de átomos que tienen carga desequilibrada. Dentro de un campo eléctrico aplicado los dipolos se alinean causando polarización. Existen cuatro mecanismos de polarización:

### **3.6.5 POLARIZACIÓN ELECTRÓNICA.**

Consiste en la concentración de los electrones en el lado del núcleo más cercano al extremo positivo del campo. Esto implica una distorsión del arreglo electrónico, en la que el átomo actúa como un dipolo temporal inducido. Este efecto, que ocurre en todos los materiales es pequeño y temporal.

### **3.6.6 POLARIZACIÓN IÓNICA.**

Los enlaces iónicos tienden a deformarse elásticamente cuando se colocan en un campo eléctrico. En consecuencia la carga se redistribuye minúsculamente dentro del material. Los cationes y aniones se acercan o se alejan dependiendo de la dirección de campo. Estos dipolos temporalmente inducidos causan polarización y también pueden modificar las dimensiones generales del material.

### **3.6.7 POLARIZACIÓN MOLECULAR.**

Algunos materiales contienen dipolos naturales, que, al aplicárseles un campo giran, hasta alinearse con él. En algunos materiales, como el titanato de bario, los dipolos se mantienen alineados a pesar de haberse eliminado la influencia del campo externo. Anteriormente, al hablar de polarización iónica, mencionamos la posibilidad de que hubiera modificación de las dimensiones del material.

Este efecto se conoce como electrostricción, además de darse por cambios en la longitud de los enlaces entre iones, puede ser resultado de la actuación de los átomos como partículas en forma oval en vez de esférica o por distorsión debida a la orientación de los dipolos permanentes del material.

Sin embargo, existen materiales que muestran una propiedad adicional: cuando se les impone un cambio dimensional, ocurre polarización, lo que crea un voltaje o un campo.

Los materiales que presentan este comportamiento son piezoeléctricos. Cuando se encuentran entre capas de material conductor, los materiales dieléctricos que se polarizan son capaces de almacenar cargas, esta propiedad se describe mediante:

- **Constante dieléctrica**, que es la relación de la permisividad del material con la permisividad en el vacío.

La presencia de polarización en un material después de que se retira el campo eléctrico se puede explicar en función de una alineación residual de dipolos permanentes. Esto sucede de la siguiente forma: se toma un cristal cuyos dipolos se encuentran orientados de forma aleatoria, de forma que no hay polarización neta; al aplicar un campo, los dipolos comienzan a alinearse con dicho campo; finalmente, el campo alinea todos los dipolos y se obtiene la polarización máxima o de saturación; cuando posteriormente se retira el campo, queda una polarización remanente, debida al acoplamiento de dipolos y el material ha quedado permanentemente polarizado.

Los materiales que retienen una polarización neta, una vez retirado el campo se conocen como ferróeléctricos.

Para que el material dieléctrico almacene energía, se debe impedir que los portadores de carga como iones y electrones se muevan de un conductor a otro a través de él, en consecuencia, los materiales dieléctricos tienen siempre una alta resistividad eléctrica.

Materiales utilizados para aislar el campo eléctrico deben poseer alta resistividad eléctrica, alta resistencia dieléctrica y un bajo factor de pérdida.

Sin embargo, una constante dieléctrica alta no es necesaria e incluso puede llegar a ser indeseable. Una constante dieléctrica pequeña impide la polarización, por lo que no se almacena carga localmente en el aislante.

### **3.6.8 EFECTO PIEZOELÉCTRICO.**

El efecto piezoeléctrico (*piezo* del griego, que significa oprimir) es exhibido por algunos materiales, como los cristales de cuarzo y algunos cerámicos, en el cual existe una interacción reversible entre una deformación elástica y un campo magnético.

Esta propiedad es utilizada en la fabricación de transductores, dispositivos que convierten la deformación proveniente de una fuerza externa en energía eléctrica. Las aplicaciones típicas son transductores de fuerza o de presión, calibradores de deformación, detectores de sonar y micrófonos.

### 3.7 PROPIEDADES MAGNÉTICAS

El comportamiento magnético está determinado por las interacciones entre dipolos magnéticos, estos dipolos a su vez están dados por la estructura electrónica del material. Por lo tanto, al modificar la microestructura, la composición o el procesamiento se pueden alterar las propiedades magnéticas.

Los conceptos que definen los efectos de un campo magnético en un material son:

Tabla 3.9 Conceptos y definiciones de un campo magnético en un material.

| <b>Concepto</b>            | <b>Definición</b>   |
|----------------------------|---|
| Momento magnético.         | Intensidad de campo magnético asociado con el electrón.   |
| Permeabilidad magnética.   | El material amplifica o debilita el efecto del campo magnético.   |
| Magnetización.             | Representa el incremento en la inducción magnética debida al material del núcleo.                             |
| Susceptibilidad magnética. | Es la relación entre la magnetización y el campo aplicado, proporciona la amplificación dada por el material. |

Fuente: Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002). Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ª Edición.

Así, cuando se acerca un campo magnético a un conjunto de átomos es posible observar diversas reacciones:

- **Díamagnetismo.** El campo magnético influye en los momentos magnéticos de los electrones dentro del átomo y produce un dipolo para todos los átomos. Estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor a cero.

- **Paramagnetismo.** Debido a la existencia de electrones no apareados, a cada átomo se le asocia un momento magnético neto, causado por el giro de los electrones. Cuando se aplica un campo magnético, los dipolos se alinean con él, resultando una magnetización positiva. Pero, dado que los dipolos no interactúan, para alinearlos se requieren campos magnéticos extremadamente grandes. Además, en cuanto se elimina el campo, el efecto se pierde.

- **Ferromagnetismo.** Es causado por los niveles de energía parcialmente ocupados del nivel  $3d$  del hierro, el níquel y el cobalto. Consiste en la fácil alineación de los dipolos permanente no apareados con el campo magnético aplicado, debido a la interacción de intercambio o al refuerzo mutuo de los dipolos.

Esto significa que aún con campos magnéticos pequeños se obtienen magnetizaciones importantes, con permeabilidad relativa de hasta 106.

- **Antiferromagnetismo.** Los momentos magnéticos producidos en dipolos vecinos se alinean en el campo magnético oponiéndose unos a otros, aún cuando la intensidad de cada dipolo sea muy alta. Esto produce una magnetización nula.

- **Ferrimagnetismo.** Se da principalmente en materiales cerámicos, donde diferentes iones crean momentos magnéticos distintos, causando que, en un campo magnético los dipolos de Ion A puedan alinearse con el campo, en tanto que los dipolos del Ion B pueden oponérsele.

Como las intensidades de los dipolos son distintas, el resultado será una magnetización neta. Así, los materiales con este tipo de comportamiento pueden dar una buena intensificación del campo aplicado.

### **3.8 PROPIEDADES ÓPTICAS.**

Se relacionan con la interrelación entre un material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o partículas de energía, conocidas como fotones.

Estas radiaciones pueden tener características que entren en nuestro espectro de luz visible, o ser invisibles para el ojo humano. Esta interacción produce una diversidad de efectos, como absorción, transmisión, reflexión, refracción y un comportamiento electrónico.

#### **3.8.1 FENÓMENOS ÓPTICOS.**

Al interactuar con la estructura electrónica o cristalina de un material, los fotones de una fuente externa crean varios fenómenos ópticos.

Si los fotones incidentes interactúan con los electrones de valencia pueden ocurrir varias cosas: los fotones ceden energía al material, en cuyo caso hay absorción; o puede ser que cuando los fotones aportan energía, de inmediato el material emite electrones de idéntica energía, de forma que se produce reflexión.

También puede que los fotones no interactúen con la estructura electrónica del material, en ese caso ocurre la transmisión. En cualquiera de estos tres casos, la velocidad de los fotones cambia; este cambio propicia la refracción.

- **Refracción.** Cuando un fotón es transmitido provoca la polarización de electrones en el material y, al interactuar con el material polarizado, pierde parte de su energía.



Figura 3.10 Refracción de la luz en diversos contenedores.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Refracci%C3%B3n>.

Un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado. También se produce refracción cuando la luz atraviesa capas de aire a distinta temperatura, de la que depende el índice de refracción.

La velocidad de la luz se puede relacionar con la facilidad con la cual un material se polariza tanto eléctricamente (permisividad) como magnéticamente (permeabilidad).

Sin embargo, los materiales ópticos no son magnéticos, por tanto la permeabilidad puede no tomarse en cuenta.

- **Reflexión.** Cuando un haz de fotones golpea un material, éstos interactúan con los electrones de valencia y ceden su energía. Cuando las bandas de valencia no están totalmente ocupadas, cualquier radiación, de casi cualquier longitud de onda, excita a los electrones hacia niveles superiores de energía.

Podría esperarse que, si los fotones son totalmente absorbidos, no se reflejara luz y el material aparecería de color negro.

Sin embargo, cuando fotones de longitud casi idéntica vuelven a ser emitidos, mientras que los electrones excitados regresan a sus niveles inferiores de energía, ocurre la reflexión. Dado que la totalidad del espectro visible se refleja, los materiales con esta propiedad tienen un color blanco o plateado (en los metales).

- **Absorción.** La porción de haz incidente que no es reflejada por el material es absorbida o transmitida a través del mismo. La fracción de luz absorbida está relacionada con el espesor del material y la forma en la cual los fotones interactúan con su estructura

La absorción ocurre debido a varios mecanismos. En la dispersión de Raleigh, el fotón interactúa con electrones en órbita y sufre una deflexión sin cambios de energía; este resultado es más significativo para átomos con alto número atómico y para fotones de baja energía. La dispersión es causada por la interacción entre electrones en órbita y fotones; así, el electrón es expulsado del átomo y, por tanto, consume parte de la energía del fotón. De nuevo, átomos con números atómicos más altos y energías de fotón menores causan mayor dispersión. El efecto fotoeléctrico se presentará cuando la energía del fotón se consuma al romperse la unión entre el electrón y su núcleo. Conforme la energía del fotón aumenta (reduciendo la longitud de onda), ocurrirá menos absorción, hasta que el fotón tenga una energía igual a la de la unión.

A este nivel de energía, el coeficiente de absorción se incrementa de manera significativa.

La energía o longitud de onda a la que esto ocurre se conoce como margen de absorción. Cuando los fotones no interactúan con imperfecciones de la materia, se dice que éste es transparente. Éste es el caso del vidrio, cerámicos cristalinos de alta pureza y de polímeros amorfos como acrílicos, policarbonatos y polisulfones.

- **Transmisión.** La fracción del haz que no ha sido reflejada ni absorbida se transmite a través del material.

Intensidad del haz transmitido dependerá de la longitud de onda de los fotones dentro del haz.

Si sobre un material incide un haz de luz blanca y se absorben, se reflejan y se transmiten fracciones equivalentes de fotones con longitudes de onda diferentes, el haz transmitido también será de luz blanca.

Pero, si los fotones de longitud de onda más larga son absorbidos en mayor proporción que los de longitud de onda más corta, la luz transmitida aparecerá del color de la longitud de onda corta cuya absorción haya sido menor. La transparencia no es otra cosa que la transmisión íntegra de los haces de luz que inciden sobre el material y la intensidad del haz también depende de características microestructurales.

Cuando cualquiera de estos tres fenómenos ópticos se da de forma que solo fotones con un intervalo específico de longitud de onda son absorbidos, reflejados o transmitidos, se producen propiedades ópticas poco comunes, que se traducen en cambios de color (policromía), colores característicos (como el rojo del láser de rubí dopado), etc.

### **3.8.2 FENÓMENOS DE EMISIÓN.**

Un material puede emitir fotones cuya energía puede producir radiaciones en una gran gama de longitudes de onda.

A continuación se presentan algunos ejemplos específicos de este tipo de fenómenos:

- **Rayos Gamma.** Interacciones nucleares. Los rayos gamma son fotones de energía muy elevada, emitidos durante la descomposición radiactiva de núcleos inestables de ciertos átomos.

Así la energía de los rayos gamma depende de la estructura del núcleo que los origina.

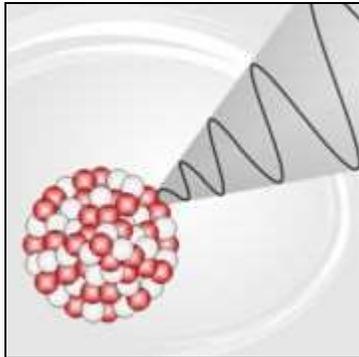


Figura 3.11 Radiación gamma

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Rayos\\_gamma](http://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_gamma)

La radiación gamma ( $\gamma$ ) es un tipo de radiación electromagnética producida generalmente por elementos radioactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación de tal magnitud también es producida en fenómenos astrofísicos de gran violencia.

- **Rayos X.** Interacciones en las capas internas de los electrones. Los rayos X cuya energía es ligeramente menor que la de los rayos gamma, son producidos al estimular los electrones de las capas internas del átomo. Este estímulo puede consistir en electrones de alta energía u otro rayo X. Así se emiten rayos X de espectro continuo y espectro característico. Cuando un electrón de alta energía golpea un material, al desacelerarse cede energía, que es emitida en forma de fotones.

Cada vez que el electrón golpea un átomo, cede una parte adicional de su energía; cada una de estas interacciones puede ser más o menos severa, por lo que en cada ocasión el electrón cede una fracción distinta de su energía,

produciendo fotones de longitudes de onda diferentes, produciendo un espectro continuo.

Si el electrón perdiera toda su energía en un solo impacto, la longitud de onda mínima de los fotones emitidos sería el equivalente a la energía original del estímulo; esta longitud de onda mínima se conoce como límite de longitud de onda corta.

Este límite se reduce al aumentar la energía del estímulo, lo que incrementa el número y la energía de los fotones emitidos. El estímulo también puede tener energía suficiente para excitar un electrón de un nivel inferior de energía y pasarlo a un nivel superior.

El electrón excitado no es estable y, a fin de restaurar el equilibrio, el nivel inferior no ocupado se llena con electrones provenientes de un nivel superior. Este es el proceso que emite un espectro característico de rayos x, que es diferente para cada tipo de átomo.

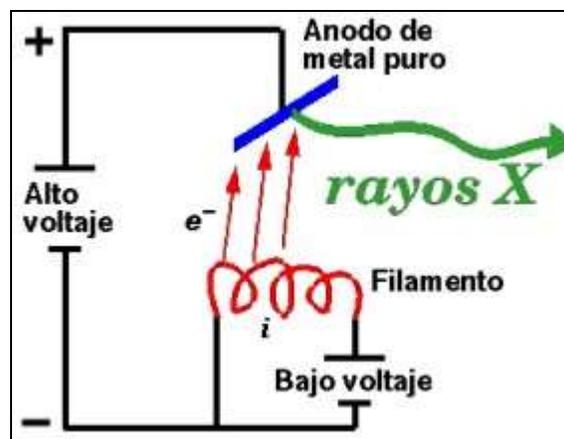


Figura 3.12 Esquema de un tubo convencional de rayos X



Generación de rayos X en un laboratorio de Cristalografía

Figura 3.13 Ejemplo de rayos x

Los equipos que se utilizan en los laboratorios de Cristalografía para producir estos rayos X son relativamente sencillos.

Disponen de un *generador* de alta tensión (unos 50.000 voltios), que se suministra al llamado *tubo de rayos X*, que es realmente donde se produce la radiación.

Fuente: [http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_02.html](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_02.html)

El tubo con gas se encuentra a una presión de aproximadamente 0.01 mmHg y es controlada mediante una válvula; posee un cátodo de aluminio cóncavo, el cual permite enfocar los electrones y un ánodo. Las partículas ionizadas de nitrógeno y oxígeno, presentes en el tubo, son atraídas hacia el cátodo y ánodo. Los iones positivos son atraídos hacia el cátodo e inyectan electrones a este. Posteriormente los electrones son acelerados hacia el ánodo (que contiene al blanco) a altas energías para luego producir rayos X. El mecanismo de refrigeración y la ventana son los mismos que se encuentran en el tubo con filamento.

- **Luminiscencia.** Interacciones de las capas exteriores de electrones. La luminiscencia es la conversión de radiaciones y otras formas de energía en luz

visible. Ocurre cuando una radiación incidente excita electrones de la banda de valencia, para pasar a través de la brecha de energía y haciéndolos llegar finalmente a la banda de conducción. Estos electrones excitados se quedan brevemente en niveles superiores de energía, y cuando regresan a la banda de valencia emiten fotones. Si la longitud de onda de estos fotones está dentro de la parte del espectro que es visible al ojo humano, aparecerá la luminiscencia.

- **Diodos emisores de luz.** Electroluminiscencia. Los diodos emisores de luz (LED) se basan en la aplicación de un voltaje externo, que causa transiciones electrónicas y electroluminiscencia. Estos dispositivos de unión *p-n* están diseñados de forma que estén dentro de nuestro espectro de luz visible. Un voltaje aplicado al diodo en dirección de polarización directa hace que en la unión se recombinen huecos y electrones, lo que obliga a estos a emitir fotones.

- **Láser.** Amplificación de la luminiscencia. El láser (siglas en inglés de light amplification by stimulated emission of radiation, o amplificación de la luz mediante emisión estimulada de radiación), es una aplicación especial de la luminiscencia. Al calentarse un material, los electrones saltan de la banda de valencia hacia la banda de conducción, dejando atrás "huecos" en la banda de valencia.

Cuando un electrón vuelve a la banda de valencia recombinándose con un hueco, se produce un fotón, con energía y longitud de onda equivalentes a la brecha de energía. Este fotón estimula otro electrón, para que baje de la banda de conducción hacia la banda de valencia, creando un segundo fotón con longitud de onda y frecuencia idénticas y en fase con el primer fotón.

Así, los fotones emitidos en el material se amplifican. Seleccionando cuidadosamente el estimulante y el material, podemos hacer que la longitud de onda de los fotones caiga dentro de nuestro espectro de luz visible. La salida del láser es un haz de fotones paralelos y coherentes, de una misma longitud de onda.

En un haz coherente, la naturaleza ondulatoria de los fotones está en fase, por lo que no ocurren interferencias destructivas. Los rayos láser son útiles en tratamiento térmico y fusión de metales, en soldadura, cirugía, cartografía, en la transmisión y procesamiento de información y otras aplicaciones.

- **Emisión térmica.** Al calentarse un material, los electrones se excitan térmicamente hasta llegar a niveles energéticos superiores, particularmente en los niveles superiores de energía, donde los electrones están débilmente unidos al núcleo. De inmediato estos regresan a sus niveles normales, liberando fotones.

Conforme se incrementa la temperatura, la agitación térmica aumenta y también la máxima energía de los fotones emitidos. Se emite un espectro continuo de radiación, con una longitud de onda mínima y una distribución de intensidad dependientes de la temperatura.

Algunos de los fotones pueden tener longitudes de onda dentro de nuestro espectro visible, por lo que el color del material cambiará con la temperatura. A temperaturas bajas, la longitud de onda de la radiación es demasiado larga para ser vista. Conforme la temperatura asciende, los fotones emitidos son de longitudes más cortas.

A los 700 ° C comienza a verse un tinte rojizo y de esta temperatura en adelante, se producen todas las longitudes de onda visibles, hasta que este espectro emitido es una luz blanca. Midiendo con un pirómetro la intensidad de una banda estrecha de las longitudes de onda emitidas, se puede estimar la temperatura del material.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROPIEDADES QUIMICAS DE LOS MATERIALES.**

#### **4.1 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**

La apreciación de la resistencia a la corrosión de los metales y sus aleaciones se hace en base a ensayos de laboratorio, con ello se valora cualquier característica del material relacionada por la destrucción química desarrollada antes, y después de la acción del medio a probar.

Es común que se tome una probeta del material y se someta al medio en cuestión, luego de un tiempo de permanencia, se determina el cambio del peso, si se producen en la probeta sales o compuestos superficiales de fácil desprendimiento el peso irá disminuyendo, pero en caso contrario cuando se forman óxidos adherentes y continuos su peso aumentará.

Cuando la corrosión se produce en toda la superficie de la probeta se puede determinar el cambio de peso por unidad de superficie y por hora (gramos/m<sup>2</sup>/hora), de esta forma, y usando la densidad del material, se puede finalmente determinar la velocidad de corrosión en unidades de cambio de dimensiones por año, que es la unidad mas común en la que se expresa la corrosión continua (mm/año).

Para los casos en que la corrosión producida sea por zonas localizadas, el método del peso deja de ser preciso o seguro. En estos casos lo que se hace es medir la profundidad de la corrosión o el cambio de las propiedades mecánicas. Esto último tiene importancia primordial para el caso de la corrosión en la dirección de las facetas de los granos (corrosión intercrystalina).

#### **4.1.1 CORROSIÓN.**

Es definida como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la Temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión.

Los más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón).

Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.).

Es un problema industrial importante, que puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelve 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante.

En general, se calcula que su costo económico no es inferior al 2% del producto interno bruto.

La corrosión es un campo de las ciencias de materiales que invoca a la vez nociones de química y de física (físico-química).



Figura 4.1 Oxidación del metal.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

#### **4.1.2 DEFINICIONES BÁSICAS.**

La corrosión es, principalmente, un fenómeno electroquímico. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química cede y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción.

Para que esto ocurra entre las especies debe existir un diferencial electroquímico, si separamos una especie y su semireacción se le denominará semipar electroquímico, si juntamos ambos semipares se formará un par electroquímico.

Cada semipar está asociado a un potencial de reducción (antiguamente se manejaba el concepto de potencial de oxidación). Aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción y viceversa, aquel que exhiba un potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación.

Este par de metales constituye la llamada pila galvánica, en donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo).

En un medio acuoso, la oxidación del medio se verifica mediante un electrodo especial llamado Electrodo ORP que mide en milivolts la conductancia del medio.

#### 4.1.3 APROXIMACIÓN A LA CORROSIÓN DE LOS METALES.

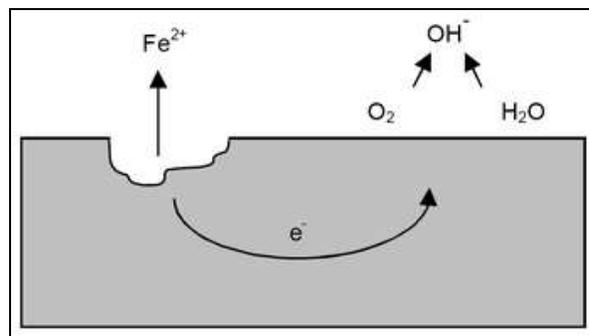


Figura 4.2 Esquema de oxidación del hierro, ejemplo de corrosión del tipo polarizada.

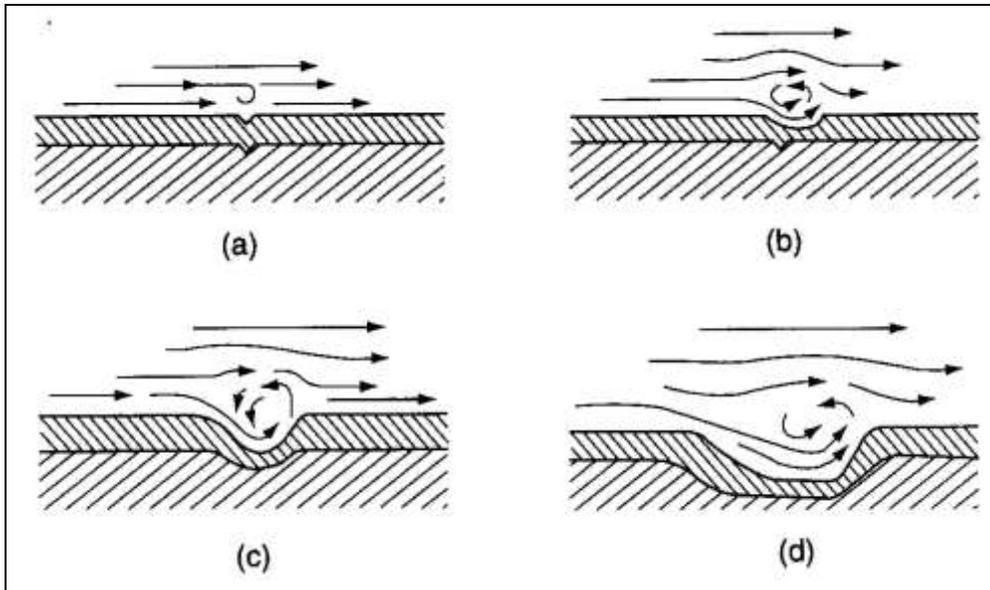


Figura 4.3 Diagrama esquemático del mecanismo de erosión-corrosión  
 Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>.

La corrosión de los metales es un fenómeno natural que ocurre debido a la inestabilidad termodinámica de la mayoría de los metales. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico) los metales están presentes en la Tierra en forma de óxido, en los minerales (como la bauxita si es aluminio, la hematita si es hierro...). Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en reducir los óxidos en bajos hornos, luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido.

La corrosión es una reacción química (oxidoreducción) en la que intervienen dos factores:

- la pieza manufacturada
- el ambiente

A menudo se habla del acero inoxidable; el término es impropio por dos razones:

- Este tipo de acero contiene elementos de aleación (cromo, níquel) que se oxidan; a esta capa de óxido se debe la protección del acero;
- No está protegido más que en ciertos tipos de ambiente, y se corroerá en ambientes distintos.

Existen múltiples variedades de aceros llamados "inoxidables", que llevan nombres como "304", "304L", "316N", etc. correspondiente a distintas composiciones y tratamientos. Cada acero corresponde a ciertos tipos de ambiente; su uso en ambientes distintos será catastrófico.

Además, el material del que está hecha la pieza no es el único parámetro. La forma de la pieza y los tratamientos a los que se la somete (conformación, soldadura, atornillado) tienen un papel primordial. Así, un montaje de dos metales diferentes (por ejemplo, dos variedades de acero, o el mismo acero con tratamientos diferentes) puede dar pie a una corrosión acelerada; además, a menudo se ven trazas de herrumbre en las tuercas.

Asimismo, si la pieza presenta un intersticio (por ejemplo, entre dos placas), ahí puede formarse un medio confinado que evolucionará de un modo diferente del resto de la pieza y, por lo tanto, podrá llegar a una corrosión local acelerada. De hecho, toda heterogeneidad puede desembocar en una corrosión local acelerada, como, por ejemplo, en los cordones de soldadura o en la mano al ser salpicada por un ácido.

#### **4.1.4 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.**

La corrosión es un fenómeno que depende del material utilizado, de la concepción de la pieza (forma, tratamiento, montaje) y del ambiente. Se puede influir entonces en estos tres parámetros; se puede influir también en la reacción química misma.

#### **4.1.5 ELECCIÓN DEL MATERIAL.**

La primera idea es escoger todo un material que no se corroa en el ambiente considerado.

Se pueden utilizar aceros inoxidable, aluminios, cerámicas, polímeros (plásticos), etc. La elección también debe tomar en cuenta las restricciones de la aplicación (masa de la pieza, resistencia a la deformación, al calor, capacidad de conducir la electricidad, etc.). Cabe recordar que no existen materiales absolutamente inoxidables; hasta el aluminio se puede corroer.

#### **4.1.6 CONCEPCIÓN DE LA PIEZA.**

En la concepción, hay que evitar las zonas de confinamiento, los contactos entre materiales diferentes y las heterogeneidades en general.

Hay que prever también la importancia de la corrosión y el tiempo en el que habrá que cambiar la pieza (mantenimiento preventivo).

#### **4.1.7 DOMINIO DEL AMBIENTE.**

Cuando se trabaja en ambiente cerrado (por ejemplo, un circuito cerrado de agua), se pueden dominar los parámetros que influyen en la corrosión; composición química (particularmente la acidez), temperatura, presión... Se puede, agregar productos llamados "inhibidores de corrosión". Un inhibidor de corrosión es una sustancia que, añadida a un determinado medio, reduce de manera significativa la velocidad de corrosión.

Las sustancias utilizadas dependen tanto del metal a proteger como del medio, y un inhibidor que funciona bien en un determinado sistema puede incluso acelerar la corrosión en otro sistema.

Sin embargo, este tipo de solución es inaplicable cuando se trabaja en medio abierto (atmósfera, mar, cuenca en contacto con el medio natural, circuito abierto...)

#### 4.2 INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN.

Los inhibidores de corrosión, son productos que actúan ya sea formando films sobre la superficie metálica, tales como los molibdatos o fosfatos o bien entregando sus electrones al medio.

Por lo general los inhibidores de este tipo, son azoles modificados que actúan sinérgicamente con otros inhibidores tales como nitritos, fosfatos y silicatos. La química de los inhibidores no está del todo desarrollada aun. Su uso es en el campo de los sistemas de enfriamiento o disipadores de calor tales como los radiadores, torres de enfriamiento, calderas, etc.

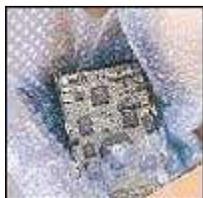


**PELÍCULAS:** Los films o películas proveen protección en gran variedad de formas a fin de adecuarse a las necesidades de empaque o embalaje. Desde el polietileno para uso general, hasta películas retráctiles o termocontraíbles, estirables y reforzadas, todos los films tienen excelente claridad y adhesión. Para empaque industrial las bolsas multifuncionales combinan inhibidores de corrosión con acción desecante y construcción antiestática. Las bolsas y películas tienen acción absorbente de humedad, un protector tipo barrera capaz de mantener el vacío y excelente también para alta temperatura y humedad.





**ESPUMAS:** Las espumas impregnadas de y las burbujas de polietileno protegen piezas de precisión y componentes electrónicos sensibles. Protegen los artículos contra roturas y daños superficiales, protege artículos delicados con su forro anti-abrasión y capacidad de absorción de condensación.



**INSERTOS:** Los insertos proporcionan absorción excepcional y alcances de áreas inaccesibles. Los insertos encajan virtualmente en cualquier sistema de empaque o embalaje, y vienen en sobrecitos, tabletas y círculos.



Figura 4.4 Algunos inhibidores a la corrosión.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

#### 4.2.1 AISLAMIENTO DEL MEDIO.

Existen distintos medios para impedir que ocurra la reacción química. Como primera medida de protección se puede aislar la pieza del ambiente, dándole una mano de pintura, cubriendo la pieza de plástico, haciendo un tratamiento de superficie (por ejemplo, nitruración, cromatación o proyección plasma).

#### 4.2.3 GALVANISMO ANÓDICO O PROTECCIÓN CATÓDICA.

También se puede introducir otra pieza para perturbar la reacción; es el principio del "ánodo de sacrificio". Se coloca una pieza (a menudo de zinc) que se va a corroer en lugar de la pieza que se quiere proteger; la reacción química entre el ambiente y la pieza sacrificada impide la reacción entre el ambiente y la pieza útil.

En medio acuoso, basta con atornillar el ánodo sacrificial a la pieza que se debe proteger. Al aire, hay que recubrir totalmente la pieza; es el principio de la galvanización. Este método se usa ampliamente en la Ingeniería naval.

### **4.3 GALVANOPLASTÍA.**

La pieza se puede recubrir con una película de otro metal electro depositado cuyo potencial de reducción es más estable que el alma de la pieza. Existe el niquelado, el zincado (galvanizado), el cobrizado y el cromatizado.

El cromado usado comúnmente en la industria automotriz confiere una protección estable al alma de hierro con la cual se confecciona el artículo.

El cromado (no confundir el cromado, un depósito de cromo, con la cromatación, que es la formación de una capa de metal combinado con iones de cromo VI).

En efecto, el cromo mismo no se corroe, protegiendo así la pieza, pero la mínima rayadura es catastrófica, pues la pieza hace entonces las veces de ánodo sacrificial del cromo y se corroe a gran velocidad.

Las pinturas anticorrosión con plomo han sido abandonadas a causa de su impacto dramático en el ambiente.

### **4.4 APLICACIÓN DE INHIBIDORES ASOCIADOS A UNA PELÍCULA DE FIJACIÓN.**

En este caso, caen las pinturas anticorrosivas cuyas formulaciones aparte de aportar con un film de aislamiento de tipo epóxico fenólico o epoxi-ureico llevan asociados un paquete anticorrosivo compuesto por moléculas orgánicas o minerales receptoras de electrones.

Es también conveniente mencionar que un inhibidor de corrosión deberá especificarse sobre que tipo de corrosión va a inhibir dado la gran diversidad de tipos y formas de corrosión dependiendo principalmente de las condiciones del medio donde se está llevando a cabo esta.

#### **4.5 EXPOSICIÓN A SOLUCIONES REDUCTORAS.**

La superficie es expuesta a la permanente exposición de elementos químicos disueltos en una solución a bajas concentraciones, dichas especies son pares reductores que se oxidan ellos mismos a cambio de la pieza y además contribuyen con la pasivación o inactivación de la superficie formando micropelículas químicas estables.

Estas especies se encuentran comúnmente en anticongelantes, pinturas base acuosa y otras aplicaciones.

#### **4.6 TIPOS DE CORROSIÓN.**

Existen muchos mecanismos por los cuales se verifica la corrosión, que tal como se ha explicado anteriormente es fundamentalmente un proceso electroquímico.

##### **- Corrosión electroquímica o polarizada**

La corrosión electroquímica se establece cuando en una misma superficie metálica ocurre una diferencia de potencial en zonas muy próximas entre sí en donde se establece una migración electrónica desde aquella en que se verifica el potencial de oxidación más elevado, llamado área anódica hacia aquella donde se verifica el potencial de oxidación (este término ha quedado obsoleto,

actualmente se estipula como potencial de reducción) más bajo, llamado área cacariza.

El conjunto de las dos semireacciones constituye una célula de corrosión electroquímica.

### **- Corrosión por oxígeno**

Este tipo de corrosión ocurre generalmente en superficies expuestas al oxígeno diatómico disuelto en agua o al aire, se ve favorecido por altas temperaturas y presión elevada ( ejemplo: calderas de vapor).

El oxígeno provoca el llamado pitting (picado) en aquellas superficies muy pulidas y expuestas.

La burbuja de oxígeno que se localiza forma un cátodo y el metal del seno que aloja dicha burbuja se transforma en un ánodo.

Este tipo de corrosión es muy reactiva y puede desarrollarse en un breve lapso.

La corrosión en las máquinas térmicas (calderas de vapor) representa una constante pérdida de rendimiento y vida útil de la instalación.

### **- Corrosión microbiológica**

Algunos microorganismos son capaces de causar corrosión en las superficies metálicas sumergidas. Se han identificado algunas especies hidrógeno dependientes que usan el hidrógeno disuelto del agua en sus procesos metabólicos provocando una diferencia de potencial del medio circundante.

Su accionar está asociado al pitting (picado) del oxígeno o la presencia de ácido sulfhídrico en el medio. En este caso se clasifican las ferróbacterias.

### **- Corrosión por presiones parciales de oxígeno**

El oxígeno presente en una tubería por ejemplo, está expuesto a diferentes presiones parciales del mismo. Es decir una superficie es más aireada que otra próxima a ella y se forma una pila.

El área sujeta a menor aireación (menor presión parcial) actúa como ánodo y la que tiene mayor presencia de oxígeno (mayor presión) actúa como un cátodo y se establece la migración de electrones, formándose óxido en una y reduciéndose en la otra parte de la pila.

Este tipo de corrosión es común en superficies muy irregulares donde se producen obturaciones de oxígeno.

### **- Corrosión galvánica**

Es la más común de todas y se establece cuando dos metales distintos entre si actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo.

Aquel que tenga el potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación y viceversa aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción.

Este par de metales constituye la llamada pila galvánica. En donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta los electrones.

La corrosión Galvánica es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos (con distinto par redox) se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva).

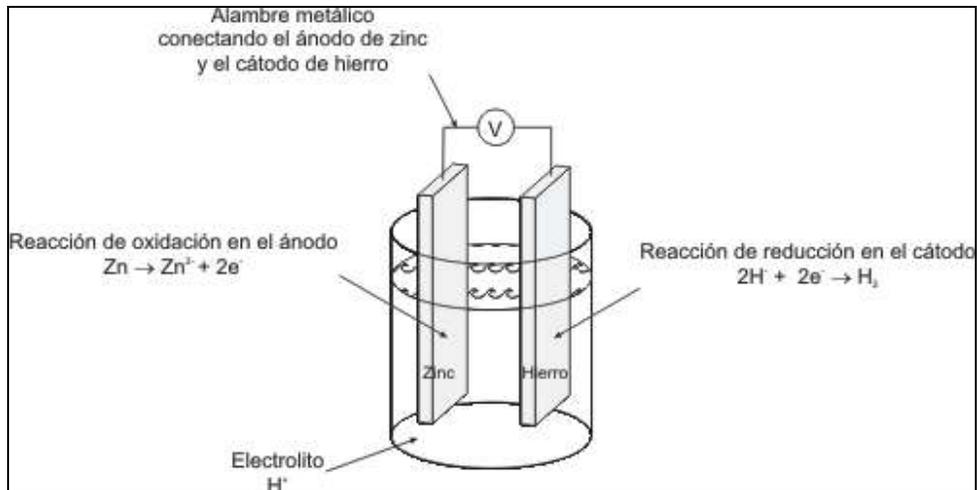


Figura 4.5 Esquema de corrosión galvánica.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

#### - Corrosión por actividad salina diferenciada

Este tipo de corrosión se verifica principalmente en calderas de vapor, en donde la superficie metálica expuesta a diferentes concentraciones salinas forman a ratos una pila galvánica en donde la superficie expuesta a la menor concentración salina se comporta como un ánodo.

#### - Corrosión por Fisuras o “Crevice”

La corrosión por *crevice* o por fisuras es la que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no- metálico. En las fisuras de ambos metales, que también pueden ser espacios en la forma del objeto, se deposita la solución que facilita la corrosión de la pieza. Se dice, en estos casos, que es una corrosión con ánodo estancado, ya que esa solución, a menos que sea removida, nunca podrá salir de la fisura. Además, esta cavidad se puede generar de forma natural producto de la interacción iónica entre las partes que constituyen la pieza.

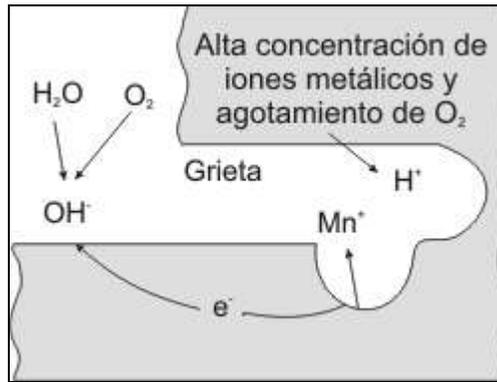


Figura 4.6 Corrosión por Fisuras o Crevice.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

## **CAPÍTULO 5**

### **PROPIÉDADES TECNOLÓGICAS O DE MANUFACTURA**

Las propiedades de manufactura y tecnológicas son aquellas que definen el comportamiento de un material frente a diversos métodos de trabajo y a determinadas aplicaciones. Existen varias propiedades que entran en esta categoría, destacándose la templabilidad, la soldabilidad y la dureza entre otras.

#### **5.1 SOLDABILIDAD:**

En ingeniería, procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse. La mayor parte de procesos de soldadura se pueden separar en dos categorías: soldadura por presión, que se realiza sin la aportación de otro material mediante la aplicación de la presión suficiente y normalmente ayudada con calor, y soldadura por fusión, realizada mediante la aplicación de calor a las superficies, que se funden en la zona de contacto, con o sin aportación de otro metal. En cuanto a la utilización de metal de aportación se distingue entre soldadura ordinaria y soldadura autógena. Esta última se realiza sin añadir ningún material. La soldadura ordinaria o de aleación se lleva a cabo añadiendo un metal de aportación que se funde y adhiere a las piezas base, por lo que realmente éstas no participan por fusión en la soldadura. Se distingue también entre soldadura blanda y soldadura dura, según sea la temperatura de fusión del metal de aportación empleado; la soldadura blanda utiliza metales de aportación cuyo punto de fusión es inferior a los 450 °C, y la dura metales con temperaturas superiores.

Gracias al desarrollo de nuevas técnicas durante la primera mitad del siglo XX, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y barcos. Es una técnica

fundamental en la industria del motor, en la aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de cualquier producto hecho con metales.

El tipo de soldadura más adecuado para unir dos piezas de metal depende de las propiedades físicas de los metales, de la utilización a la que está destinada la pieza y de las instalaciones disponibles. Los procesos de soldadura se clasifican según las fuentes de presión y calor utilizadas.

El procedimiento de soldadura por presión original es el de soldadura de fragua, practicado durante siglos por herreros y artesanos. Los metales se calientan en un horno y se unen a golpes de martillo. Esta técnica se utiliza cada vez menos en la industria moderna.

### **5.1.1 SOLDADURA ORDINARIA O DE ALEACIÓN**

Método utilizado para unir metales con aleaciones metálicas que se funden a temperaturas relativamente bajas. Se suele diferenciar entre soldaduras duras y blandas, según el punto de fusión y resistencia de la aleación utilizada. Los metales de aportación de las soldaduras blandas son aleaciones de plomo y estaño y, en ocasiones, pequeñas cantidades de bismuto. En las soldaduras duras se emplean aleaciones de plata, cobre y cinc (soldadura de plata) o de cobre y cinc (latón soldadura).

Para unir dos piezas de metal con aleación, primero hay que limpiar su superficie mecánicamente y recubrirla con una capa de fundente, por lo general resina o bórax. Esta limpieza química ayuda a que las piezas se unan con más fuerza, ya que elimina el óxido de los metales. A continuación se calientan las superficies con un soldador o soplete, y cuando alcanzan la temperatura de fusión del metal de aportación se aplica éste, que corre libremente y se endurece cuando se enfría. En el proceso llamado de resudación se aplica el metal de aportación a las piezas por separado, después se colocan juntas y se calientan. En los procesos industriales se suelen emplear hornos para calentar las piezas.

Este tipo de soldadura la practicaban ya hace más de 2.000 años los fenicios y los chinos. En el siglo I d.C., Plinio habla de la soldadura con estaño como procedimiento habitual de los artesanos en la elaboración de ornamentos con metales preciosos; en el siglo XV se conoce la utilización del bórax como fundente.

### **5.1.2 SOLDADURA POR FUSIÓN**

Agrupar muchos procedimientos de soldadura en los que tiene lugar una fusión entre los metales a unir, con o sin la aportación de un metal, por lo general sin aplicar presión y a temperaturas superiores a las que se trabaja en las soldaduras ordinarias. Hay muchos procedimientos, entre los que destacan la soldadura por gas, la soldadura por arco y la aluminotérmica. Otras más específicas son la soldadura por haz de partículas, que se realiza en el vacío mediante un haz de electrones o de iones, y la soldadura por haz luminoso, que suele emplear un rayo láser como fuente de energía.

### **5.1.3 SOLDADURA POR GAS**

La soldadura por gas o con soplete utiliza el calor de la combustión de un gas o una mezcla gaseosa, que se aplica a las superficies de las piezas y a la varilla de metal de aportación. Este sistema tiene la ventaja de ser portátil ya que no necesita conectarse a la corriente eléctrica. Según la mezcla gaseosa utilizada se distingue entre soldadura oxiacetilénica (oxígeno / acetileno) y oxihídrica (oxígeno / hidrógeno), entre otras.

### **5.1.4 SOLDADURA POR ARCO**

Los procedimientos de soldadura por arco son los más utilizados, sobre todo para soldar acero, y requieren corriente eléctrica. Esta corriente se utiliza para crear un arco eléctrico entre uno o varios electrodos aplicados a la pieza, lo que genera el calor suficiente para fundir el metal y crear la unión.

La soldadura por arco tiene ciertas ventajas con respecto a otros métodos. Es más rápida debido a la alta concentración de calor que se genera y por lo tanto produce menos distorsión en la unión. En algunos casos se utilizan electrodos fusibles, que son los metales de aportación, en forma de varillas recubiertas de fundente o desnudas; en otros casos se utiliza un electrodo refractario de wolframio y el metal de aportación se añade aparte. Los procedimientos más importantes de soldadura por arco son con electrodo recubierto, con protección gaseosa y con fundente en polvo.

#### *A) Soldadura por arco con electrodo recubierto*

En este tipo de soldadura el electrodo metálico, que es conductor de electricidad, está recubierto de fundente y conectado a la fuente de corriente. El metal a soldar está conectado al otro borne de la fuente eléctrica. Al tocar con la punta del electrodo la pieza de metal se forma el arco eléctrico. El intenso calor del arco funde las dos partes a unir y la punta del electrodo, que constituye el metal de aportación. Este procedimiento, desarrollado a principios del siglo XX, se utiliza sobre todo para soldar acero.

#### *B) Soldadura por arco con protección gaseosa*

Es la que utiliza un gas para proteger la fusión del aire de la atmósfera. Según la naturaleza del gas utilizado se distingue entre soldadura MIG, si utiliza gas inerte, y soldadura MAG si utiliza un gas activo. Los gases inertes utilizados como protección suelen ser argón y helio; los gases activos suelen ser mezclas con dióxido de carbono. En ambos casos el electrodo, una varilla desnuda o recubierta con fundente, se funde para rellenar la unión.

Otro tipo de soldadura con protección gaseosa es la soldadura TIG, que utiliza un gas inerte para proteger los metales del oxígeno, como la MIG, pero se diferencia en que el electrodo no es fusible; se utiliza una varilla refractaria de wolframio. El metal de aportación puede suministrarse acercando una varilla desnuda al electrodo.

### *C) Soldadura por arco con fundente en polvo*

Este procedimiento, en vez de utilizar un gas o el recubrimiento fundente del electrodo para proteger la unión del aire, usa un baño de material fundente en polvo donde se sumergen las piezas a soldar. Se pueden emplear varios electrodos de alambre desnudo y el polvo sobrante se utiliza de nuevo, por lo que es un procedimiento muy eficaz.

#### **5.1.5 SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA**

El calor necesario para este tipo de soldadura se obtiene de la reacción química de una mezcla de óxido de hierro con partículas de aluminio muy finas. El metal líquido resultante constituye el metal de aportación. Se emplea para soldar roturas y cortes en piezas pesadas de hierro y acero, y es el método utilizado para soldar los raíles o rieles de los trenes.

#### **5.1.6 SOLDADURA POR PRESIÓN**

Agrupar todos los procesos de soldadura en los que se aplica presión sin aportación de metales para realizar la unión. Algunos métodos coinciden con los de fusión, como la soldadura con gases por presión, donde se calientan las piezas con una llama, pero difieren en que la unión se hace por presión y sin añadir ningún metal. El procedimiento más utilizado es el de soldadura por resistencia; otros son la soldadura por fragua (descrita más arriba), la soldadura por fricción y otros métodos más recientes como la soldadura por ultrasonidos.

#### **5.1.7 SOLDADURA POR RESISTENCIA**

Se realiza por el calentamiento que experimentan los metales debido a su resistencia al flujo de una corriente eléctrica (efecto Joule). Los electrodos se aplican a los extremos de las piezas, se colocan juntas a presión y se hace pasar por ellas una fuerte corriente eléctrica durante un instante. La zona de unión de las dos piezas, como es la que mayor resistencia eléctrica ofrece, se

calienta y funde los metales. Este procedimiento se utiliza mucho en la industria para la fabricación de láminas y alambres de metal, y se adapta muy bien a la automatización.

## **5.2 TEMPLABILIDAD**

Proceso de baja temperatura en el tratamiento térmico del material, especialmente el acero, con el que se obtiene el equilibrio deseado entre la dureza y la tenacidad del producto final. Las piezas de acero endurecidos se calientan a una temperatura elevada, pero bajo el punto de fusión del material. Luego se enfrían rápidamente en aceite o en agua para lograr un material más duro, con menos estrés interno, pero más frágil. Para reducir la fragilidad, el material pasa por un recocido que aumenta la tenacidad y disminuye su dureza,

Para obtener el equilibrio adecuado entre dureza y tenacidad, deben controlar la temperatura de recalentamiento y la duración de este. La templabilidad depende de la facilidad del acero para evitar la transformación de la perlita (constituyente microscópico de las aleaciones férricas, formado por ferrita y cementita) o de la barrita de modo que pueda producirse martensita ( hierro tetragonal de cuerpo centrado con carbono en solución sólida sobresaturada).

La templabilidad no es sinónimo de dureza. La máxima dureza que se puede obtener es una función del contenido de carbono.

## **5.3 RECOCIDO**

Proceso de tratamiento térmico por el que el vidrio y ciertos metales y aleaciones se hacen menos quebradizos y más resistentes a la fractura. El recocido minimiza los defectos internos en la estructura atómica del material y elimina posibles tensiones internas provocadas en las etapas anteriores de su procesado.

Los metales ferrosos y el vidrio se recuecen calentándolos a alta temperatura y enfriándolos lentamente; en cambio, la mejor forma de recocer el cobre y la plata es calentarlos y enfriarlos enseguida sumergiéndolos en agua. Cuando el volumen de metal o vidrio es grande suele enfriarse dentro del horno de calentamiento; las láminas suelen recocerse en un horno de proceso continuo. El material a recocer se traslada sobre un tablero móvil a través de una cámara de gran longitud con un gradiente (diferencia gradual) de temperaturas cuidadosamente fijado, desde un valor inicial justo por debajo del punto de ablandado hasta la temperatura ambiente en el extremo final. El tiempo de recocido, sobre todo en el caso del vidrio, varía mucho según el espesor de cada pieza; el vidrio de ventana, por ejemplo, requiere varias horas; el vidrio cilindrado necesita varios días, y los espejos de vidrio para telescopios reflectores, varios meses. El recocido es necesario como paso intermedio en procesos de manipulación de metales, como la fabricación de alambre o el estampado en latón, para recuperar la ductilidad que el metal a tratar pierde debido al endurecimiento producido durante la operación de modelado, y para obtener los más bajos valores de resistencia a la deformación.

#### **5.4 MAQUINABILIDAD**

Propiedad que determina la capacidad de mecanización de un material. Está relacionada con los procesos en los cuales existe arranque de material o viruta como:

- *cizallado*: proceso por el cual se corta una plancha o una pieza metálica en frío por medio de tijeras o cizallas.
- *torneado*: operación que consiste en trabajar una pieza en un torno, máquina-herramienta en la que se asegura y se hace girar la pieza a trabajar, para pulirla o labrarla. Existen varios tipos de torneado como el simple o recto y el cónico y horadado.

- *taladrado*: operación que consiste principalmente en la abertura, agrandamiento, corte y acabado de agujeros en una pieza.

También están el fresado, el cepillado y el rectificado entre otros procesos que involucran maquinabilidad.

## **5.5 ISOTROPÍA**

Un material o pieza es isotrópico cuando presenta exactamente las mismas propiedades en todas las direcciones. Lo contrario es que sea anisotrópico, o sea, que tenga propiedades distintas para cada dirección (propiedades direccionales).

## **5.6 COLABILIDAD**

Propiedad que tiene relación con la fluidez que adquiere un material una vez alcanzada la temperatura de fusión. Tiene gran importancia en procesos de fundición, en los cuales a través del vertido de metal fundido sobre un molde hueco, por lo general hecho de arena, se obtienen piezas metálicas. La fundición implica tres procesos diferentes: en primer lugar se construye un modelo de madera, plástico o metal con la forma del objeto terminado; más tarde se realiza un molde hueco rodeando el modelo con arena y retirándolo después; y a continuación se vierte metal fundido en el molde (este último proceso se conoce como colada).

Para que un material logre una fluidez adecuada para que el proceso de fundición se lleve a cabo con éxito, es necesario que la temperatura de colada sobrepase unos 110°C la temperatura de fusión, para evitar problemas de endurecimiento precoz del material.

Existen diversos métodos de fundición como la colada centrífuga, la cual permite fundir objetos de forma circular, o la fundición inversa, especial para la fabricación de piezas fundidas ornamentales. Además de la fundición, existen

otros procesos que han ido sustituyendo a la fundición como el laminado, el mecanizado, la extrusión, la forja y el fundido a presión.

## **5.7 CONFORMABILIDAD**

Propiedad del material que determina su moldeabilidad. En estado líquido tiene relación con el tipo de fundición que se emplee (molde-vaciado, preza fundida, etc.). En estado sólido está relacionada con procesos de deformación plástica del material (trefilado, laminado, etc.). En estado granular, esta ligada a la presión y a la temperatura que se apliquen a los granos o polvo del material.

La conformabilidad en estado sólido se presenta en 3 casos. Existe conformabilidad con conservación de masa (deformación plástica para materiales dúctiles y maleables), con reducción de masa (torneado, cepillado, rectificado, taladrado, etc.) y de unión (remaches, soldaduras, pegamentos, presión).

Esta propiedad es de vital importancia a la hora de decidir el proceso para lograr la pieza final proyectada, debido a su amplio espectro de posibilidades que influyen en los costos y facilidades de producción.

## GLOSÁRIO DE TÉRMINOS.

**Adiabático.** En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquél en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isentrópico. El extremo opuesto, en el que tiene lugar la máxima transferencia de calor, causando que la temperatura permanezca constante, se denomina como proceso isotérmico.

El término *adiabático* hace referencia a elementos que impiden la transferencia de calor con el entorno. Una pared aislada se aproxima bastante a un límite adiabático. Otro ejemplo es la temperatura adiabática de llama, que es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor hacia el entorno. En climatización los procesos de humectación (aporte de vapor de agua) son adiabáticos, puesto que no hay transferencia de calor, a pesar que se consiga variar la temperatura del aire y su humedad relativa.

**Anisotropía (textura).** Resultado de una deformación plástica, los granos se alargan en una dirección y se contraen en la otra.

**Arreglo atómico.** Estructura cristalina que forman algunos metales a fin de minimizar la energía requerida para ajustarse entre sí.

**Bcc.** Arreglo atómico básico de algunos metales; conocido como Cúbico centrado en el cuerpo (bcc).

**Bruñido.** Es una operación tecnológica secundaria de acabado, se emplea para el superacabado superficial en superficies cilíndricas, superficies frontales planas, superficies de forma o perfiladas, superficies cónicas, biseles, respaldos, cambios de sección y radios, entre otros, (las piezas a bruñir fueron previamente maquinadas).

**Clivaje.** Es la tendencia de un mineral a romperse a lo largo de una superficie plana.

**Comportamiento elástico lineal.** Una secuencia típica de deformación del espécimen de ensayo a la tensión es cuando se aplica la carga, al principio el espécimen se alarga en proporción con la carga.

**Dislocaciones.** Son defectos del arreglo ordenado de la estructura atómica de un metal.

**Doblado.** Carga aplicada a un espécimen soportando dicha carga en sus extremos ya sea en un punto o dos.

**Ductilidad.** Es la cantidad de deformación plástica que sufre el material antes de ser fracturada.

**Dureza.** Propiedad del material que nos indica la resistencia de este al rayado y al desgaste.

**Durómetro.** Instrumento utilizado para medir la dureza de los materiales.

**Efecto Bauschinger.** Cuando un metal con un cierto esfuerzo de cedencia tensil es sujeto a tensión en el rango plástico; la carga se libera y se aplica a compresión, el esfuerzo de cedencia a compresión es inferior al correspondiente a la tensión.

**Electrodeposición.** Es un proceso químico o eletroquímico, para el tratamiento de superficies, depositando una capa metálica (y en ciertos casos no metálica). Se basa en el paso de la corriente eléctrica entre dos metales diferentes (electrodos) que están inmersos en un líquido conductor (electrolito).

Se utiliza para proteger al material de la corrosión, mejorar las propiedades de la superficie, o con efectos decorativos.

**Enmarañamiento.** Es mover dos arrugas a ángulos diferentes a través de un tapete: donde se cruzan, las dos arrugas interfieren entre sí, y su efecto combinado es dificultar el movimiento del tapete.

**Escleroscopio.** Instrumento en el cual un indentador de punto de diamante encerrado en un tubo de vidrio, dejado caer desde cierta altura sobre el espécimen.

**Fcc.** Arreglo atómico básico de algunos metales; conocido como Cúbico centrado en la cara (fcc).

**Fragilización de las fronteras de grano.** Cuando se pone en contacto atómico íntimo con ciertos metales de bajo punto de fusión, un metal normalmente dúctil y resistente puede agrietarse bajo esfuerzos muy bajos.

**Granallado.** Es una técnica de tratamiento de limpieza superficial por impacto con el cual se puede lograr un excelente grado de limpieza y simultáneamente una correcta terminación superficial.

**Granos.** Consisten en muchos cristales individuales orientados al azar.

**Hcp.** Arreglo atómico básico de algunos metales; conocido como Hexagonal compacto (hcp)

**Maclado.** Es una deformación plástica, caracterizada porque los átomos se desplazan cizallando, de manera que los átomos desplazados son, frente a los fijos, una imagen simétrica.

**Orientación preferida.** También conocida como anisotropía cristalográfica. Cuando un cristal de metal se sujeta a tensión, los bloques en deslizamiento giran hacia la dirección de la fuerza de estirado.

**Torsión.** Deformación cortante a la que están sujetos ciertos materiales de trabajo.

## **CONCLUSIONES.**

Con base en la recopilación de distintos materiales escritos se conocieron diferentes puntos acerca de los materiales utilizados en la manufactura: sus características y propiedades, pero no solo eso si no que también aprendí que para utilizar algún material en cualquier proceso, estos materiales tienen un comportamiento diferente, para saber que material es el más óptimo en el trabajo que se este realizando se deben hacer diferentes pruebas o ensayos, ya que cuando se estén manejando pueden sufrir algún tipo de falla o deformación y con el conocimiento adquirido se pueden evitar estos tipos de fallas.

El obtener estos conocimientos de los materiales nos permite mejorar su manejo así obteniendo los resultados satisfactorios en cualquiera de los procesos en los que sean utilizados.

El presente trabajo me hizo darme cuenta que en la realización de ciertos productos no se puede manejar cualquier tipo de material, se requiere de un conocimiento exacto del material a utilizar para que el producto a realizar sea de la mejor calidad posible.

Por otra parte al comprender la estructura de los materiales y su comportamiento podemos diferenciar cada uno de estos y nos brinda las bases para modificar o adaptar sus características en los diferentes procesos de mecanizado.

## BIBLIOGRAFÍA.

- B. H. Amstead, P. Ostwald y M. Begeman. Procesos de Manufactura. Versión S.I. Compañía Editorial Continental.
- Groover, Mikell P. (1996), Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistema. Editorial Prentice Hall, México.
- Jhon E. Nelly, Richard R. Kibbe, (1992), Materiales y procesos de manufactura. Noriega Editores, México.  
Versión Rafael Garcia Díaz, Oswaldo Silva Luna.
- Jim Lesko (2004), Diseño industrial: Guía de materiales y procesos de manufactura. Editorial Limusa Wiley México.
- Kanzas, H. C. Gem E. Backer, Thomas Grosor. Procesos básicos de manufactura. Editorial Mc. Graw Hill.
- Millán Gómez, Simón (2006), *Procedimientos de Mecanizado*, Madrid: Editorial Paraninfo. ISBN 84-9732-428-5.
- Schonberger Richard J. (1996), Manufactura de clase mundial para el próximo siglo. Editorial Prentice Hall, México.
- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid (2002), Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4a Edición. Editorial Pearson Hall.
- Stewart C. Black, Vie Chiles, Principios de Ingeniería de Manufactura. Compañía Editorial Mexicana
- W. G. Moffatt, (1976) Estructura y propiedades de los materiales. Vol 1.

## **CIBERGRAFÍA.**

[http://apuntes.rincondelvago.com/apuntes\\_universidad/ingeniero\\_industrial/fundamentos\\_ciencia\\_materiales/](http://apuntes.rincondelvago.com/apuntes_universidad/ingeniero_industrial/fundamentos_ciencia_materiales/)

<http://www.edukativos.com/apuntes/archives/239>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Ciencia\\_de\\_materiales.](http://es.wikipedia.org/wiki/Ciencia_de_materiales)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza>

<http://www.monografias.com/trabajos16/materiales-plasticos/materiales-plasticos.shtml>

[http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-ionico/estructura-metales.](http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-ionico/estructura-metales)

[http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_02.html](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_02.html)

<http://www2.ing.puc.cl/icmcursos/metalurgia/apuntes/cap2/23/>