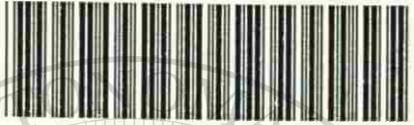


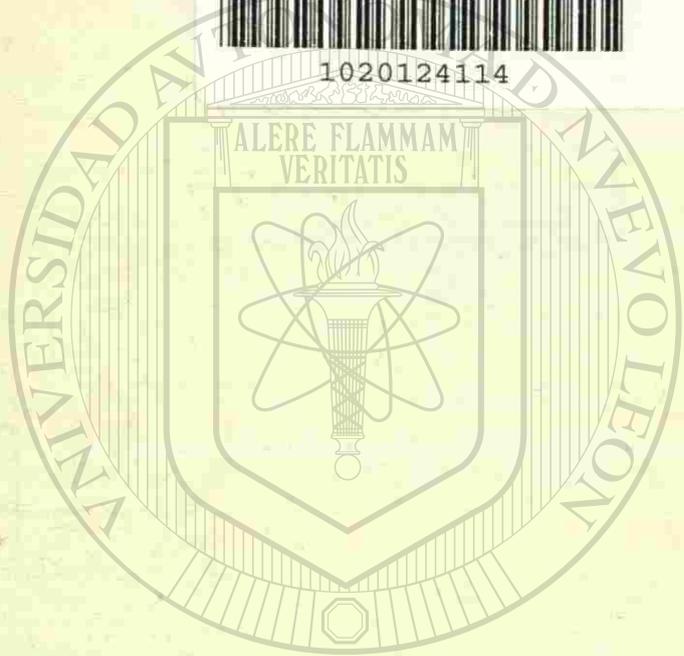
# Tecnología de Materiales

Fac. de Ingeniería Mecánica y Eléctrica UANL.

T.A45  
.T43



1020124114



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



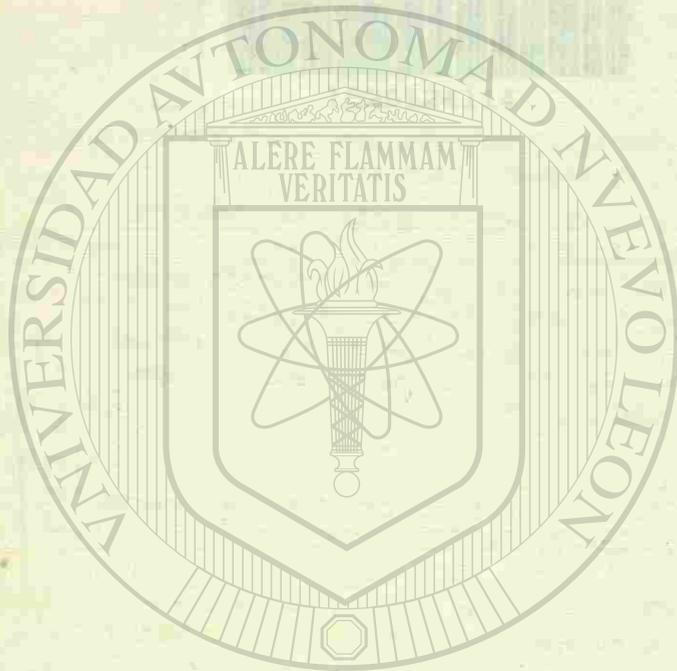
FONDO  
UNIVERSITARIO

*m*

977581

TA 459

. T43



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO UNIVERSITARIO

11-x-04

Mario

C O N T E N I D O

	Pag.
INTRODUCCION .....	1
CAP. 1.- METALURGIA EXTRACTIVA .....	2
Extracción del mineral, trituración primaria, concentración, separación hidromecánica magnética, flotación, extracción del metal, afino, Bessemer, Thomas, B.O.F. Martin Siemens, afino electrotérmico, destilación, fundiciones, obtención del cobre y aluminio.	
CAP. 2.- PROPIEDADES Y ENSAYOS MECANICOS DE LOS MATERIALES METALICOS.....	80
Medición de temperaturas, metalografía dureza, ensayo Rockwell, Vickers, Brinill. Inspeccion radiografica, inspección partículas magnéticas, líquidos penetrantes, inspección ultrasonicas.	
CAP. 3.- ESTRUCTURAS CRISTALINAS .....	116
Sistemas cristalinos, planos atómicos cristalización, imperfecciones cristianas.	
CAP. 4.- ALEACIONES .....	124
Soluciones sólidas por sustitución, intersticial.	
CAP. 5.- DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO .....	129
Tipo I, Tipo II, Tipo III, variación del Tipo I, envejecimiento, Tipo IV, reacción monotéctica, otros tipos de diagramas, reacción peritectoide.	
CAP. 6.- DIAGRAMA HIERRO - CARBURO DE HIERRO.....	151
Estructura del diagrama, clasificación de los aceros.	
CAP. 7.- TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO.....	158
Templado, revenido, recosido, Austempering - Martempering, endurecimiento superficial del acero, cianurado, nitruración, endurecimiento superficial por llama, por corrientes de inducción.	

## INTRODUCCION

En general recibe el nombre de tecnología el conjunto de conocimientos propios de una técnica determinada. En Ingeniería se define la tecnología como el tratamiento de los medios y procedimientos que emplea el hombre para transformar la naturaleza en bienes satisfactorios de necesidades. De acuerdo con esto la Tecnología de Materiales estudia los distintos materiales de que se puede valer el ser humano para fabricar con ellos los objetos que le son necesarios, así como sus medios de obtención y los procedimientos para darle la forma deseada al material, asegurando al mismo tiempo un máximo de rendimiento y economía.

Todos los cuerpos están sometidos a la acción de diferentes fenómenos físicos en el medio que lo rodea -- estos tienden a modificarlo, y a los cuales se opone en mayor o menor grado. Cada cuerpo tiene una manera característica propia de reaccionar; éstas reacciones o propiedades del cuerpo dependen del material de que está constituido, y por lo tanto de la constitución atómica y de la forma en que los átomos se agrupan en el material.

Para lograr que un producto dé un buen resultado es necesario conocer y analizar las acciones externas a las que se va a encontrar sometido, y en base a ellas se leccionar el material cuyas propiedades nos aseguren la resistencia a estas acciones. Para esto es necesario conocer éstas propiedades desde el punto de vista de su comportamiento en condiciones de utilización y en los procesos de elaboración de las piezas. Durante mucho tiempo estos conocimientos fueron empíricos, pero el avance de la ciencia y la tecnología permite obtener bases para su fundamento a partir de la constitución de la materia.

En este curso estudiaremos los materiales de tipo metálico desde su extracción hasta el afino pues aunque existen desde hace mucho otros productos de uso industrial y en la actualidad se desarrollan grandemente los materiales plásticos, en el campo de la Ingeniería desempeñan un papel importante los metales.

La metalurgia en general trata del estudio de los metales y puede esta ciencia subdividirse en: Metalurgia Extractiva; que trata de los procedimientos de obtención, la Metalurgia Física, que trata del estudio de la naturaleza física o constitución atómica y la Metalurgia mecánica que estudia las propiedades mecánicas y su capacidad de conformación, en este capítulo trataremos de los procedimientos de obtención.

La capa del globo terráqueo que se extiende hasta 16 Km. de profundidad se denomina corteza terrestre y está compuesta principalmente por sílice y alúmina, siendo su composición media la siguiente.

ELEMENTO	% EN PESO	ELEMENTO	% EN PESO
Oxígeno	46.59	Cromo	0.037
Silicio	27.72	Carbono	0.032
Aluminio	8.13	Circonio	0.026
Hierro	5.01	Niquel	0.020
Calcio	3.63	Vanadio	0.017
Sodio	2.85	Cobre	0.010
Potasio	2.60	Uranio	0.008
Magnesio	2.09	Tungsteno	0.005
Titanio	0.63	Cinc	0.004
Fósforo	0.13	Plomo	0.002
Hidrógeno	0.13	Cobalto	0.001
Manganeso	0.10	Berilio	0.001
Azufre	0.052	Molibdeno	0.0006
Bario	0.050	Estaño	0.0005

Es interesante saber que de los elementos indicados en la tabla los primeros 8 representan el 96.5 % del peso de la corteza terrestre y que todos los elementos del grupo solo tres son industrialmente importantes, (aluminio, hierro, magnesio), como muchos de los metales útiles no ferrosos aparecen en porcentajes sumamente pequeños, cabe preguntarse como es posible que sea económicamente rentable la obtención de los metales puros.

En la tabla anterior se indica la composición media de la corteza terrestre, afortunadamente la distribución de los elementos dista mucho de ser uniforme, debido a la acción de diversos fenómenos naturales tales como, precipitación, cristalización, agentes meteorológicos, erosión, sedimentación y consolidación de los depósitos de minerales tienen muy a menudo la concentración suficiente para que la extracción del metal sea económicamente rentable, a estos depósitos se les denomina minas o yacimientos, de ellos se extrae la materia prima llamada mineral.

Los procesos de obtención comprende 2 fases esenciales, extracción del metal a partir del mineral del producto bruto obtenido.

La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza en forma de mineral, (algunos metales como el oro y la plata suelen encontrarse en estado puro) el cual está constituido, de combinaciones químicas frecuentemente complejas (mena) mezclado con rocas estériles (gangas).

Industrialmente se considera mineral a todo compuesto químico o mezcla, formado por la mena y la ganga y económicamente explotable, del cual se obtenga una aleación o un metal comercialmente puro.

#### FACTORES QUE DETERMINAN LAS POSIBILIDADES DE EXPLOTACION DE UN MINERAL

1.- RIQUEZA EN METAL UTIL. - El contenido de los minerales explotables depende esencialmente del valor del metal así un cuarzo aurífero que contiene 20 gramos de oro por tonelada se considera como un mineral rico, mientras que una roca con 30 % de hierro (10,000 veces mayor) generalmente no es explotada.

2.- CONDICIONES DE EXTRACCION. - El mineral se explota a cielo abierto o por medio de galerías excavadas en la falda del monte o lo más frecuente por pozos de mina.

3.- SITUACION GEOGRAFICA DEL YACIMIENTO.- El alejamiento mayor ó menor del lugar de producción a los centros de consumo, ocasiona gastos de transporte que pueden gravar ciertos minerales hasta el punto de hacerlos inexplorables, también es necesario tomar en cuenta la situación de las minas de hulla que proporcionan el carbón necesario para el tratamiento del mineral en general, la industria metalúrgica se instala cerca del yacimiento del mineral.

4.- NATURALEZA DE LA GANGA.- El valor del mineral puede ser modificado por la existencia de ciertos elementos en la ganga, así la presencia de magnesio aumenta el valor de los minerales de hierro -- mientras que la sílice en la bauxita es indeseable.

5.- FACTORES ECONOMICOS Y POLITICOS.- Un mineral puede ser explotado solamente durante un período de cotización elevada: actualmente el alza del precio del oro permite tratar minerales de contenido -- muy bajo.

En tiempos de guerra las fuentes extranjeras de importación pueden estar temporalmente agotadas, entonces la consideración de proceso de costo es secundario y se utilizan minerales pobres que no se explotan en tiempo normal.

Los progresos técnicos de la metalúrgica hace posible la explotación de minerales cada vez más pobres que antes eran desechados.

#### CLASIFICACION DE LOS MINERALES SEGUN SU COMPOSICION QUIMICA

- Los minerales se clasifican en 5 categorías principales:
- |                     |   |
|---------------------|---|
| 1.- Metales Nativos | 4.- Oxidos o carbonatos (estos últimos pueden ser convertibles en óxidos por calcinación) |
| 2.- Sulfuros        | 5.- Cloruros.   |
| 3.- Silicatos       |   |

Entre los metales que se encuentran en forma nativa tenemos oro, cobre, plata, sin embargo estos metales también se obtienen a partir de minerales ó como producto secundario en el tratamiento de algúno otro.

Los siguientes metales se obtienen a partir de sus óxidos hierro, estaño, aluminio, cromo, tungsteno, manganeso, titanio, berilio.

Bajo la forma de sulfuros, tenemos cobre, plomo, cinc, níquel, antimonio, bismuto, cadmio y molibdeno.

Los minerales silicátados son poco conocidos de ellos se obtiene el cinc y el níquel.

De los cloruros se obtiene el magnesio y el calcio.

SECUENCIA DE OPERACIONES DE LA METALURGIA EXTRACTIVA.- Los pasos u operaciones de la metalurgia extractiva podemos considerarlos en la forma siguiente; localización del mineral, extracción del mineral concentración ó separación, extracción del metal, -- afino, aleación ó metal comercialmente puro.

EXTRACCION DEL MINERAL.- Los procedimientos principales de obtención del mineral son dos: extracción a cielo abierto y extracción subterránea en minas, la extracción a cielo abierto se realiza cuando los depósitos se encuentran en la superficie ó próximos a ella. La extracción subterránea es la normal, cuando los depósitos se encuentran formando filones o bolsas enterradas profundamente, en este caso normalmente se excava un pozo vertical próximo al filón del cual parten galerías o túneles horizontales que llegan hasta la veta, los costos de funcionamiento y mantenimiento de montacargas, sistemas de drenaje y ventilación, aumentan con la profundidad de la mina de tal modo que solo en muy contados casos encuentra justificación económica, la explotación de minas a mas de 1.5 Km. de profundidad, la extracción a cie

lo abierto presenta sobre la extracción subterránea las ventajas de un menor costo de explotación, el empleo de equipo mecánico de mayores dimensiones, producciones más grandes, mayor seguridad y mejores condiciones de trabajo.

Entre los inconvenientes de la explotación a cielo abierto, podemos citar, mayor volumen de material para remover rocas y tierra que cubre el mineral, la duración del trabajo dependiente de las condiciones atmosféricas y que la explotación no puede realizarse más allá de una profundidad moderada.

**BENEFICIO DEL MINERAL.** - El beneficio del mineral consiste en una serie de operaciones mecánicas que tienen por objeto llevar el mineral a tamaño óptimo para efectuar en los procedimientos de separación de mena y ganga o concentración.

La concentración (ó beneficio) del mineral podemos dividirla en las siguientes fases.

**TRITURACION PRIMARIA.** - Consiste en reducir el mineral de grandes trozos en un tamaño de 5 a 10 cm. a continuación los productos obtenidos se criban en un tamiz vibrante con objeto de separar aquellas partículas cuyo tamaño sea lo suficientemente fino.

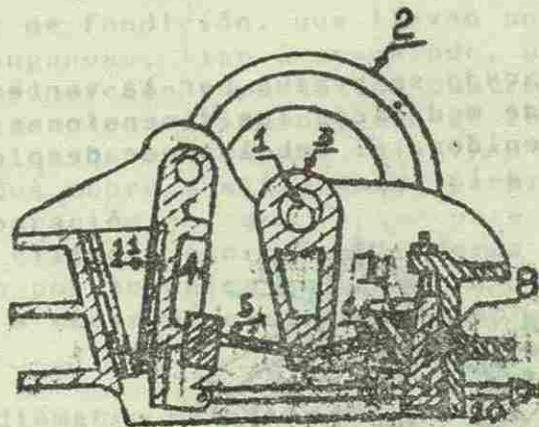
**TRITURACION SECUNDARIA.** - En ésta fase de las partículas se reduce a un valor de 6 a 9 mm.

**MOLIENDA.** - Aquí se reducen las partículas a un valor de un mm. de diámetro.

**CRIBADO.** - Se hace para clasificar las partículas de mineral según su tamaño y separar las que están listas para su separación ó concentración.

#### BENEFICIO DEL MINERAL

Machacadora de mandíbulas (tipo Blake) este aparato realiza la fragmentación del mineral por presión entre una mandíbula fija y una mandíbula móvil animada de un movimiento de vaivén, el árbol excén-

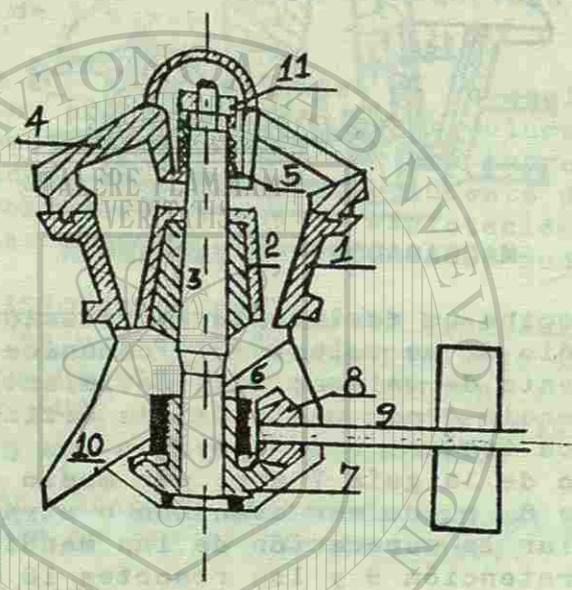


MACHACADORA DE MANDÍBULA

trico 1 recibe un movimiento de rotación regularizado por medio de un volante 2 y comunica a la biela 3 un movimiento de vaivén; este movimiento se transmite al balancin 4 por medio de las articulaciones 5 y 6, la placa trasera 6 se apoya en una garganta de acero duro de la guía 7 que, por medio de una cuña de reglaje 8, puede ser avanzada o atrasada a fin de hacer variar la separación de las mandíbulas. Una varilla de retención 9 y los resortes 10 mantienen todos los órganos en posición, las mandíbulas 11 de acero al manganeso (13% aproximadamente) son intercambiables. La velocidad de rotación es de 200 vueltas por minuto aproximadamente y la producción horaria puede alcanzar 400 ton.

**Machacadora giratoria.** - En la machacadora giratoria el mineral es roto por presión entre una cuba troncocónica fija 1 y un rodillo cónico 2, que se mueve en el interior del espacio limitado por la cuba. El vértice del árbol 3 muy robusto que soporta el cono, está suspendido de un estribo 4 por intermedio de un anillo de acero templado 5 que le permite girar la parte inferior del eje del árbol e introduce libremente en un muñón excéntrico 6 cuyo movimiento de rotación es mandado por los engranajes cónicos 7 y 8 y el árbol 9, por consiguiente, el eje del cono central recibe un movimiento giratorio (aprox. barre una superficie cónica cuyo eje es el de la cuba). el cono rueda apoyado sobre el lecho más ó menos regular formado por el mineral. El pro-

ducto machacado se evacúa por la vertedera inclinada 10. A fin de modificar las dimensiones de los fragmentos obtenidos, el árbol puede desplazarse en altura gracias a la tuerca II.



MACHACADORA GIRATORIA

La velocidad de rotación del árbol es de 200 a 500 vueltas por minuto, y la producción puede pasar a 2000 t/h. La machacadora giratoria está menos extendida que la machacadora de mandíbulas, sin embargo tiene una producción mayor, pero la relación de reducción de las rocas machacadas es mayor y, por otra parte, debido a la presencia del estribo las machacadoras giratorias tienen una abertura más pequeña lo que limita el tamaño de los bloques a tratar.

La machacadora cónica, variante, de la machacadora giratoria la pieza móvil 2 es un cono muy ensanchado, mientras que la pieza fija 1 tiene parcialmente la forma de una campana complementaria preponderan los efectos del choque y la relación de reducción muy elevada.

MOLINO DE CILINDROS.- Este aparato está formado esencialmente por dos cilindros del mismo diámetro que giran en sentido contrario y constituidos --

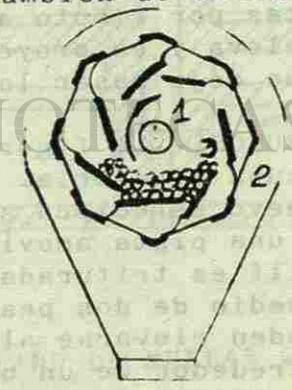
por núcleos de fundición, que llevan una banda de acero al manganeso, liso ó acanalado, una robusta bancada de fundición soporta los cuatro cojinetes de los árboles de los cilindros, dos de los cojinetes son solidarios de la bancada, mientras que los otros dos, montados sobre deslizaderas, permiten el ajuste y la separación en caso de que pase un cuerpo metálico. El cilindro sobre deslizaderas es mantenido en posición por potentes resortes fijos a la bancada destinados a ceder en caso de una sobrecarga accidental.

El diámetro exterior de los cilindros varía de 15 a 150 cm.; de anchura de 30 a 60 cm. y el espesor de la banda es del orden de 10 cm., los cilindros giran a razón de 100 vueltas por minuto aproximadamente.

OTROS TIPOS DE MOLINOS.- Los modelos de molinos son muy numerosos, describiremos un aparato de cada uno de los tipos más utilizados, insistiendo sobre el modo de acción que provoca la división de la materia.

MOLINOS DE BOLAS.- Los molinos de bolas pulverizan los materiales previamente machacados, por aplastamiento mediante una carga de bolas de acero ó de sílex en movimiento en el interior de un tambor giratorio.

El aparato tipo está constituido por un tambor cilíndrico de acero 2 que comprende fuertes chapas de choque 3 también de acero.



MOLINO DE BOLAS.

El tambor lleva en el periferia un tamiz que no deja de pasar más que los granos del grosor deseado, las chapas de choque no forman una superficie continua; permiten al mineral molido pasar sobre el tamiz, y al rechazo de éste tamiz volver a venir en contacto con las bolas trituradoras. el mineral se introduce por 1 sobre el eje de rotación.

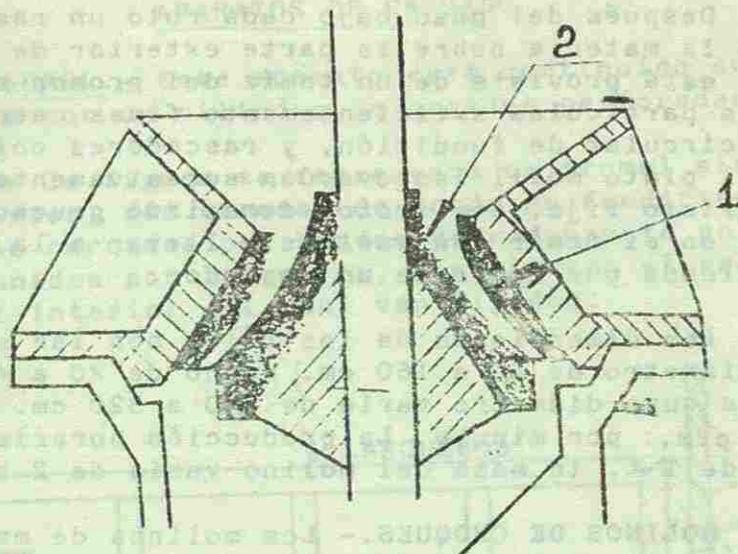
El diámetro del tambor varía de 0.6a 3 m; la anchura es aproximadamente los  $\frac{3}{4}$  del diámetro. La velocidad de rotación es aproximadamente de 50 a 100 vueltas por minuto. La masa de las bolas varía de 100 a 1000 kg. y cada bola pesa aproximadamente 1 kg la producción horaria es muy variable, según el diámetro del tambor, el mineral y el grosor del tamiz: Es del orden de 1 t/h. La molienda se hace en seco ó en presencia de agua.

El molino de barras puede ser considerado como una variante en la que las bolas son reemplazadas por barras cilíndricas cuya longitud es sensiblemente igual a la del espacio libre.

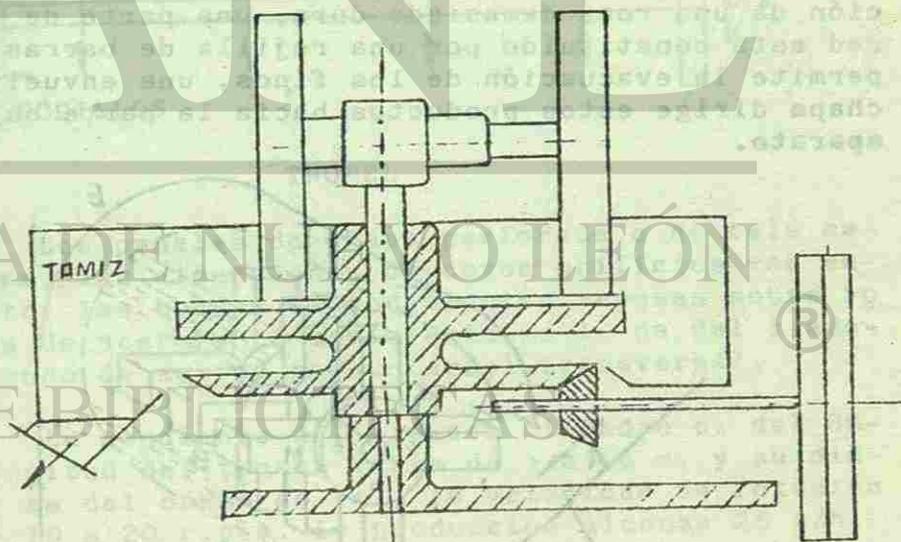
**MOLINOS CENTRIFUGOS.** - En los molinos centrifugos el mineral es proyectado por centrifugación en la garganta de una pista de molienda donde las piezas frotantes son igualmente aplicadas por centrifugación.

El molino Morel comprende esencialmente cuatro bolas gruesas B arrastradas por los cuatro brazos de una cruz perpendicular al eje de rotación y girando a 200 vueltas por minuto aproximadamente. La materia molido se eleva y es proyectada contra el tamiz circular T que deja pasar las partes finas.

**MOLINOS DE RULOS.** - La figura representa un molino de muelas de cuba giratoria. la materia a moler del tamaño de un huevo se coloca sobre un plato giratorio revestido de una pista amovible de fundición dura ó de acero; allí es triturada por aplastamiento y frotamiento por medio de dos pesados rulos fijos, pero cuyos ejes pueden elevarse al paso de cuerpos duros basculando alrededor de un brazo de manivela, los rulos están revestidos de bandas de acero al manganeso.



QUEBRANTADOR CONICO SYMONS

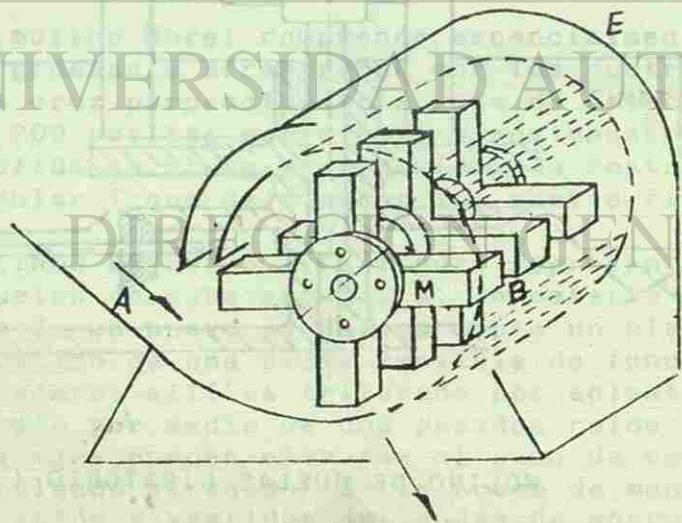


MOLINO DE MUELAS GIRATORIO ( RULOS )

Después del paso bajo cada rulo un rascador - empuja la materia sobre la parte exterior de la pista que está provista de un tamiz del grosor apropiado, las partículas suficientemente finas caen en un canal circular de fundición, y rascadores colocados bajo el plato móvil las evacúan sucesivamente hacia un orificio fijo. Los trozos demasiado gruesos que quedan en el tamiz son vueltos a llevar a la pista de molienda por medio de un rascador.

Las dimensiones de los rulos son las siguientes: diámetro de 50 a 160 cm., ancho de 20 a 45 cm. - la cuba cuyo diámetro varía de 140 a 320 cm. gira a 100 r.p.m. por minuto. La producción horaria es del orden de 1 t., la masa del molino varía de 2 a 30 t.

**MOLINOS DE CHOQUES.** - Los molinos de martillos son muy empleados para la molienda de combustibles, - están constituidos por un rotor que gira a una velocidad del orden de 1000 r.p.m. y que lleva martillos N que pulverizan el mineral introducido por A; estos martillos son móviles alrededor de su eje de fijación lo que evita su rotura en el caso de introducción de una roca demasiado dura, una parte de la pared está constituido por una rejilla de barras B que permite la evacuación de los finos, una envuelta de chapa dirige estos productos hacia la parte baja del aparato.

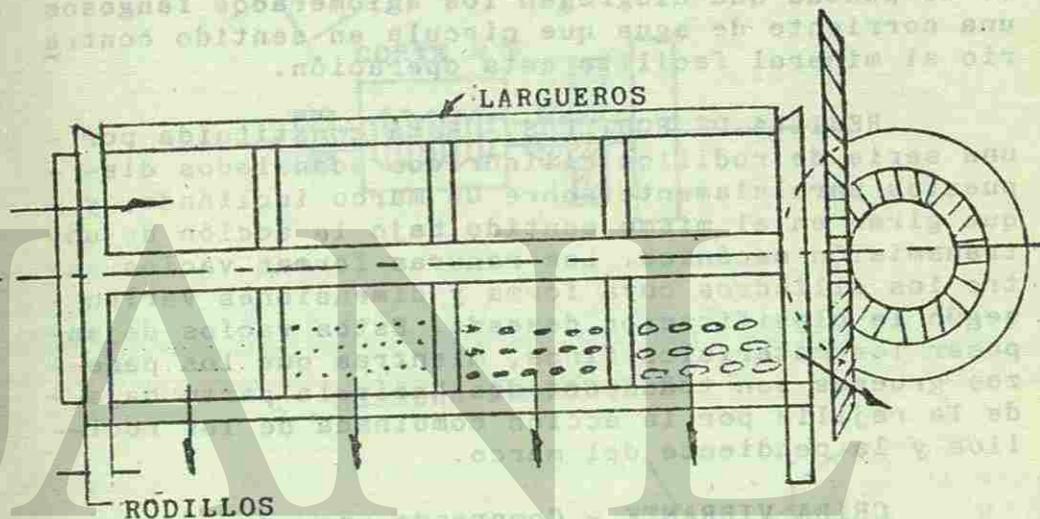


MOLINO DE MARTILLOS

## APARATOS DE CRIBADO

**TROMEL.** - Este aparato está continuado esencialmente por un cilindro de paredes perforadas.

En la figura se representa un tromel sin árbol interior, dos coronas de fondo en fundición encubiertas cercadas por bandas de rodamiento en acero y reunidas por largueros, constituyen el esqueleto es el interior del cual van fijados.



TROMEL

Los paneles de chapa perforada o de tela metálica, las dimensiones de cuyos orificios van en aumento, las bandas de rodamientos reposan sobre rodillos de acero y el movimiento se le da del lado del fondo de salida por un árbol transversal.

La pendiente del eje del cilindro es del 8% - la longitud del tromel varía de 3 a 16 m. y su diámetro es del orden de 1m., la velocidad de rotación es de 10 a 20 r.p.m. La producción alcanza 25 t/h.

El tromel cilíndrico es conveniente para la clasificación de materias comprendidas entre 8 y 10 mm. para materias más finas (1 a 15 mm), se emplean

con preferencia tromeles hexagonales que dan un mejor efecto de tamizado debido a que la materia se remueve por las caídas sucesivas desde un panel sobre el otro.

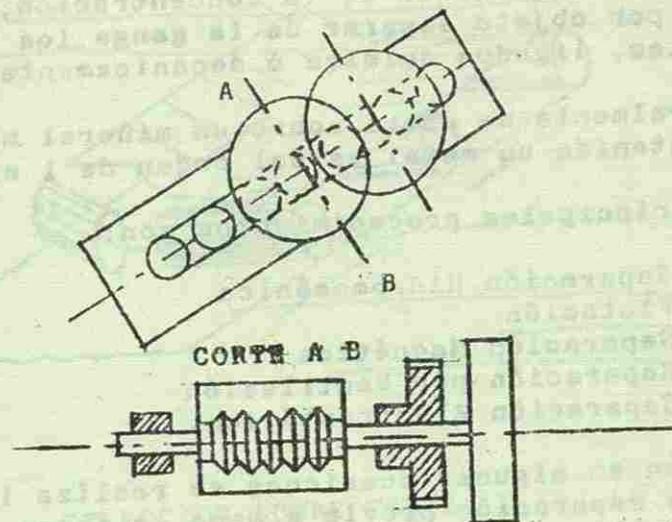
A veces, para facilitar la molienda, se riega el mineral y el producto es fangoso y más difícil de escoger, entonces se utiliza un tromel desenfangador, el primer tercio del tromel está guarnecido de puntas que disgregan los aglomerados fangosos una corriente de agua que circula en sentido contrario al mineral facilita esta operación.

**REJILLA DE RODILLOS.** - Está constituida por una serie de rodillos cilíndricos acanalados dispuestos paralelamente sobre un marco inclinado, y que giran en el mismo sentido bajo la acción de una transmisión mecánica. Las ranuras forman vacíos entre los cilindros cuya forma y dimensiones varían según la clasificación deseada. Estos vacíos dejan pasar los materiales finos, mientras que los pedazos gruesos son transportados hacia la parte baja de la rejilla por la acción combinada de los rodillos y la pendiente del marco.

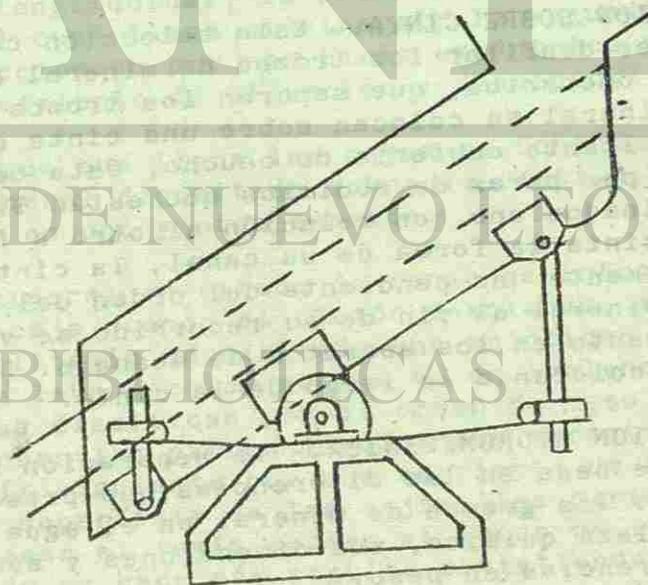
**CRIBA VIBRANTE.** - Comprende una, dos ó tres superficies tamizantes superpuestas constituidas por paneles de la tela metálica y soportadas por una armazón, ésta armazón descansa en cuatro puntos por medio de bielas unidas a los extremos de cuatro resortes de ballesta. La criba está animada de un movimiento oscilante de pequeña amplitud, pero muy rápido por medio de un árbol que comprende dos soportes excéntricos provistos de rodamientos de rodillos solidarios a la armazón.

Las dimensiones de los paneles cribantes van de 0.9 x 1.8 a 1.5 x 3 mts.

Las cribas vibrantes son menos voluminosos que los tromeles y tienen una eficacia mayor para los productos finos, pero su producción es más limitada, están suplantando progresivamente a los otros aparatos.



REJILLA DE RODILLOS



CRIBA VIBRANTE

**SEPARACION ó CONCENTRACION.**.- La fase final del beneficio del mineral es la concentración, la cual tiene por objeto separar de la ganga los elementos útiles, ligados química ó mecánicamente.

Generalmente se opera sobre un mineral molido cuyo contenido en metal es del orden de 1 al 5%

Los principales procedimientos son:

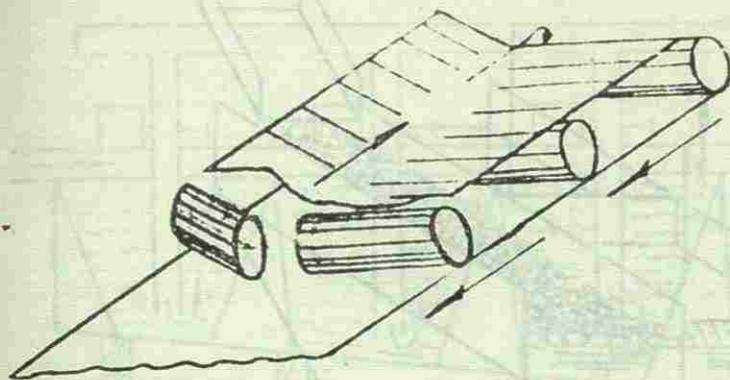
- A).- Separación Hidromecánica
- B).- Flotación
- C).- Separación Magnética
- D).- Separación por Ventilación
- E).- Separación Electroestática.

Si bien en algunas ocasiones se realiza lo que llamamos separación previa a mano en forma de:

**SCHEIDAJE.**.- Esta operación consiste en una selección manual del mineral en su subida de la mina, se separan los bloques estériles después de haberlos roto con ayuda de un mazo para asegurarse que no contienen porción útil alguna.

**SELECCION SOBRE CINTA.**.- Esta selección consiste en hacer desfilar los trozos de mineral delante de los operarios, que separan los trozos estériles el mineral se colocan sobre una cinta continua, generalmente cubierta de caucho, ésta cinta es soportada por pares de rodillos que están ligeramente inclinados uno con relación al otro a fin de dar a la cinta la forma de un canal, la cinta tiene generalmente una pendiente del orden del 20% para que el mineral al fin de su recorrido se vierta automáticamente en los aparatos de acabado. Los operarios se colocan a lo largo de la cinta.

**SEPARACION HIDROMECHANICA.**.- La separación hidromecánica se basa en las diferencias que presenta la caída de los granos de mineral en el agua según su naturaleza química, sus dimensiones y sobre todo sus diferencias en peso.



### SELECCION SOBRE CINTA

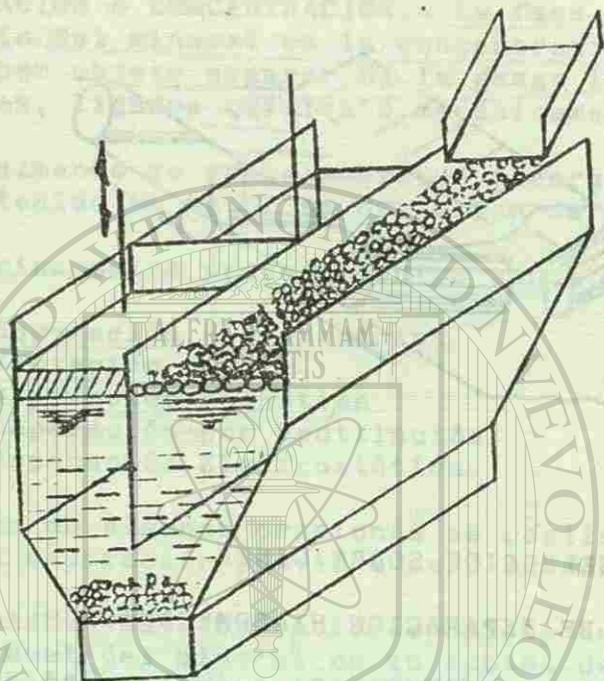
#### APARATOS DE SEPARACION HIDROMECHANICA.

**SEPARADOR DE PISTON.**.- El aparato está formado de varios compartimentos (1 a 5) colocados en serie cada compartimento está dividido en dos partes por un tabique longitudinal; la primera comprende un tamiz sobre el cual llega el mineral; la segunda posee un pistón accionado por una biela excéntrica y animado de un movimiento de elevación y descenso.

El agua que llena las cajas es forzada a atravesar el mineral depositado sobre la rejilla, alternativamente en uno y otro sentido.

El mineral en estado de fango se introduce en la primera caja cuando el pistón desciende, el agua atraviesa el tamiz adquiriendo una velocidad suficiente para levantar los granos de equivalencia pequeña que se clasifican por el orden de masa volumétrica entonces las partes ligadas son arrastradas sobre el tamiz siguiente por una corriente de agua que llega a la superficie de las cajas; las partes pesadas atraviesan el tamiz y caen al fondo de la caja. El resultado se hace más regular revistiendo el tamiz de un lecho de granalla más gruesa que los gra-

nos de mineral y de un espesor aproximado de 5 cm.



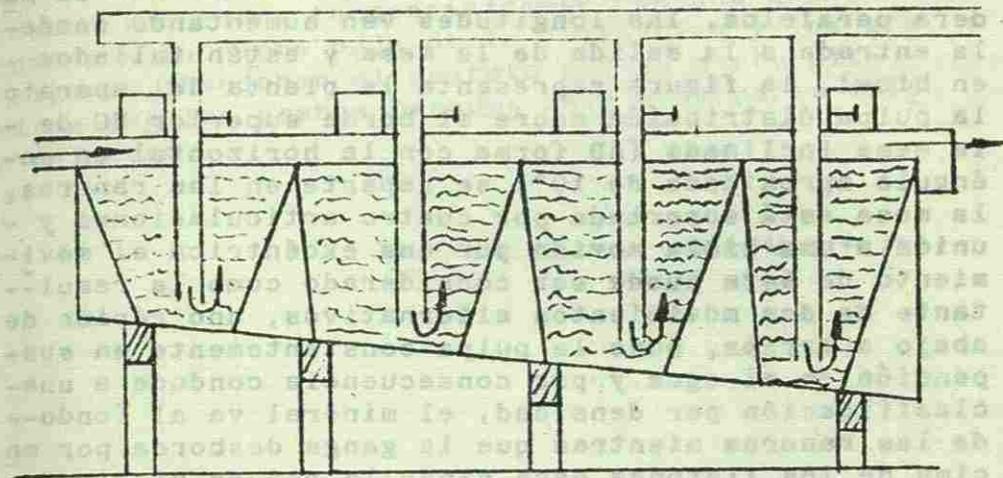
SEPARADOR DE PISTON

El pistón tiene un curso del orden de 1 cm.-- y efectúa 200 vaivenes por minuto. Las dimensiones del tamiz son de 70 x 40 cm. aproximadamente.

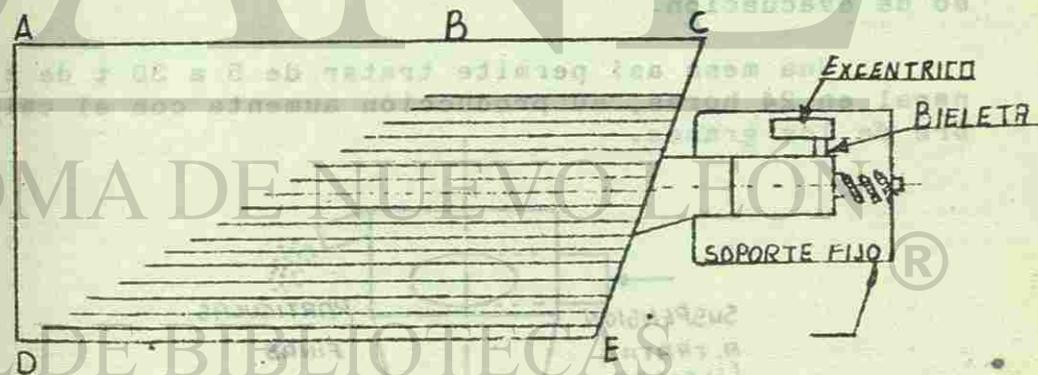
**SEPARADOR DE CAJAS.**— Este aparato está constituido por una serie de cajas en forma de pirámides cuadrangulares invertidas cuyas dimensiones van en aumento, lo que origina una disminución de la velocidad de la corriente de agua horizontal que conduce el mineral.

La clasificación tiende a hacerse por orden de masa volumétrica pero generalmente se inyecta agua de abajo a arriba en el fondo de cada caja, y esta corriente de agua ascendente hace intervenir una clasificación por equivalencia. Se recogen las diversas categorías de mineral en el fondo de las cajas y a la salida del aparato.

**MESA DE SACUDIDAS.**— Este aparato, muy empleado



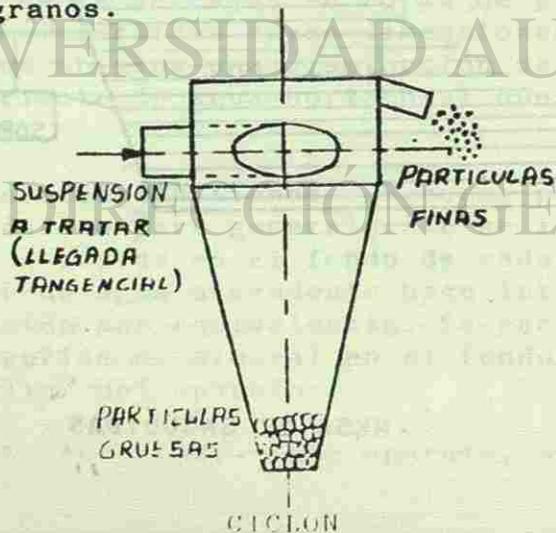
SEPARADOR DE CAJAS



MESA DE SACUDIDAS

do está constituido esencialmente por un revestimiento de linóleo sobre el cual se clavan listones de madera paralelos, las longitudes van aumentando desde la entrada a la salida de la mesa y están tallados en bisel, la figura representa la planta del aparato la pulpa distribuida sobre el borde superior BC de la mesa inclinada (AD forma con la horizontal en un ángulo aproximado de  $10^\circ$ ) se reparte en las ranuras, la mesa está soportada por cuatro articulaciones y unida a una biela movida por una excéntrica el movimiento de ésta puede ser considerado como la resultante de dos movimientos alternativos, uno rápido de abajo a arriba, pone la pulpa constantemente en suspensión en el agua y por consecuencia conduce a una clasificación por densidad, el mineral va al fondo de las ranuras mientras que la ganga desborda por encima de los listones para ganar la ranura siguiente y camina así hacia la parte baja de la mesa. El otro movimiento es un movimiento alternativo en el plano de la mesa, determinante de los choques longitudinales; las partículas de mineral puro ganan, por saltos sucesivos, la extremidad de las ranuras y vienen a establecerse sobre la parte lisa donde son lavadas por una lámina de agua que viene de AB los concentrados ganan el borde de la mesa AD para caer en un paso de evacuación.

Una mesa así permite tratar de 5 a 30 t de mineral en 24 horas, su producción aumenta con el calibre de los granos.



**CICLON.** - El ciclón comprende de una parte cilíndrica y una parte cónica que tienen el mismo eje, la suspensión entra tangencialmente con una gran velocidad por la parte baja de la cilíndrica y los granos ligeros abandonan el aparato por la parte alta mientras que los granos pesados caen a la parte inferior del cono.

## FLOTACION

Principio.- La flotación tiene por objeto separar de la ganga el elemento rico del mineral, reuniéndolo en la superficie del agua en la que se le ha sumergido mientras que la ganga permanece en el fondo en el caso de un mineral complejo, permite hacer flotar, uno del otro, los diversos constituyentes que se trata separar (flotación diferencial).

La flotación consiste en inyectar aire dividido en burbujas muy finas en un fango formado de mineral pulverizado y agua, al que se han incorporado "reactivos convenientes". Las burbujas de aire se fijan sobre ciertos granos (según su naturaleza química) y forman una espuma; se concibe que el empuje del agua pueda vencer el peso de la espuma y haga flotar ésta; mientras que los otros granos permanecen en el fondo.

La flotación no tiene lugar más que para las partículas no mojadas por el agua, condición realizada por la adición de un producto conveniente. En la flotación intervienen múltiples fenómenos; fenómenos electrostáticos y electrolíticos. capilaridad, adsorción, emulsiones y naturaleza de la superficie del grano juegan un papel fundamental.

Este tratamiento da muy buenos resultados, aún para minerales pobres o muy complejos. Por ello, este procedimiento ha tenido un desarrollo considerable. Creado en los Estados Unidos, en 1911, se puede estimar en casi 1000 millones de toneladas la cantidad de mineral tratado anualmente por este procedimiento. No se aplica más que a los minerales no férricos. y, sobre todo, a los sulfuros. Sin la flotación, el plomo, el cinc y el cobre serían mucho más costosos.

El papel que realizan los reactivos en los procesos de flotación son:

1.- Formación de una película sobre el mineral. El reactivo envuelve al mineral con una película muy delgada que aumenta su aptitud a no dejarse mojar por el agua, y permite la adherencia de las burbujas de aire (papel colector). Para este fin se emplean sobre todo xantatos de potasio.

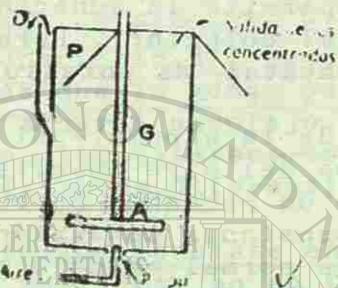
2.- Formación de la espuma.- El reactivo a la división en el agua del aire insuflado o aspirado, en un gran número de pequeñas burbujas que forman una espuma de dimensiones convenientes (la dimensión de una burbuja normal es de 3 mm de diámetro aproximadamente). Además, esta espuma debe ser de una estabilidad suficiente para no romperse antes de su salida del aparato. pero no debe mantenerse demasiado tiempo a fin de desagregarse desde su entrada en los espesadores.

Se utilizan sobre todo para realizar este papel aceites de alquitrán, de madera de pino en particular (papel espumante).

3.- Modificación del medio.- La flotación puede ser impedida por la presencia de sales solubles (ej. sulfatos) o por ciertas modificaciones químicas superficiales del mineral. A veces la ganga puede flotar, como consecuencia de su finura o de su naturaleza química.

Los principales agentes modificantes son: el ácido sulfúrico; el sulfuro de sodio, utilizado para precipitar las sales solubles que se encuentran en la pulpa, y también para facilitar la flotación de los minerales oxidados recubriendo su superficie de una capa de sulfuro.

La cantidad de reactivo es relativamente pequeña: para 1 t de mineral tratado, es del orden de 60 g de aceite, 50 g de xantato de potasio y 2 kg. de ácido o de producto básico; la riqueza del mineral pasa por ejemplo de 1 a 25% y la tasa de recuperación del metal sobrepasa el 90%.



### SEPARACION MAGNETICA

**Principio.**— La separación magnética es aplicable a elementos paramagnéticos o ferromagnéticos; estando el mineral colocado en un campo magnético, los elementos magnéticos son separados por atracción.

A veces la separación magnética es precedida de un tratamiento térmico conveniente cuyo objeto es acentuar las propiedades magnéticas de un elemento del mineral a fin de hacer más fácil la separación.

El paramagnetismo debido al hierro se atenúa con la complejidad química de las combinaciones. Una simple calcinación puede destruir ciertas sales complejas y formar combinaciones más simples muy paramagnéticas.

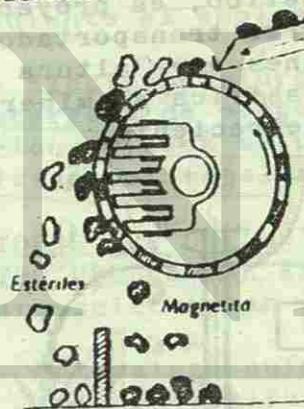
**APARATOS DE SEPARACION MAGNETICA.**— Se les clasifica en dos categorías bien distintas según que el mineral sea ferromagnético o paramagnético.

**A).**— **SEPARACION DE MINERALES FERROMAGNETICOS.**— Siendo la fuerza de atracción relativamente grande, los aparatos utilizados son muy simples. Se puede operar en seco o por vía húmeda. La separación en seco utiliza un aparato de tambor si el mineral está en trozos comprendidos entre 5 y 40 mm, y un aparato de correa si se opera sobre granos muy finos, que

tiene la ventaja de suprimir los polvos.

**1.**— **APARATO DE TAMBOR.**— Este aparato está formado por un tambor cilíndrico que gira alrededor de un eje horizontal; la superficie de este tambor está formada de barras de hierro y de cobre (o de acero austenítico amagnético) alternadas. Un electroimán imanta las barras de hierro y les permite retener momentáneamente los bloques de magnetita, mientras que los estériles continúan su caída. Los bloques de magnetita caen cuando la rotación del tambor los lleva a una zona de pequeña intensidad del campo magnético.

Un aparato cuyo cilindro tiene 75 cm de diámetro, 60 cm de longitud y gira a razón de 30 r.p.m., trata aproximadamente 5 t/h de mineral.



**2.**— **LOS SEPARADORES HIDROMAGNETICOS,** se fundan en principios análogos. Estos aparatos Gröndal están constituidos por un casquete esférico de eje de rotación vertical; este casquete está formado por sectores alternativamente de cobre y de hierro; éstos durante su imantación por un imán, retienen los granos magnéticos del lavado. Un conducto circular dividido se encuentra debajo del casquete; las partes estériles caen en un compartimiento mientras que las partes magnéticas son arrastradas al compartimiento colocado a una altura inferior de la anterior.

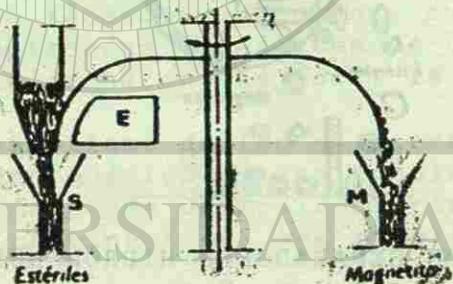
Esta separación se llama de baja intensidad.

porque los campos magnéticos no sobrepasan de 0.3 - telsa. Se practica en las minas para obtener concentrados (52 a 68% de hierro) a partir de todo-uno de magnetita de 45% de hierro aproximadamente.

#### B.- SEPARACION DE MINERALES PARAMAGNETICOS.

La separación es mucho más difícil que en el caso precedente. La fórmula que da la fuerza de atracción - muestra que es preciso utilizar campos magnéticos intensos y que presenten una gran variación lineal.

Los aparatos del tipo "Rapid" son los más extendidos. El mineral, molido bastante groseramente, llega a la superficie de una correa sin fin; es atraído por la acción de los imanes que giran rápidamente alrededor de un eje vertical; cuando el mineral está fuera del campo magnético, es proyectado por inercia al costado de la correa transportadora. Generalmente se utilizan tres imanes cuya altura está regulada de tal manera que se clasifica el mineral en seis categorías de magnetismo decreciente.



### DIRECCIÓN GENERAL

Esta separación se llama separación magnética de alta intensidad, porque los campos utilizados alcanzan 2 telsas. Este procedimiento permite obtener concentrados de 10% de hierro a partir de todo-uno de 25% de hierro aproximadamente (limonita oolítica de ganga calcárea).

## EXTRACCION DEL METAL

EXTRACCION DEL METAL.- El concentrado, obtenido por los procesos anteriores, deberá ser tratado con el fin de eliminar el resto de la ganga y descomponer el mineral de modo que pueda extraerse el metal.

CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE EXTRACCION Y AFINO DEL METAL.- Los procesos de extracción y afino del metal se clasifican de la siguiente forma:

A).- Pirometalúrgico:- El calor necesario para la reacción se obtiene de la combustión de combustibles.

B).- Hidrometalúrgicos:- El metal se extrae del mineral mediante el empleo de alguna disolución líquida.

C).- Electrometalúrgicos:- La energía eléctrica es la encargada de proporcionar el calor para la descomposición, o bien se utiliza para la deposición electrolítica del metal a partir de una solución.

FACTORES QUE DETERMINAN LA SELECCION DE UN U OTRO PROCESO DE EXTRACCION.- Los factores principales para seleccionar los procesos de extracción son:

- Naturaleza química del concentrado - (óxidos, sulfuros)
- Riqueza en metal útil
- Pureza que se pide al producto final
- Cantidad que debe tratarse de concentrado

PROCESOS PIROMETALURGICOS.- Los procesos que integran este grupo son: SINTERIZACION, CALCINACION, TOSTACION, FUSION, DESTILACION, AFINO A FUEGO.

Los tres primeros métodos son procesos térmicos preliminares a la fusión.

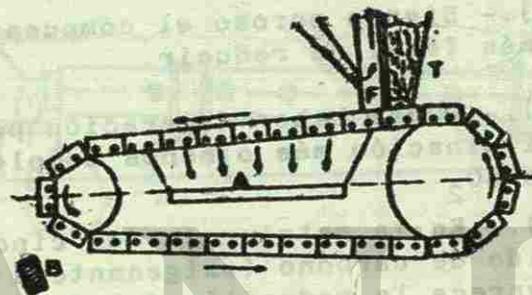
SINTERIZACION.- Consiste en calentar las partículas a una temperatura próxima a la de fusión, aproximadamente 1000°C, para que tomen un estado poroso y se adhieran unas con otras.

Las partículas a sinterizar son previamente mezclados con un poco de carbón (del orden del 10%) a fin de obtener la temperatura suficiente; a veces se añade un fundente (sílice, cal) que sirve de ligante así se obtienen productos a la vez muy porosos (para favorecer la reducción posterior) y muy resistentes.

Se utilizan diferentes aparatos: horno rotativo, convertidores Dwight Lloyd y Huntington-Heberlein aparato Greenwalt, etc.

Una de las máquinas más utilizadas en la sinterización y la más difundida es la de Dwight-Lloyd, en la cual, la carga cae automáticamente mediante una tolva de alimentación sobre una parrilla móvil sin fin. La carga pasa a continuación por debajo de un encendedor, el cual prende la superficie de la carga al penetrar ésta en la zona de aspiración. El dispositivo de encendido está formado en esencia por un quemador de forma especial que dirige los productos calientes de la combustión directamente a través de la superficie de la carga. Por debajo del emparrillado móvil que transporta la carga existe en la zona de aspiración una caja de viento o de aspiración. La caja de viento está conectada a un ventilador centrífugo de fuerte depresión, el cual aspira al aire a través de la carga a su paso por encima de la caja. Esto hace que el calor penetre a través del lecho que forma la carga que se quiere sinterizar. La profundidad del lecho suele variar la inmensa mayoría de las veces de 10 a 12.5 cm. con minerales de cobre y de 20 a 25 cm con minerales de hierro. La velocidad a que se mueve la cinta es tal que la sinterización se completa al llegar el material al extremo de la caja de vientos. El material sinterizado al alcanzar el otro extremo del emparrillado cae a una vagoneta dispuesta para recibirlo. La ventaja de esta máquina es que cada fase del proceso se realiza mecánicamente y automáticamente.

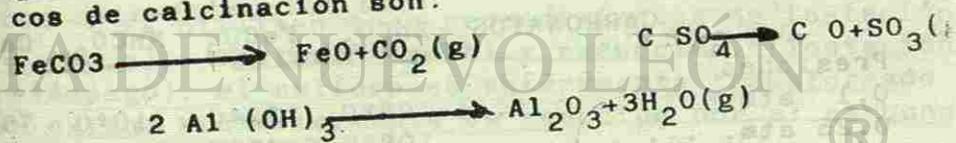
Un aparato con 13 metros de longitud y 1 metro de ancho tuesta aproximadamente 200 toneladas en 24 horas a una velocidad de 50cm/min.



proceso  
exotérmico

MAQUINA DWIGHT-LLOYD

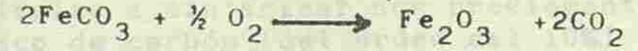
**CALCINACION.** - Se define con el nombre de calcinación, la descomposición de un compuesto químico con producción de un sólido y un gas. El sólido que se obtiene normalmente es un óxido <sup>metálico</sup>. Ejem. típicos de calcinación son:



También se puede definir como la disociación térmica de los carbonatos bajo el efecto de una elevación de temperatura, ejem. descomposición de carbonato de hierro:  $\text{FeCO}_3 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{FeO}$

Sería ventajoso, desde el punto de vista de consumo posterior de carbono, detenerse en el óxido ferroso, pero no se puede impedir su oxidación inmediata, en óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). ó en óxido magnético ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) por el exceso de aire en el ho-

Por lo tanto la ecuación global de calcinación es.



VENTAJAS DE LA CALCINACION.- A).- Hay un quecimiento del mineral cuyo título en elemento útil es evidentemente aumentado por la separación del óxido de carbono y el agua; de ellos resulta, eventualmente, una disminución de los gastos de transporte y un aumento de rendimiento del aparato metalúrgico.

B).- Siendo poroso el compuesto obtenido en general más fácil de reducir.

C).- Puede haber depuración parcial del mineral por eliminación más o menos completa de azufre en estado de SO<sub>2</sub>

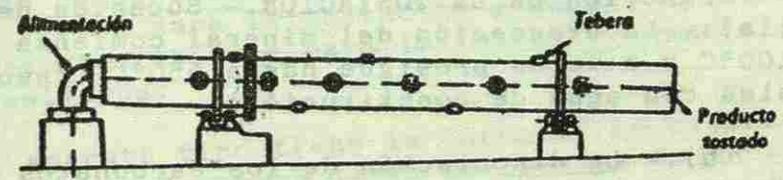
D).- En la metalurgia del cinc. La separación del óxido de carbono (oxigenante a temperatura elevada) favorece la reducción del óxido ZnO que en otra forma no sería posible más que a costa de un aumento del consumo del coque.

E).- Se advierte que bajo presiones iguales las temperaturas teóricas de comienzo de disociación térmica de los diferentes carbonatos se reparten en un vasto intervalo, ha aquí los números relativos de los cuatro carbonatos utilizados en metalurgia.

	CARBONATOS	ZnCO <sub>3</sub>	FeCO <sub>3</sub>	MnCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
Presiones					
0,1 atm.	95°C	132°C	310°C	750°C	
0,25 atm.	108°C	149°C	333°C	798°C	

En el proceso de calcinación se utiliza un horno rotativo, son largos cilindros hasta de 60 m que giran a 5 r.p.m., ligeramente inclinados sobre la horizontal (6 grados), y cuyo diámetro es generalmente 1/10 de su longitud. Llevan en la periferia tuberías de admisión de aire regulables que penetran en el eje del cilindro, la pared interior de ladrillo refractario presenta una estructura especial con anillos de retención a fin de hacer más lento el movimiento del mineral.

Su flexibilidad de marcha es muy grande, la temperatura del régimen puede variar de 850 a 1100°C según la naturaleza del mineral tratado



Proceso exotérmico HORNO ROTATIVO

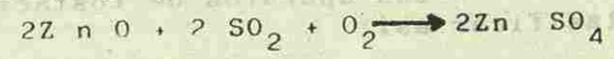
TOSTACION.- Es la transformación de un mineral ó concentrado en un óxido o en un sulfato mediante la aplicación de calor y (la acción de un reactivo de oxidación, como por ejemplo, aire. un agente oxidante)

Se utilizan tres procedimientos de tostación:

a).- Tostación total y reducción. (Tostación-relámpago), el sulfuro es enteramente transformado en óxido, posteriormente es reducido por el carbono.



b).- Tostación total, disolución y electrolisis. El óxido formado se trata con ácido sulfúrico diluido se obtiene una solución de sulfato de la que se extrae el metal por una electrolisis con ánodo insoluble, ejemplo: cinc, cobre.



c).- Tostación parcial y reacción, este procedimiento se utiliza para obtener cobre, pero no se aplica al mineral bruto. Una parte del sulfuro es oxidado, y el óxido cuproso formado reacciona sobre el sulfuro intacto dando el metal:



**PRACTICA DE LA TOSTACION.**- Sucesión de fenómenos: a).- La desecación del mineral comienza antes de 100°C y a veces prosigue hasta 550°C (caso de minerales con agua de constitución).

b).- La disociación de los carbonatos de la ganga se produce eventualmente a partir de 200°C.

c).- La inflamación de los sulfuros se produce a partir de 200°C a temperaturas que varían con la naturaleza del mineral y la finura de los granos. Encima de 650°C se forman sobre todo sulfatos encima de 750°C predomina la formación de óxidos. La composición de la atmósfera del horno ( $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) puede modificar, para una misma temperatura, las proporciones de óxidos y sulfatos.

d).- La descomposición de los sulfatos es prácticamente total encima de 1000°C. El producto tostado está entonces formado de óxidos.

**HORNOS DE TOSTACION.**- Actualmente, un horno de tostación no solamente debe realizar la oxidación del mineral de manera a obtener los productos deseados (óxidos o sulfatos) en las mejores condiciones sino que también debe permitir la recuperación fácil del dióxido de azufre (fabricación del ácido sulfúrico) y la máxima recuperación de las cantidades de calor.

Estas consideraciones han originado la construcción de numerosos aparatos de tostación, que se pueden clasificar así:

- 1.- Hornos de soleras múltiples de tableado mecánico (utilizados sobre todo para los minerales autocombustibles).
- 2.- Hornos de mufla (para minerales no autocombustibles).
- 3.- Convertidores
- 4.- Hornos rotativos
- 5.- Hornos de fluidización.

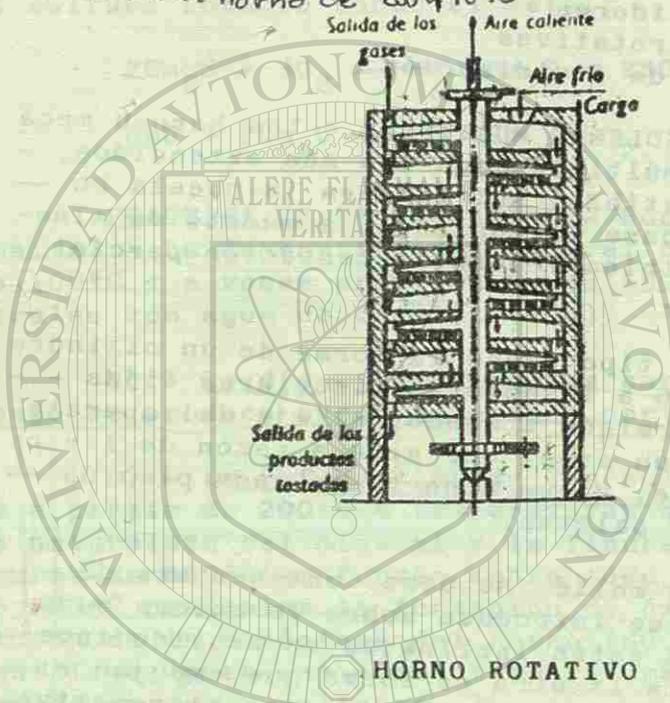
**HORNOS DE SOLERAS MULTIPLES.**- Los hornos mecánicos de soleras múltiples son los más extendidos, no utilizan combustible, salvo; para la puesta en marcha, y sirven para la tostación a muerte de minerales autocombustibles y para la tostación parcial de otros sulfuros.

El aparato tipo tiene la forma de un cilindro que comprende de 6 a 10 soleras circulares fijas, construidas de hormigón armado, el eje del aparato está ocupado por un árbol que gira a razón de 1 r.p.m. aproximadamente, y que soporta en cada piso un brazo provisto de paletas.

El mineral molido no debe contener más de 0.08% de agua, y se introduce sobre la solera superior; las paletas están inclinadas en sentido inverso de una solera a la otra de forma que empujan el mineral hacia la abertura de la solera, alternativamente central y periférica, a fin de hacerlo pasar a la solera inferior. El aire se insufla en la parte inferior del horno; este aire generalmente se recambia previamente por circulación en el árbol ó brazos, a los que enfría y protege así contra el ataque de los gases.

Las dimensiones medias de un aparato tal son las siguientes: Diámetro 6 m, altura 9, la producción diaria del mineral tostado es aproximadamente de 50 t. y el contenido en azufre desciende a 7% aproximadamente.

El horno alto su objetivo es producir el arrabio que es la materia prima en la fabricación de aceros en los hornos de afinado o bien en la fabricación de piezas de fundición en el horno de colado.

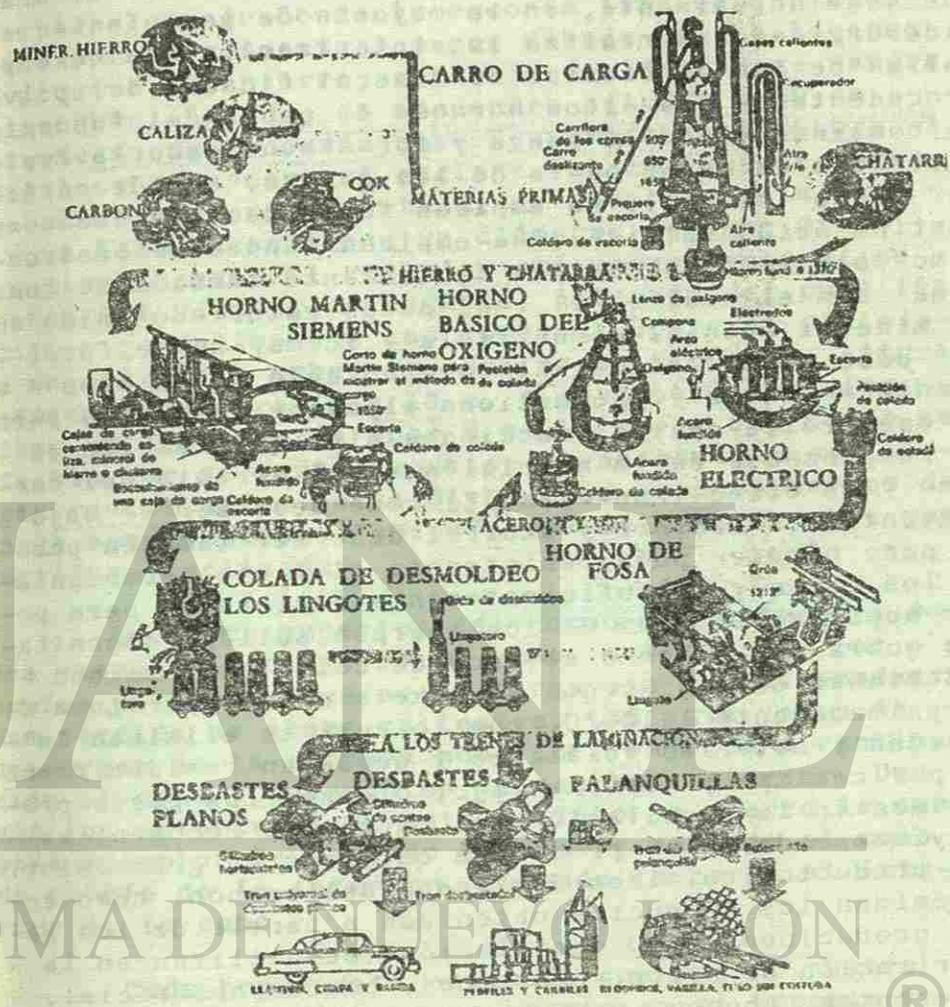


HORNO ROTATIVO

**FUSION.** - Se llama fusión a toda operación realizada a elevada temperatura, en la que se obtiene bien metal fundido (fusión reductora) ó bien una mezcla de sulfuros metálicos en estado líquido (fusión por matas). En esta operación normalmente se adicionan fundentes, los cuales, al combinarse con la ganga, forman una escoria que se elimina periódicamente. Los dos principales tipos de hornos utilizados en la fusión son el horno alto y el horno de reverbero (por matas) (hornos metálicos).

La fusión reductora del mineral de hierro en el horno alto constituye el punto de partida de la fabricación de la fundición y del acero, por lo que trataremos de ella con más detalle.

Las materias primas utilizadas en la carga del horno son mineral de hierro, coque (agente reductor) y castina, la cual es un fundente calizo que (Chatarra, combustible, fundentes, aire)



ESQUEMA DE LA PRODUCCION DEL ACERO

combina con las impurezas y origina su separación física. Los minerales de hierro utilizados son principalmente óxidos; hematitas ( $Fe_2O_3$ ), magnetita ( $Fe_3O_4$ ), limonita ( $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) y siderita ( $FeCO_2$ ), estando formada la ganga en su mayor parte por sílice ( $SiO_2$ ), junto con cantidades menores de manganeso y fósforo. A veces el mineral se somete a alguna operación previa de preparación, tal como calcinación, tostación, o concentración, dependiendo el

El coke debe ser:

si tenga: porosidad, bajo contenido en sust. volátiles  
resistencia al aplastamiento

36

Un buen poder calorífico (7,000 kcal/Kg) el que se le someta a una u otro; del tipo de mineral que sea. Actualmente, en la mayoría de las plantas siderúrgicas, se realiza la sinterización con coke y caliza de las partículas de mineral finas y del polvo procedente de los altos hornos. El papel del fundente es combinarse con la ganga y formar una escoria fusible. Como la mayor parte de las gangas, son de carácter ácido (sílice), se emplean fundentes básicos como castina ácido (sílice), se emplean fundentes básicos como castina o magnesita. El fundente también se combina con el azufre, el cual puede estar contenido en el mineral o en el combustible y formar un sulfuro que pasa a la escoria. El coke no solo actúa como agente reductor y proporciona el calor necesario para el desarrollo de las reacciones sino que también es el responsable de la aparición en el arrabio del carbono y de otras impurezas. El coke debe ser de bajo contenido en fósforo y azufre, debe ser también poroso para ofrecer poca resistencia al flujo ascendente de los gases y lo suficientemente resistente para poder soportar el peso de los cuerpos sólidos depositados sobre él. El coke se produce calentando carbón bituminoso en los hornos de coke a una temperatura de aproximadamente 1,100°C, con lo cual se eliminan la humedad y materias volátiles y queda un residuo formado por cenizas y carbono fijo, o coke. Los gases producidos en la destilación del carbón se recogen, extrayéndose de ellos productos químicos de gran valor. Los productos químicos derivados del carbón, como se denominan los productos obtenidos a partir de los gases producidos en su destilación, se utilizan en la fabricación de nylon, plásticos, caucho artificial, colorantes, abonos, perfumes y diversos productos farmacéuticos, entre ellos la aspirina.

Los hornos altos son grandes hornos de cuba de aproximadamente 30 m de altura, revestidos interiormente con ladrillos refractarios. La parte cilíndrica inferior, denominada crisol, de unos 3 m de altura y unos 8 m de diámetro, contiene las toberas, la piqueta de escoria o bigotera y la piqueta de sangrado del hierro. Las toberas son una serie de orificios abiertos a lo largo de una circunferencia en la parte superior del revestimiento del crisol, a través de los

No debe tener impurezas

Los gases por su baja densidad pesan a la parte superior del horno donde es eliminada la ceniza (se utiliza para piedra caliza)

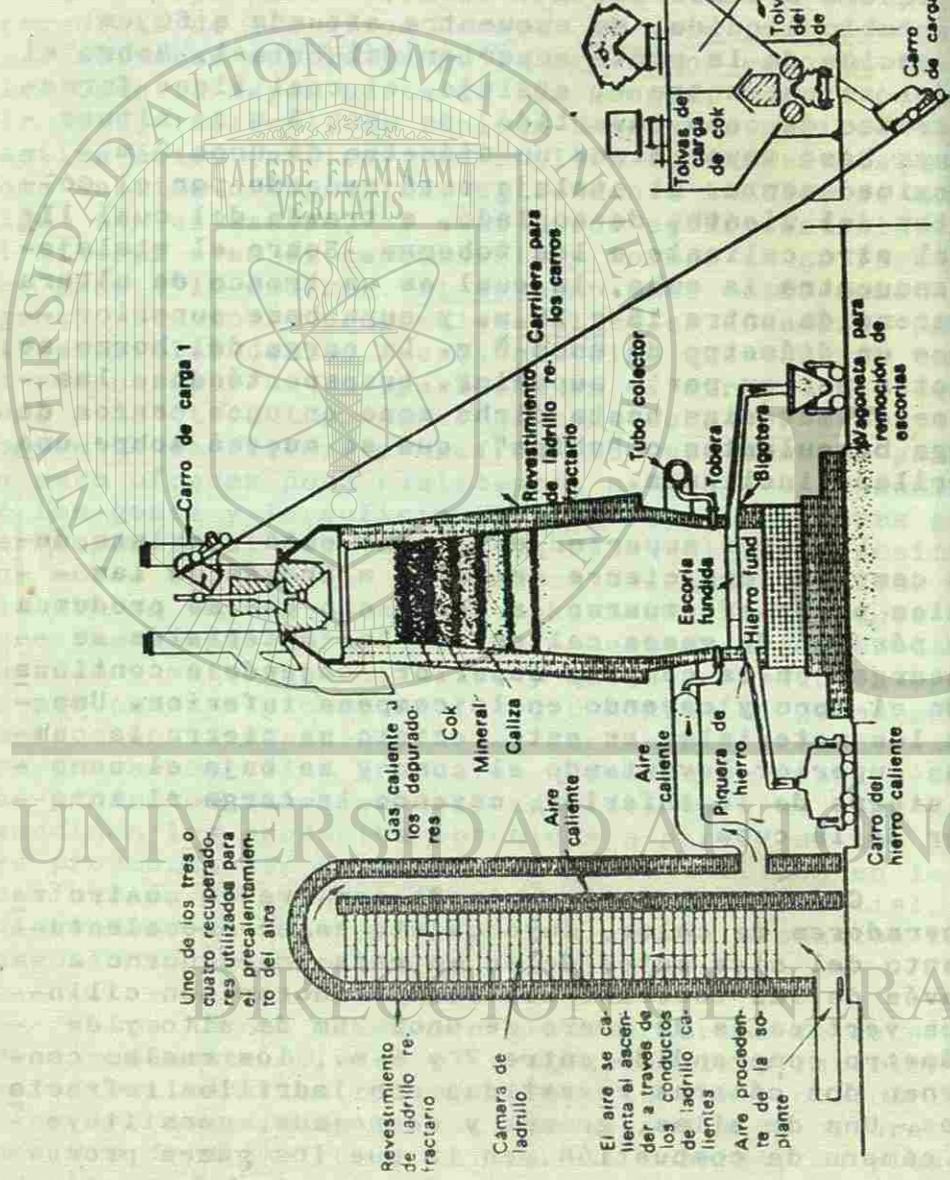
El aire ayuda con la combustión

37

cuales se insufla en el horno aire caliente. La piqueta de escoria o bigotera, a través de la cual se efectúa el sangrado de la escoria líquida, está situada aproximadamente 1 m por debajo de las toberas de la piqueta del hierro, a través de la cual se sangra el arrabio líquido, se encuentra situada a 60 cm. -- por encima de la parte superior del crisol. Sobre el crisol se encuentra el etalaje, el cual tiene forma de tronco de cono invertido, de unos 3 m de altura y cuya base mayor tiene un diámetro de unos 9 m -- aproximadamente. El etalaje está rodeado por el colector del viento, de soplado, a través del cual llega al aire caliente a las toberas. Sobre el etalaje se encuentra la cuba, la cual es un tronco de altura comprendida entre 15 y 18 m, y cuya base superior -- tiene un diámetro de unos 6 m. La carga del horno se efectúa por su parte superior, transportándose las primeras materias hasta dicha zona en unos carros de carga basculantes o "ships", que se mueven sobre una carrielera inclinada.

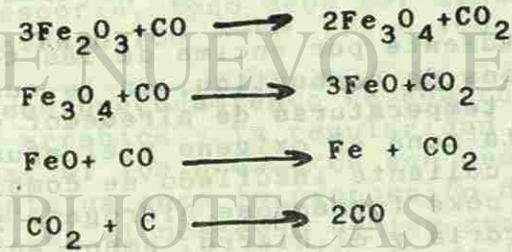
La parte superior del horno está provista de dos campanas con cierre de cono, a través de las cuales puede efectuarse la carga sin que se produzca una pérdida de gases calientes. Los materiales se descargan en la campana superior, bajando a continuación el cono y cayendo en la campana inferior. Una vez los materiales en este recinto se cierra la campana superior levantando el cono y se baja el cono de cierre de la inferior, cayendo la carga al interior de la cuba.

Cada horno está equipado con tres o cuatro recuperadores de calor, cuyo objeto es el precalentamiento del aire antes de su entrada en el horno a través de las toberas. Los recuperadores son cilindros verticales de acero de unos 36m de alto y de diámetro comprendido entre 7 y 9 m., los cuales contienen dos cámaras revestidas con ladrillos refractarios. Una de ellas, grande y despejada, constituye la cámara de combustión, en la que los gases procedentes del horno alto se mezclan con la proporción correspondiente de aire, quemándose. Los gases quemados ascienden a la cúpula del recuperador y de allí



descienden a través de los numerosos conductos de la  
 drillos refractarios que forman la segunda cámara, -  
 cediéndoles gran parte de su calor. Después de estar  
 pasando el gas durante unas tres horas por el mismo-  
 recuperador se cierra el paso y se envía a otro de -  
 los recuperadores, introduciéndose en el primero por  
 su parte inferior aire procedente de las máquinas so-  
 plantes, el cual, durante su recorrido hasta el hor-  
 no, absorbe el calor almacenado en el refractario. -  
 Si el horno cuenta con tres recuperadores, mientras-  
 uno está "en aire" los otros dos están "en gas" por-  
 lo que el tiempo que cada recuperador está en gas es  
 doble del que está en aire.

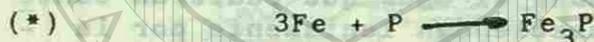
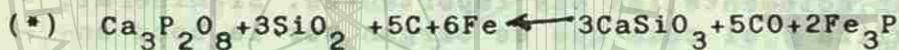
Las reacciones químicas que tienen lugar en-  
 el horno alto son numerosas, y nos limitaremos a --  
 tratar solamente las más importantes. El mineral, -  
 la caliza y el coke que se cargan por la boca en- -  
 tran en contacto con la corriente ascendente de ga-  
 ses calientes, cuya temperatura es de unos 150°C, -  
 secándose y eliminándose el agua que pudieran conte-  
 ner. Los materiales descienden lentamente por la -  
 cuba hasta alcanzar la zona de reducción, en la ---  
 cual las temperaturas varían entre 370 y 870°C. --  
 Aquí se ponen en contacto con el gas reductor, óxi-  
 do de carbono, verificándose las siguientes reaccio-  
 nes que van acompañadas de un aumento de temperatu-  
 ras.



Al continuar descendiendo los materiales lle-  
 gan a la zona de absorción de calor, en la cual las  
 temperaturas varían de 870 a unos 1,315°C, corres-  
 pondiendo éste último valor a la parte superior del  
 etalaje. En esta zona se descomponen el agua y la -  
 caliza, el hierro esponjoso absorbe algo de carbono  
 y parte de óxido de manganeso se reduce, verificán-  
 dose las reacciones siguientes:



En la región del etalaje, conocida como zona de fusión se alcanzan temperaturas de unos 1650°C, teniendo lugar muchas de las reacciones que dan lugar a la formación de la escoria, algunas de las reacciones típicas que se verifican son las siguientes:



Las reacciones (\*) conducen a la formación de fosfuro de hierro, el cual es soluble en el hierro y pasa a formar parte del baño metálico; por consiguiente la única manera de controlar el contenido en fósforo del arrabio es mediante una adecuada selección de los materiales de partida.

Inmediatamente por encima de las toberas se encuentra la zona de combustión, en la cual se llegan a alcanzar temperaturas de alrededor de los 2,000°C. En esta zona el oxígeno y el agua contenidos en el aire caliente insuflado se combinan con el carbono del coque formándose hidrógeno y óxido de carbono, la escoria y el hierro, ambos en estado líquido ahora, se filtran a través de los intersticios del coque, pasando al crisol, donde se separan en dos capas por orden de densidades. La capa inferior, de metal fundido, contiene todas las sustancias reducidas, mientras que la superior, de escoria, está compuesta por todas las sustancias que han quedado sin reducir. Es probable que en la superficie de contacto entre ambas capas haya una pe-

queña reducción de sílice con formación de siliciuro de hierro o silicio de acuerdo con las reacciones siguientes:



lo que explica la presencia en el hierro de pequeñas cantidades de silicio en estado de disolución.

En marcha normal la escoria se sangra cada dos horas aproximadamente, mientras que el sangrado del hierro tiene lugar cuatro ó cinco veces al día. El arrabio se cuela en cucharas, en las cuales se transporta a los hornos de acero, los cuales necesariamente tienen que encontrarse cerca, o bien pueden moldearse en lingote de afino ó galápagos.

Las impurezas que contiene el arrabio varía notablemente según el mineral utilizado, pero normalmente se encuentra dentro de los siguientes intervalos; carbono de 3 a 4.5% silicio, 1 a 4%; azufre, 0.04 a 0.2% fósforo 0.1 a 2%; y manganeso 0.2 a 2.5%

El horno alto debe tener un funcionamiento perfectamente regular; la composición del lecho de fusión, su modo de repartición en la cuba, la cantidad, presión, temperatura y grado de humedad del aire insuflado, la cadencia de las coladas del arrabio y de la escoria, todo debe ser mantenido sensiblemente constante.

El buen funcionamiento se controla por el estudio de los arrabios y la regularidad del descenso de las cargas; si los productos son demasiado calientes, se aumenta un poco la proporción de mineral e inversamente, si el descenso de las cargas es penoso se aumenta la sílice en detrimento de la cal. Otras consideraciones intervienen: exámen de la escoria, composición y temperatura de los gases del tragante, cantidad de polvos, presión del aire, exámen de las toberas.

Cuando se quiere cambiar de marcha, se opera

progresivamente y la operación dura algunos días, se modifica poco a poco el lecho de fusión y el régimen del aire.

Los accidentes de marcha son de dos clases,

A).- El colgado es una parada en el descenso de las cargas que quedan colgadas en las paredes. puede ser debido a una marcha demasiado caliente; la fusión de las materias es prematura, y su dilatación forma una bóveda en la parte superior de los etalajes, la formación de carbono pulverulento a partir de la disociación del óxido de carbono contribuye también al hinchamiento de la carga. Se remedia por la parada momentánea del soplado o disminuyendo la temperatura del aire.

El colgado puede igualmente formarse en marcha fría, si el combustible está en cantidad insuficiente, las materias de la carga no funden más que en parte y descienden mal. Entonces se utilizan las toberas de socorro que están colocadas a un nivel superior a las toberas normales.

B).- Las obstrucciones del crisol provienen de un defecto de combustible o de una carga demasiado calcárea; la escoria se carga de óxido de hierro la desulfuración se hace mal, y las toberas y los agujeros de colada corren el peligro de ser obstruidos debido a la falta de fluidez de la materia. Es preciso remediar inmediatamente este accidente elevando la temperatura del aire.

TEORIA DE LA CARGA.- La carga se hace a una cadencia regular, por capas alternadas de combustible y de la mezcla mineral + fundente. Siendo los ángulos del talud natural del coke y del mineral de aproximadamente  $26^\circ$  y  $35^\circ$  respectivamente se debe proceder por cargas masivas, porque cargas alternadas insuficientes podrían dar lugar al establecimiento de una columna continua de uno de los elementos.

El dispositivo de la carga está dispuesto de tal manera que las materias son introducidas en la periferia; por consiguiente el coke predomina en el centro, pero en el curso del descenso de los minerales (sobre todo los menudos) tienden a aproximarse al eje del aparato, lo que homogeneiza el lecho de fusión. La buena repartición de las materias origina una economía de coke, restringe la producción de polvos y disminuye los riesgos de colgado.

INYECCION DEL VIENTO.- El viento es soplado bajo una sobrepresión de 1 atm aproximadamente por 10 a 20 toberas colocadas regularmente alrededor de la obra. La penetración y el diámetro de las toberas deben permitir la repartición regular del viento en el interior del horno alto; toberas largas o demasiado poco penetrantes proporcionarían una circulación periférica.

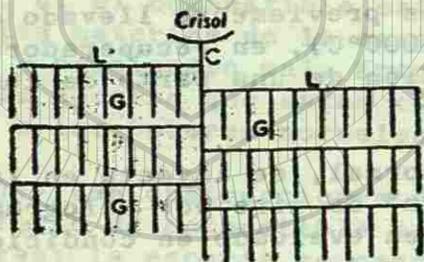
El viento es previamente llevado a alta temperatura, (600 a  $1000^\circ\text{C}$ ), en recuperadores calentados por la combustión de una parte de los gases del tragante.

En marcha normal, se inyecta en las toberas aproximadamente  $3 \text{ m}^3$  de aire por kilogramo de coke introducido, volumen evaluado en condiciones normales de temperatura y de presión.

Generalmente la humedad del viento es mantenida a una tasa determinada.

COLADA DEL ARRABIO.- Según el volumen del crisol y la producción del horno alto, el intervalo regular entre dos coladas sucesivas varía de 4 a 12 h. La temperatura del arrabio a la salida del crisol es de  $1400^\circ\text{C}$  aproximadamente. El arrabio que sale del horno alto se destina a tres empleos, 1.- Se utiliza directamente para el moldeo; este caso es más bien raro. 2.- Se le dirige en estado líquido hacia la acería. El arrabio destinado a ser inmediatamente transformado en acero, es colado en cucharas cuya capacidad aproximada es de 20 t, y después reunido en un mezclador, en espera de ser in-

3.- Se le cuela en lingotes, bloques de arrabio de 15 a 50 kg. destinados a sufrir una segunda fusión. Este arrabio se cuela en arena o en coquilla. En el primer caso, el suelo de la nave de colada situado delante del horno alto está recubierto de una capa de arena seca; se traza en él un canal central que parte del agujero de colada que alimenta sucesivamente los canales laterales éstos están unidos, por medio de canales estrechos que permiten una rotura fácil después de la solidificación, a cavidades dispuestas como las púas de un peine, donde el arrabio solidifica en lingotes.



**COLADA Y UTILIZACION DE LA ESCORIA.**— La escoria se cuela con más frecuencia que el arrabio. Si no se utiliza en el mismo lugar, se transporta al escorial, sea en cuchara donde permanece líquida, sea en vagones basculantes donde solidifica. Pero este procedimiento crea un estorbo considerable en las proximidades del horno alto, y actualmente las escorias son generalmente empleadas para diversos usos de los que el más importante es la fabricación de materiales de construcción.

A veces, se mezcla la escoria con cemento Portland en proporciones variables, o se utiliza en vez de arcilla en la fabricación de este mismo cemento.

**Lana de escorias.**— Esta sustancia, que tiene el aspecto de la lana, se obtiene soplando vapor ó aire comprimido sobre una capa delgada de escoria líquida. Es un excelente aislante térmico y acústico que tiene la ventaja de ser incombustible.

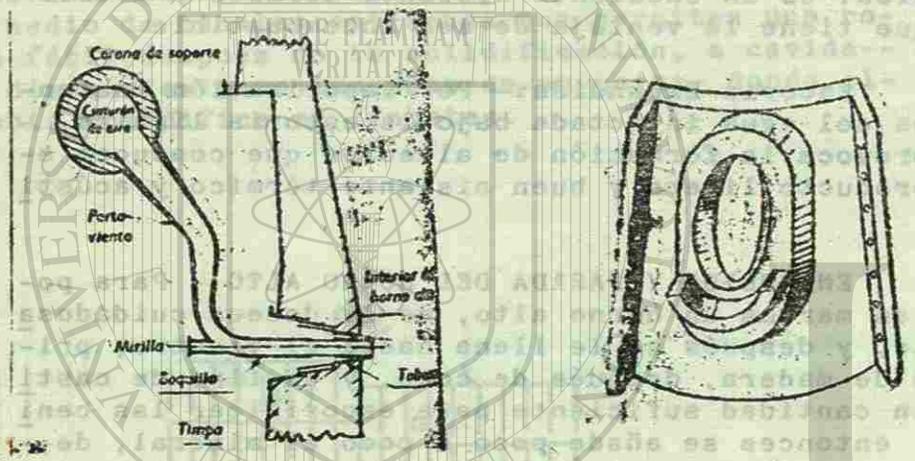
**Escoria Expandida.**— Por vaporización instantánea del agua inyectada bajo la escoria líquida, se provoca la formación de alveolos que conducen a un producto ligero y buen aislante térmico y acústico.

**ENCENDIDO Y PARADA DEL HORNO ALTO.**— Para poner en marcha un horno alto, se le deseca cuidadosamente, y después se le llena hasta el vientre, primero de madera, después de coke, y en fin, de castiñas en cantidad suficiente para escorificar las cenizas, entonces se añade poco a poco el mineral, de forma que la composición de las cargas en el tragan te sea normal. Entonces se enciende por abajo y no se colocan las toberas hasta un día después. Se sopla el aire progresivamente, y el aparato está en marcha.

Se puede parar el horno alto durante varios meses sin tener necesidad de apagarlo. Se prepara la parada suprimiendo el mineral en la carga; después de estas cargas blancas, se vuelven a cargar progresivamente el mineral; cuando las cargas blancas alcanzan las toberas, se cesa de soplar aire, se vacía el crisol, se cierran todas las aberturas del aparato y sobre las cargas superiores, se ponen chapas que se recubren de arcilla húmeda. Para volver al funcionamiento normal, hasta restablecer el tiro.

Para apagar el horno alto, basta no introducir nada después de las cargas blancas.

**CONDUCTOS DE VIENTO.**- El viento es conducido al horno alto por la canalización área revestida interiormente de una capa de ladrillos refractarios de 30 a 45 cm. de espesor el conducto de aire de 50 a 75 cm de diámetro interior termina alrededor del horno alto por el cinturón de viento, canalización en forma de herradura de sección decreciente situada al nivel de la parte superior de los etalajes.



Ramificaciones laterales o portavientos conducen al aire caliente a las toberas cuyo diámetro interior es de 20 cm. aproximadamente. Una mirilla permite seguir la caída de los materiales dentro del horno. Las toberas (generalmente de cobre) son refrigeradas por circulación de agua, que llega a la parte baja por un tubo buzo y sale por arriba. Además de las toberas principales (10 a 20) situadas en la parte alta de la obra, se disponen encima en medio de los etalajes, toberas de socorro, utilizadas en el caso en que el descenso de las cargas se haga mal.

**ORIFICIOS DE COLADA.**- El orificio de colada del arrabio dispuesto al nivel del suelo del crisol se obtura con un tapón de arcilla.

Los orificios de colada de la escoria están situados de 0.50 a 1 m. por debajo de las toberas

de aire; se obturan con un tapón de arcilla y están protegidos por una tobera; generalmente hay dos ó tres siendo una de reserva.

**CAPTACION Y UTILIZACION DE LOS GASES.**- El gas sale por dos aberturas laterales y pasa a dos conductos muy inclinados que se juntan para formar un solo conducto inclinado 45° hacia abajo que conduce el gas a las botellas de polvo. Los conductores de gas, cuyo diámetro exterior es del orden de 1.6m, son de chapa revestida interiormente de ladrillos refractarios. Cerca del horno alto, la pendiente es tan rápida como sea posible para evitar los depósitos de polvo que podrían provocar sobre presiones peligrosas. Por la misma razón, los conductos entre las botellas de polvo y el depurador están en línea quebrada.

El volúmen de gases es del orden de 4000m<sup>3</sup>/t de coke; depurado y seco, este gas tiene un poder calorífico medio de 950Kcal/m<sup>3</sup>.

El horno alto consume aproximadamente el 32% de este gas para sus propios servicios; el 25% sirve para el calentamiento del aire el 7% es transformado, mediante máquinas de vapor o motores de combustión interna, en energía eléctrica que alimenta las máquinas soplantes y los dispositivos de manutención.

El resto del gas es utilizado en la producción de energía eléctrica o en el calentamiento de los hornos (puro o mezclado con gas de los hornos de coke).

**DEPURACION DE LOS GASES.**- Los gases del tragante contienen un promedio de 5% de agua y 15 g (5 a 60) de polvo por métro cúbico. Es necesario secarlos y desempolvarlos antes de utilizarlos. El contenido máximo tolerado para la alimentación de los motores es de 0,02 g/m<sup>3</sup>, se puede consentir un contenido mayor para otros usos, pero no tiene interés, porque la limpieza del gas permite evitar depósitos de polvo en los aparatos de utilización o

en las canalizaciones de transporte.

La depuración se hace en dos tiempos:

1.- depuración primaria.- La bajada de gas que llega del tragante termina en una o dos botellas de polvo; el depósito de los polvos es provocado, por la disminución de velocidad acompañada de un cambio de dirección. El gas atraviesa seguidamente un ciclón.

El contenido en polvo de gas desciende a  $4 \text{ g/m}^3$ .

2.- DEPURACION SECUNDARIA.- Se puede hacer en tres maneras diferentes, una de ellas es la:

Depuración Húmeda, Comprende dos aparatos sucesivos, un aparato de lavado y un desintegrador.

El aparato de lavado es una torre cilíndrica ( $h=20\text{m}$ ,  $d=5$ ), donde el gas es enfriado y lavado por una lluvia de agua. El contenido en polvo desciende  $1 \text{ g/m}^3$ .

En el desintegrador, el agua y el gas son batidos por medio de paletas que giran a gran velocidad, y la separación del polvo se realiza por centrifugación.

El desintegrador Dingler, consiste en una carcasa fija que contiene en cada lado un compartimiento de aspiración y en el centro un compartimiento de impulsión, cada compartimiento de aspiración está dividido en varias células cilíndricas coaxiales, constituidas por chapas finamente perforadas o por tubos de llegada de agua. El rotor gira en esta carcasa; la parte central lleva álabes que sirven para aspirar el gas a través del aparato; las partes laterales están formadas de varias filas de varrotes gracias al efecto de batido producido por la gran velocidad, el agua de lavado introducida bajo presión es pulverizada tan finamente (desintegrada) y mezclada tan íntimamente con el gas que las partículas de polvo son apresadas por el agua y pre-

cipitadas sobre la pared por inercia. El caudal horario es de  $50,000 \text{ m}^3$  aproximadamente.

AFINO A FUEGO.- En este tipo de afino la eliminación de las impurezas se logran mediante una oxidación selectiva. Las impurezas pueden ser eliminadas del metal fundido, bien por la aplicación de aire o por el empleo de agentes oxidantes que posteriormente pasan a formar parte de la escoria. Si el metal es volátil puede recuperarse por destilación.

Volviendo a la fabricación del acero, las impurezas que contiene el arrabio obtenido en el horno alto, son principalmente carbono, manganeso, azufre, silicio y fósforo. Para la eliminación de estas impurezas pueden utilizarse diversos procedimientos; convertidor bessemer, horno básico al oxígeno, horno martin-siemens y horno eléctrico de arco. En cada uno de estos sistemas el horno puede tener un revestimiento ácido (silíceo) ó básico (de magnesia o dolomita).

El convertidor bessemer está constituido por una cuba de acero de forma de pera revestida interiormente con un material refractario. El arrabio líquido procedente del horno alto se carga en el convertidor, al cual previamente se le ha hecho bascular hasta alcanzar la posición horizontal. El aire utilizado para la oxidación a una presión de  $2.1 \text{ Kg/cm}^2$ , se introduce por uno de los muñones huecos de la caja de viento, de donde pasa a través de las toberas a la carga. El oxígeno del aire oxida en primer lugar al hierro, el cual a su vez oxida al silicio y al manganeso, que se combinan entre sí para formar la escoria de acuerdo con las reacciones siguientes:

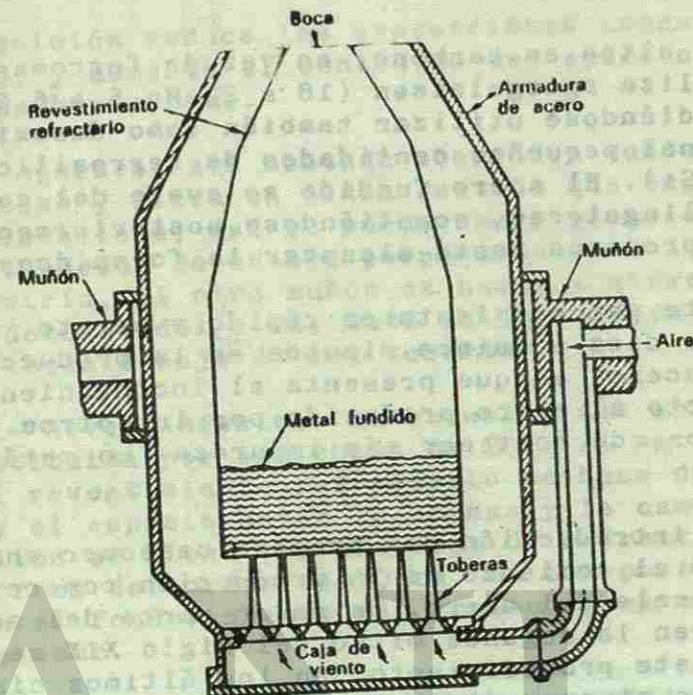


Una vez oxidados el silicio y el manganeso el oxígeno se combina con el carbono, para formar monóxido de carbono, el cual se quema en la boca del convertidor.

El tipo de escoria producida depende del carácter del revestimiento refractario. Así, un revestimiento ácido (silice) no ejerce ninguna acción sobre el fósforo y el azufre, los cuales pueden eliminarse solamente mediante una escoria básica. Por tanto, en el proceso bessemer ácido, el cual se emplea exclusivamente en los Estados Unidos, el arrabio debe de ser bajo en fósforo y en azufre. En los convertidores ácidos el calor que se desprende proviene principalmente de la oxidación del silicio, y el arrabio utilizado debe contener de 1 a 2% de silicio, no solo para que actúe como "combustible" sino para que se forme una escoria adecuada.

El progreso de la oxidación se juzga por el aspecto que tiene la llama que sale por la boca del convertidor. A los pocos minutos de iniciado el soplado se han eliminado el silicio y el manganeso y comienza a oxidarse el carbono, lo que se pone de manifiesto por el color rojo-amarillento de la llama que sale por la boca del convertidor. Esta se transforma rápidamente en una llama blanca de 7.5 m de altura. Al poco rato la llama empieza a acortarse y a ser menos luminosa, lo que es señal de que prácticamente el carbono se ha quemado por completo. En este momento se corta el soplado de aire e inclinando el convertidor se cuela el hierro, afinado en un caldero de colada.

Como todo el carbono que originalmente, contenía el arrabio se ha eliminado, se hacen al caldero las adiciones necesarias para desoxidar y recarburar el hierro afinado de modo que se obtenga un acero determinado. Con este fin se adiciona normalmente ferromanganeso, el cual contiene aproximadamente 80% de manganeso de 5 a 7% de carbono y de 0.5 a 1% de silicio. El manganeso y el silicio constituyen unos buenos desoxidantes y reducen el óxido de hierro que hubiera presente. Para la obtención



CORTE ESQUEMATICO DE UN HORNO BESSEMER



1020124114

HORNO BESSEMER EN OPERACION

de aceros altos en carbono, en vez de ferromanganeso se utiliza spiegeleisen (18 a 22 Mn 5 a 6 C, -- 1 Si). Pudiéndose utilizar también como desoxidante adicionales pequeñas cantidades de ferrosilicio (47 a 52 Si). El acero fundido se cuela del caldero a las lingoteras, sometiéndose posteriormente a diversos procesos hasta alcanzar la forma deseada.

Este procedimiento es rápido y barato, tratándose de diez a quince minutos en la producción de Tn de acero, aunque presenta el inconveniente con respecto al acero producido por los otros procedimientos, de contener más impurezas no metálicas.

La introducción del proceso bessemer en 1864 marcó el comienzo de la producción comercial en gran escala del acero. La mayor parte del acero producido en la segunda mitad del siglo XIX se obtuvo por este procedimiento, en los últimos cincuenta años el procedimiento Martin ha reemplazado el proceso bessemer como mayor productor de acero quedando limitado este último a la fabricación de acero para tubería, hojalata y algo de alambre principalmente. El reciente descubrimiento del proceso básico al oxígeno ha supuesto el abandono total del proceso bessemer ácido.

1.- Descripción.- El convertidor es una especie de retorta de cuello corto, móvil alrededor de un eje horizontal; comprende:

a).- Una cuba vertical cuya altura es un tercio de la del aparato entero; está rodeada de un anillo de acero que lleva los muñones;

b).- Una base troncocónica cuyo fondo móvil fácilmente reemplazable (dura 60 cargas aproximadamente), tiene orificios (toberas) que permiten el paso del aire; un fondo contiene de 100 a 300 toberas, siendo el diámetro de éstas del orden del centímetro;

c).- Una parte troncocónica que se une a la cuba, y cuya base pequeña, o pico, sirve para la entrada y salida de las materias. El eje de esta parte está inclinado con relación al de la cuba;

esta disposición reduce las proyecciones durante el soplado, y aumenta el contenido del aparato en su posición horizontal.

El aparato está montado sobre dos muñones; uno es macizo y lleva un piñón dentado que engrana con una cremallera; así se puede hacer girar el aparato alrededor de un eje perpendicular a su plano de simetría, el otro muñón es hueco y sirve para la conducción del aire; está unido a la caja de viento situada debajo de las toberas.

2.- Revestimiento.- La envuelta del aparato está constituida por una chapa de 20 a 25 mm de espesor. El revestimiento refractario se hace de ladrillos y el espacio entre la coraza y la camisa de ladrillos se llena con una capa de refractario, su espesor es del orden de 50 cm. en las paredes y de 1 m en el fondo, siendo más grueso en el convertidor bessemer.

Para el procedimiento ácido, se utiliza arena aglomerada con un poco de arcilla. El revestimiento básico es a base de colomita descompuesta en óxidos por cocción, y después aglomerada con el 10% de alquitrán; este revestimiento se cuece en posición. Debe ser completamente rehecho después de unas 300 coladas y la duración de marcha sin gran interrupción de un convertidor es de 12 días aproximadamente.

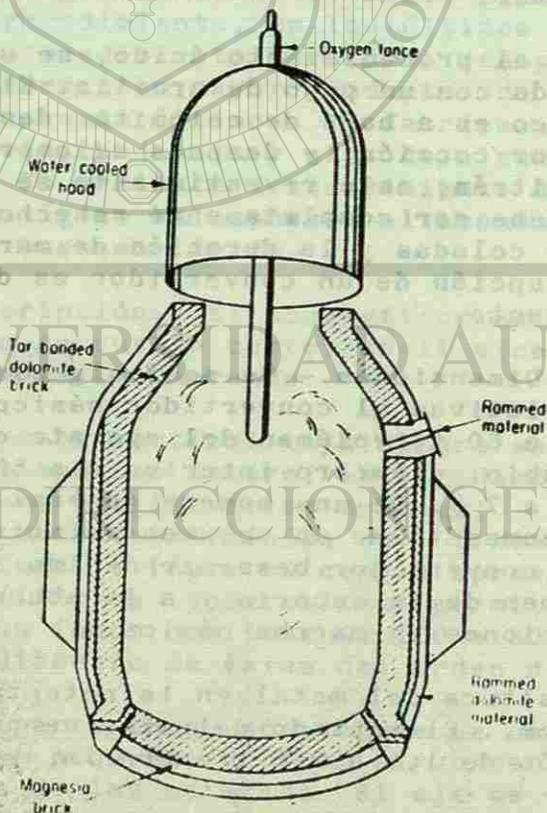
3.- Dimensiones.- He aquí algunas características relativas al convertidor básico; carga de arrabio 30 a 60 t; volumen del aparato diez veces el del arrabio; diámetro interior 4 a 5 m; altura interior 5 a 7 m. De una manera general. El convertidor Thomas tiene un volumen relativamente mayor que el convertidor bessemer debido al considerable volumen de la escoria y a la abundancia de las proyecciones en marcha básica.

La altura del metal en la retorta es del orden de 40 cm.. El soplado del aire se hace con una sobrepresión de 1,5 a 2,5 atm con la ayuda de má-

quinas soplantes análogas a las utilizadas para los hornos altos, aproximadamente se soplan 320 de aire por tonelada de arrabio.

4.- Utilización.- Normalmente un taller comprende 4 convertidores, de los que dos están en servicio, uno rehaciendo el revestimiento y otro volviéndose a montar.

El horno utilizado para la fabricación del acero por el proceso básico al oxígeno, es análogo al convertidor bessemer básico, diferenciándose de éste último en que no tiene toberas, caja de viento ni fondo rebatible. El revestimiento refractario básico tiene un espesor de aproximadamente 1 m y está formado por una capa interior de ladrillos-magnesita, otra intermedia de dolomita apisonada y una tercera de trabajo formada por ladrillos de dolomita alquitranada. El horno está proyectado para producir unas 180 tn de acero por hora.



La carga se compone de mineral de hierro, chatarra de acero y arrabio líquido, junto con una pequeña cantidad de caliza como fundente. Durante el soplado se suelen adicionar normalmente otros materiales fundentes como cal y espato flour. Una vez cargado el horno y en posición de trabajo se introduce hasta una distancia de la superficie del baño, inferior a 1.5 m. una lanza vertical refrigerada por agua a través de la cual se envía a la superficie del baño un chorro de oxígeno de gran pureza a una presión de 7 a 10.5 Kg/cm<sup>2</sup>. La temperatura en la superficie del baño alcanza un valor de unos 2,200°C. Las reacciones que se verifican son las mismas que en el proceso bessemer, con la diferencia de que, debido a las temperaturas tan elevadas que se alcanzan, la oxidación es más rápida. A consecuencia del óxido de carbono que se forma, se produce en todo el baño una violenta ebullición. Como el revestimiento es básico, la mayor parte del fósforo y del azufre pasará a la escoria. Un acortamiento claramente visible de la longitud de la llama que sale por la boca del horno, indica el final del proceso. La lanza se retira; el horno se bascula para desescoriar el baño, se endereza nuevamente y, a continuación, se cuela el hierro afinado en un caldero. Al caldero, se le hacen las adiciones normales para obtener el acero de la composición deseada. La calidad del acero producido por este procedimiento es igual o superior a la del acero obtenido en el horno Martin.

Descripción.- Es un convertidor de fondo lleno, derivado del convertidor Thomas. el revestimiento está realizado en ladrillos de dolomita sin terizada aglomerada con alquitranado, salvo en el fondo que está apisonado. Esta parte se taladra cuando se va a rehacer revestimiento, lo que se realiza después de 500 operaciones aproximadamente y así se obtiene un enfriamiento rápido. El espesor máximo es de 1 metro.

El oxígeno es insuflado bajo una presión del orden de 10 psia por medio de una lanza refrigerada por agua, colocada en el eje del crisol y cuya extremidad dista de 30 a 100 cm de la superfi-

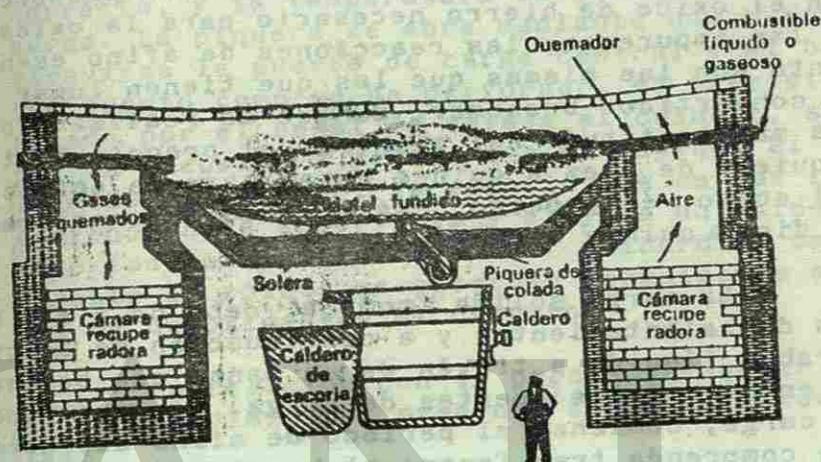
cie del baño. Se calcula un promedio de  $60 \text{ m}^3$  de oxígeno por tonelada de acero.

La lanza, de 15 m de longitud, está formada por tres tubos concéntricos (diámetro exterior 25-cm); el tubo interior sirve para el paso del oxígeno, y los otros dos permiten la circulación del agua cuyo caudal es de  $140 \text{ m}^3/\text{h}$ . En la punta tiene una boquilla de soplado de cobre con tres agujeros dispuestos a  $120^\circ$  unos con relación a los otros, e inclinados  $15^\circ$  sobre la vertical.

Todos los procedimientos de afino al oxígeno necesitan el desempolvado de los humos. Los humos contienen aproximadamente 10 Kg de polvos (hierro y óxidos) por tonelada de arrabio, son capturados a la salida del convertidor por medio de una campana que da paso a la lanza y que tiene un canalón de alimentación para las adiciones; lo más frecuente es tratar de captar la menor cantidad posible de aire a fin de evitar la combustión de los gases cuya composición es aproximadamente de  $90\% \text{ CO} + \text{CO}_2$ . Los humos son en seguida enfriados en un circuito tipo caldera de vapor, después por pulverización de agua, y por fin desempolvados en una torre de lavado. Se puede completar el desempolvado pasándolos por un filtro electrostático por un aparato de sacos filtrantes.

El procedimiento Martin/Siemens, también conocido por procedimiento Martin a secas, tuvo un desarrollo más lento que el bessemer y hasta después de 1908 no consiguió convertirse en el principal procedimiento de producción de acero. Según sea el tipo del revestimiento refractario, el proceso Martin puede ser ácido o básico, pero de los dos el más utilizado con gran diferencia es el segundo.

En la figura siguiente se muestra la sección recta de un horno Martin Siemens, el cual se basa por su funcionamiento en el principio de la recuperación del calor del combustible, el aire de combustión se precalienta antes de mezclarse con el



gas en una cámaras recuperadoras que contienen una serie de conductos hechos con ladrillos refractarios. Mientras el aire de combustión se precalienta al atravesar una de las cámaras, los gases calientes de la combustión atraviesan otra cámara, exactamente igual a la primera, cediendo su calor a los ladrillos. Cada veinte minutos aproximadamente se invierte la dirección del flujo. Este sistema permite obtener un rendimiento térmico mayor y mantener en el horno una temperatura más constante.

Al efectuar la carga del horno Martin básico, lo primero que se coloca es una pequeña capa

de chatarra fina, la cual funde rápidamente y forma una capa líquida que protege la solera de la oxidación de la caliza. A continuación se carga la carga en trozos gruesos, o terrones, seguida por el mineral de hierro y finalmente la chatarra de acero. El mineral de hierro y la chatarra proporcionan el óxido de hierro necesario para la oxidación de las impurezas, las reacciones de afinado esencialmente son las mismas que las que tienen lugar en el convertidor bessemer, aunque se realizan con una más lentitud. Así mientras el proceso Martin requiere de diez a quince horas para la obtención del acero, el proceso bessemer requiere solamente de diez a quince minutos.

La carga sólida funde al cabo de 2 a 4 horas de calentamiento, y a continuación se adiciona arrabio líquido a través de un canal que se inserta en una de las puertas de carga. Una vez fundida la carga, comienza el período de afinado del metal que comprende tres fases: el hervido debido al mineral, el hervido debido a la cal, y la fase de ajuste del carbono.

Durante el hervido debido al mineral, la reacción entre el mineral y los óxidos de hierro contenidos en la escoria, y el carbono del metal provoca el desprendimiento del óxido de carbono, el cual burbujea a través de la carga líquida. Durante esta fase se oxidan el silicio, manganeso y fósforo, pasando a la escoria.

Durante el hervido debido a la cal, el anhídrido carbónico que se desprende al descomponerse la caliza situada sobre la solera del horno, burbujea a través de la carga fundida, y ayuda a la oxidación. Durante esta fase la mayor parte de la carga sube a la superficie y contribuye a aumentar la viscosidad de la escoria.

Terminando el hervido, la mayor parte de las impurezas con excepción del carbono se han oxidado pasando a la escoria. Durante la fase siguiente se ajusta el contenido de carbono dentro de los límites que se desean. Si el contenido de

carbono del metal es demasiado bajo, se adiciona la cantidad necesaria de arrabio o de lingote de afinado, si por el contrario, el contenido de carbono es demasiado alto se cargan nuevas cantidades de mineral. Cuando las muestras sacadas indican que la composición del metal y de la escoria es la correcta, y la temperatura la justa, se cuele la carga. La piqueta se abre mediante una barra que atraviesa la puerta de carga central y el baño, y tan pronto como se ha perforado, se precipita el colado por el canal de colada al caldero, seguido por la escoria. A medida que va cayendo el acero líquido al caldero, la escoria que es más ligera, asciende a la superficie y fluye a un caldero de escorias colocado al lado del caldero de colada. Durante la colada se efectúan normalmente adiciones de desoxidantes al caldero.

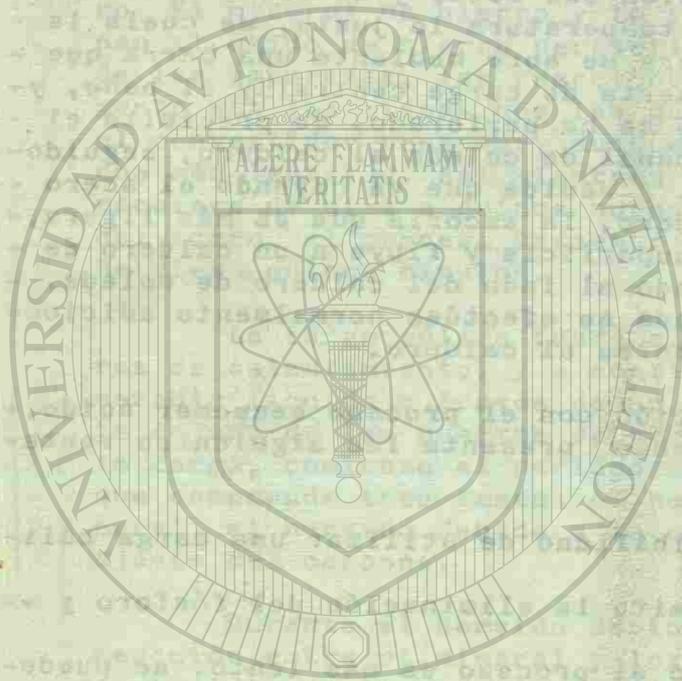
En relación con el proceso bessemer ácido, este procedimiento, presenta las siguientes ventajas:

- 1.- Posibilidad de utilizar una carga sólida.
- 2.- Permite la eliminación del fósforo y del azufre.
- 3.- Como el proceso es más lento, se puede producir un acero de mejor calidad.
- 4.- Posibilidad de controlar más estrechamente la composición del acero, lo que permite la fabricación de aceros aleados.

Se denomina proceso duplex a aquel en el cual las primeras materias para la fabricación del acero se tratan en un tipo de horno, y el producto líquido que se obtiene se carga en otro horno de tipo distinto para su afinado.

El proceso duplex más corriente es el formado por los procedimientos bessemer ácido Martin -- Siemens básico. Este proceso presenta las ventajas de una rápida eliminación del silicio y de la mayor parte del carbono del arrabio, típico del proceso bessemer, junto con la obtención de un producto relativamente alto en fósforo que puede afinar-

se rápidamente en un horno Mart.in-Siemens básico.



60

## BAÑO ELECTROTÉRMICO

De una manera general se pueden distinguir -- tres tipos de hornos eléctricos.

**HORNOS DE RESISTENCIA.**-- El calor se desprende en un circuito que rodea, las resistencias usuales -- tienen, sea un punto de fusión demasiado bajo (aleaciones a base de níquel), sea una resistencia a la -- oxidación insuficiente (grafito tungsteno), para que se puedan realizar hornos de resistencia que permitan la elaboración del acero.

**HORNOS DE INDUCCIÓN.**-- El baño de acero es calentado por el efecto Joule de una corriente que se crea en él por inducción de una corriente alterna.

**HORNOS DE ARCO.**-- Son en suma hornos de resistencia, en los que éste está constituida sobre todo -- por el medio gaseoso comprendido entre el electrodo y la materia a calentar.

Actualmente sólo se utilizan los dos últimos tipos de hornos, pero los hornos de arco son, con mucho, los más utilizados, se les clasifica en tres categorías según su modo de funcionamiento.

a).-- La corriente no pasa por el baño el arco salta encima del baño y el calentamiento tiene lugar por radiación, convección y por reverberación sobre la bóveda.

b).-- La corriente atraviesa el baño yendo de un electrodo al otro, estando los electrodos fuera -- del baño.

c).-- La corriente conducida por un electrodo, atraviesa el baño y sale por la solera conductora.

Los hornos del primer tipo dan lugar a una mala repartición del calor desprendido.

Los hornos de solera conductora (de los que -- varios tipos están aún en servicio), tienden a ser --

abandonados debido a la fragilidad de la solera que está esencialmente constituida por una capa de sílice.

El Horno Héroult, que pertenece al segundo tipo es con mucho el más empleado.

**HORNO HEROULT.** - Este horno comprende un crisol formado de chapas, (cilíndrico de eje horizontal) revestido interiormente de refractario. Presenta, diametralmente opuestos, un pico de colada y puertas de carga y desescoriado. El crisol está montado sobre dos sectores dentados que permiten bascularlo hacia adelante para la colada, y hacia atrás para el desescoriado; el movimiento está asegurado por un mando eléctrico o hidráulico.

**Refractarios.** - Las bóvedas están generalmente revestidas de ladrillos de sílice, poco costosos y que no se reblandecen hasta 1650°C. Se utilizan también ladrillos de cromita-magnesia particularmente para el contorno de la bóveda y las partes laterales del horno. El revestimiento de la cuba está formado en una capa ácido o básico (dolomita cocida en general) que descansa sobre ladrillos silicoaluminosos ordinarios. Durante una marcha continua, el revestimiento se desgasta completamente al cabo de 3 a 4 semanas.

**Carga del Horno.** - En los hornos modernos, la bóveda se eleva para permitir la colocación de la carga, y el desplazamiento de la bóveda con relación al crisol se hace según diversas formas. La solución más extendida consiste en elevar la bóveda por medio de un gato hidráulico adyacente a la cuba del horno. El vástago de este gato está unido a un bastidor metálico que lleva de un lado la bóveda y del otro los pesantes portaelectrodos. El gato de elevación contiene una rampa helicoidal en combinación con el pistón. De esta manera, la bóveda, al mismo tiempo que es elevada, efectúa un movimiento de rotación de 80 a 90° que despeja completamente la cuba para la carga.

Esta carga se efectúa por medio de cubas de mando mecánico o de electroimanes. A veces, para pequeñas unidades, se carga aún con cuchara, la marcha es generalmente continua.

**Características Eléctricas.** - Los electrodos atraviesan la bóveda, siendo la alimentación en corriente trifásica la más común hay 3 electrodos verticales dispuestos, en planta, en los vértices de un triángulo equilátero. La altura de los electrodos encima de la superficie del baño es determinada por reguladores automáticos, se consumen 10Kg. de electrodos por tonelada de acero.

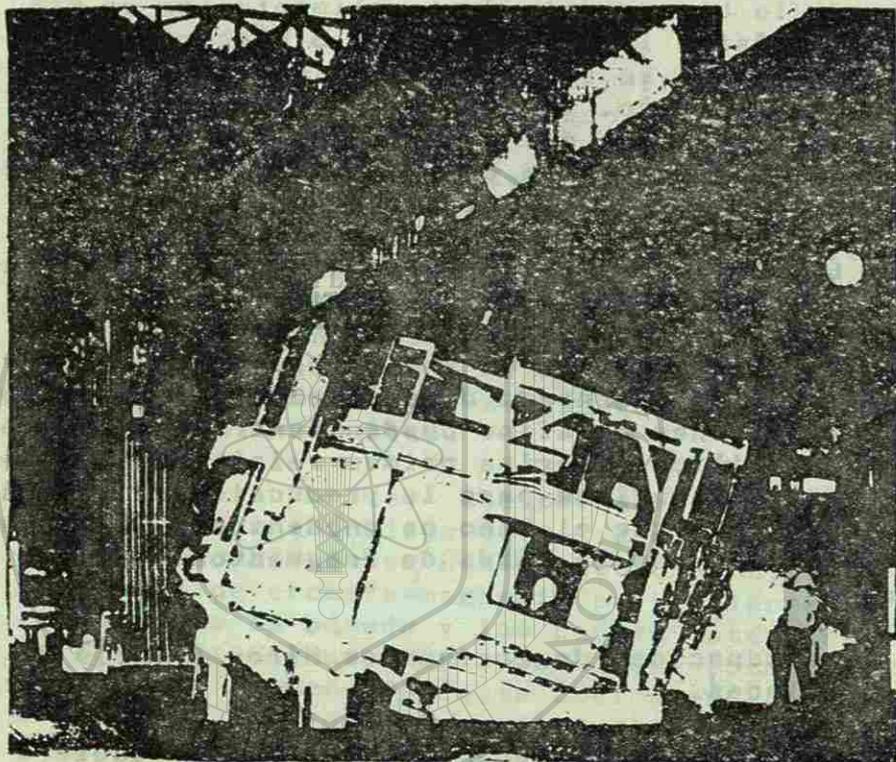
La tensión es del orden de 100 a 200 V la intensidad alcanza 15000 A por electrodo.

El horno Héroult da una temperatura muy elevada en la escoria calentada directamente por el acero así las reacciones de afino pueden tener una gran importancia. Utiliza materias primas relativamente impuras, pero no conviene para la producción de aceros extra suaves, porque el baño se encuentra automáticamente carburado por la caída de fragmentos de los electrodos.

La capacidad de los hornos Héroult varía de 5 a 180 toneladas.

Como el horno eléctrico de arco no requiere para su funcionamiento ningún combustible, puede utilizarse el tipo de atmósfera que se desee, neutra ó reductora, ya que no existe ninguna contaminación del baño por el aceite combustible o por los gases de la combustión. Debido al control que se ejerce sobre la atmósfera del horno, y a la posibilidad de producir primero una escoria fuertemente oxidante, y a continuación una escoria reductora, se pueden obtener productos de gran calidad.

La carga, normalmente está compuesta por chatarra de acero de composición conocida en estado sólido. La primera fase de la marcha operatoria requiere de la formación de una escoria básica oxidante, cuyo objeto es eliminar el fósforo y otros constituyentes oxidables. Para ello, se cargan sobre el acero fundido cal y mineral de hierro. Cuando el contenido de fósforo del metal se ha reducido al valor deseado, se efectúa el desescoriado del baño o eliminación de la escoria formada. La segunda fase consiste en la desul-



HORNO ELECTRICO EN OPERACION DE COLADO.

furación y desoxidación del metal. Esta fase requiere una escoria básica reductora, la cual se forma mediante la adición de cal, coque en polvo y espato flour. La gran cantidad de cal de la escoria y sus condiciones reductoras favorecen la eliminación del azufre del baño bajo la forma de sulfuro de calcio que pasa a formar parte de la escoria para obtener el acero de la composición requerida, se efectúan las oportunas adiciones de elementos de aleación.

Cuando el análisis indica que la composición del acero es la correcta, se bascula el horno y se cuela el acero en un caldero.

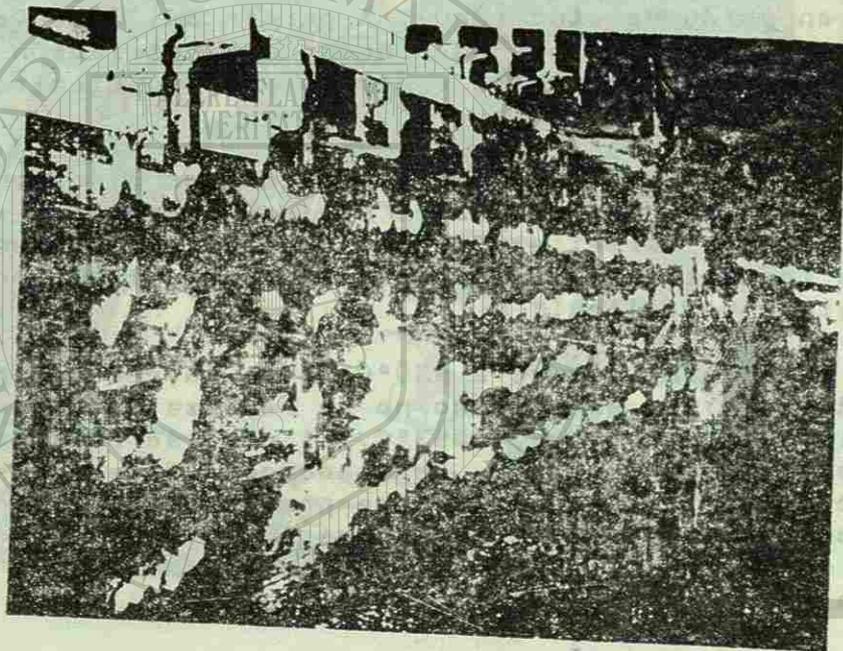
**DESTILACION.** - Con este nombre se conoce el proceso pirometalúrgico que se utiliza para separar los metales volátiles de las impurezas no volátiles. Este procedimiento es el utilizado para la obtención del cinc. Este procedimiento no puede aplicarse directamente al mineral y requiere la ejecución previa de las operaciones de concentración y tostación con objeto de transformar los minerales compuestos por sulfuro de cinc en óxido de cinc ( $ZnO$ ). A partir del óxido se puede extraer el cinc por un proceso de destilación por reducción por el carbono o por un proceso electrolítico.

Antes de sufrir la reducción por el carbono, los concentrados tostados se suelen sinterizar, con objeto de eliminar el azufre que hubiera podido quedar en la tostación y para que se desprendan las impurezas metálicas volátiles.

El cinc hierve a  $930^{\circ}C$ , pero la reducción total del  $ZnO$  por el carbono no se realiza a temperaturas inferiores a unos  $1.093^{\circ}C$ . El cinc se obtiene por tanto en forma de vapor, mezclado con otros gases, de los cuales tiene que separarse por condensación. Los hornos más comúnmente utilizados en la obtención del cinc son de dos tipos principalmente, de retorta horizontal y de retorta vertical.

Si se utilizan los primeros se colocan en un horno alimentado con gas de cuatro a seis filas horizontales de retortas de arcilla refractaria de alrededor de 1,5 m de longitud y 0,23 de diámetro. Las retortas se llenan con una mezcla de carbón y de  $ZnO$  sinterizado y se prolongan por su extremo abierto en un condensador de arcilla situado fuera del horno, cuya temperatura, al estar al aire, es de unos  $500^{\circ}C$ . El carbono reduce el óxido de cinc y el óxido de carbono, obteniéndose una mezcla compuesta por vapor de cinc y el óxido de carbono, la cual pasa al condensador a menor temperatura, donde el cinc se condensa, siguiendo el óxido de carbono hasta la boca del condensador, donde se quema. La figura muestra la parte anterior de un horno de cinc de retortas horizontales. El cinc líquido se saca de los condensadores tres veces en un ciclo de veinticuatro horas. Al final del ciclo se quitan

os condensadores, se eliminan de las retortas de los residuos de la carga consumida y se inicia un nuevo ciclo.



PARTE ANTERIOR DE UN HORNO DE RETORTA HORIZONTAL PARA LA EXTRACCIÓN DEL CINC

En contraste con el proceso que se lleva a cabo en las retortas horizontales, el cual es de tipo discontinuo, el proceso que tiene lugar en los hornos de retorta verticales permite la extracción continua del cinc. La carga se compone de briquetas formadas por una mezcla de concentrados sinterizados y carbón coquizado. El horno se carga totalmente con briquetas que se introducen por la parte superior. A medida que

descienden por el horno son atravesados por el vapor de cinc producido, el cual se recoge en un gran condensador situado en las proximidades de la parte superior del horno, donde se condensa al estado líquido. El óxido de carbono que acompaña al cinc se prepara para su empleo como combustible. Las briquetas consumidas se retiran continuamente por la parte inferior del horno. El calor necesario para que se verifique la reacción es suministrado mediante quemadores de gas.

JANIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



GENERAL DE BIBLIOTECAS

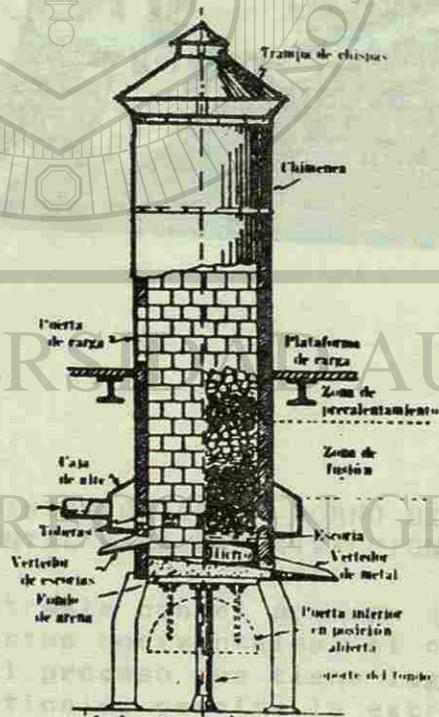


HORNO DE CUBIERTA

FUNDICIONES

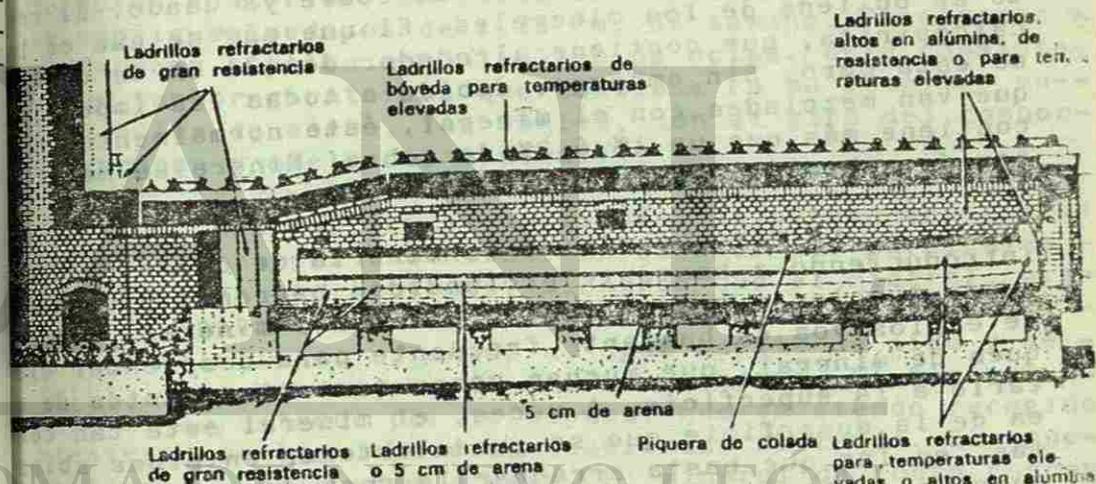
Las fundiciones se obtienen a partir del arrabio, en cubilotes o en hornos de reverbero.

**El Cubilote.** - Es similar a un horno alto, solo que más pequeño; funciona con presiones de soplado mucho menor; para operar el cubilote, se carga con pedacería de madera y una carga normal de carbón coque, que se enciende al "rojo vivo", en ese momento se carga con arrabio y chatarra de fundición y el coque, que actúa como combustible, en capas alternadas hasta la altura de la puerta de carga, en cada carga se coloca piedra caliza que actúa como fundente de las cenizas del carbón, cuando se funde la cantidad de metal que se requiere, cesa de cargarse el horno y se sangra todo el metal fundido, parandose el funcionamiento del horno. Después se abre la tapa del fondo del cubilote y se vacía el horno.



HORNO DE CUBILOTE

**Horno de Reverbero.** - En este horno la carga metálica se calienta por reflexión del calor de la bóveda. La carga se realiza cuando el horno está frío y se compone de chatarra de fundición. Los quemadores utilizan carbón pulverizado ó combustibles líquidos. Fundida la carga, la composición de la misma se puede ajustar con las adiciones de los elementos necesarios, luego se cuela en las ollas apropiadas. En este horno el metal no está en contacto con el combustible, por lo tanto, absorbe menos azufre y carbon que el de cubilote, obteniendo un metal más resistente y de mayor calidad, permite además utilizar más tipos de chatarra y llevar un control más preciso de la operación, sin embargo el cubilote es más económico por su instalación y servicio.



CORTE ESQUEMATICO DE UN HORNO DE REVERBERO

El cobre es uno de los pocos elementos que encuentran en la corteza terrestre como tales. Sin embargo, aunque los cristales nativos de cobre tienen interés para los geólogos, no se presentan en cantidad suficiente para tener importancia desde el punto de vista comercial. La mayor parte del cobre se encuentra en forma de minerales, en los cuales está combinado casi siempre con hierro y azufre esto no sorprende porque el cobre, al salir fundido de la Tierra, abriéndose camino a través de las grietas de las rocas y penetrando con frecuencia en los poros de la mismas. Los principales yacimientos de cobre del mundo se encuentran en los Estados Unidos, Zambia, Chile y Canadá. Anualmente se funden alrededor de 3.5 millones de toneladas de cobre, de las cuales más del 20% se obtiene de la purificación de cobre ya usado. El resto se obtiene de los minerales. El que más se usa es la calcopirita, que contiene alrededor del 34.5% de cobre puro. Sin embargo, debido a todas las impurezas que van mezcladas con el mineral, éste normalmente no contiene más que un 1% ó 2% de cobre. Minerales más ricos de cobre pueden tener hasta un 5%.

La mayor parte de la minería de cobre se ha introduciendo a bastante profundidad barrenos y construyendo túneles a través de las vetas del mineral. El uso de explosivos es bastante frecuente para desprender bloques de mineral, que muchas veces se tritura antes de llevarlo a la superficie. A veces, el mineral está tan cerca de la superficie que se puede obtener en minas abiertas, en las que basta arrancar la capa de rocas que lo cubre para llegar, inmediatamente, hasta el mineral.

Algunos minerales oxidados y de baja calidad no se extraen metalúrgicamente por minería, sino que el cobre que contienen se saca por disolución. Se añade ácido diluido al mineral; una vez escurrido éste, se recoge. Posteriormente, el líquido se coloca en grandes tinajas con disolución y el cobre se deposita, luego, éste se filtra.

Los sulfuros que provienen de las minas contienen gran cantidad de ganga y un porcentaje pequeño de mineral útil, que es preciso separar, antes de emplearlo.

El mineral se machaca entre las poderosas mandíbulas de trituradoras gigantes, hasta convertirlo en pedazos de unos 13 cm., y se pasa a través de un tipo de tamiz, llamado "criba", para eliminar los fragmentos pequeños que no necesitan una trituración ulterior. Los trozos de 13 cm. se convierten en secciones de unos 4 cm. en trituradoras cónicas. Estas son unos recipientes muy fuertes de acero, con forma de pera, dentro de los cuales hay un enorme mazo que, al girar, tritura el mineral. El mazo está muy separado de la pared en la parte superior del recipiente, y muy próximo a la parte inferior. De este modo, los pedazos de mineral que van cayendo desde la parte superior se machacan contra las paredes y se van haciendo más pequeños, a medida que descienden. Por trituración posterior, en otras trituradoras del mismo tipo se consiguen pedazos de 1.25 cm. de tamaño. Finalmente se reducen a polvo en un molino de bolas. Este consiste en un tambor giratorio, que contiene en su interior muchas bolas de acero, las cuales, con el giro del tambor, bombardean y muelen el mineral.

Las partículas de mineral se pueden separar de las impurezas por flotación. En el agua las partículas de impurezas van al fondo, mientras que el mineral, gracias al tratamiento a que es sometido, flota. Para que el mineral flote, se añade al agua aceite de pino y se agita luego con objeto de producir espuma. El mineral útil es arrastrado por la espuma, que va siendo recogido mientras que las impurezas descienden al fondo. El agua se limpia y se vuelve a usar. El mineral de cobre concentrado se filtra, quedando listo para su extracción por fundición. Con frecuencia, esta concentración contiene también oro y plata. El tratamiento de mineral a partir de éste punto, depende de sus características los minerales constituidos de cobre nativos, óxidos y carbonatos se pueden fundir sin más tratamiento, pero los concentrados que contienen azufre y hierro han de ser tostados previamente. El tostado que se efectúa en un horno, sirve para secar el mineral y eliminar parte del azufre en forma de anhídrido sulfuroso. El polvo caliente que resulta de este tratamiento se llama calcinado. Es una mezcla de sulfuro de cobre, sulfuro de hierro y óxido de hierro.

**FUNDICION.**— El objeto de la fundición consiste en separar los constituyentes térreos inútiles. Se utiliza para esto la piedra caliza, debido a que se combina con la tierra para formar la escoria. También se produce la reacción entre el óxido de hierro y el bióxido de silicio de la tierra.



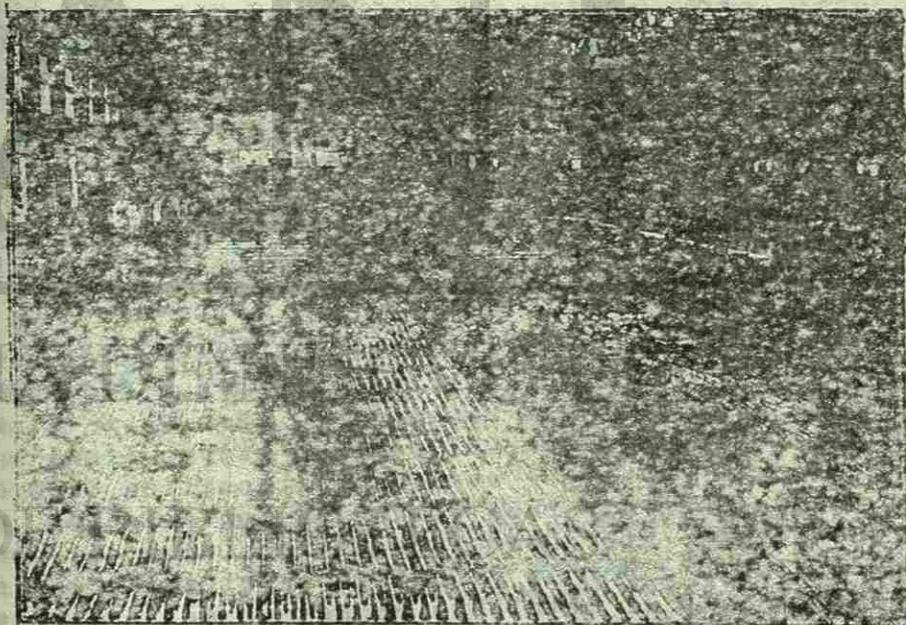
La fundición se efectúa casi siempre en hornos recubiertos de ladrillos refractarios, calentados con carbón, petróleo o gas, siendo algunos eléctricos. En los métodos más recientes, sin embargo, se utiliza el calor que desprenden las mismas reacciones químicas. Esto se conoce con el nombre de fundición instantánea. En ella el calcinador seco es introducido en el horno mediante chorros de aire u oxígeno. El calor de la reacción es suficiente para que dé comienzo la reacción de la carga que se ha introducido. Los líquidos del horno se separan en dos capas. La escoria flota sobre la capa semifundida que contiene el cobre. La escoria se extrae de vez en cuando.

El material semifundido se pasa con un cucharón a un convertidor, en el cual se libera el cobre. Se insufla aire a presión a través del material semifundido que es una mezcla de sulfuros de cobre y de hierro. El azufre se elimina con el aire en forma de anhídrido sulfuroso, que es un gas, y el hierro se separa en forma de escoria por adición de arena. Aunque el aire que se insufla es aire frío, el material semifundido no se enfría pues el calor que suministran las reacciones químicas contrarresta su efecto. Después de varias horas de tratamiento con aire, se cuele el cobre y se obtienen unas tortas con ampollas, conocidas del cobre ampollado es superior al 98%, no resulta aún suficiente.

Se realiza un refinado posterior antes de entrar en procesos fabriles. Al cobre fundido se le insufla más aire, con el objeto de oxidar y eliminar otras impurezas, tales como

el arsénico. En el curso de esta operación, parte del cobre se oxida también y tiene que ser convertido en cobre de nuevo por la acción reductora de unos trozos de madera que se introducen en el horno. El cobre fundido es colocado de nuevo para formar bloques, que ahora reciben el nombre de ánodos, porque son conectados como tales, en el refino, por electrólisis.

El tanque electrolítico se llena con una disolución de sulfato de cobre, siendo utilizadas como cátodos planchas de cobre puro. Por la acción de la corriente eléctrica, el cobre que se encuentre en el ánodo pasa a la disolución y se deposita en el cátodo, sin que se hagan las impurezas que forman un barro viscoso debajo del ánodo. Con frecuencia, el oro y la plata que contiene este barro compensan el costo del proceso de electrólisis.



DISPOSICION DE LOS CATODOS DE COBRE.

## EL ALUMINIO

Se llaman electrólitos las sustancias que disueltas o fundidas se disocian en iones. Un ion es un átomo o grupo de átomos con carga eléctrica.

Si se sumergen en un líquido dos electrodos, el polo negativo o cátodo atrae los iones positivos o cationes y los neutraliza; el polo positivo o ánodo atrae los iones negativos o aniones, que leceden sus electrones. Así, gracias al transporte de los electrones por los iones, circula una corriente eléctrica, que separa los fragmentos en que estaba disociada la molécula del electrólito. Se comprende que el factor primordial del rendimiento es el número de electrones que circula por segundo, o intensidad de la corriente; en cambio el voltaje o energía de dichos electrones, es secundario.

La electrólisis aprovecha esta propiedad para aislar ciertas sustancias. Obsérvese que los electrones de la corriente son transportados por los iones de la solución como si fueran los pasajeros de un vehículo, y que la separación de los ingredientes de un compuesto tiene lugar en contacto con cada electrodo. Conviene recordar que un cátodo y un catión son de signos opuestos entre sí, así como un ánodo y un anión.

El aluminio, elemento No. 13, es el metal del siglo XX, su importancia crece día a día, debido a su ligereza, y a menos de 70 años de iniciarse su utilización industrial sólo el hierro tiene una importancia mayor. Se emplea en utensilios caseros, en envases, en diversos vehículos, en aviación, en arquitectura, etc. Desde los últimos años, el consumo de aluminio por la industria eléctrica crece rápidamente. Es el metal más abundante de la corteza terrestre con una proporción del 7%.

El aluminio se oxida instantáneamente; pero forma una delgadísima capa protectora transparente de alúmina (óxido de aluminio), que para los fi-

nes prácticos se vuelve inoxidable. Sin embargo, en las fábricas de escamas de aluminio para pinturas se trabaja en una atmósfera inerte, porque la enorme ampliación de la superficie para un determinado volumen, favorece la inflamación del metal (el polvo de aluminio se utiliza en las luces de bengala).

El Procedimiento "Bayer".- Es el más utilizado, recurre a la electrólisis para aislar el metal partiendo de la alúmina, y comprende varias fases.

1ª.- La Materia Prima.- La alúmina, muy mezclada con otros minerales, no es directamente aprovechable. Se prefiere extraerla de la bauxita, sustancia más compleja. En primer lugar, se muele y lava el mineral para eliminar la arcilla y otras impurezas. Una vez seco se pulveriza, y se trata con sosa cáustica bajo vapor a alta presión. Entonces el óxido de aluminio se disuelve, pues forma un aluminato de sodio soluble. Finalmente, se filtra el líquido para eliminar las partículas de hierro y titanio.

2ª.- Separación de la Alúmina.- Generalmente, un líquido más cantidad de sólido si está caliente; dicho de otro modo, si se enfría una solución saturada (o sea de máxima concentración), el exceso de soluto se separa y precipita o sedimenta en forma sólida. En el caso que nos ocupa se obtiene alúmina hidratada. Se acelera el proceso introduciendo en el líquido algunos cristales de dicha sustancia.

En largos hornos giratorios, se calcina la alúmina hidratada para despojarla de agua unida a sus moléculas. Se obtiene un polvo blanco muy puro de alúmina propiamente dicha u óxido de aluminio.

3ª.- Obtención de Aluminio.- Su principio es simple la electrólisis de la alúmina en fusión - aísla sus componentes. El aluminio se deposita en el cátodo y el oxígeno se desprende en el ánodo.

El procedimiento requiere grandes cantidades de energía eléctrica se necesitan 1,000 kilovoltios/hora para separar una tonelada de aluminio. Los grandes productores de dicho metal son los países donde la corriente eléctrica es barata, como en el Canadá; pero se plantea un problema de fletes pues el mineral se extrae a menudo en regiones muy distantes.

Para hacer bajar la temperatura de fusión de la alúmina se le añade criolita, compuesto de aluminio que disuelve casi todos los metales y materiales refractarios. Solo Groenlandia produce criolita natural; por esta razón en la actualidad se le sintetiza.

#### PORMENORES DE LA ELECTROLISIS

Se opera en cubas u hornos relativamente pequeños, a una temperatura de 960-980°C. Es suficiente una tensión de 4 a 7 voltios, pero como se dispone de corrientes de 600 a 900 v, se conectan en serie de 100 ó 150 cubas. Una instalación productora puede constar de más de 1,500 cubas.

Las paredes de la cuba electrolítica propiamente dicha son de acero. Interiormente las tapiza una capa de carbón, que hace las veces de cátodo (electrodo negativo que atrae a los cationes positivos de aluminio). El metal líquido se deposita en el fondo, y se extrae inmediatamente.

Hay varios ánodos, también de carbón, en forma de barras sumergidas dentro de la alúmina en fusión. Atraen a los aniones negativos de oxígeno que las consume gradualmente pues forma con ellas un gas, el venenoso monóxido de carbono. Cuando éste llega a la superficie, se combina con el oxígeno del aire y forma bióxido de carbono que se elimina por medio de chimeneas adecuadas.

En teoría, el proceso atañe sólo a la alú

mina pero en la práctica se consume también cierta cantidad de criolita, que se repone periódicamente.

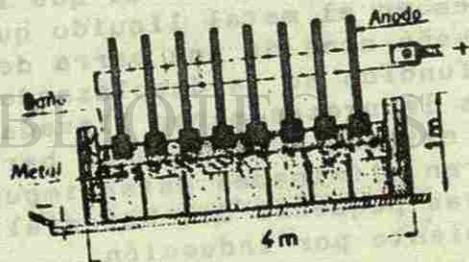
La electrólisis permite aislar también, en forma industrialmente económica, otros metales como el sodio el potasio, el estroncio, el bario y el magnesio. Por otra parte, se emplea para purificar el cobre, el estaño, el níquel, el cobalto. En todos los casos, el metal se deposita en el electrodo negativo (cátodo) que atrae sus iones.

#### ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones más utilizadas para el vaciado en moldes incluyen proporciones poco importantes (no más del 10%) de cobre, silicio, manganeso y magnesio.

Las aleaciones que se emplean en el forjado pueden comprender, además de los metales antes dichos, cinc y cromo.

Las ventajas del aluminio y sus aleaciones son la inalterabilidad, el escaso peso específico, el brillo y la resistencia. El metal muy puro es un buen vehículo de la electricidad a pesos iguales su conductibilidad es el doble de la del cobre, debido a su mayor ligereza.



**Fusión en Vacío.**- Los avances tecnológicos en electrónica y en los motores de reacción requieren de materiales y aleaciones de elevada pureza, lo que ha llevado al desarrollo de la fusión en vacío. Pequeñas cantidades de gases disueltos en un metal, como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno disminuye la resistencia a la tensión y demás características mecánicas, sobre todo a elevadas temperaturas. Estos gases tienen un efecto perjudicial sobre las operaciones posteriores de trabajo a que se somete el material.

Debido a la mayor solubilidad de los gases en el metal en el estado líquido que en el estado sólido, al solidificarse el material produce en el - sopladuras, venteaduras en la chapa metálica y el material se comporta fragilmente, si estos gases se precipitan en los contornos de grano. La solubilidad se reduce disminuyendo la presión como en los hornos de vacío.

Por este método se producen metales para - los reactores atómicos, como uranio, torio, y circonio. Para la elaboración de titanio, tántalo y molibdeno. En electrónica se requiere el silicio y el germanio. Para la recuperación de magnesio, calcio, bario y estroncio.

**Afinado por Zonas.**- Por este método se obtienen metales y aleaciones de gran pureza, para - aplicaciones especiales.

Esto se basa en el hecho de que las impurezas son más solubles en el metal líquido que en el sólido. Si una pequeña área de una barra de metal se funde y esta zona fundida se va desplazando a lo largo de la barra, las impurezas serán llevadas por la zona fundida de un extremo a otro de la barra y en la zona fría quedarán eliminadas estas impurezas. La fusión de estas áreas pequeñas del material, se logra por un calentamiento por inducción.

Este proceso se aplica a cualquier material cristalino siempre que la diferencia entre la -

solubilidad de las impurezas en estado líquido y sólido tenga un valor muy elevado. Por este método se obtiene germanio, silicio, circonio, molibdeno, - tungsteno, titanio, etc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

AL DE BIBLIOTECAS

PROPIEDADES Y ENSAYOS MECANICOS DE LOS MATERIALES METALICOS.

Medición de Temperaturas.- El éxito de muchas operaciones metalúrgicas tales como la fusión, afino, colada y tratamientos térmicos, depende en gran parte de la medida y control correcto de la temperatura. Es muy frecuente que una temperatura de 10- o 15°C con relación a la temperatura optima, repercuta en la obtención de productos de calidad inferior.

El concepto de temperatura probablemente se originó a causa del sentido físico del calor o del frío. Los intentos para lograr una estimación más específica y cuantitativa dieron lugar a la idea de la escala de temperaturas.

Escala de Temperaturas.- La temperatura es una medida de la energía térmica del movimiento desordenado de las moléculas en una sustancia en equilibrio térmico.

Por lo general la temperatura de una sustancia se mide en grados fahrenheit o celsius (centígrada). La escala científica común es la escala celsius en la cual 0° corresponde al punto de congelación del agua y 100° es la temperatura normal de ebullición de la misma. A principios del año de 1700 Fahrenheit cuyo oficio por tradición era el de soplador de vidrio ya podía construir termómetros de mercurio cuya concordancia de lecturas era bastante satisfactoria. La escala Fahrenheit es la que comunmente se utiliza en las actividades diarias de los Estados Unidos, tal como se ha normalizado, 32°F representa el punto de congelación del agua y 212°F corresponde al punto de ebullición normal del agua mediante las siguientes ecuaciones, se puede realizar la conversión de una a otra

°C = 5/9 (°F - 32)

°F = 9/5 °C + 32

Las escalas fahrenheit y celsius son relativas. Esto es, el punto correspondiente a cero fue establecido arbitrariamente por sus inventores frecuentemente es necesario utilizar temperaturas absolutas en lugar de los valores relativos.

En las escalas absolutas, el punto perteneciente a cero corresponde a la temperatura mínima que el hombre piensa que puede existir. Tal como se sabe la temperatura mínima está relacionada con las leyes de los gases ideales y con las leyes de la termodinámica. La escala absoluta que está basada en los grados celsius y cuyas unidades son de la misma magnitud que estos, es la escala Kelvin: la escala absoluta correspondiente a los grados Fahrenheit se llama escala Rankine.

En la siguiente figura se ilustran las relaciones entre temperaturas relativas y absolutas. Redondearemos el cero absoluto de la escala Rankine, que es -459.58°F. a -460°F; en la misma forma, -273.15 grados C se redondeará a -273°C, la relación entre -- °K = °C+273 °R= °F +460.

Medición de Temperaturas por medio de Colores.- Uno de los métodos más sencillos para estimar la temperatura de un metal, especialmente del acero contenido en un horno, es la observación del color del cuerpo caliente. Existe una relación definida entre la temperatura de un cuerpo y su color, aproximadamente en la forma siguiente:

Color	Grados Centígrados
Rojo Incipiente	500
Rojo Oscuro o Sangre	500-625
Rojo Cereza Oscuro	635
Rojo Cereza	700
Cereza Brillante	800
Anaranjado Oscuro	900
Anaranjado	950
Amarillo Limón	950-1000
Amarillo Claro	1100
Blanco	má. 1150



trico cuyo tubo curvado actúa sobre los engranajes, y la aguja señala la temperatura en la escala del aparato.

Algunos de los líquidos empleados y las temperaturas a que se utilizan son:

Mercurio	-	37 a 510°C
Alcohol	-	80 a 70°C
Pentano	-	200 a 30°C
Creosota	-	6.5 a 205°C

**Termómetro de Vapor a Presión.**— Este termómetro se carga con un líquido volátil de forma que en el bulbo haya siempre líquido y vapor. Al variar la temperatura en el bulbo varía la presión del vapor saturado la cual se transmite al tubo en espiral, el cual señala la temperatura correspondiente en función a la presión del vapor. Los vapores utilizados son: Cloruro de metilo, eter, alcohol etílico, tolueno y el rango de temperaturas que mide es de -50 a 260°C.

**Termómetro de gas a presión.**— El funcionamiento de estos instrumentos se basa en el aumento de presión que experimenta el gas que contienen en su interior, al aumentar la temperatura; como el volumen en el que el gas está contenido es prácticamente constante, la medición de la temperatura se puede hacer midiendo la presión del gas.

El gas utilizado normalmente es el nitrógeno el cual mide temperaturas en el rango de -128 a 430°C.

**Termómetro de Resistencia Eléctrica.**— Estos instrumentos operan sobre el principio de que la resistencia de un alambre al paso de una corriente eléctrica varía al cambiar la temperatura. A mayor temperatura mayor resistencia. El termómetro de resistencia se compone de una bobina de alambre de alta pureza, generalmente enrollada sobre un soporte aislador de mica. La bobina es el elemento termométrico activo, y su resistencia es la que servirá como base para determinar la temperatura, se le monta en el in-

terior de un tubo de protección cerrado por un extremo, que puede ser de metal o porcelana. Desde la bobina y por dentro del tubo, se llevan alambres conductores hasta la cabeza terminal, desde la que, a su vez, se disponen conductores adecuados para conectar el termómetro a un aparato para la medida de la resistencia, generalmente un puente de Wheatstone. El alambre utilizado debe ser de pureza elevada y poseer una resistencia constante y reproducible para cualquier temperatura dada. Los límites de temperatura entre los cuales se pueden emplear los metales son los siguientes:

Platino	-	250 a 600°C
Niquel	-	100 a 200°C
Cobre	-	100 a 200°C
Paladio	-	200 a 600°C

El termómetro de resistencia es muy exacto y de gran importancia en el laboratorio; sin embargo, su aplicación en la industria es limitada, porque es frágil y requiere de mucho cuidado en su manejo.

**Pirómetro Termoeléctrico.**— Es un aparato para medir y controlar temperaturas de hasta 2300°C. Sus elementos constitutivos son: a).— El termopar, b).— El bloque de empalmes, c).— Los cables de extensión y d).— El instrumento indicador, para medir la fuerza electromotriz producida por el termopar.

**Termopares.**— Un termopar es un sistema compuesto de dos alambres metálicos homogéneos, de composición química diferente, soldados en uno de sus extremos (junta caliente), formándose un circuito cerrado cuando los otros dos extremos libres se unen al indicador (junta fría o de referencia).

Para seleccionar las combinaciones de termopares, es necesario que los metales cumplan una serie de características.

- Suficiente potencial termoeléctrico para poder medirse.
- Costo razonable.

c).- Punto de fusión superior a la temperatura que han de medir.

Materiales de los Termopares.- En los termopares, el primer material en la combinación siempre se conecta a la terminal positiva.

a).- Cromel-alumel: el cromel (90% de níquel, 10% de cromo) y el alumel (94% de níquel, 3% manganeso, 2% de aluminio y 1% de silicio), son más útiles en el intervalo de 650 a 1200°C.

b).- Hierro-constantan: el constantan es una aleación que contiene 54% de cobre y 45% de níquel. Esta combinación puede utilizarse en el intervalo de 150 a 760°C.

c).- Cobre-Constantan: Esta combinación es más adecuada para mediciones a baja temperatura hasta de 250°C. El límite superior es de 300°C.

d).- Platino con 10% de rhodio-platino rango de temperaturas de 0 a 1650°C.

e).- Platino con 13% de Rhodio-platino rango de temperaturas de 0 a 1700°C.

f).- Platino 30f de Rhodio-platino 6f de rhodio se utiliza para medir entre 0 y 1760°C.

g).- Tungsteno-tungsteno 26%, reino

h).- Tungsteno 3% - Tungsteno 25% reino

i).- Tungsteno 5% - tungsteno 26% reino hasta 2300°C

Los termopares se fabrican cortando longitudes adecuadas de los dos alambres; los alambres se tuercen conjuntamente unas dos vueltas, o algunas veces se unen por extremos, y se sueldan para formar un botón redondo y uniforme. Los alambres del termopar deben estar en contacto eléctrico solo en la unión caliente, ya que el contacto en cualquier otro punto generalmente resultará en una F.E.M. medida demasiado baja. Los alambres están aislados entre sí por pequeños cilindros de porcelana.

Los termopares es conveniente portegerlos con tubos o cañas de protección las cuales son fundidas que protegen los alambres de choques o gases corrosivos.

Tipos de cañas.- a).- Fundición hasta 700°C, b).- Hierro con 14% de cromo hasta 800°C, c).- Hierro con 28% de cromo hasta 1100°C, por encima de 1100°C los tubos de protección que se utilizan son de porcelana, carburo de silicio o alúmina de 99.8% de pureza.

Fundamentos.- La medida de la temperatura mediante un termopar es posible porque en el se produce una fuerza electromotriz, cuando la unión soldada está a temperatura diferente de la unión fría. Si la unión fría se mantiene a una temperatura constante por ejemplo, el punto de fusión del hielo, la fuerza-electromotriz creada en el termopar es una cierta función de la temperatura a la que se encuentre la unión caliente.

En las condiciones señaladas, la f.e.m. creada depende de dos causas diferentes: el efecto Peltier y el efecto Thomson. Efecto Peltier: cuando 2 alambres metálicos homogéneos de diferente composición química, se ponen en contacto eléctrico uno con otro, se produce en la unión un tacto eléctrico uno con otro, se produce en la unión una diferencia de potencial entre los dos metales. Esta diferencia de potencial depende de la temperatura a que se encuentra el contacto y de la composición química de los dos alambres. Efecto Thomson: Cuando en un alambre metálico homogéneo se produce un gradiente de temperatura por calentamiento de uno de sus extremos, se establece también una diferencia de potencial entre los extremos, se establece también una diferencia de potencial entre los extremos calientes y frío del alambre; de esta exposición se deduce que la f.e.m. total creada en el sistema termoelectrico es la suma de las siguientes cuatro f.e.m.

- 1.- F.E.M. Peltier en la unión caliente
- 2.- F.E.M. Peltier en la unión fría
- 3.- F.E.M. Thomson a lo largo de uno de los alambres del termopar
- 4.- F.E.M. Thomson a lo largo de otro alambre del termopar.

La fuerza electromotriz total también recibe el nombre de efecto Seebeck.

**Termómetro de registro y control.**— En la mayoría de las instalaciones industriales es necesario que el pirómetro efectúe algo más que medir la temperatura. La aguja del instrumento medidor se puede sustituir por una pluma que se mueva sobre una carta corrediza, a fin de obtener un registro completo de la temperatura. Este recibe el nombre de pirómetro de registro. También el instrumento mediante circuitos eléctricos, se puede utilizar para controlar el flujo de gas a los quemadores o de electricidad a los elementos de calefacción y de este modo mantener constante una temperatura determinada en el horno. Este se llama pirómetro de control.

**Termómetros de Radiación Total.**— Los pirómetros de radiación total determinan la temperatura de un cuerpo caliente midiendo la intensidad de la radiación emitida de todas las long de onda. Se diferencian de los pirómetros ópticos en este empleo de la radiación total, de luz y calor, en lugar de una sola longitud de onda.

Todos los pirómetros de radiación total operan concentrando la energía radiante de todas las longitudes de onda sobre un elemento sensible, que genera una fuerza electromotriz medible con un instrumento apropiado. El elemento sensible puede ser un termopar o, en algunos casos, una termopila.

El rango normal de temperaturas que mide es de 700 a 2000°C.

**Ley de Stefan-Boltzmann.** La elevación de temperatura de la unión caliente del termopar de un pirómetro de radiación total es aproximadamente proporcional a la velocidad con que incide sobre él la energía radiante.

La ley de Stefan-Boltzmann, fundamento de la escala de temperatura. De todos los pirómetros de radiación total, dice que esta velocidad de inciden-

cia de la energía procedente de un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta,  $w = kt^4$ , donde:

$w$  = velocidad de emisión de la energía de todas las longitudes de onda por el cuerpo negro.  
 $k$  = Constante de proporcionalidad  
 $t$  = temperatura absoluta del cuerpo negro.

El cuerpo negro es un material hipotético que se toma como referencia y que tiene la propiedad de absorber todas las radiaciones que recibe y emitir energía que ningún otro cuerpo a la misma temperatura.

La temperatura que se lee en el pirómetro es la temperatura aparente, la cual se ajusta para obtener la temperatura verdadera y esto se logra tomando en cuenta la emisividad total del material.

**Emisividad.**— Es la relación que hay entre la energía emitida por un cuerpo y la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura.

MATERIAL	EMISIVIDAD
Cobre (sin oxidarse)	.02
Cobre (oxidado)	.70
Cobre (Líquido)	.15
Hierro (sin oxidar)	.05
Hierro (oxidado)	.85
Placa de acero (rugosa y oxidada)	.97
Hierro colado (muy oxidado)	.95
Ladrillo refractario	.75
Ladrillo de silic	.85

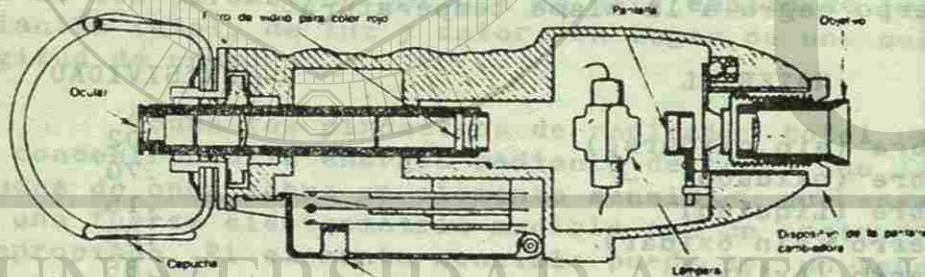
En la siguiente tabla se dan las temperaturas verdaderas en función de las aparentes observadas en un pirómetro de radiación total.

**Pirómetro Óptico.**— Un pirómetro óptico esencialmente un fotómetro que aísla una banda estrecha de la radiación visible emitida por un cuerpo incandescente y la compara con la intensidad de la radiación en la misma banda de un foco patrón calibrado.

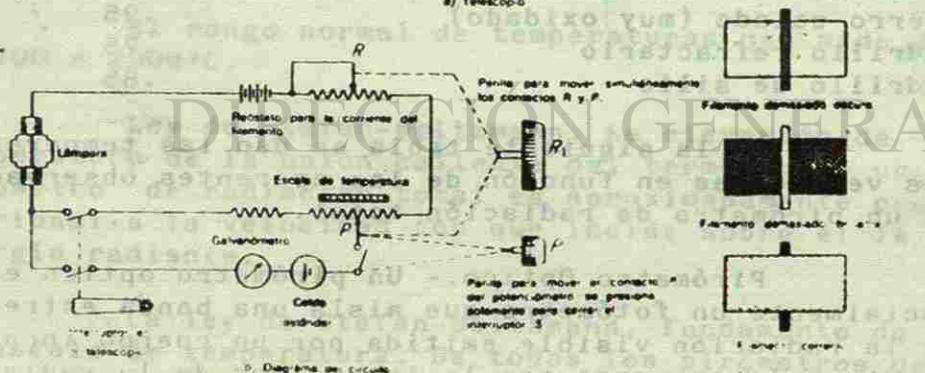
Las radiaciones comparadas suelen estar limitadas a una banda casi monocromática correspondiente a una longitud de onda media de unos 0.65  $\mu$  por lo tanto roja. El que se seleccione precisamente la luz roja es debido a que los filtros de este color permiten aislar una radiación casi monocromática sin pérdidas sensibles de intensidad, lo cual no se logra con filtros de otros colores.

En este pirómetro para poder determinar la temperatura por comparación de intensidades, también se necesita tener en cuenta la emisividad de cada material. En la pirometría óptica, la comparación se hace sobre una determinada longitud de onda y en este caso es preciso conocer la emisividad espectral o parcial correspondiente a la longitud de onda empleada.

En las tablas siguientes se dan las emisividades espectrales para algunos materiales y en la tabla se obtiene la temperatura verdadera partiendo de la temperatura aparente leída en el pirómetro óptico.



Rail



PIROMETRO OPTICO

**MICROGRAFIA o METALOGRAFIA.** - La metalografía estudia al microscopio las fases, el tamaño de grano, el tamaño y las formas de las inclusiones metálicas y no metálicas de las aleaciones y de los metales en general.

La microestructura nos indica el tratamiento térmico y mecánico de los metales y puede predecir el comportamiento que tendrá, así mismo, nos revela las causas de las fallas de las mismas.

Para realizar un análisis metalográfico se deben seguir un número de pasos sencillos, que requieren de una práctica constante para obtener un adecuado análisis de las muestras. El paso final es obtener una superficie plana especular. Los pasos generales son los siguientes:

**OBTENCION DE LA MUESTRA.** - La obtención de la muestra es importante; si lo que se va a analizar es una falla, se escoge del área cercana a la falla y se compara con una área normal. Si el material es suave, se corta con segueta, si el material es duro se corta con un abrasivo adecuado que gira a alta velocidad. En todos los casos la muestra debe de mantenerse fría durante el corte.

**PULIDO GROSERO.** - La muestra debe tener un tamaño de tal manera que pueda maniobrarse, se coloca sobre lijas o discos abrasivos hasta que las rayas existentes del corte desaparezcan pasándoseles de los abrasivos gruesos a los fines, siempre manteniéndola fría. En cada operación de pulido, la muestra se mueve en sentido perpendicular a las rayas existentes.

**MONTAJE.** - Las muestras que son pequeñas o incómodas para pulirse deben montarse en plásticos para facilitar el pulido intermedio y final. Los materiales plásticos que más se utilizan son la baquelita, en bases de tamaño uniforme, generalmente 2.5, 3 y 4 cm de diámetro. La lucita es otro plástico de uso común, es transparente y esto es útil para observar el área que se pule, o cuando se desea ver la muestra en la base.

Estos plásticos deben ser resistentes a los reactivos que se emplean posteriormente al pulido.

**PULIDO INTERMEDIO.**— La muestra después de montarse en plásticos se lleva a pulir en una serie de lijas con abrasivos más finos en forma secuencial. El abrasivo que se emplea primero es el número 1, luego (0), (00), (000). Generalmente se sigue la operación al pasar de una lija a otra, de girar la posición de la muestra y generalmente se hace en seco, aunque se emplean también refrigerantes.

**PULIDO FINAL.**— La fase final del pulido se lleva a cabo en discos giratorios húmedos cubiertos con telas o paños especiales y con abrasivos seleccionados, según el material a pulirse y el estudio metalográfico a realizar. Los abrasivos para pulido fino son óxido de aluminio para metales ferrosos y cobre; óxido de cerio para aluminio, magnesio, otros abrasivos son pasta de diamante, óxido de magnesio y óxido de cromo.

Los palos con que se cubren los discos van desde la seda, paño de billar, lana, terciopelo.

**ATAQUE QUIMICO.**— Para hacer visibles las características de las microestructuras del metal o aleación se realiza el ataque químico; debido al ataque de una o más fases, estas se ven reveladas; las fronteras de los granos.

Los reactivos utilizados son el nital, picral, cloruro férrico con ácido hidrocórico, persulfato de amonio, ácido hidrofúorico etc.

En general los reactivos para ataque metalográfico se componen de ácidos orgánicos e inorgánicos disueltos en agua, alcohol, glicerina, glicol, o mezclas de varios disolventes.

El metal se emplea en aceros al carbono para observar la perlita, para diferenciar la ferrita de la austenita.

El picral se emplea para todos los aceros con un tiempo de ataque de unos cuantos segundos a un minuto. El ácido hidrofúorico, se usa en aluminio y sus aleaciones frotándolo con algodón por 20 segundos.

**MICROSCOPIO METALOGRAFICO.**— Las muestras son opacas a la luz, por esto debe ser iluminada con luz reflejada. Un haz de luz horizontal que se produce en una lámpara es reflejada por medio de un vidrio plano hacia el objetivo del microscopio y sobre la superficie de la muestra se amplifica al pasar a través del objetivo y a través del vidrio plano, luego se ve amplificada otra vez al pasar por el ocular. El poder de amplificación se obtiene con los números de los objetivos y los oculares y con la longitud del tubo adecuado. La máxima ampliación de un microscopio óptico es de 2000X.

Mayor poder de resolución se obtiene en el microscopio eléctrico, que con lentes adicionales puede alcanzar hasta 2000 000X con casi los mismos pasos de preparación de la muestra y al llevarla a la observación se le hace una preparación adicional especial.



DUREZA

Se llama dureza a la resistencia que presentan los cuerpos a ser penetrados por otros. Esta característica se encuentra relacionada con las propiedades elásticas y plásticas de los materiales.

Si a un material determinado lo ensayamos rayando su superficie con una pieza afilada de dureza conocida, se dice que esa superficie es más dura que la pieza afilada, si ésta no consigue rayar la superficie de la probeta.

La dureza nos da una idea de otras propiedades mecánicas si se toma en cuenta que los tratamientos térmicos, el trabajo mecánico, el vaciado de la pieza pueden variar los valores de dicha dureza.

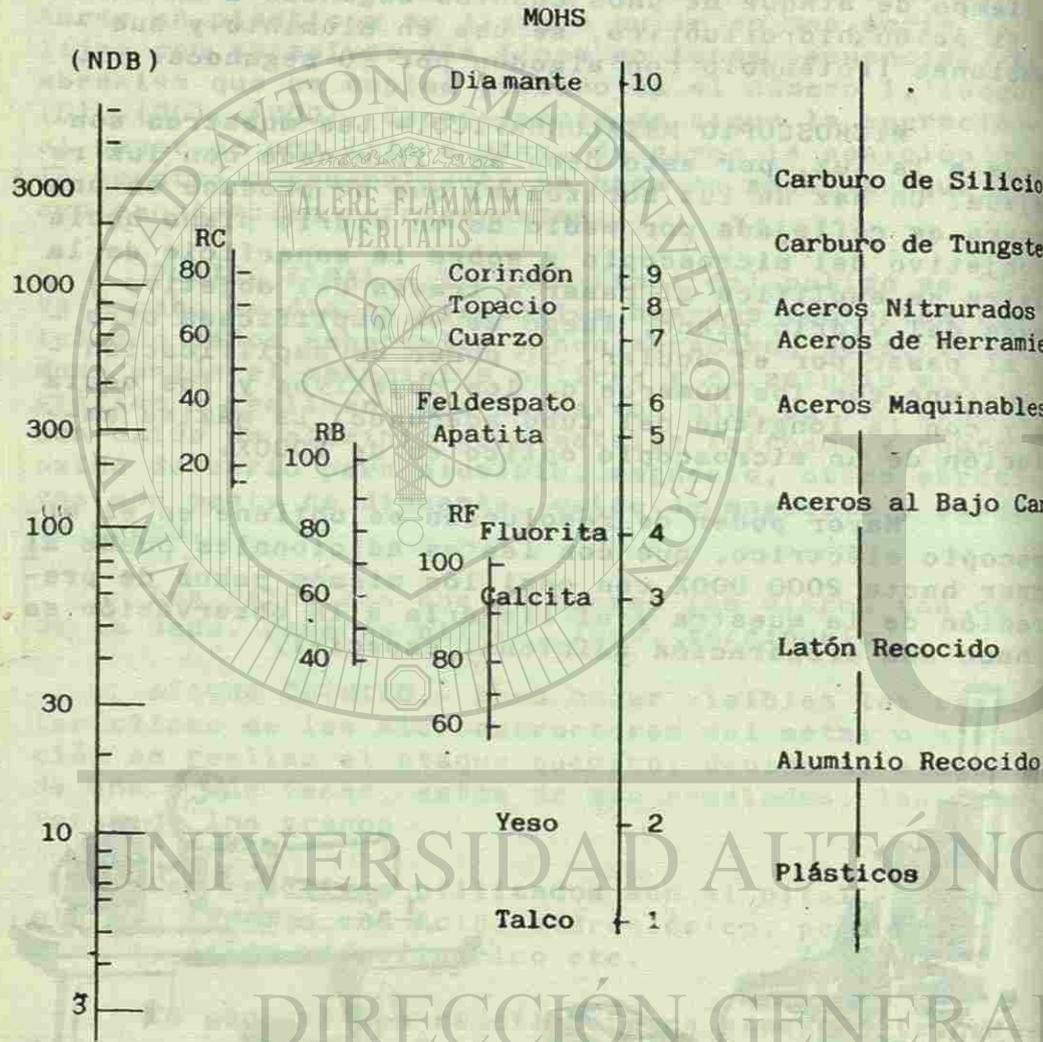
La dureza no es un término absoluto y al hablar de ella habrá que indicar el método para determinarla.

Existen muchos métodos de medición, que se pueden clasificar según el procedimiento empleado en los siguientes:

- 1º.- Los que miden la resistencia al corte o a la abrasión
- 2º.- Los que miden la dureza elástica
- 3º.- Los que miden la resistencia a la penetración.

La manera más simple de determinar la dureza - al corte o a la abrasión es compararlo con la escala mineralógica de Mohs, y en la que cada uno de los minerales raya a todos aquellos que tienen un número inferior al suyo y es a su vez, rayado por los que tienen un número superior al mismo.

El ensayo se realiza rayando la superficie de la muestra con los materiales de la escala de Mohs.



COMPARACION DE LAS ESCALAS DE DUREZA

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| 1º.- Talco             | 2º.- Yeso                   |
| 3º.- Calcita           | 4º.- Fluorita (espato-flor) |
| 5º.- Apatita           | 6º.- Feldespato (ortoclasa) |
| 7º.- Cuarzo            | 8º.- Topacio                |
| 9º.- Safiro (corindón) | 10º.- Diamante.             |

**ESCLEROSCOPIO.**- Por este método se utiliza el escleroscopio que mide la cantidad de energía que absorbe un material dentro de la zona elástica. El aparato mide la altura de rebote de un pequeño martinete que en la punta lleva un diamante y cae desde una altura determinada sobre la superficie que se va a ensayar. El aparato lleva un cuadrante indicador en el que se registra la altura de rebote del martillo. La energía potencial del martinete se convierte en energía cinética hasta el momento de incidir sobre la superficie, ese instante parte de la energía lo absorbe el material y el resto es la altura del rebote.

**DUREZA A LA PENETRACION.**- Por este método se prueban materiales bajo cargas determinadas y penetradores conocidos. Los ensayos más utilizados son:

- 1º.- Brinell, 2º.- Rockwell, 3º.- Vickers.

El ensayo brinell consiste en medir el área de una superficie esférica de la huella dejada en la probeta por una bola de acero endurecida de un diámetro de 10 mm. aplicada durante un tiempo de 15 segundos para el hierro y el acero, y de 30 segundos para los metales blandos, la carga es de 300 kgs. para el hierro y el acero, y de 500 kilos para metales blancos (aleaciones de aluminio, latón, bronce, etc.).

Para calcular el área se mide el diámetro aparente de la huella por medio de un microscopio, que lleva un calibrador, con una aproximación de 1/20 de mm. Estos datos se aplican en la siguiente fórmula.

$$BHN = \frac{L}{\frac{\pi \times D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Generalmente no se requiere hacer el cálculo, ya que existen tablas para convertir el diámetro de la huella observada al número de dureza brinell.

Si el material es muy duro se usa una bola de carburo de tungsteno, para llegar a durezas de 650 brinell.

**ENSAYO ROCKWELL.**- El método más empleado -- por la rapidez de su operación. Consiste en medir la penetración de un diamante cónico ó de una bola de acero (de distintos diámetros) bajo una carga determinada

Al iniciar la prueba se aplica una carga de 10 kilos y se pone a cero el indicador, después se aumenta la carga hasta el valor máximo fijado para la prueba y se lee en la escala correspondiente del indicador el número de dureza rockwell.

El disco indicador está fijo en la máquina, -- justo sobre el vástago al que se adapta el penetrador -- mediante un enlace mecánico, cualquier movimiento vertical del penetrador se traduce en una rotación de la aguja del indicador.

Lleva grabadas 2 series de números, una en color rojo y otra en negro, los rojos son para la escala RB y también para las demás escalas que emplean bolas diferentes de la de 1/16 de pulgada. Los números negros son para la RC y los demás que emplean el penetrador de diamante.

Los penetradores de bola de acero son de 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 de pulgada de diámetro y un penetrador cónico de diamante de 120º.

Generalmente las cargas mayores son de 60, 100, 150 kilos en rockwell normal y de 15, 30 y 45 kilos en rockwell superficial.

Las escalas más empleadas son la B (carga de 100 kilos y bola de 1/16 pulgada) y la C (carga de 150

kilos y penetrador de diamante).

**ENSAYO VICKERS.**— El principio es similar al del método brinell. En el método vickers el penetrador es una pirámide de diamante de base cuadrada y con ángulo en el vértice de 136°.

El número de dureza vickers se obtiene dividiendo la carga aplicada en kilogramos por el área de la impresión dejada por la pirámide. Las cargas que se aplican durante 30 segundos está entre 1 y 10 kilos. Generalmente se emplean cargas de 50 kilos. Para materiales blandos ó delgados se utilizan 5 kilos. La longitud de la diagonal de la huella se mide por medio de un microscopio ocular en milésimas de mm.

Estos datos se aplican a la fórmula.

$$D.P.H. = \frac{1,854 L}{d^2}$$

Medidas para efectuar los ensayos de dureza. Para realizar cualquier ensayo de dureza se deben tomar precauciones para obtener la mayor exactitud. Los factores que influyen para esto son los siguientes:

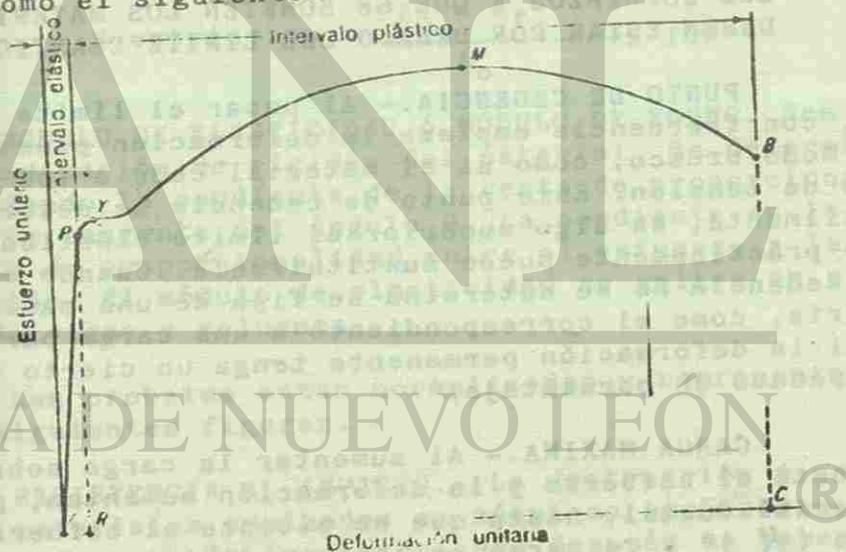
- a).— Estado del penetrador
- b).— La exactitud de la carga aplicada
- c).— Aplicación rápida de la carga
- d).— Superficie de la muestra
- e).— Espesor y forma de la muestra
- f).— Localización de las impresiones
- g).— Uniformidad del material.

Todos los ensayos de dureza pueden convertirse de uno a otro y se para el caso de los aceros a la resistencia a la tensión.

## RESISTENCIA A LA TENSION

Para determinar ciertas propiedades mecánicas, se realiza el ensayo de tensión. La probeta con dimensiones normalizadas se coloca en la máquina de prueba se le somete a una carga axial por medio de un sistema de palancas, mecánica o hidráulica. La fuerza se indica en la carátula de un indicador. Conociendo el área transversal de la probeta, se calcula el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide por medio de un extensómetro. La deformación unitaria se obtiene dividiendo el alargamiento medido entre la longitud marcada en la probeta. La resistencia a la tensión es el esfuerzo máximo de tensión que puede resistir un material antes de romperse.

Cuando se realiza el ensayo se obtiene un diagrama como el siguiente:



GRAFICA ESFUERZO DEFORMACION DE UN ACERO DUCTIL

Las propiedades que se determinan en el ensayo de tensión son

**LIMITE DE PROPORCIONALIDAD.**— El material al aplicarse la carga, se deforma, proporcionalmente al esfuerzo. Si dejamos de aplicar la carga, el material

recobra rápidamente su forma original y su forma es una recta OP. El esfuerzo en el límite del punto P se le llama límite de proporcionalidad.

**LIMITE ELASTICO.**- Al aplicarse la carga, si esta se retira y el extensómetro regresa a cero, nos indica que la deformación que se produjo es elástica, cuando al aplicarse la carga y se revisa el extensómetro, se llegara a un punto tal que la aguja no regresa a cero; esto nos indica que el material tiene ahora una deformación permanente. El límite elástico se define como el esfuerzo mínimo en el que se tiene la primera deformación permanente. Para la mayoría de los metales estructurales, el límite de proporcionalidad y el límite elástico tienen casi el mismo valor.

**LOS ESFUERZOS A QUE SE SOMETEN LOS MATERIALES DEBEN ESTAR POR DEBAJO DEL LIMITE ELASTICO.**

**PUNTO DE CEDENCIA.**- Al pasar el límite elástico, con frecuencia empieza la deformación plástica de un modo brusco, como si el material cede a los esfuerzos de tensión. Este punto de cedencia se determina fácilmente, es algo superior al límite elástico, aunque prácticamente puede sustituirse. Cuando el punto de cedencia no se determina se fija de una manera arbitraria, como el correspondiente a una carga para la cual la deformación permanente tenga un cierto valor, expresado en porcentaje.

**CARGA MAXIMA.**- Al aumentar la carga sobre la probeta el esfuerzo y la deformación aumentan, para un material dúctil, hasta que se alcanza el esfuerzo máximo ( $M$ )° y la carga se obtiene dividiendo el esfuerzo máximo, entre el área transversal de la probeta original. Un material frágil se rompe cuando llega al esfuerzo máximo, en cambio el material dúctil continúa deformándose.

**CARGA DE RUPTURA.**- En un material dúctil, esto se sigue alargando, disminuyendo la carga conforme el área decrece. Esta deformación no es uniforme y ocurre

rápido hasta el punto en que el material se rompe. La resistencia a la ruptura se obtiene al dividir la carga de ruptura entre el área de la probeta original, es menor que la resistencia máxima. Para un material frágil, la carga máxima y la de ruptura coinciden.

**DUCTILIDAD.**- Se determina por la cantidad de deformación que soporta hasta que se rompe la probeta.

Las partes de la probeta se juntan después de la ruptura y se mide la distancia entre las marcas que se le habían hecho a la probeta antes de la prueba para dar:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

también se juntan las partes de la probeta y se mide el área transversal mínima y se aplica la fórmula:

$$\% \text{ estricción} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

**MODULO DE ELASTICIDAD ó MODULO DE YOUNG.** Nos da una indicación de rigidez del material. Se determina conociendo la pendiente de la recta de proporcionalidad o la tangente del ángulo  $\theta$ . La pendiente es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. El módulo de elasticidad se aplica en el diseño de vigas y columnas.

Las probetas están normalizadas y representan en las siguientes figuras.

**RESISTENCIA AL IMPACTO.**- La destrucción de ciertos materiales empleados en máquinas que operan sometidas a fuerzas de impulsión, aún después de haberse sometido a pruebas de tensión y dar resultados satisfactorios, se llevan a ensayo de percusión para descubrir los materiales propensos a la fractura por choque. La resistencia es la propiedad contraria a la fragilidad, o sea la propiedad por la que los cuerpos se oponen a la rotura por choque.

La prueba de impacto consiste en hacer una entalla en la probeta, sujetarla en la máquina de prueba

y romperla por el golpe dado con un péndulo. La prueba no tiene valor absoluto, es comparativo. Se utiliza para comprobar si un cierto material ha sido tratado mecánicamente bien.

Existen dos métodos standarizados para los ensayos al impacto, el de Izod y el de Charpy.

El método Izod, sujeta la probeta en la entalla al nivel de la parte superior de la mordaza, al soltar el péndulo desde cierta altura, golpea a la probeta al llegar al punto más bajo del recorrido. La altura a que llega el péndulo después de romper la probeta se mide en un cuadrante graduado, que da la energía absorbida en la rotura de la probeta.

En el método Charpy, la probeta se sujeta entre dos soportes, en la parte inferior del recorrido del péndulo. La entalla está exactamente en el centro y en la cara opuesta recibe el impacto.

La energía absorbida se mide como en la izod. El aparato lleva en el cuadrante una aguja, con rozamiento suave, que es empujada por el brazo del péndulo. Se queda en la posición extrema de la oscilación cuando el péndulo inicia el movimiento contrario. El cuadrante da directamente el valor de la resiliencia, para cada tipo de probeta standard.

**RESISTENCIA A LA FATIGA.**— Se le llama fatiga de un metal a la disminución de resistencia que sufre un material cuando se somete a una serie de esfuerzos repetidos, es una prueba de tipo dinámico. La fatiga se debe a las pequeñas grietas o fisuras que se van haciendo más grandes por los esfuerzos repetidos hasta que la pieza se rompe.

Existen diferentes tipos de máquinas para determinar el límite de resistencia a la fatiga en los metales, veremos la de más uso que es la del Método de Flexión tipo cantiliver de brazo rotatorio. La probeta trabaja como viga en voladizo, llevando un peso colgado en su extremo libre. La probeta de sección uniforme transversal, se varía su momento de inercia en el

punto de carga al máximo en el soporte.

Los esfuerzos que soporta cada fibra, debido al momento de flexión, varían de compresión a tensión cada  $180^\circ$  de giro.

Si se traza la curva del ensayo, los esfuerzos como coordenadas y el número de ciclos para producir la ruptura, la curva tiende a ser una asíntota a un esfuerzo mínimo y debajo de ésta curva el material es resistente a la fatiga.

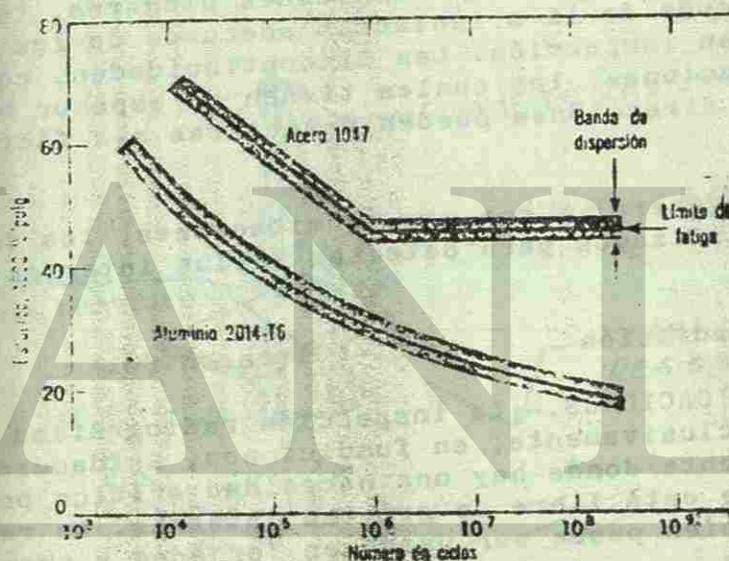


DIAGRAMA DEL ENSAYO DE FATIGA PARA DETERMINAR EL LÍMITE DE DURACION DE LOS METALES.

## INSPECCION RADIOGRAFICA

**INTRODUCCION.**- La radiografía es un método utilizado para detectar fallas de un componente que exhiba una diferencia en espesores o densidad física del material. Diferencias grandes son más fáciles para detectar que diferencias menores. En general, la radiografía puede detectar únicamente las fallas que tengan un espesor apreciable en una dirección paralela al haz de radiación. Esto significa que la habilidad de un proceso para detectar discontinuidades planares, como grietas, depende de la orientación adecuada de las piezas durante su inspección. Las discontinuidades, como poros e inclusiones, las cuales tienen un espesor medible en todas direcciones pueden detectarse más fácilmente.

En general y con sus limitaciones, los dos medios más utilizados para detectar fallas internas son:

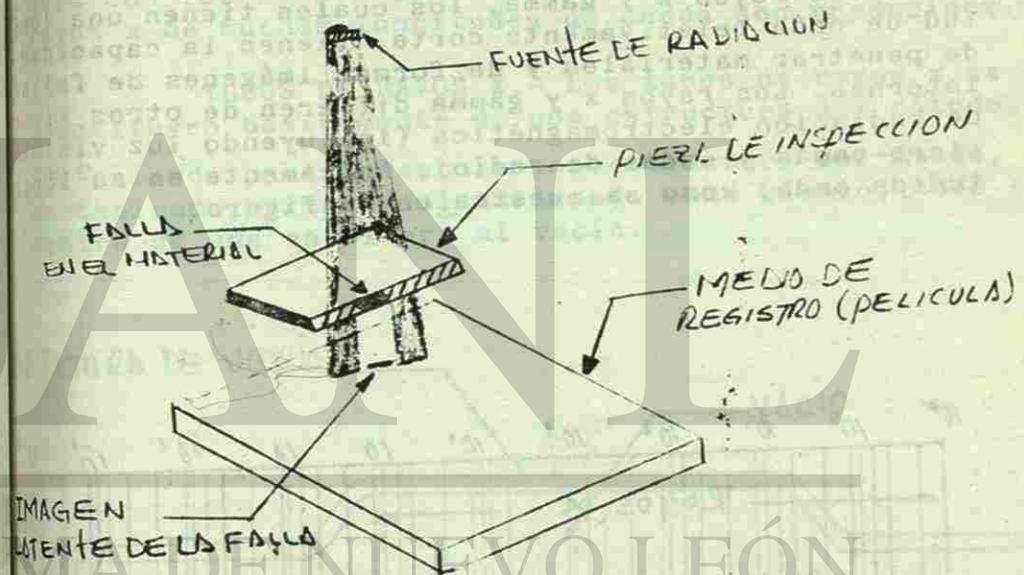
- 1.- Radiación
- 2.- Ultrasonido.

**APLICACIONES.**- La inspección radiográfica es utilizada, exclusivamente, en fundiciones, soldaduras y particularmente donde hay una necesidad crítica para asegurarse que está libre de grietas internas. La radiografía también puede ser usada en forjados y ensamblajes mecánicos.

**LIMITACIONES.**- Comparado con otros medios de inspección no destructiva, la radiografía es costosa. Costos relativamente altos y espacios grandes, son requeridos para un laboratorio radiográfico. De otra manera, cuando fuentes de rayos x ó gamma, el espacio es requerido únicamente para proceso e interpretación.

Ciertos tipos de fallas son difíciles para detectar por radiografía. Las grietas que pueden ser detectadas, a menos que estén esencialmente paralelas al haz de radiación.

**PRINCIPIOS DE RADIOGRAFIA.**- Tres elementos básicos -una fuente de radiación, una pieza de prueba (objeto a ser evaluado, y un medio de registro (usualmente película)- se combinan para producir una radiografía. Estos elementos son mostrados en forma esquemática en la fig. No.

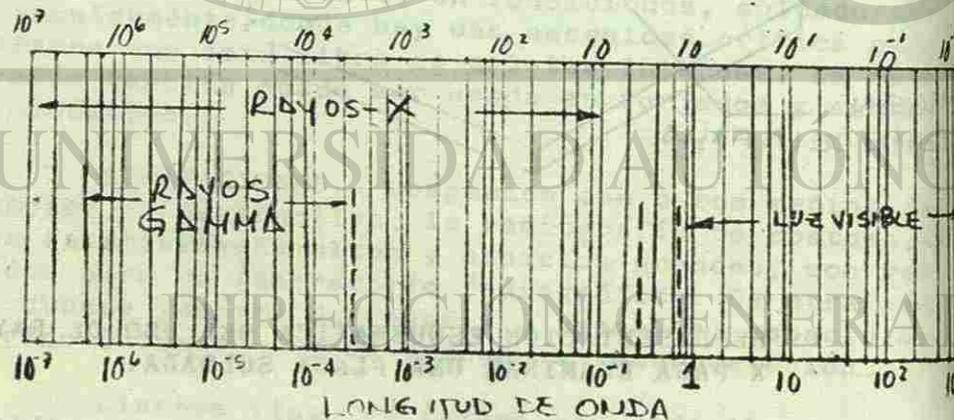


REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL USO DE RAYOS X PARA EXAMINAR UNA PLACA SOLDADA.

Es una placa de espesor uniforme que contiene una falla interna que tienen características de absorción diferentes del material homogéneo. La radiación de la fuente es absorbida por la pieza de prueba que la radiación pasa atravezada; la falla y el material homogéneo, absorben cantidades débiles de radiación.

ción: La cantidad de radiación que llega a la película en el área de la falla, es diferente a la cantidad de radiación que llega a la película en las áreas adyacentes a la falla y esto produce en la película una imagen latente de la falla, y cuando la película es revelada, puede verse como una sombra de diferente densidad fotográfica que la de la imagen del material homogéneo.

**FUENTES DE RADIACION.** Dos tipos de radiación son utilizados para inspección no destructiva. La fig. se muestra una parte electromagnética. Únicamente los rayos X y gamma, los cuales tienen una longitud de onda relativamente corta, tienen la capacidad de penetrar materiales y de formar imágenes de fallas internas. Los rayos X y gamma difieren de otros tipos de radiación electromagnética (incluyendo luz visible, micro-ondas y ondas de radio), únicamente en su longitud de onda, como se muestra en la figura.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO QUE INCLUYE RAYOS X, RAYOS GAMMA, LUZ VISIBLE Y ULTRAVIOLETA.

Los rayos X y gamma son indistinguibles, físicamente, ellos difieren únicamente en su manera, en la cual son producidos, Los rayos X son resultados de la interacción entre el movimiento rápido de electrones y átomos con el material sólido como blanco, y los rayos gamma son emitidos durante el decaimiento radioactivo de núcleos atómicos inestables.

**RAYOS X.** Dos tipos de rayos X son producidos por la interacción de un movimiento rápido de electrones hacia un material utilizado como blanco. Cuando los electrones son rápidamente desacelerados por choques con los átomos del material utilizado como blanco rayos X de muchas longitudes de ondas son producidos.

**TUBOS DE RAYOS X.** Los tubos de rayos X se constituyen básicamente de una estructura del cátodo, conteniendo un filamento y una estructura del ánodo, conteniendo un material utilizado como blanco, todo dentro de una envoltura al vacío.

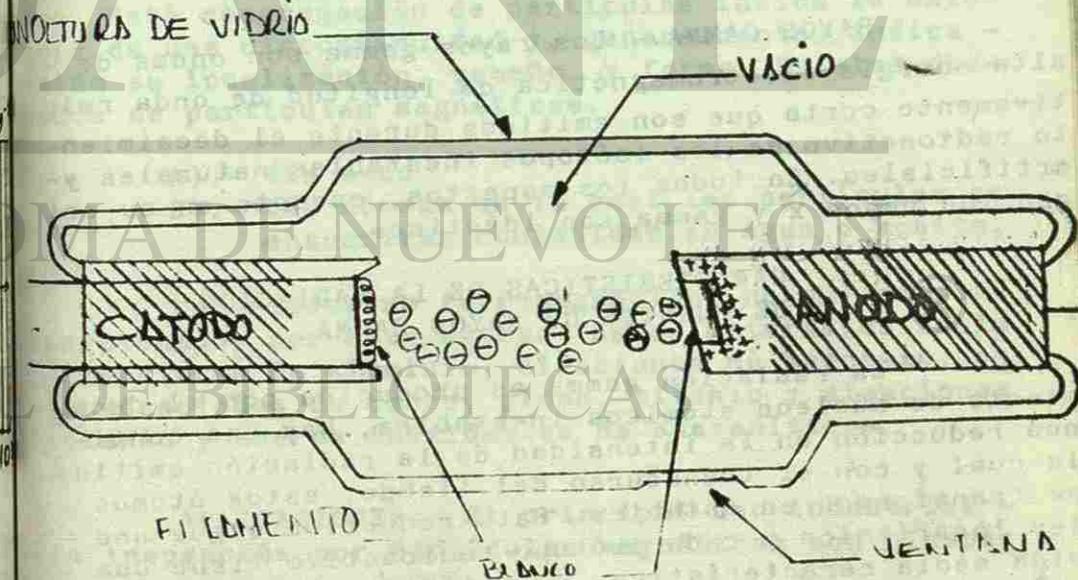


DIAGRAMA DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA UNIDAD DE RAYOS X.

La estructura del cátodo contiene un filamento y una envoltura la cual rodea el filamento. La envoltura, usualmente hecha de hierro puro ó níquel puro funciona como un lente electrostático cuyo propósito es dirigir el rayo de electrones hacia el ánodo.

El filamento, usualmente una bobina de alambre de tungsteno es calentado por una corriente eléctrica producida por un voltaje relativamente bajo. El filamento, en este estado, emite electrones los cuales son acelerados a través del espacio entre el cátodo y el ánodo. La aceleración de estos electrones es un alto potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo, el cual es aplicado durante una exposición de radiación. El ánodo usualmente consiste de una porción del material utilizado como blanco, ensamblado en una pieza de cobre que absorbe mucho del calor generado por el choque de los electrones con el material utilizado como blanco (tungsteno). El tungsteno es el material preferido para utilizar como blanco, debido:

- A).- Eficiente emisión de rayos x por su alto número atómico.
- B).- Por su alto punto de fusión.

**RAYOS GAMMA.**- Los rayos gamma son ondas de alta energía electromagnética de longitud de onda relativamente corta que son emitidas durante el decaimiento radioactivo de los isótopos inestables naturales y artificiales. En todos los aspectos, excepto en su origen los rayos x y gamma son idénticos.

#### CARACTERISTICAS DE LA RADIACION DE FUENTES DE RAYOS GAMMA.

La radiación gamma es producida por el decaimiento de núcleos atómicos inestables, hay una continua reducción en la intensidad de la radiación emitida la cual y con el transcurso del tiempo, estos átomos se transforman en estables. Esta reducción sigue una ley logarítmica y cada isótopo radioactivo tiene una vida media característica, o cantidad de tiempo que necesita para que la intensidad de radiación emitida se reduzca a un medio.

Otra característica de la fuente de radiación gamma, es la fuerza de la fuente la cual es una medida de la actividad de una fuente específica. La actividad de la fuente es medida en curies, que un curie es igual a  $3.7 \times 10^{10}$  desintegración atómica por segundo.

#### INSPECCION DE PARTICULAS MAGNETICAS

**INTRODUCCION.**- La inspección por partículas magnéticas es un método para localizar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Esto depende para su operación en que cuando el material de prueba es magnétizado, las discontinuidades que tengan una dirección transversal a la dirección del campo magnético, causará una fuga de este y formará sobre la superficie de la parte una indicación. La presencia de esta fuga de campo magnético y por lo tanto la presencia de esta discontinuidad, es detectada usando partículas ferromagnéticas muy finas, aplicadas sobre la superficie, algunas de las partículas son atraídas y sostenidas sobre la fuga del campo. Esta congregación de partículas indica la existencia de una discontinuidad y, generalmente, indica también su localización, tamaño, y forma. Existen dos métodos de partículas magnéticas.

- A).- Vía seca
- B).- Vía húmeda en la cual las partículas se encuentran contenidas en agua o aceite.

Materiales no ferromagnéticos no pueden ser inspeccionados por este método. Estos materiales incluyen aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio, cobre y aleaciones de cobre, plomo, titanio y aleaciones de titanio y aceros inoxidables de austeníticos.

**APLICACIONES.**- El principal uso industrial de la inspección por partículas magnéticas son: Inspección final; inspección de recibo, proceso de inspección y control de calidad, y mantenimiento de plantas maquinarias.

VENTAJAS.- El método de partículas magnéticas es muy sensitivo para localizar pequeñas grietas superficiales en materiales ferromagnéticos.

Discontinuidades que no se encuentran abiertas a la superficie también son detectadas, en muchos casos, por este método.

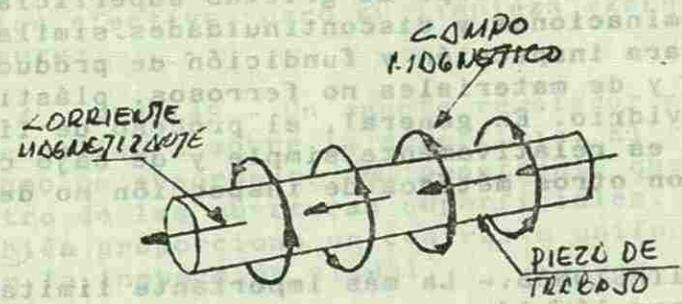
Las indicaciones de partículas magnéticas son producidas directamente en la superficie de la pieza inspeccionada, y constituyen las discontinuidades existentes. No existen formas para determinar la profundidad del defecto, pero pueden hacerse estimaciones razonables de la profundidad de éstos, partículas ferromagnéticas y técnicas apropiadas.

LIMITACIONES.- Hay ciertas limitaciones en la inspección de partículas magnéticas:

- 1.- Este método solamente trabajará en materiales ferromagnéticos.
- 2.- Para mejor resultado, el campo magnético deberá estar en una dirección que intercepte el plano principal de la discontinuidad. Algunas veces, esto requiere más inspecciones en secuencia con diferente magnetización.
- 3.- Corrientes excesivamente grandes es, algunas veces, requerido para partes muy grandes.
- 4.- El cuidado es necesario para evitar calentamiento y quemadas en las partes donde se hace el contacto eléctrico.

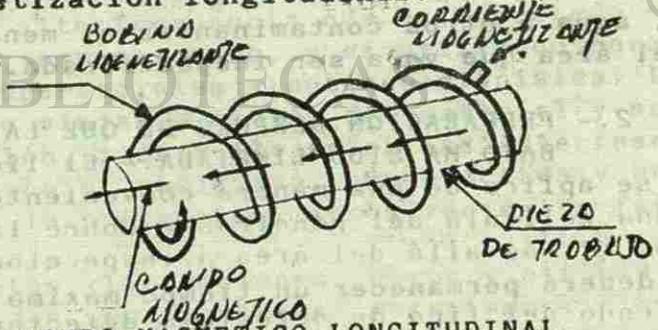
TIPOS DE CAMPOS MAGNETICOS.- Magnetización Circular.- La corriente eléctrica pasa a través de cualquier conductor recto, como un alambre o barra para crear un campo magnético circular, alrededor del conductor. Cuando el conductor de la corriente eléctrica es un material ferromagnético, el paso de la corriente induce un campo magnético en el conductor. Una parte magnetizada, de esta manera, se dice que tiene un campo magnético longitudinal que está magnetizado

circularmente. (ver figura ).



CAMPO MAGNETICO CIRCULAR.

MAGNETIZACION LONGITUDINAL.- La corriente eléctrica también puede ser utilizada para crear un campo magnético en materiales magnéticos. Cuando la corriente eléctrica pasa a través de la bobina, de una ó más vueltas, un campo magnético es establecido longitudinalmente dentro de la bobina (ver figura). La naturaleza y dirección del campo magnético, alrededor del conductor que forman las vueltas de la bobina, producirá una magnetización longitudinal.



CAMPO MAGNETICO LONGITUDINAL.

## INSPECCION POR LIQUIDOS PENETRANTES

**INTRODUCCION.-** La inspección por líquidos penetrantes es un método no destructivo para encontrar discontinuidades que están abiertas a la superficie en materiales sólidos y esencialmente no porosos. Las indicaciones de fallas pueden encontrarse y detectar su tamaño y configuración. Este proceso es disponible para la detección de todo tipo de grietas superficiales, porosidad, laminaciones y discontinuidades similares. Es utilizado para inspección y fundición de productos de acero dulce y de materiales no ferrosos, plásticos y objetos de vidrio. En general, el proceso de líquidos penetrantes es relativamente simple y de bajo costo, comparado con otros métodos de inspección no destructiva.

**LIMITACIONES.-** La más importante limitación de inspección por líquidos penetrantes es que puede detectarse únicamente fallas que se encuentran abiertas a la superficie. Otro factor que puede considerarse una limitación, es la rugosidad de la superficie que se inspecciona o que la superficie está demasiado porosa, ya que estas condiciones producirán falsas indicaciones de discontinuidades.

**DESCRIPCION DEL PROCESO.-** Este proceso requiere, de, al menos cinco pasos esenciales.

**1.- PREPARACION DE LA SUPERFICIE.-** Todas las superficies de la pieza de trabajo deberán estar limpias y secas antes de que sean sujetas a la inspección de líquidos penetrantes. Para que las discontinuidades expuestas a la superficie, se encuentren libres de aceite, agua u otros contaminantes al menos 1" más allá del área que va a ser inspeccionada.

**2.- PREPARACION DESPUES DE QUE LA PIEZA DE TRABAJO HA SIDO LIMPIADA.-** El líquido penetrante se aplica de una manera conveniente para que forme una película del penetrante sobre la superficie, al menos  $\frac{1}{2}$ " más allá del área a inspeccionar. Esta película deberá permanecer un tiempo máximo permitido, dependiendo del tipo de defecto a detectar.

**3.- REMOSION DEL EXCESO DEL PENETRANTE.-** Posterior al tiempo de penetración y exceso de penetrante, deberá removerse de la superficie el método de limpieza deberá determinarse por el tipo de penetrante utilizado. Algunos pueden simplemente removerse con agua y otros requieren el uso de solventes. Su remoción uniforme del exceso de penetrante es necesaria para una inspección efectiva, pero su limpieza excesiva es inconveniente.

**4.- REVELAR.-** Un agente revelador se aplica en forma de película sobre la superficie. El revelador actúa como un absorbedor del penetrante que se encuentra dentro de las aberturas superficiales. El revelador también proporciona un contraste uniforme para efectuar la inspección visual.

**5.- INSPECCION.-** Después del tiempo suficiente de revelado, la superficie es inspeccionada visualmente. Esa examinación deberá hacerse en un medio ambiente conveniente. La inspección de líquidos penetrantes visibles, se hace con luz blanca conveniente. Cuando es utilizada, los penetrantes fluorescentes, la inspección deberá hacerse en áreas convenientemente oscuras usando luz negra para que el penetrante pueda proporcionar luz visible.

## INSPECCION ULTRASONICA

**INTRODUCCION.-** La inspección ultrasónica es un método de pruebas no destructivas en el cual las ondas de sonido de alta frecuencia que es inyectado en el material a ser inspeccionado, y es utilizado para detectar fallas superficiales y sub-superficiales. Las ondas de sonido viajan a través del material y sufren alguna atenuación, y se reflejan en las interfases. La cantidad de sonido reflejada, es detectada y analizada para definir la presencia y localización de fallas.

Grietas, laminaciones, poros y otras discontinuidades pueden ser fácilmente detectadas.

La inspección ultrasónica se efectúa con una frecuencia del sonido de 1 hasta 25 Mhz. Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas, la inspección ultrasónica es uno de los métodos más ampliamente utilizados para la inspección no destructiva. Su aplicación principal en la inspección de materiales, es la detección y caracterización de fallas internas, también se utiliza para detectar fallas en la superficie para medir espesores, para determinar propiedades físicas, estructura y tamaño de grano.

**VENTAJAS.**— Las principales ventajas de inspección ultrasónica, con respecto a otros métodos de pruebas no destructivas, son las siguientes:

- A).— Poder de penetración muy superior, lo cual permite la detección de fallas profundas en las piezas.
- B).— Alta sensibilidad que permite la detección de fallas extremadamente pequeñas.
- C).— Mayor seguridad que otros métodos no destructivos en la determinación de la posición de fallas internas, estimando su tamaño, orientación, forma o naturaleza.
- D).— Únicamente su superficie necesita ser accesible.
- E).— La operación es electrónica, lo cual proporciona indicaciones casi instantáneas de las fallas. Esto hace el método conveniente para interpretación inmediata.

**DESVENTAJAS.**—

- A).— Requiere cuidadosa atención para la operación manual.
- B).— Un amplio conocimiento técnico se requiere para el desarrollo de procedimientos en inspección.
- C).— Partes rugosas, irregulares en tamaño, pequeñas o delgadas, o no homogéneas, son difíciles de inspeccionar.
- D).— Las discontinuidades presentes inmediatamente a la superficie, no pueden ser detectadas.
- E).— Los acoplamientos son necesarios para proporcionar transferencia efectiva de la energía de las ondas ultrasónicas, entre transductores y partes a inspeccionar.

F).— Los estándares de referencia son necesarios, ambos para calibración del equipo y caracterización de las fallas.

**APLICACION.**— La inspección ultrasónica de materiales se utiliza, principalmente para la detección de discontinuidades.

La inspección ultrasónica se usa para control de calidad e inspección de materiales en la mayoría de las industrias.

Algunos de los principales equipos que son inspeccionados por ultrasonido, son los siguientes.

- 1.— Turbinas, tubería de presión, soldaduras, recipientes a presión, flechas, herramientas de acero-automotriz y partes de ferrocarriles y aleación. Las fallas detectadas incluyen poros, grietas, inclusiones laminaciones y quemadas.

**CARACTERISTICAS GENERALES DE LAS ZONAS ULTRASONICAS.**— Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas (en contraste, por ejemplo, con la luz o rayos X los cuales son ondas electromagnéticas), que consisten de oscilaciones y vibraciones de partículas moleculares de una substancia. Las ondas ultrasónicas pueden ser propagadas en un medio elástico, el cual puede ser sólido o líquido o gaseoso, pero no en un vacío.

Cuando las partículas moleculares de un material elástico se desplazan de su posición de equilibrio por cualquier fuerza aplicada, esfuerzos internos actúan para retornar las partículas a su posición original. El actual desplazamiento de la materia que ocurre en ondas ultrasónicas, es extremadamente pequeño. La amplitud de vibración y velocidad, difieren en sólidos líquidos y gases, por la diferencia en la distancia entre partículas que forman la materia.

ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Los metales al solidificar observan estructuras cristalinas, que es un arreglo geométrico de átomos o moléculas. Si recordamos el esquema de la estructura atómica, para explicar como pueden unirse entre sí varios átomos del mismo o de diferentes elementos para la formación de una molécula o un cristal, decimos que esta unión se debe a las fuerzas eléctricas y magnéticas de los componentes.

Estas fuerzas de atracción que mantiene unidos a los átomos o moléculas en un sólido se deben a los siguientes enlaces: Iónico; Covalente; Metálico; Fuerzas de Van Der Walls.

SISTEMAS CRISTALINOS.- Los átomos al solidificar toman posiciones relativamente fijas para formar cristales y lo hacen de modo que quedan en contacto unos con otros, en la forma más estable, ordenándose a lo largo de tres dimensiones, pudiendo imaginarnos que forman una red que llena todo el espacio ocupado por el cristal. Esta red tridimensional de líneas imaginarias que conecta a los átomos se le llama red espacial y la unidad más pequeña que presenta la misma simetría del cristal se conoce como celdilla unitaria. Cada uno de los metales tiene una celdilla unitaria específica y se define por sus parámetros a, b, c, en los ejes x, y, z con los ángulos

Existen 14 tipos de redes espaciales clasificadas en siete sistemas cristalinos; como se indica en la tabla.

La mayoría de los metales de uso común, cristalizan en los sistemas cúbicos o en el hexagonal y los tipos de red espacial que se encuentran convenientemente son: cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.); cúbica centrada en las caras (f.c.c.) y hexagonal compacta (c.p.h.).

CUBICA CENTRADA EN EL CUERPO.- Este tipo de red espacial se presenta en el cromo, tungsteno, hierro

TRICLINICO.

Tres ejes desiguales, sin ser perpendiculares, cualquiera dos de ellos.  
 $a \neq b \neq c$   $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

MONOCLINICO

Tres ejes desiguales, uno de los cuales es perpendicular a otros de los dos restantes  
 $a \neq b \neq c$   $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$

ORTORROMBICO

Tres ejes desiguales, mutuamente perpendiculares.  
 $a \neq b \neq c$   $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

ROMBOEDRAL (TRIGONAL)

Tres ejes iguales, no a ángulos rectos  
 $a = b = c$   $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

HEXAGONAL

Tres ejes iguales coplanares a  $120^\circ$  y un cuarto eje desigual perpendicular a su plano  
 $a = b \neq c$   $\alpha = \beta = 90^\circ$   $\gamma = 120^\circ$

TETRAGONAL

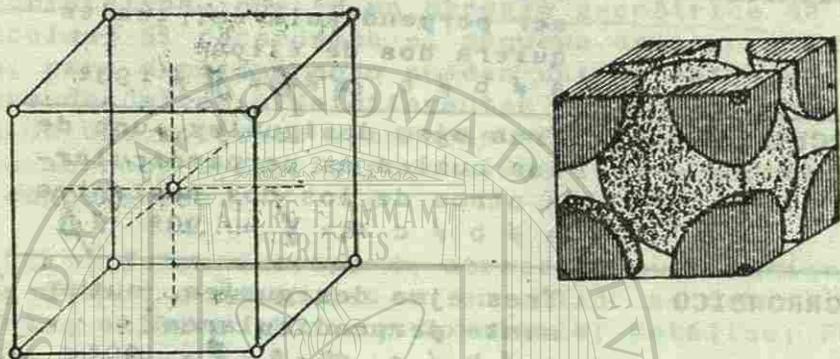
Tres ejes perpendiculares, solamente dos iguales  
 $a = b \neq c$   $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

CUBICO

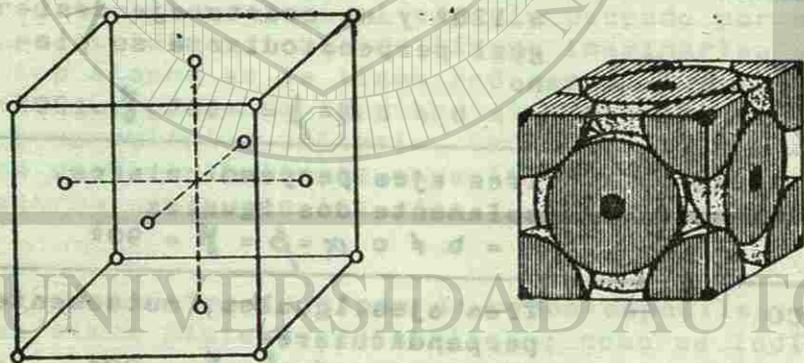
Tres ejes iguales, mutuamente perpendiculares  
 $a = b = c$   $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

DE BIBLIOTECAS

alfa ( $\alpha$ ) y hierro delta ( $\delta$ ), molibdeno, vanadio, sodio. La celdilla unitaria de la cúbica centrada en el cuerpo contiene dos átomos.



**CUBICA CENTRADA EN LAS CARAS.** - Aluminio, Oro, Plata, Platino, Cobre, Hierro gamma ( $\gamma$ ) son algunos de los metales que cristalizan en este tipo de red. - contiene esta celdilla cuatro átomos.



**HEXAGONAL COMPACTA.** - La celdilla unitaria c.p.h., contiene dos átomos. El magnesio, berilio, cinc, cadmio y hafnio son ejemplos de metales que cristalizan en este tipo de red espacial.

**POLIMORFISMO.** - Es la propiedad de un material en el estado sólido de existir en más de un tipo de red espacial. Si este cambio de red es reversible, se le llamarán alotrópico. Este fenómeno es un cambio de fase dentro del estado sólido. El caso más co

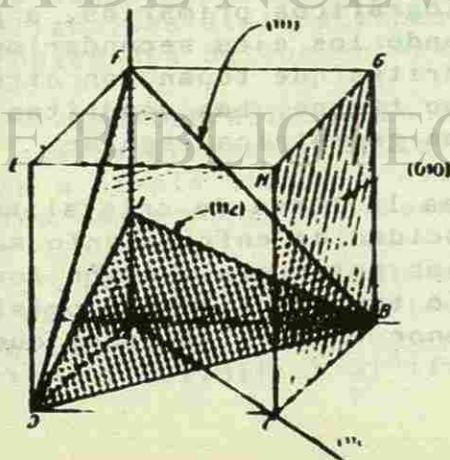
mojado es el del hierro delta (b.c.c.) a hierro gamma (f.c.c.) y luego a hierro alfa (b.c.c.). Cuando - menos quince metales presentan esta propiedad.

La transformación de una variedad alotrópica en otra tiene lugar al pasar por determinadas temperaturas, por analogía con lo que sucede en los cambios de estado, se les llama también puntos críticos. El cobalto a 1159° C cambia de c.p.h. a f.c.c.

**PLANOS ATOMICOS.** - Los planos sobre los cuales están ordenados los átomos se les llama plano cristalográfico o plano atómico.

La relación que existe entre un conjunto de planos con los ejes de las celdillas unitarias se les conoce con el nombre de Indices de Miller. Un extremo de la celdilla unitaria es el origen de las coordenadas espaciales y cualquier conjunto de planos se identifica con los recíprocos de las intercepciones con las coordenadas. La unidad de las coordenadas es el parámetro de la red del cristal. Si el plano es paralelo al eje, lo intercepta en el infinito.

Cuando los índices de Miller para un plano son fracciones, estas deben convertirse a enteros. Los planos paralelos tienen los mismos índices. Los parentesis alrededor de los índices de miller representan un conjunto de planos paralelos, las llaves forman una familia de planos de la misma forma.



**DETERMINACION DE LOS INDICES DE MILLER:**  
EL PLANO (010), EL PLANO (111) Y EL PLANO (112).

**CRISTALIZACION.**- La cristalización es la transición del estado líquido al sólido y se presenta en 2 pasos:

1.- Formación de núcleos y 2.- Crecimiento del cristal.

Cuando un metal está en estado líquido, la energía cinética es muy grande, aunque las fuerzas de atracción tratan de formar agrupaciones atómicas, son rápidamente destruidas, apenas se forman, por los choques que se originan entre ellos y los átomos libres. Al bajar la temperatura la energía cinética es menor y la energía desarrollada en los choques son las agrupaciones y por lo tanto la viscosidad del líquido, hasta equilibrar la energía cinética en la fuerza de atracción. Al no destruirse las agrupaciones por los átomos que chocan con ellos, estos átomos libres se adhieren a ellos y contribuyen a su desarrollo progresivo.

Estas agrupaciones iniciales forman los núcleos con los que se inicia el estado sólido y da origen a la solidificación total del metal.

El crecimiento de estos núcleos da lugar a la formación de granos cristalinos. La solidificación se desarrolla alrededor de un esqueleto dendrítico o de forma de árbol, agrupándose los átomos, con su red apropiada y a partir de cada núcleo, a lo largo de uno de los ejes cristalográficos primarios, a partir de este se siguen formando los ejes secundarios etc, hasta formar estas dendritas que topan con otras que se van formando al mismo tiempo, Las dendritas no se desarrollan de una forma geométrica regular.

Cualquiera que sea la forma de cristalización, entre mayor sea la velocidad de enfriamiento mayor será el número de núcleos de cristalización formados y no destruidos y por lo tanto los granos cristalinos resultantes serán de menor tamaño, al tener que repa-

arse la misma cantidad de materia en mayor número de granos cristalinos. Es geoméricamente imposible que en las superficies de contacto de cristales o granos coincidan sus respectivas redes espaciales, por lo que entre los granos quedan ciertos espacios irregulares.

Esto da lugar a una estructura amorfa intergranular en la frontera del grano, en la que los átomos están espaciados irregularmente, con una concentración de impurezas atómicas en esa área.

**IMPERFECCIONES CRISTALINAS.**- Por lo anterior es obvio que la mayoría de los materiales al solidificarse presentan imperfecciones a escala atómica. Los principales son vacancias, intersticios y dislocaciones

Las vacancias son sitios atómicos vacíos y es característico de los metales a todas las temperaturas arriba del cero absoluto.

Los intersticios se presentan en las aleaciones con metales que tienen átomos con diferencia de diámetros atómicos muy elevados. Los intersticios hacen que se distorsione la red, también se producen al elevarse la temperatura, o por radiación con partículas nucleares, por deformación plástica y por irradiación.

La dislocación se define como una región distorsionada situada entre dos partes sustancialmente perfectas de un cristal. Existen varios tipos de dislocación los más simples son los de borde y la de tornillo o de hélice. Las dislocaciones sirven para explicar muchas propiedades de los metales.

**MACRODEFECTOS.**- En piezas coladas. Otros defectos que se presentan en la solidificación se pueden observar a simple vista, a estos se le llama macrodefectos y los más comunes son rechufes y porosidades.

Los metales líquidos al solidificarse disminuyen en su volumen. Si un molde se diseña adecuadamente con provisión para que proporcione el metal líquido a la parte que solidifica al final, la contracción de vo-

lúmen no es problema. En lingotes donde el metal se solidifica de fuera hacia adentro, la contracción o rechupe se presentará en la parte central, esta última sección se corta y se retira para trabajar el lingote.

Lo ideal en la solidificación sería que el metal se enfriase primero del fondo del molde y que el enfriamiento subiera hasta llegar a la parte superior, como esto no es posible, entonces, para reducir la formación de los rechupes se deben evitar los cambios bruscos de espesores y evitar la combinación de secciones gruesas y delgadas.

Los poros se presentan cuando los gases quedan atrapados en las piezas de fundiciones, generalmente son más abundantes y de pequeño tamaño. Se presentan debido a que los gases son más solubles en el líquido que en el sólido, y no se liberan durante la solidificación. Se presentan porosidades también, ya que algunas veces el metal líquido reacciona con sustancias, como humedad que tiene el molde. Se evitan si la arena de moldeo no se compacta demasiado y se le hacen las ventilaciones adecuadas al molde.

También en las piezas coladas se pueden producir grietas debido al enfriamiento no uniforme de la pieza, es decir, por secciones en el molde de diferentes espesores.

**TAMAÑO DE GRANO.**— En una pieza colada el tamaño de grano se determina por relaciones entre la rapidez de enfriamiento y la formación de núcleos. Si el número de núcleos que se forman es elevado, la pieza tendrá granos finos, si se forman pocos núcleos la pieza será de grano grueso. Si la pieza se enfría rápidamente, este será el factor importante para la nucleación y por lo tanto para el tamaño de grano.

Otros factores que permiten formar piezas de grano fino son:

A).— La formación de óxidos insolubles en el acero como el óxido de aluminio y de titanio.

B).— La agitación de la colada durante la solidificación, que parte los cristales antes de que crezcan mucho.

Los materiales de grano fino tienen mejor tenacidad y resistencia al golpe, son duros y de mayor resistencia que los de grano grueso. En un lingote, los granos serán de grano fino en las partes exteriores y tenderán a agrandarse en la dirección de enfriamiento, que es al centro.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se define la aleación como una sustancia compuesta por dos ó más elementos químicos, de los cuales cuando menos uno de ellos es un metal y presenta características metálicas.

Para obtener un producto de unión de dos o más elementos que se consideran aleación, se requería dos condiciones: a).- dicho producto debe ser homogéneo para que sus propiedades sean uniformes en toda la b).- Las aleaciones deben tener carácter metálico.

Un sistema de aleación contiene todas las aleaciones que pueden formarse con los elementos combinados en cualquier proporción posible. Si el sistema está compuesto por dos elementos se denomina binario, si son tres los elementos que lo componen se llama ternario, etc.

Los componentes del sistema son los elementos ó compuestos que entran a formar parte del mismo.

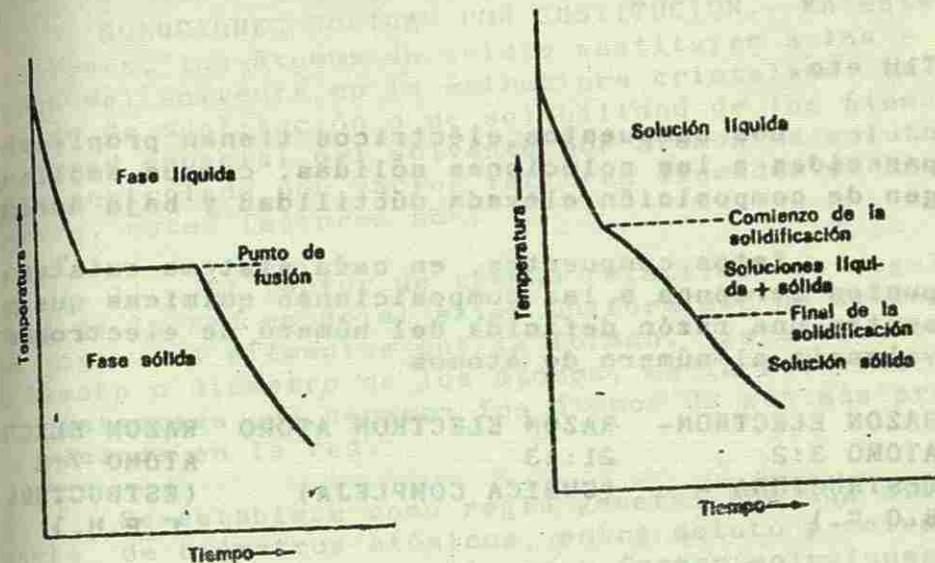
**CLASIFICACION.**— La clasificación de las aleaciones se hace de acuerdo con su estructura y los sistemas de aleación se clasifican según su diagrama de equilibrio o de fase.

**FASE.**— En un sistema se le llama fase a cada parte homogénea físicamente diferenciable de los demás vista al microscopio.

Cuando en una aleación o un metal cambia su estructura cristalina, sufre también un cambio de fase, ya que la estructura cristalina será distinta.

En estado sólido se pueden formar tres fases: 1.- Metales puros, 2) metales o fases de aleación intermedia y e).- soluciones sólidas.

Los metales puros en condición de equilibrio presentan un punto definido de fusión.



CURVA DE ENFRIAMIENTO DE UNA ALEACION Y UN METAL PURO.

Las fases de aleación intermedia presentan un punto de fusión definido, dentro de márgenes estrechos de temperatura. Cuando se forma un compuesto, los elementos que lo forman pierden en gran medida sus características propias, el compuesto tiene entonces sus propias características físicas, mecánicas y químicas. Ejemplos de los compuestos en general es la sal y el agua.

Los compuestos de una aleación son:

Los compuestos intermetálicos o de valencia -- tienen un enlace iónico y tienen características no metálicas, estructura cristalina compleja, poco dúctiles y de pobre conductividad eléctrica.

Los compuestos intersticiales son de carácter metálico elevado punto de fusión y elevada dureza, responden a fórmulas químicas, su intervalo de composición es muy estrecho. Se forman con el escandio, titanio, tántalo, tungsteno, walframio, hierro; al combinarse con el oxígeno, nitrógeno, carbono, boro. Ejemplos de compuestos intersticiales son:  $TlC$ ,  $Fe_3C$ ,  $CrN$ .

TlH etc.

Los compuestos eléctricos tienen propiedades parecidas a las soluciones sólidas, con un amplio margen de composición elevada ductilidad y baja dureza.

Estos compuestos, en cada sistema existen en puntos cercanos a las composiciones químicas que presentan una razón definida del número de electrones de valencia al número de átomos

RAZON ELECTRON- ATOMO 3:2 (ESTRUCTURA - - B.C.C.)	RAZON ELECTRON ATOMO 21:13 (CUBICA COMPLEJA)	RAZON ELECTRON ATOMO 7:4 (ESTRUCTURA - C.P.H.)
AgCd	Ag <sub>5</sub> Cd <sub>8</sub>	AgCd <sub>3</sub>
AgZn	Cu <sub>9</sub> Al <sub>4</sub>	Ag <sub>5</sub> Al <sub>3</sub>
Cu <sub>3</sub> Al	Cu <sub>31</sub> Sn <sub>8</sub>	AuZn <sub>3</sub>
AuMg	Au <sub>5</sub> Zn <sub>8</sub>	Cu <sub>3</sub> Si
FwAl	Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	FeZn <sub>7</sub>
Cu <sub>5</sub> Sn	Ni <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	Ag <sub>3</sub> Sn

**SOLUCIONES SOLIDAS.-** Una solución sólida es una solución en estado sólido que contiene átomos de dos o mas elementos en la misma red espacial.

Existen dos tipos de soluciones sólidas:

- 1.- Soluciones sólidas por sustitución
- 2.- Soluciones sólidas intersticiales.

En todas las soluciones sólidas, el que actúa como solvente conserva siempre la red espacial. Los átomos del soluto se pueden encontrar de dos maneras en las soluciones sólidas por sustitución, estos átomos reemplazan a un determinado número de átomos del solvente en la red espacial de él. En las soluciones sólidas intersticiales, estos átomos se intercalan en los espacios interatómicos de la red espacial del solvente.

**SOLUCIONES SOLIDAS POR SUSTITUCION.-** En estas soluciones, los átomos de soluto sustituyen a los átomos del solvente en la estructura cristalina. La facilidad de sustitución o de solubilidad de los átomos en la red espacial del solvente por átomos de soluto, se ve controlada por varios factores llamados de Hume-Rothery, estos factores son:

1).- El factor de tamaño relativo.- La regularidad de la red espacial exige uniformidad de dimensiones entre los elementos que la forman. Se entiende como tamaño o diámetro de los átomos, en la red, las mismas distancias que separan los átomos de sus más próximos vecinos en la red.

Se establece como regla general que una diferencia de diámetros atómicos, entre soluto y solvente mayor de 15% es desfavorable para formar soluciones sólidas, lo contrario sucede cuando la diferencia entre los diámetros atómicos de los componentes es menor de 15%.

**Factor de estructura cristalina.-** Elementos que tengan el mismo tipo de estructura cristalina tendrán una solubilidad total.

**FACTOR ELECTROQUIMICO.-** La formación de una solución sólida exige que no haya afinidad química entre los componentes, entre mayor sea la diferencia electroquímica entre dos elementos, tenderá a formar compuestos químicos y no soluciones sólidas.

El azufre, el telurio, el selenio raramente forman soluciones sólidas con los metales, por la tendencia a formar sulfuros telurios y seleniuros.

**Factor de volumen relativo.-** Uno de los factores que influyen más en la solubilidad sólida, es la diferencia de valencia entre el soluto y el solvente. Entre mayor sea la diferencia entre las valencias, tanto menor será la solubilidad y esta variará según que el elemento de mayor valencia sea el solvente o sea el soluto.

Si el metal que actúa como soluto tiene valen-

cia distinta de la del solvente, el número de electrones de valencia por átomo, cambiará es decir, la razón electrónica cambia. Un metal de menor valencia tiende a disolver más a un metal que tiene mayor valencia y viceversa.

Para que exista solubilidad total, es decir que los dos elementos se disuelvan en todas las proporciones es necesario, que ambos metales solidifiquen en la misma red espacial.

Los factores de Hume-Rothery son una guía para analizar la solubilidad de los metales, aunque hay excepciones en estas reglas.

**Soluciones sólidas intersticiales.** Cuando los átomos de radios pequeños se intercalan en los espacios o intersticios de la estructura cristalina de los átomos solventes de radio mayor se forman las soluciones intersticiales.

Los elementos de radio atómico menor de un angstrom formará soluciones sólidas intersticiales como el hidrógeno (0.46), el oxígeno (0.60), nitrógeno (0.71) carbono (0.77) y boro (0.97). Cuando al solvente se le añade una pequeña cantidad de soluto con una diferencia de radios atómicos bastante grande, se forma una solución sólida intersticial. Generalmente son de poca importancia a excepción del carbono en el hierro.

## DIAGRAMAS DE EQUILIBIO

Durante el enfriamiento o calentamiento de un metal o de una aleación aparecen y desaparecen fases, para facilitar el estudio de éstos, se tienen los diagramas de equilibrio llamados también diagramas de fases o diagramas de constitución.

Para que quede determinado el estado de un sistema en equilibrio se deben conocer los valores de tres variables independientes. Estas variables obedecen a causas exteriores al sistema y son: temperatura, presión y composición. Si la presión es la presión atmosférica y se mantiene constante, los diagramas de equilibrio nos darán los cambios de estructuras del metal o aleación, cuando varía la temperatura y la composición. Un diagrama de equilibrio nos representa gráficamente un sistema de aleación.

Cuando la variación de la temperatura en un sistema de aleación se realiza rápidamente no se presentan las mismas fases que cuando las condiciones de enfriamiento y calentamiento no llevan a cabo lentamente. En realidad los cambios de fases se presentan a temperaturas un poco arriba o abajo de las teóricas dependiendo de la velocidad de calentamiento o enfriamiento de la aleación o del metal.

Con el propósito de comprender e interpretar los diagramas de equilibrio complejos o los sistemas de aleación de varios elementos, analizaremos los diagramas binarios, que son los más sencillos y fáciles de entender.

Los diagramas de equilibrio se grafican en sistemas cartesianos, las ordenadas, son las temperaturas que pueden estar en grados centígrados o en grados fahrenheit, y las abscisas, en porcentaje en peso de los elementos que forman el sistema de aleación. También la composición se puede representar en porcentaje en átomos, pero el diagrama sería el mismo.

cia distinta de la del solvente, el número de electrones de valencia por átomo, cambiará es decir, la razón electrónica cambia. Un metal de menor valencia tiende a disolver más a un metal que tiene mayor valencia y viceversa.

Para que exista solubilidad total, es decir que los dos elementos se disuelvan en todas las proporciones es necesario, que ambos metales solidifiquen en la misma red espacial.

Los factores de Hume-Rothery son una guía para analizar la solubilidad de los metales, aunque hay excepciones en estas reglas.

**Soluciones sólidas intersticiales.** Cuando los átomos de radios pequeños se intercalan en los espacios o intersticios de la estructura cristalina de los átomos solventes de radio mayor se forman las soluciones intersticiales.

Los elementos de radio atómico menor de un angstrom formará soluciones sólidas intersticiales como el hidrógeno (0.46), el oxígeno (0.60), nitrógeno (0.71) carbono (0.77) y boro (0.97). Cuando al solvente se le añade una pequeña cantidad de soluto con una diferencia de radios atómicos bastante grande, se forma una solución sólida intersticial. Generalmente son de poca importancia a excepción del carbono en el hierro.

## DIAGRAMAS DE EQUILIBIO

Durante el enfriamiento o calentamiento de un metal o de una aleación aparecen y desaparecen fases, para facilitar el estudio de éstos, se tienen los diagramas de equilibrio llamados también diagramas de fases o diagramas de constitución

Para que quede determinado el estado de un sistema en equilibrio se deben conocer los valores de tres variables independientes. Estas variables obedecen a causas exteriores al sistema y son: temperatura, presión y composición. Si la presión es la presión atmosférica y se mantiene constante, los diagramas de equilibrio nos darán los cambios de estructuras del metal o aleación, cuando varía la temperatura y la composición. Un diagrama de equilibrio nos representa gráficamente un sistema de aleación.

Cuando la variación de la temperatura en un sistema de aleación se realiza rápidamente no se presentan las mismas fases que cuando las condiciones de enfriamiento y calentamiento no llevan a cabo lentamente. En realidad los cambios de fases se presentan a temperaturas un poco arriba o abajo de las teóricas dependiendo de la velocidad de calentamiento o enfriamiento de la aleación o del metal.

Con el propósito de comprender e interpretar los diagramas de equilibrio complejos o los sistemas de aleación de varios elementos, analizaremos los diagramas binarios, que son los más sencillos y fáciles de entender.

Los diagramas de equilibrio se grafican en sistemas cartesianos, las ordenadas, son las temperaturas que pueden estar en grados centígrados o en grados fahrenheit, y las abscisas, en porcentaje en peso de los elementos que forman el sistema de aleación. También la composición se puede representar en porcentaje en átomos, pero el diagrama sería el mismo.

Para construir un diagrama de equilibrio experimentalmente existen varios métodos, de los cuales los más comunes son:

**POR ANALISIS TERMICO.**- Este método es el más empleado. Si las temperaturas se grafican en función del tiempo, con una determinada aleación, se obtiene su curva de enfriamiento y la pendiente cambiará, cuando se presente un cambio de fase, por el calor liberado en esa transformación. Con éste método se obtiene la temperatura final e inicial de solidificación, pero no se tienen los cambios de fase en el estado sólido, ya que el calor que se desprende es muy pequeño.

**POR METALOGRAFIA.**- Por este método se calientan muestras de aleación a distintas temperaturas dejándolas el tiempo necesario a la temperatura de equilibrio y enfriándola rápidamente con el fin de que conserven la fase que tenía a la temperatura elevada, y después observarlas al microscopio.

Este método requiere de mucha experiencia, cuando se analizan metales a elevadas temperaturas ya que al observar las estructuras, no siempre las aleaciones retienen las fases que tenían antes de enfriarlas. Generalmente este método es de comprobación de los diagramas de equilibrio obtenidos.

**POR DIFRACCION DE RAYOS X.**- Por este método se miden las dimensiones de la red, y cuando aparece una nueva fase cambian las dimensiones del cristal.

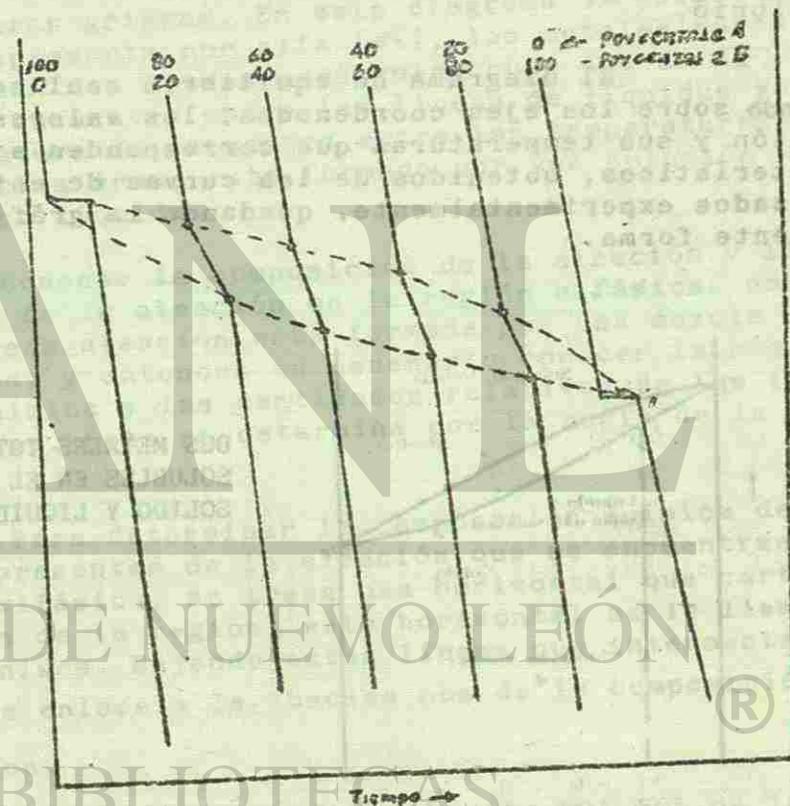
Este método permite determinar las variaciones de solubilidad en estado sólido con la temperatura, es sencillo y preciso.

#### TIPOS DE DIAGRAMAS

**1er TIPO.**- De solubilidad total en el estado sólido y en el estado líquido de dos metales.

Cuando se presenta este caso, el único tipo de fase sólida, formada será una solución sólida sustitucional, ya que ambos metales presentan el mismo sistema cristalino y la diferencia entre sus radios atómicos es menor de 8%.

Para graficarlo se toman distintas aleaciones y se trazan las curvas de enfriamiento de todo el sistema, comenzando por los metales puros, obteniéndose una gráfica como la siguiente.

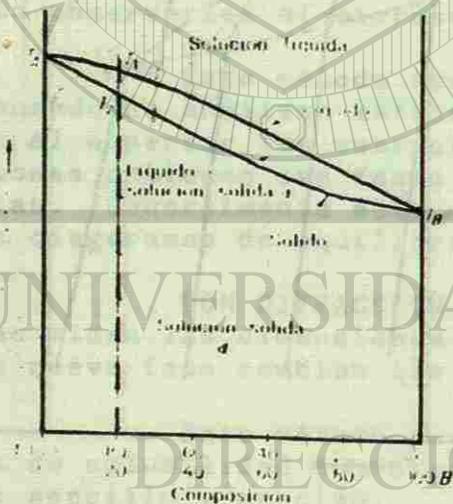


ENFRIAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALEACION

Los metales puros presentan una gráfica, -- como se vió en el capítulo anterior, y las aleaciones intermedias entre los dos metales puros, que forman el sistema, tienen dos puntos definidos con cambio de pendiente que son donde se inicia y termina la solidificación de la aleación.

Uniendo estos puntos con el tramo horizontal de los metales puros, nos da la forma del diagrama de equilibrio.

El diagrama de equilibrio real se obtiene situando sobre los ejes coordenados, los valores de la composición y sus temperaturas que corresponden a los puntos característicos, obtenidos de las curvas de enfriamiento realizadas experimentalmente, quedando la gráfica de la siguiente forma.



DOS METALES TOTALMENTE SOLUBLES EN EL ESTADO-SÓLIDO Y LÍQUIDO.

La línea que une los puntos donde se inicia la solidificación se le llama línea de liquidus y la que une los puntos donde termina la solidificación se le llama línea de solidus.

Arriba de la línea de liquidus, todas las aleaciones, incluyendo los metales puros, se presentan como una región monofásica, líquida homogénea.

Abajo de la línea de solidus, todas las aleaciones, incluyendo los metales puros, presentan una sola fase, sólida y homogénea.

Las soluciones sólidas y las aleaciones intermedias de los diagramas de equilibrio, se representan por letras griegas. En este diagrama la solución sólida se representa por alfa ( $\alpha$ ), los metales puros se representan con letras mayúsculas como A y B. El área que se encuentra entre las líneas de liquidus y cuya temperatura se encuentra entre las temperaturas-límites de esta área, esta formada por una solución sólida y otra líquida.

Conocer la composición de la aleación y la temperatura de la aleación en la región bifásica, nos indica que esa aleación está formada por una mezcla de dos fases, y entonces es necesario conocer la composición química y las cantidades relativas de las fases presentes. Esto se determina por la regla de la palanca.

Para determinar la composición química de las fases presentes de la aleación que se encuentran en región bifásica, se traza una horizontal que corta los límites de la región, esta horizontal se le llama línea de enlace. Bajando estas líneas que intersectan la línea de enlace a la abscisa nos da la composición que se busca.

Por ejemplo. En la aleación 80A-20B de la figura a la temperatura  $T_1$ , que corresponde a la zona bifásica, al aplicar lo anterior, si se marca la línea de enlace m o ; el punto m corta la línea de solidus, se lleva la vertical al eje de las abscisas, nos indicará la composición química de la solución sólida, 90A-10 B. Por el punto o, bajando la vertical al eje de la composición nos dará la composición química

mica de la fase líquida: 74A - 26 B.

Las cantidades relativas de las fases presentes se obtienen aplicando la regla de la palanca.

Las cantidades relativas de cada fase que se encuentran en equilibrio en la zona bifásica se obtienen trazando la línea de enlace; de la aleación que se analiza se baja la vertical a la composición, así mismo, otras verticales en los puntos m y o que cortan la región bifásica, este punto de intersección de ambas rectas divide a la línea de enlace en 2 partes, cuyas longitudes son inversamente proporcionales a las cantidades de las fases presentes. A esto se le llama regla de la palanca.

Si tomamos la aleación del punto n que tiene la composición 80A. En 100 gramos, de esta aleación, 80 deben ser de A y 20 de B. De tal manera se tiene:

Peso total de aleación = 100 gramos  
 Peso total del metal A = 80 gramos  
 Peso total del metal B = 20 gramos

Si representamos por w el peso de la fase sólida de la aleación en gramos y (100 - w) el peso de la fase líquida. La cantidad de A en solución sólida de la aleación es igual al peso de esta fase, por el porcentaje de A (90%) que contiene. El peso de A en la fase líquida es igual al peso del líquido por el porcentaje de A en el estado líquido (74%). Por lo tanto:

Peso de A en la fase sólida = 0.90 w  
 Peso de A en la fase líquida = 0.74 (100 - w)

El peso total del metal A en la aleación es igual a la suma de su peso en las fases líquidas y sólidas es decir;

$$80 = 0.90 w + 0.74 (100 - w)$$

Pasando los términos similares:

$$80 - 74 = (0.90 - 0.74) w$$

El peso de la fase sólida, se obtiene resolviendo para w;

$$w = \frac{80 - 74}{0.9 - 0.74} = \frac{6}{0.16} = 37.5 \text{ gramos}$$

El peso total de la aleación es de 100 gramos, el porcentaje en peso de la fase sólida es 37.5 gramos, el peso correspondiente a la fase líquida será 62.5 gramos.

La forma anterior:  $80 - 74 = (0.90 - 0.74) w$

se divide cada miembro por 100 gramos, que es el peso de la aleación se obtiene:

$$0.80 - 0.74 = (0.90 - 0.74) \frac{w}{100}$$

de donde:  $\frac{w}{100} = \frac{0.80 - 0.74}{0.90 - 0.74}$

En esta expresión, el denominador es la diferencia en la composición de las fases sólida y líquida, es decir la línea mo el numerador es la diferencia entre la composición de la fase líquida y la aleación que se está analizando. La cantidad de fase sólida está dada por:

$$\alpha = \frac{N O}{M O} \times 100$$

$$\text{Líquido} = \frac{M N}{M O} \times 100$$

Resumiendo ambas condiciones, se puede decir, que a una temperatura T, la aleación 80 A - 26B, esta formada por 62.5% de líquido, cuya composición es 74A - 26B y 37.5% del total en forma de solución sólida de composición 90A - 10 B.

**SEGREGACIONES DENDRITICAS.**- Cuando la aleación se enfría lentamente, se producen todos los cambios de fase que se tienen en el diagrama, es decir, se lleva a cabo el equilibrio, pero en la práctica, es difícil conseguir que el enfriamiento cumpla con las condiciones de equilibrio. Si la difusión en estado sólido se lleva a cabo a velocidades muy pequeñas, a velocidades de enfriamiento normales los diagramas de equilibrio reales tie-

nen diferencias con los teóricos, sobre todo en las líneas de solidificación o línea de solidus. Basándose en esto, de la figura anterior la aleación 80-A-20B al terminar su solidificación, lo hace un poco abajo de la temperatura del diagrama, — que debido a la rapidez de enfriamiento la solución sólida final estará formada por una estructura "segregada", con una parte central más rica en metal de elevado punto de fusión, rodeado por una capa más rica en metal de bajo punto de fusión, que es la que solidifica al final. Esto se le llama fenómeno de segregación dendrítica.

**HOMOGENIZACION.** / Las estructuras segregadas se originan debido a que la última porción de líquido que solidifica a lo largo de los contornos de grano y los espacios interdendríticos es rica en metal de bajo punto de fusión. Estos contornos pueden formar planos de posible rotura, dependiendo de las propiedades del metal que solidifica al final.

Para igualar la composición o lo que se conoce como homogenización de las segregaciones en el estado sólido se hace mediante el fenómeno de difusión. En los metales la velocidad de difusión a temperatura ambiente es mucho muy pequeña, pero si se calienta el metal a una temperatura un poco abajo de la línea de solidus, esta velocidad aumenta y la aleación se homogeniza en un tiempo corto. Este tratamiento se debe hacer con extremo cuidado, ya que si se calienta arriba de la línea de solidus, los contornos de grano se funden y se modifican la forma y las propiedades físicas de la aleación.

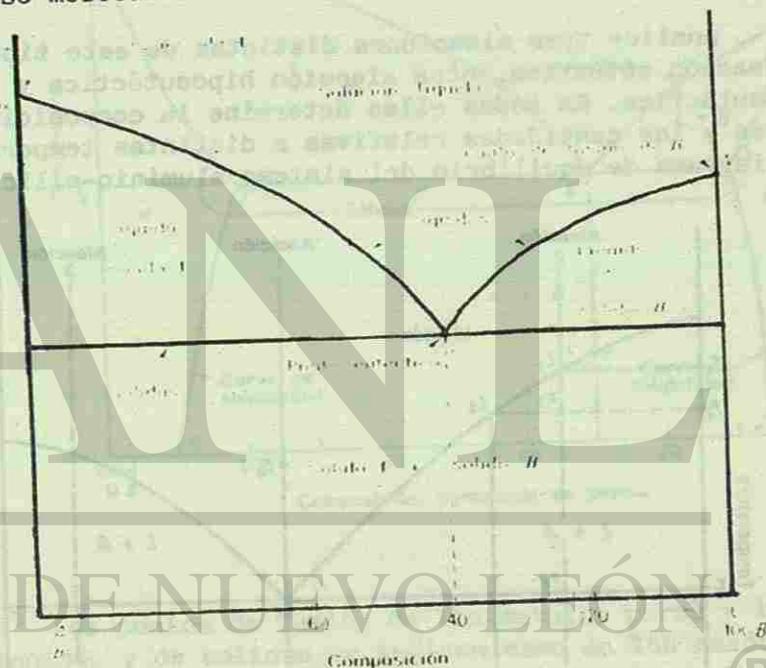
En general, los sistemas de aleación que forman una serie continua de soluciones sólidas presentan cada una un máximo valor para la resistencia y la dureza, y la ductilidad y conductividad eléctrica presentan un mínimo.

**VARIACIONES DEL TIPO I.** — Dentro de este tipo, todas las aleaciones se funden entre los puntos de fusión de A y B. En algunos sistemas se da el caso de que la línea de liquidus y la de solidus presentan un máximo o un mínimo.

Estas aleaciones se conocen como aleaciones de fusión congruente. La aleación marcada con una x se le conoce también como pseudoeutéctica. De las aleaciones que en el diagrama presentan un mínimo se encuentran los sistemas Cr — Au y Ni — Pd. El otro caso no es común y no se conoce ningún sistema de esta forma.

**TIPO II.** — Dos metales totalmente solubles en el estado líquido e insolubles en el estado sólido.

No existen ningún par de metales que sean totalmente insolubles uno en otro. En algunos casos la solubilidad es muy limitada y en la práctica se considera insoluble. La ley de Raoult indica que si a una sustancia pura se le añade otra, soluble en ella en estado líquido e insoluble en el estado sólido su punto de solidificación disminuye en una cantidad proporcional al peso molecular del soluto.



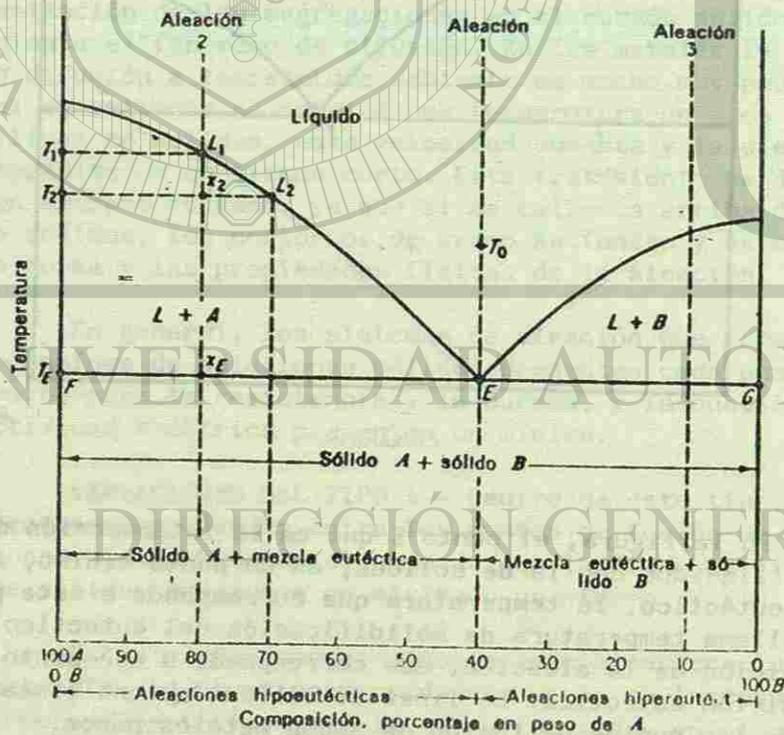
En la figura, el punto E que es la intersección de la línea de liquidus con la de solidus, es un punto mínimo, llamado punto eutéctico, la temperatura que corresponde a este punto se le llama temperatura de solidificación del eutéctico y la composición de la aleación, que corresponde a ese punto, es la composición eutéctica. La línea de solidus es una línea constante que une los puntos de fusión de ambos metales puros.

Al señalar en los diagramas de equilibrio las distintas zonas conviene empezar por regiones monofásicas, con lo que

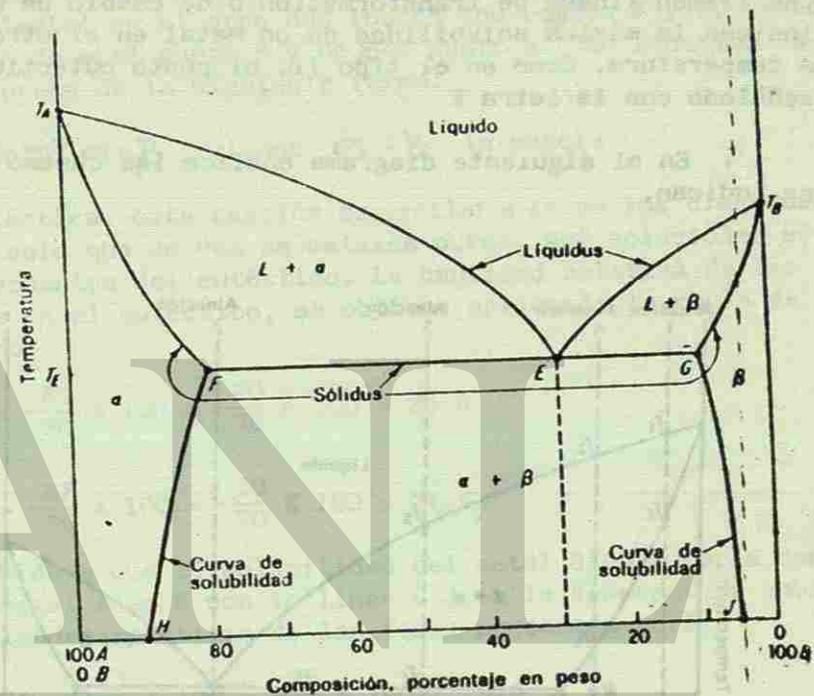
tiene que toda la línea horizontal que atraviesa una zona bifásica tiene sus extremos en zonas monofásicas.

Puesto que los dos metales son insolubles en el estado sólido, cuando comienza la solidificación, el único sólido que se forma es un metal puro; por lo tanto toda la aleación solidificada, de cualquier composición está formada por una mezcla de dos metales puros. Las aleaciones a la izquierda del eutéctico se les llama aleaciones hipoeutécticas y las de la derecha del eutéctico aleaciones hipereutécticas.

Analice tres aleaciones distintas de este tipo, la primera la aleación eutéctica, otra aleación hipoeutéctica y la aleación hipereutéctica. En todas ellas determine la composición química de las fases y las cantidades relativas a distintas temperaturas, observe el diagrama de equilibrio del sistema aluminio-silicio.



TIPO III.- Dos metales totalmente solubles en el estado líquido y parcialmente solubles en el estado sólido. Se considera como un tipo intermedio de los dos casos anteriores, la característica es de que en el estado sólido, la solubilidad de un metal en el otro presentan un límite de saturación.

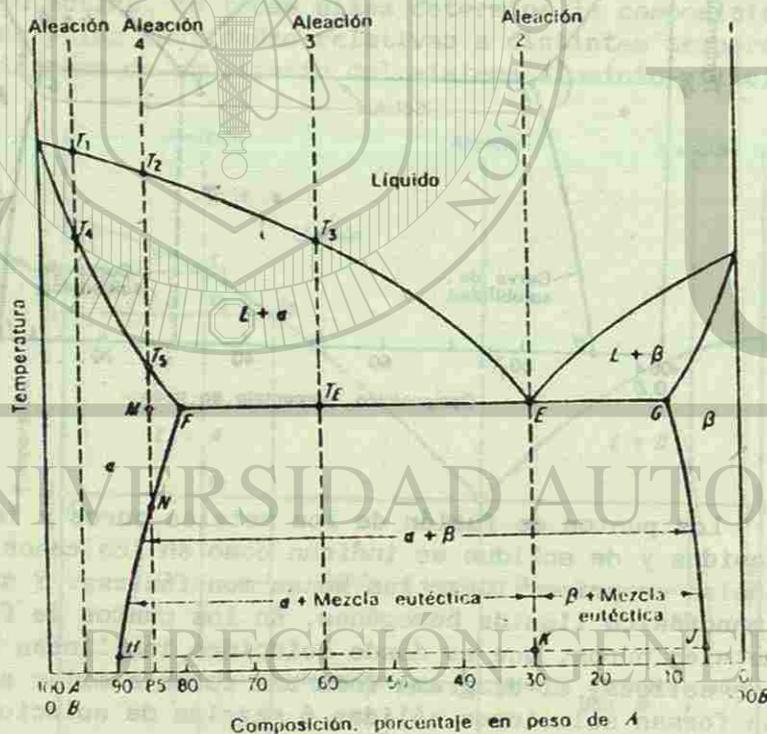


Los puntos de fusión de los metales puros y las líneas de liquidus y de solidus se indican como en los casos anteriores. Se señalan en primer lugar las zonas monofásicas. Y se tiene la zona monofásica líquida homogénea. En los puntos de fusión de los metales puros, que es donde coinciden las líneas de liquidus y la de solidus, el diagrama toma una forma similar al del tipo I y se forman soluciones sólidas ó mezclas de soluciones y se señalan con alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ) a estas zonas que corresponden a soluciones sólidas monofásicas llamadas también soluciones sólidas finales por formarse en las zonas contiguas a los ejes.

Las zonas bifásicas restantes se señalan como: líquido +  $\alpha$ ; líquido +  $\beta$  y  $\alpha + \beta$ . Al bajar la temperatura y llegar a TE

la solución sólida  $\alpha$ , disuelve como máximo 20% de metal B (punto de fusión F) y la solución sólida  $\beta$  disuelve un máximo de 10% de metal A (punto G). Al seguir bajando la temperatura, la cantidad máxima de soluto que se disuelve se indica por las líneas FH y GJ. Estas líneas se llaman líneas de transformación o de cambio de solubilidad y nos indican la máxima solubilidad de un metal en el otro en función de la temperatura. Como en el tipo II, el punto eutéctico, se encuentra señalado con la letra E.

En el siguiente diagrama analice las cuatro aleaciones que se indican.



La aleación 1 solidificará como una aleación del sistema del primer tipo. La aleación 2 cuya composición es del eutéctico, solidificará de acuerdo con lo siguiente: un poco arriba del eutéctico la aleación se encuentra en estado líquido como solución líquida monofásica homogénea, al llegar al eutéctico, la máxima solubilidad de un metal en el otro nos los da los puntos F y G, siendo la composición de  $\alpha$  el punto F y de  $\beta$  el punto G. La reacción eutéctica se expresa de la siguiente forma:

Líquido  $\rightleftharpoons \alpha + \beta$  siendo  $\alpha + \beta$  la mezcla

Eutéctica, esta reacción es similar a la de los diagramas del tipo II, solo que en vez de metales puros, son soluciones sólidas. Los componentes del eutéctico. La cantidad relativa de las fases presentes en el eutéctico, se obtiene aplicando la regla de la palanca siendo:

$$\alpha = \frac{EG}{FG} \times 100 = \frac{20}{70} \times 100 = 28.6$$

$$\beta = \frac{EF}{FG} \times 100 = \frac{50}{70} \times 100 = 71.4$$

Debido a que la solubilidad del metal B en A varía con la temperatura y la del metal A en B con la línea G J, a la temperatura ambiente, las cantidades relativas de las fases presentes será:

$$\alpha = \frac{KJ}{HJ} \times 100 = \frac{25}{85} \times 100 = 29.4$$

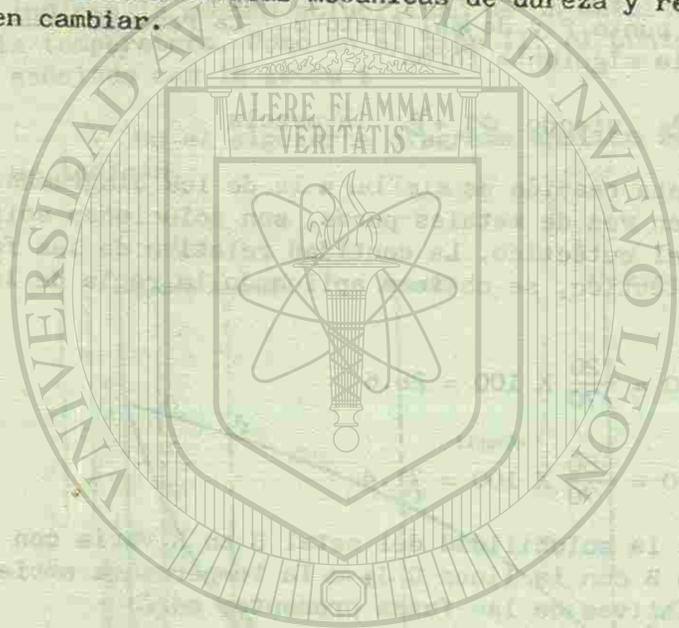
$$\beta = \frac{HK}{HJ} \times 100 = \frac{60}{85} \times 100 = 70.6$$

La aleación 3 al iniciar su solidificación forma cristales primarios  $\alpha$  proeutéticos de  $\alpha$  rico en metal A. Al bajar la temperatura y llegar a la temperatura del eutéctico las fases presentes y su composición química será 40% líquido cuya composición química es 30A - 70B y 60% de  $\alpha$  cuya composición química es 80A - 20B.

La aleación 4 sigue la solidificación similar al diagrama del tipo I, formando una solución sólida monofásica y homogénea entre los  $T_2$  y  $T_5$ . En el punto M la solución sólida no está saturada, ya que la solubilidad es FH, disminuye la solubilidad de B al bajar la temperatura. Al llegar al punto N la solución se satura del metal B Al bajar más la temperatura la aleación libera B en exceso, en forma de solución sólida  $\beta$  en los contornos

de los granos; aplicando la regla de la palanca se determina -- sus características de peso y composición química.

Si ésta fase  $\beta$  que precipita es frágil, la aleación será poco dúctil y de resistencia pequeña, y la rotura tenderá a realizarse en estas zonas. Con un adecuado tratamiento térmico, las características mecánicas de dureza y resistencia se -- pueden cambiar.



ENVEJECIMIENTO.- Para mejorar la resistencia y la dureza de las aleaciones se utilizan dos métodos: deformación en frío y calentamiento térmico.- Para las aleaciones no ferrosas es el proceso de envejecimiento. Los metales que forman la aleación deben ser parcialmente solubles en el estado sólido y la solubilidad debe decreciendo con la temperatura.

Para realizar el envejecimiento se produce en dos pasos: Calentamiento de la solución y el envejecimiento.

Si en el diagrama donde se analizan las 4 aleaciones, se observa en particular la aleación 4, se procedería de la siguiente forma: Esta aleación se calienta hasta la temperatura del punto M y toda la solución  $\beta$  que está en exceso se disuelve y la estructura de la aleación será solución sólida  $\alpha$  homogénea. Entonces se enfría rápidamente como un temple y la solución sólida sobresaturada o con exceso de soluto  $\beta$  queda retenida a la temperatura ambiente. Al templarla esta aleación se sumerge en agua -- o se enfría con agua pulverizada.

Si el medio de enfriamiento es muy enérgico se realiza en agua caliente para evitar deformaciones, grietas o tensiones internas.

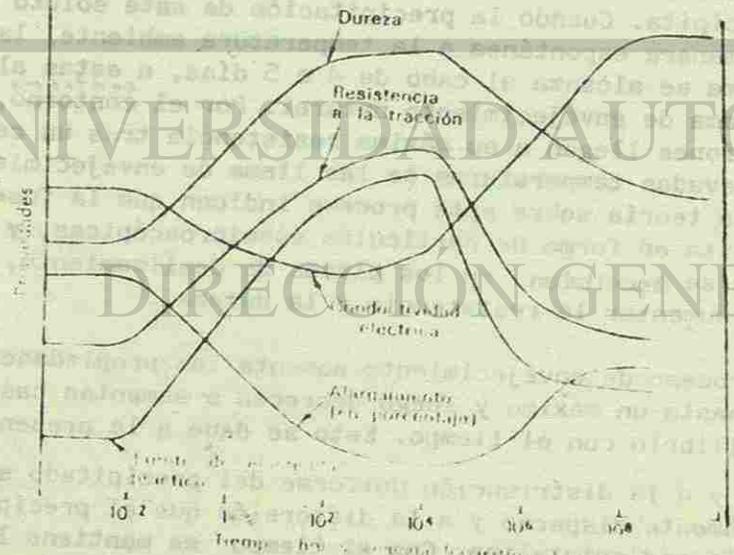
ENVEJECIMIENTO.- La aleación después del temple tiene una solución sólida sobresaturada metastable, por lo que el exceso de soluto precipita. Cuando la precipitación de este soluto se realiza a cabo de manera espontánea a la temperatura ambiente, la resistencia máxima se alcanza al cabo de 4 a 5 días, a estas aleaciones se les llama de envejecimiento natural. Por el contrario, cuando las aleaciones llegan a su máxima resistencia tras un calentamiento a elevadas temperaturas se les llama de envejecimiento artificial. La teoría sobre este proceso indica que la fase  $\beta$  en exceso precipita en forma de partículas submicroscópicas, y la mayoría de ellas se depositan en los planos de deslizamiento, lo que con esto aumenta la resistencia y la dureza.

El proceso de envejecimiento aumenta las propiedades de la aleación hasta un máximo y luego decrecen o aumentan hasta llegar a un equilibrio con el tiempo. Esto se debe a la presencia del precipitado y a la distribución uniforme del precipitado submicroscópico finamente disperso y a la distorsión que el precipitado ocasiona en la red cristalina. Con el tiempo se mantiene la --

Aleación y condición	Resistencia Kg/mm <sup>2</sup>	Límite de elasticidad práctico,	Alargamiento en 2 pulgadas %	BHN	Resistencia al estallamiento Kg/mm <sup>2</sup>
Recocido calenta-da y con envejecimiento natural	19,0	9,5	18	45	12,6
Calenta-da y con envejecimiento artificial	43,6	29,5	20	105	26,7
	49,2	42,2	13	135	29,5

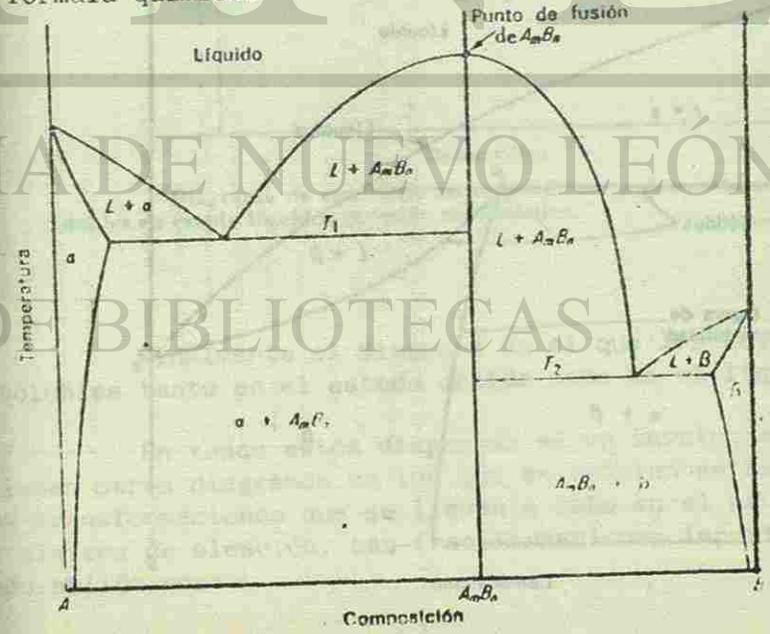
Propiedades de la aleación de aluminio 2014 con 3.5 a 4.5% de cobre envejecido.

precipitación, causando que la aleación se ablande. Cuando la precipitación se termina y la solución sólida alcanza el equilibrio, sus propiedades ya no se modifican.



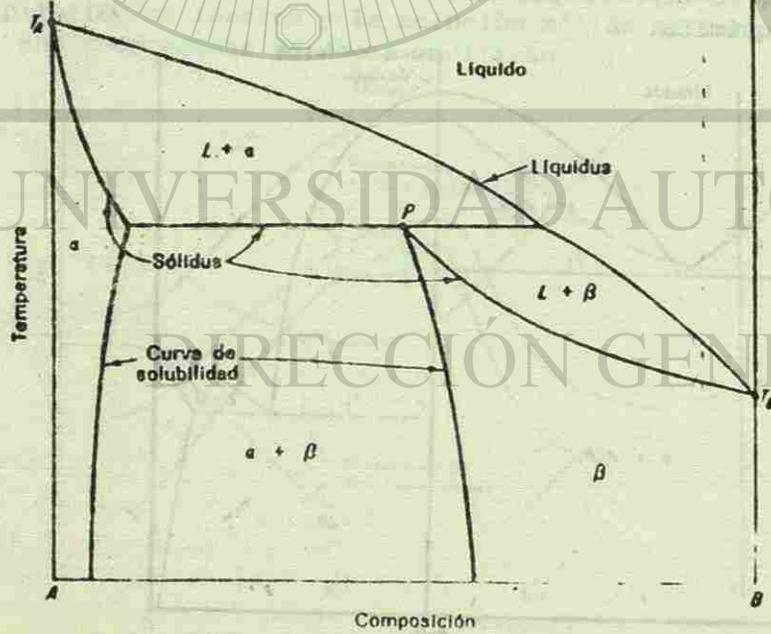
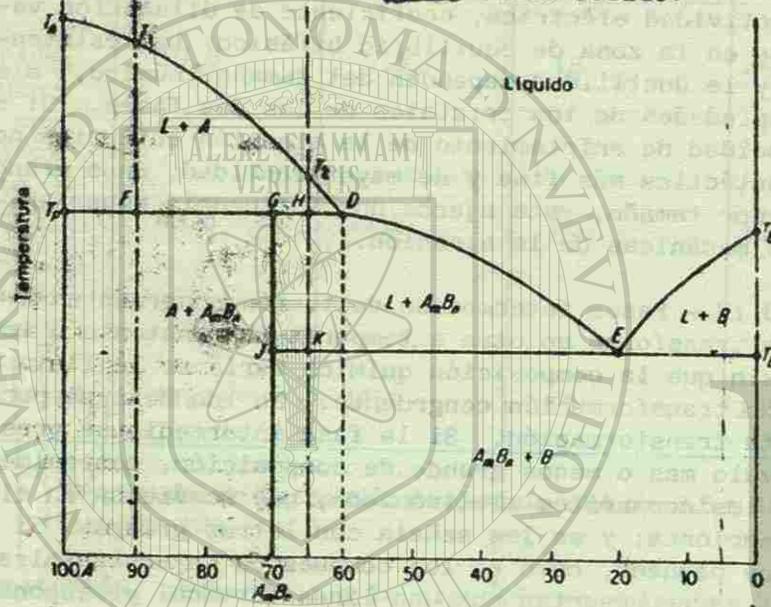
PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES CON EUTECTICO.- Las propiedades de las aleaciones que presentan varias fases dependen de las características de las fases que lo componen y de la distribución que tengan en la microestructura. Esto sucede generalmente en las aleaciones con eutéctico. Propiedades físicas como densidad, conductividad eléctrica, coeficiente de dilatación varían linealmente en la zona de equilibrio bifásico. La resistencia, la dureza y la ductilidad dependen del tamaño, número, distribución y propiedades de los cristales de las dos fases. Si se aumenta la velocidad de enfriamiento de la aleación eutéctica nos da una mezcla eutéctica más fina y de mayor cantidad, unos granos más pequeños de menor tamaño, esto ejerce una influencia mayor en las propiedades mecánicas de la aleación.

TIPO IV.- Fases intermedias de fusión congruente. Cuando una fase se transforma en otra a temperatura constante o isomórficamente, sin que la composición química varíe se le llama cambio de fase o transformación congruente. En los metales puros presenta esta transformación. Si la fase intermedia se presenta en un intervalo mas o menos grande de composición, generalmente se trata de los compuestos electrónicos, que se vieron en el capítulo de aleaciones; y se les señala con letras griegas. Si el intervalo es muy pequeño, como en los compuestos intersticiales o intermetálicos, se representan con una línea vertical y responden a una fórmula química.



OTROS TIPOS DE DIAGRAMAS.- Existen otros diagramas en los que intervienen la fase líquida y son los diagramas en los que se presentan las siguientes reacciones

Reacción peritética.



REACCION MONOTECTICA.- En la que los dos metales que forman el sistema de aleación son parcialmente solubles en el estado líquido. La reacción monotéctica en su expresión general es:

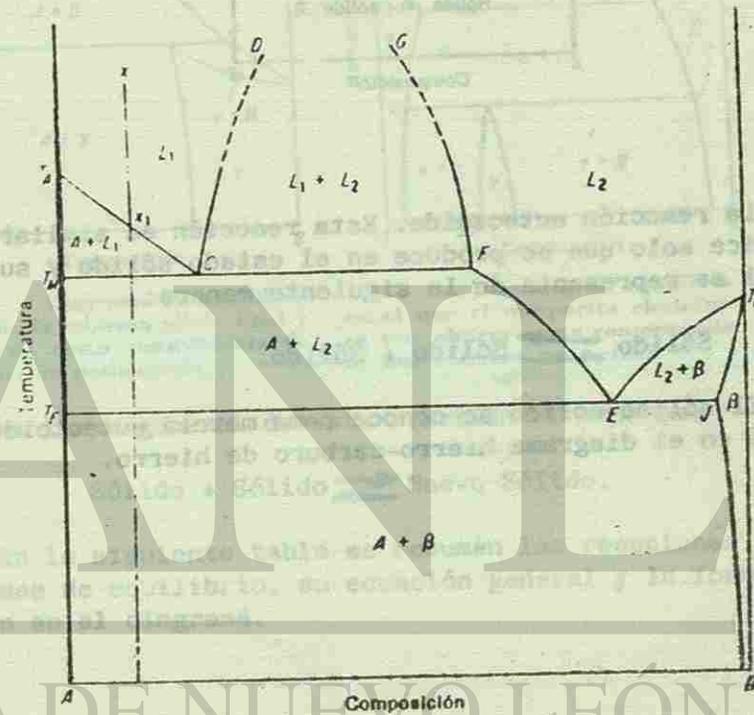
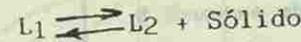
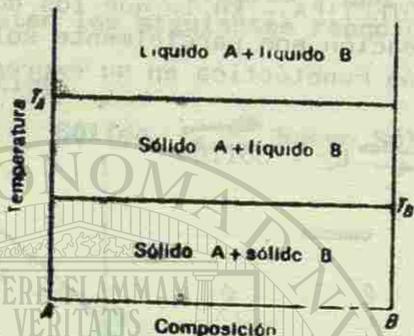


Diagrama de equilibrio correspondiente a dos metales parcialmente solubles en estado líquido; reacción monotéctica.

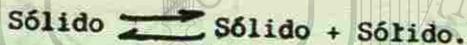
Finalmente el diagrama en el que los dos metales son insolubles tanto en el estado sólido como en el líquido.

En todos estos diagramas se ve involucrado un líquido; existen otros diagramas en los que se señalan en forma particular las transformaciones que se llevan a cabo en el estado sólido de un sistema de aleación. Las transformaciones importantes en el estado sólido son:



DOS METALES TOTALMENTE INSOLUBLES EN EL ESTADO SÓLIDO Y LÍQUIDO

La reacción eutécticoide. Esta reacción es similar a la eutéctica solo que se produce en el estado sólido y su forma general se representa de la siguiente manera:



El sólido+sólido se conoce como mezcla eutécticoide como se verá en el diagrama hierro-carburo de hierro.

REACCION PERITECTOIDE.- También se presenta en el estado sólido aunque es menos frecuente que la eutécticoide.

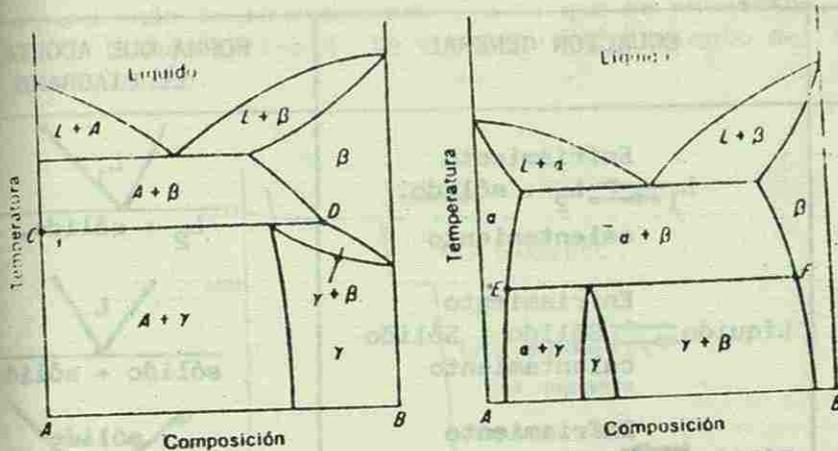


Diagrama de equilibrio en el que la solución sólida final  $\gamma$  se obtiene como consecuencia de una reacción peritectoide.

Diagrama de equilibrio en el que el compuesto electrónico  $\gamma$  se obtiene como consecuencia de una reacción peritectoide.

La forma general de esta reacción se expresa:

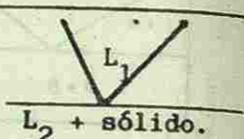
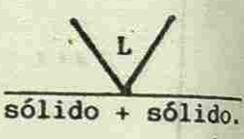
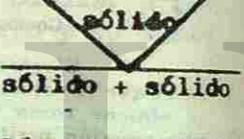
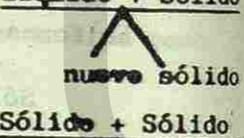
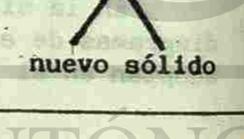


En la siguiente tabla se resumen las reacciones en los diagramas de equilibrio, su ecuación general y la forma que adoptan en el diagrama.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

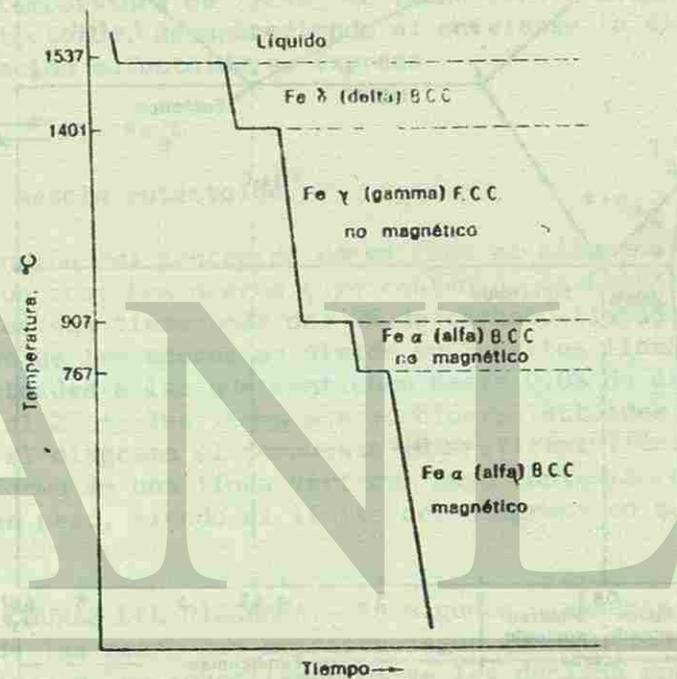
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



NOMBRE DE LA REACCION	ECUACION GENERAL	FORMA QUE ADOPTA EN EL DIAGRAMA
Monotéctica	Enfriamiento $L_1 \rightleftharpoons L_2 + \text{sólido.}$ calentamiento	
Eutética	Enfriamiento Líquido $\rightleftharpoons$ Sólido + Sólido calentamiento	
Eutectoide	Enfriamiento Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido + Sólido calentamiento	
Peritética	Enfriamiento nuevo Líquido + Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido calentamiento	
Peritectoide	Enfriamiento nuevo Sólido + Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido calentamiento	

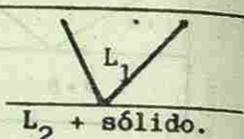
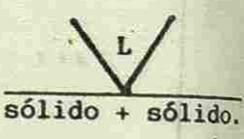
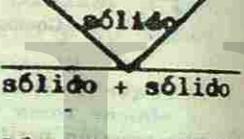
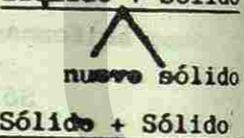
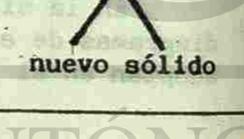
## DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO

El hierro se presenta en varias estructuras cristalinas dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, a esto se le llama alotropía. La curva de enfriamiento del hierro es la siguiente.



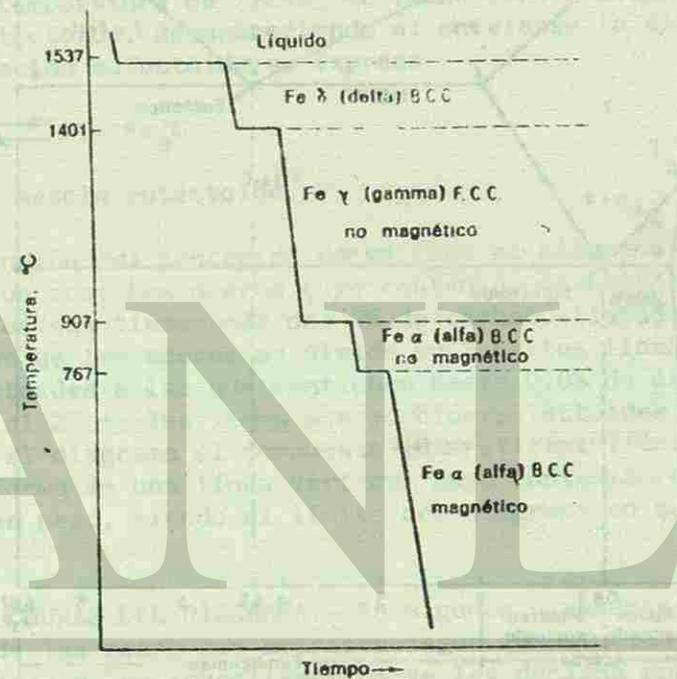
Curva de enfriamiento del hierro puro.

Todas las transformaciones alotrópicas cuando se enfría con exotérmicos, si se calientan absorben calor o endotérmicos, cuando se agregan elementos de aleación al hierro se modifican las temperaturas en los que se producen las transformaciones - alotrópicas. De los elementos de aleación más importante del - hierro, se tiene al carbono, lo cual nos da el diagrama hierro carburo de hierro, como el representado.

NOMBRE DE LA REACCION	ECUACION GENERAL	FORMA QUE ADOPTA EN EL DIAGRAMA
Monotéctica	Enfriamiento $L_1 \rightleftharpoons L_2 + \text{sólido.}$ calentamiento	
Eutéctica	Enfriamiento Líquido $\rightleftharpoons$ Sólido + Sólido calentamiento	
Eutectoide	Enfriamiento Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido + Sólido calentamiento	
Peritética	Enfriamiento nuevo Líquido + Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido calentamiento	
Peritectoide	Enfriamiento nuevo Sólido + Sólido $\rightleftharpoons$ Sólido calentamiento	

## DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO

El hierro se presenta en varias estructuras cristalinas dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, a esto se le llama alotropía. La curva de enfriamiento del hierro es la siguiente.



Curva de enfriamiento del hierro puro.

Todas las transformaciones alotrópicas cuando se enfría con exotérmicos, si se calientan absorben calor o endotérmicos, cuando se agregan elementos de aleación al hierro se modifican las temperaturas en los que se producen las transformaciones - alotrópicas. De los elementos de aleación más importante del - hierro, se tiene al carbono, lo cual nos da el diagrama hierro carburo de hierro, como el representado.

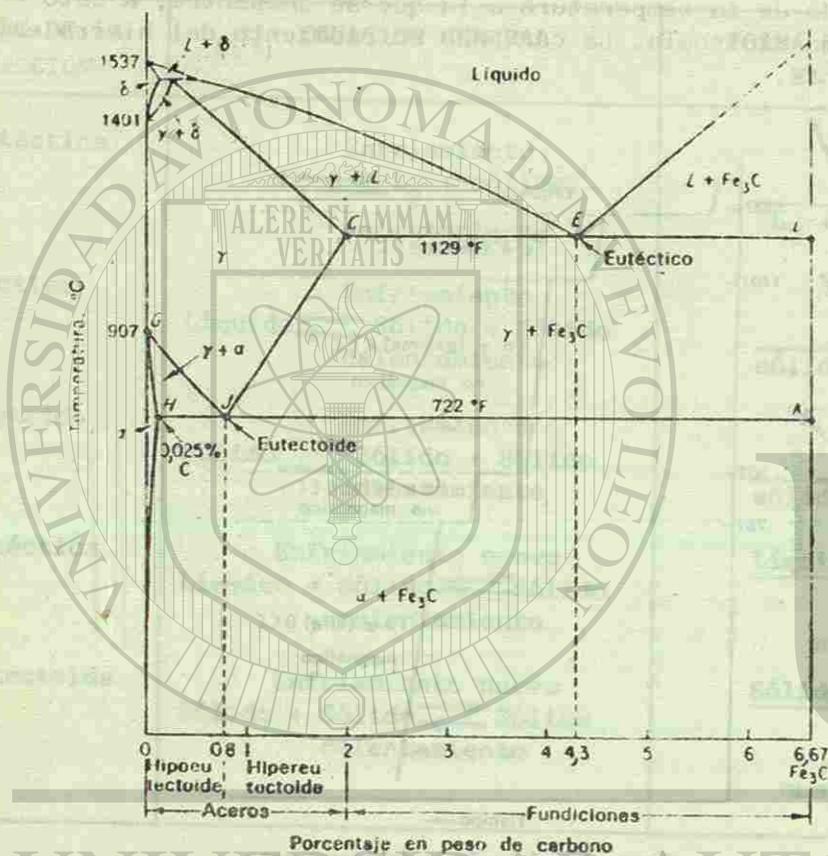
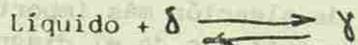


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CARBONO

El diagrama representado es solo una parte del sistema hierro-carburo, aparecen en él tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. En la región delta, la horizontal a 1493°C nos da una reacción peritética, de la siguiente forma:



La máxima solubilidad de carbono en hierro  $\delta$  es de 0.10% a 1493°C, y el hierro  $\gamma$  disuelve al carbono en mayor proporción.

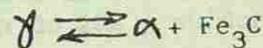
A 1129°C aparece otra línea horizontal, que es la de

definición del eutéctico y cuya reacción es:



La mezcla eutéctica ( $\delta + \text{Fe}_3\text{C}$ ) no es visible al microscopio, ya que a la temperatura ambiente no es estable y sufre transformación durante el enfriamiento.

A la temperatura de 722°C, se tiene otra horizontal, correspondiendo el eutectoide, desapareciendo al enfriarse la aleación fase  $\delta$ . La reacción eutectoide se expresa.



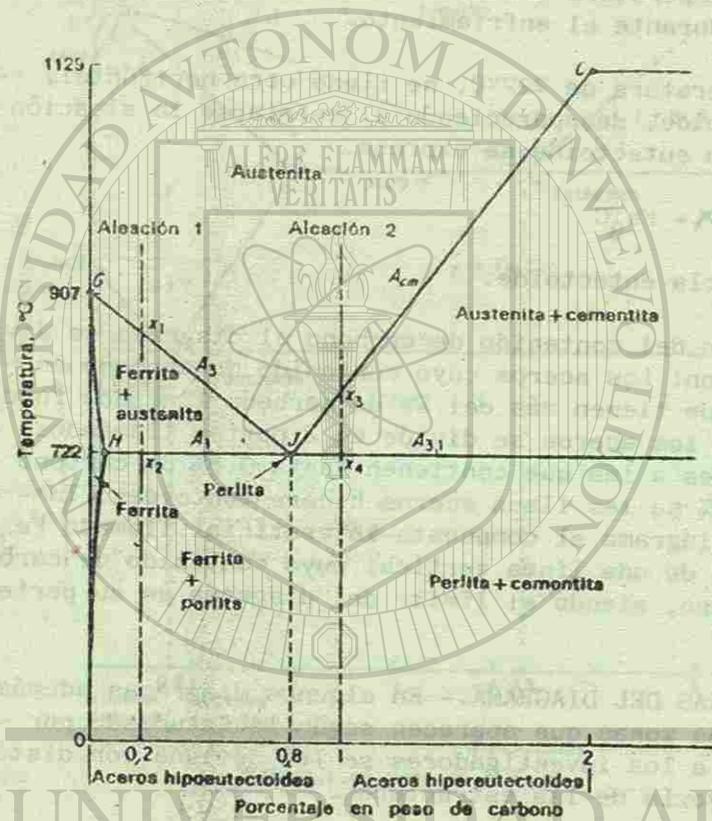
( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) es la mezcla eutectoide.

En función del contenido de carbono el diagrama se divide en 2 partes que son: Los aceros cuyo contenido de carbono es inferior al 2% y los que tienen más del 2% de carbono llamándose hipoeutectoides a las que contienen hasta 0.8% de carbono y hipereutectoides a las que contienen más del 0.8% hasta el 2% se les llama aceros hipereutectoides. También aparece en el diagrama el compuesto intersticial llamado  $\text{Fe}_3\text{C}$  cementita en forma de una línea vertical cuyo contenido de carbono es de 6.67% en peso, siendo el límite del diagrama en su parte derecha.

**ESTRUCTURAS DEL DIAGRAMA.**— En algunos diagramas además de los nombres de las zonas que aparecen según lo estudiado por los autores, en homenaje a los investigadores se les designa con distintos nombres a la mayoría de las estructuras.

**CEMENTITA.**— Responde a la fórmula química  $\text{Fe}_3\text{C}$  y contiene 6.67% de carbono; es un compuesto intersticial duro y frágil, su resistencia a la tracción es muy baja y su resistencia a la compresión es muy elevada. Es la de mayor dureza del diagrama.

**AUSTENITA.**— Se le conoce así al hierro gama ( $\gamma$ ), estructura red cúbica de caras centradas (f.c.c.). La solubilidad del carbono en el hierro es del 2% a 1129°C. Sus propiedades medias son: resistencia a la tracción de 105 Kg/mm<sup>2</sup>; el alargamiento en 2 pulgadas de 10%; dureza rockwell C de 40. No es estable a temperatura ambiente pero bajo ciertas condiciones se puede presentar.



**LEDEBURITA.**— Así se le conoce a la mezcla eutéctica de austenita y cementita ( $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ ) cuyo contenido de carbono es de 4.3% a 1129°C.

**FERRITA.**— A la solución sólida intersticial ( $\alpha$ ) se le conoce por ferrita, está formada por cantidades peque-

ñas de carbono disueltas en hierro (b.c.c.). La máxima solubilidad es de 0.025% de carbono a 722°C, pero a la temperatura ambiente la solubilidad disminuye hasta 0.008% de carbono. Sus propiedades medias son: Resistencia a la tracción 28Kg/mm<sup>2</sup> el alargamiento en 2 pulgadas es de 40%, la dureza es menor de 0-rockwell C.

**PERLITA.**— Se le conoce así a la mezcla eutectoide con 0.80% de carbono que se forma a 722°C. Está formada por ferrita y cementita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). Sus propiedades medias son: resistencia a la tracción de 84Kg/mm<sup>2</sup>; el alargamiento en 2 pulgadas es de 20% y su dureza es aproximadamente de 20 rockwell C.

La austenita de red cúbica de caras centradas y cuatro átomos en la celdilla fundamental, es más compacta atómicamente que la ferrita, de red cúbica de cuerpo centrado y 2 átomos en la celdilla fundamental. Al transformarse la austenita en ferrita durante el enfriamiento lento, esta transformación causa una expansión en la red.

Aplice las reglas anteriores de los diagramas a el de hierro-carburo de hierro o hierro carbono, a las aleaciones comprendidas de los aceros, que son las más importantes.

Analice una aleación con 0.2% de carbono, otra con 1% de carbono y la aleación eutectoide. Después analice la aleación eutéctica.

**CLASIFICACION DE LOS ACEROS.**— Los aceros se clasifican de diversas maneras, algunas de estas formas son las siguientes:

Por el proceso de fabricación.— Dependiendo del horno donde se obtenga el acero; este se clasifica de la siguiente manera: Aceros Bessemer, Aceros Martin Siemens; Acero de horno eléctrico, acero al crisol.

De acuerdo con su uso. Los aceros se clasifican de acuerdo con el uso que se le da: aceros para muelles, aceros para calderas, aceros para herramientas.

De acuerdo con su composición química.— En éste método todo los aceros se clasifican de acuerdo con varios dígitos.

Esta numeración viene especificada por las sociedades SAE y AISI. La SAE (Society of Automotive Engineers) y la AISI (American Iron and Steel Institute), realizaron una clasificación de los aceros de mayor uso a escala industrial. Designan los aceros por 4 o 5 dígitos; de los cuales el 1er. dígito indica el tipo de acero; por ejemplo aceros cuyo 1er. dígito sea un 1 indica que es un acero al carbono, el 2 es un acero al níquel, el 3 es un acero cromo-níquel, el 5 aceros al cromo.

En los aceros ordinarios aleados, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado que tiene el acero del elemento de aleación predominante. Los dos ó tres últimos dígitos indican, el contenido de carbono medio en centésimas. Por ejemplo un acero 2345 nos indica que es acero al níquel con 3% de níquel y 0.45% de contenido de carbono. Acero 1325 es un acero ordinario; con 1.6 a 1.9% de manganeso y 0.25 de carbono.

La AISI, utiliza los mismos dígitos de la SAE, sólo que éstos números llevan antes una letra como la,

- B = Acero fabricado en el Bessemer ácido
- C = Acero al carbono básico de hogar abierto
- E = Acero fabricado en horno eléctrico.

Otras veces los aceros se clasifican con respecto al contenido de carbono, de la siguiente manera.

Aceros de bajo contenido de carbono: hasta 0.25% -

Aceros de medio contenido de carbono: de 0.25 a

0.55%

Aceros de alto contenido de carbono: más de 0.55 -

por ciento.

- 10XX Aceros al carbono obtenidos en horno Martin Siemens y en convertidor Bessemer ácido.
- 11XX Aceros al carbono, altos en azufre y bajos en fósforo, obtenidos en horno martin siemens y en convertidor Bessemer ácido
- 12XX Aceros al carbono, altos en azufre y en fósforo, obtenido en horno martin siemens.
- 13XX Manganeso, 1.60 al 1.90 %
- 23XX Níquel 3,50%
- 25XX Níquel 5%
- 31XX Níquel, 1,25%; cromo, 0,60 %
- 32XX Níquel 1,75 % cromo 1,00%
- 33XX Níquel 3,50% cromo 1,50%
- 40XX Molibdeno 0,25%
- 41XX Cromo, 1,00% molibdeno, 0,20%
- 43XX Cromo-Níquel-Molibdeno
- 46XX Níquel 1,75% molibdeno, 0,25%
- 48XX N-íquel 3,50% molibdeno, 0,25%
- 51XX Cromo 0,80%
- 52XX Cromo 1,50%
- 61XX Cromo-vanadio
- 86XX Níquel, 0,55% cromo, 0,50% molibdeno, 0.20%
- 87XX Níquel 0,55% cromo, 0,50% molibdeno 0,25%
- 92XX Manganeso, 0,80 % silicio 2,00%
- 93XX Níquel 3,25% cromo, 1,20% molibdeno 0,12%
- 98XX Níquel 1,00% cromo 0,80%; molibdeno 0,25%

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los tratamientos térmicos se definen como ciclos de calentamiento y enfriamiento que se les da a los metales en estado sólido para variar alguna ó algunas de sus propiedades de la forma deseada ó requerida.

Los tratamientos térmicos más conocidos son los siguientes: Recocido (varios tipos); Normalizado, Temple; Revenido.

También veremos algunos tratamientos especiales como Austempering; Martempering y los endurecimientos superficiales como Cementado; Cianurado; Nitrurado; Endurecimiento por flama y por inducción.

RECOCIDO.- Con éste nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es ablandar el acero, otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Las diferentes clases de recocido que se emplean en la industria se pueden clasificar en tres grupos:

- A).- Recocidos con Austenización completa (o de Regeneración)
- B).- Recocidos subcríticos
- C).- Recocidos con austenización incompleta.

A).- RECOCIDOS CON AUSTENIZACION COMPLETA.- En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior durante un tiempo que depende del espesor del material (1 hora por pulgada de espesor). Posteriormente se enfría muy lentamente. Sirve para ablandar al acero y regenerar su estructura.

B).- RECOCIDOS SUBCRITICOS.- El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento se eliminan las tensiones del material y se aumenta su ductilidad. Se pueden distinguir tres clases de recocido subcríticos.

1).- De ablandamiento, 2).- Contra acritud, 3).- Globular.

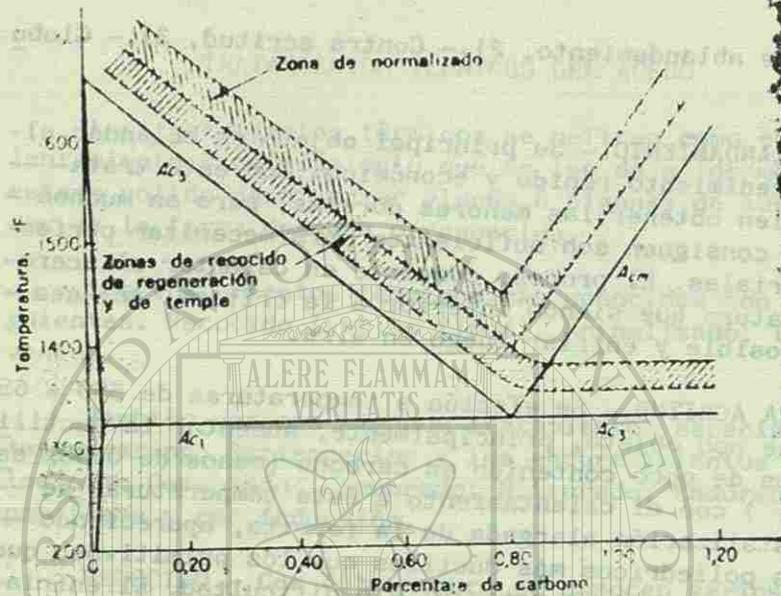
DE ABLANDAMIENTO.- Su principal objeto es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico. Con este tratamiento no se suelen obtener las menores durezas, pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar perfectamente los materiales. El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura que siendo inferior a la crítica Ac, sea lo más elevada posible y enfriar luego en aire.

CONTRA ACRTUD.- Se efectúa a temperaturas de 550 a 650 grados C, y tiene por objeto, principalmente, aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido en carbono (menos de 0.40% es tirados en frío.) con el calentamiento a ésta temperatura, se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliedricos más dúctiles que los primitivos, que permiten estirar o laminar el material sin dificultad. El enfriamiento se suele hacer al aire.

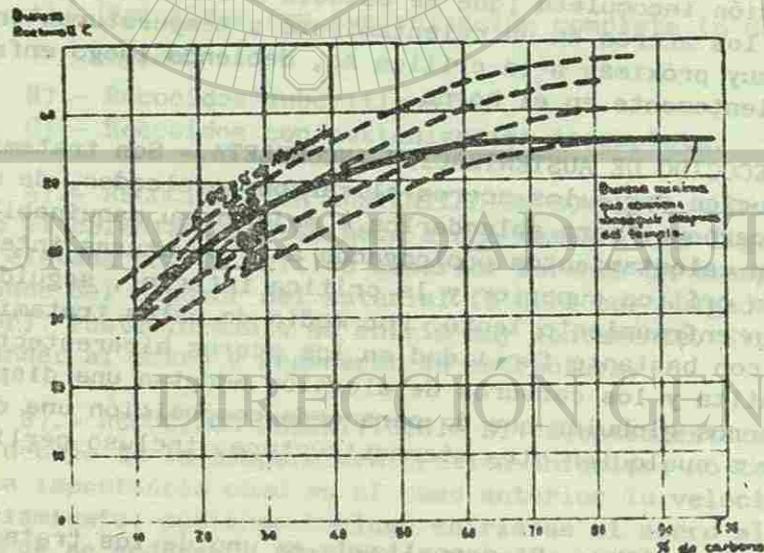
GLOBULAR.- En ocasiones para obtener en los aceros al carbono y de baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido de austenización incompleta (que se estudia a continuación), se les somete a los aceros en un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica Ac, debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

RECOCIDO DE AUSTENIZACION INCOMPLETA.- Son tratamientos que se suelen dar a los aceros al carbono o aleados, de más de 0.50% de carbono, para ablandarlos y mejorar su maquinabilidad. Consisten en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la crítica inferior, seguidos siempre de un enfriamiento lento. Por medio de estos tratamientos se consigue con bastante facilidad en los aceros hipereutectoides que la cementita y los carburos de aleación adoptan una disposición más o menos globular que da para cada composición una dureza muy inferior a cualquier otra microestructura, incluso perlita laminar.

NORMALIZADO.- El normalizado es uno de los tratamientos térmicos más fáciles de efectuar. Se utiliza lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la



INTERVALOS DE TEMPERATURAS DE NORMALIZADO, RECOCIDO Y TEMPLE DE LOS ACEROS AL CARBONO



PROMEDIO DE DUREZAS QUE SE OBTIENEN EN LOS ACEROS AL CARBONO DESPUES DEL TEMPLE EN FUNCION DEL CONTENIDO EN CARBONO Y SEGUN EL PORCENTAJE DE MARTENSITA OBTENIDA.

estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la forja o en otras operaciones posteriores. Como el nombre lo indica, se da este tratamiento a los aceros para que queden con los constituyentes característicos que puedan considerarse normales o propios a su composición. Se efectúa no sólo después de la forja o laminación, sino también después de ciertos sobrecalentamientos o enfriamientos hechos en malas condiciones y siempre que se quiere destruir los efectos de cualquier calentamiento o tratamiento anterior.

Consiste en calentar los aceros a una temperatura superior a la crítica  $A_{c3}$  o  $A_{cm}$ , para que pasen al estado austenítico y dejar luego enfriar las piezas al aire tranquilo. En el normalizado, la velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido. Es un tratamiento típico de los aceros al carbono de construcción de 0,15 a 0,40% de C y rara vez se emplea en los aceros de herramientas, ni en los aleados de construcción.

El espesor de las piezas ejerce bastante influencia en los constituyentes y características que se obtienen en el normalizado de los aceros.

Es distinta la microestructura que se obtiene en un redondo de acero de 8 mm de diámetro de 0,45% de carbono que en otro de 250 mm de diámetro de la misma composición — debido a que la velocidad de enfriamiento, que es la que en definitiva regula el tratamiento, es bastante diferente en ambos casos.

**TEMPLE.**— El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, etc.,

Teóricamente en el temple, lo mismo que en el recocido de regeneración de los aceros hipoeutectoides, toda la masa de acero debe encontrarse en estado austenítico en el momento de comenzar el enfriamiento. Si entonces se enfría el acero con rapidez, todo el material queda con gran dureza y la transformación de la austenita ocurre generalmente por debajo de  $350^{\circ}$ . La estructura resultante llamada —

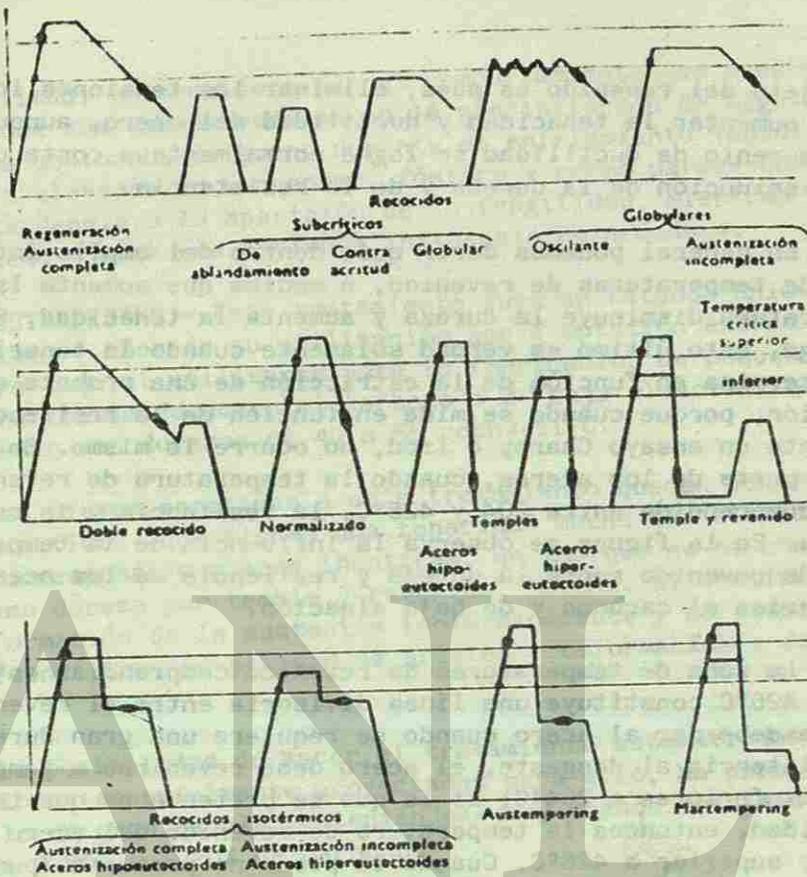
martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, pero la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado. La razón axial c/a aumenta con el contenido de carbono a un máximo de 1.08. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón para la alta dureza de la martensita. Como los átomos de la martensita están menos densamente empaquetados en la austenita durante la transformación, ocurre una expansión; sin embargo, durante la formación de martensita, dicha expansión produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz. Después de un enfriamiento drástico (temple), la martensita aparece microscópicamente como una estructura blanca acicular o tipo aguja, descrita algunas veces como un haz de pajitas. En la mayoría de los aceros, la estructura martensítica aparece vaga e indeterminable.

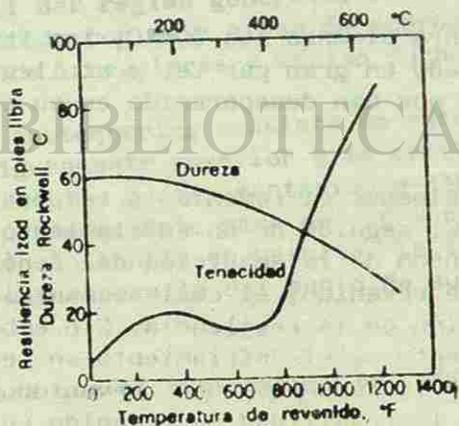
**TEMPLE DE LOS ACEROS HIPEREUTECTOIDES.**— En la mayoría de los aceros de herramientas (aceros hipereutectoides) el temple se suele realizar, como hemos dicho antes, con calentamiento de austenización incompleta.

Se ha visto en la práctica industrial que de esta forma se obtienen, en general, los mejores resultados. En estos casos, cuando en el calentamiento que se da para el temple el acero ha alcanzado la máxima temperatura, en la masa hay austenita y una cantidad de cementita y carburos aleados y complejos sin disolver cuya proporción varía según los casos con la temperatura alcanzada y la clase de acero. El temple de diversos aceros como el de limas de C=1,3% aceros rápidos 18-4-1 y de 5% de cobalto, aceros indeformables con 13% de cromo, etc., se realizan normalmente con calentamientos de austenización incompleta. Después del enfriamiento en estos aceros se obtiene martensita que proviene de la austenita transformada y carburos. A veces puede quedar también algo de austenita sin transformar.

**REVENIDO.**— Los aceros después del temple, suelen quedar demasiado frágiles para la mayoría de los usos a que van a ser destinados. Por otra parte, la formación de martensita da lugar a considerables tensiones en el acero. Por todo ello, las piezas, después del temple, se someten casi siempre a un revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior. Al-



ESQUEMA DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS MAS EMPLEADOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS ZONAS DE TRANSFORMACION. LOS PUNTOS Y ZONAS NEGRAS, SEÑALAN LAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMACION DEL ACERO.



INFLUENCIA DE UN REVENIDO DE UNA HORA A DIFERENTES TEMPERATURAS SOBRE LA DUREZA Y LA RESILIENCIA DEL ACERO 4140

El objeto del revenido es pues, eliminar las tensiones internas y aumentar la tenacidad y ductilidad del acero, aunque este aumento de ductilidad se logre normalmente a costa de una disminución de la dureza y de la resistencia.

En general podemos decir que, dentro del amplio intervalo de temperaturas de revenido, a medida que aumenta la temperatura disminuye la dureza y aumenta la tenacidad. Sin embargo, esto último es verdad solamente cuando la tenacidad se determina en función de la estricción de una probeta de tracción, porque cuando se mide en función de la resiliencia mediante un ensayo Charpy o Izod, no ocurre lo mismo. En la mayor parte de los aceros, cuando la temperatura de revenido está comprendida entre 204 y 426°C, la resiliencia y la resistencia. En la figura se observa la influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza y resiliencia de los aceros ordinarios al carbono y de baja aleación.

La zona de temperaturas de revenido comprendidas entre 204 y 426°C constituye una línea divisoria entre el revenido que se debe dar al acero cuando se requiere una gran dureza o resistencia al desgaste, el acero debe revenirse a temperaturas inferiores a 204°C; si lo que se pretende es que tenga tenacidad, entonces la temperatura de revenido del acero debe ser superior a 426°C. Cuando la pieza no presenta "puntos de concentración de tensiones" o entalladas la variación de la ductilidad puede constituir una medida de la tenacidad mejor que la resiliencia y, aunque el revenido se realice en el intervalo de temperaturas de 204 y 426°C no ocasiona ningún perjuicio a la pieza.

Cuando la temperatura alcanza los 204°C, las tensiones residuales se han eliminado en gran parte, y al llegar a los 482°C se puede decir que han desaparecido en su totalidad.

En algunos aceros aleados el revenido a temperaturas entre los 538 y los 676°C, seguido de un enfriamiento relativamente lento, va acompañado de la aparición del fenómeno conocido como fragilidad de revenido, el cual se manifiesta por una acusada disminución de la resiliencia. Sin embargo, este fenómeno no se presenta si el enfriamiento se realiza rápidamente en agua desde la temperatura de revenido. Aunque el mecanismo que origina la fragilidad de revenido no se co-

on exactitud, se considera por el comportamiento que presentan el acero, que sus causas radican en la precipitación de algunos elementos en los contornos de grano durante el enfriamiento lento. Los contenidos elevados en manganeso, fósforo y cromo parecen tener la tendencia a la aparición de la fragilidad, mientras que el molibdeno ejerce una profunda influencia retardadora.

**AUSTEMPERING.**— Este tratamiento tuvo en Estados Unidos los primeros años de su utilización una aceptación extraordinaria, sobre todo al utilizarse para la fabricación de pequeñas herramientas de acero al carbono o de baja aleación, que se quedan con durezas de 40 a 55 rockwell C.

Las piezas sometidas a este tratamiento quedan con estructuras bainíticas, que tienen una tenacidad mucho más elevada que corresponde a piezas idénticas, en las que se ha conseguido la misma dureza por temple y revenido. Además, al verificar la transformación de la austenita isotérmicamente y no existiendo la etapa martensítica, el peligro de grietas y deformaciones desaparece.

La posibilidad de hacer el tratamiento automáticamente en instalaciones especialmente proyectadas para ello, ha permitido utilizarlo en gran escala, obteniéndose muy buenos resultados en aceros de 0.50% a 1.20% de carbono.

En cambio, las experiencias realizadas con aceros de construcción al carbono y aleados de 0,20 a 0,40% de carbono, no son tan satisfactorias. Algunas veces los resultados son mejores que los obtenidos en el temple y revenido, y otras veces inferiores. Es difícil dar reglas generales sobre las ventajas e inconvenientes del método con esta clase de aceros, porque los resultados son bastante irregulares y varían mucho de unos casos a otros.

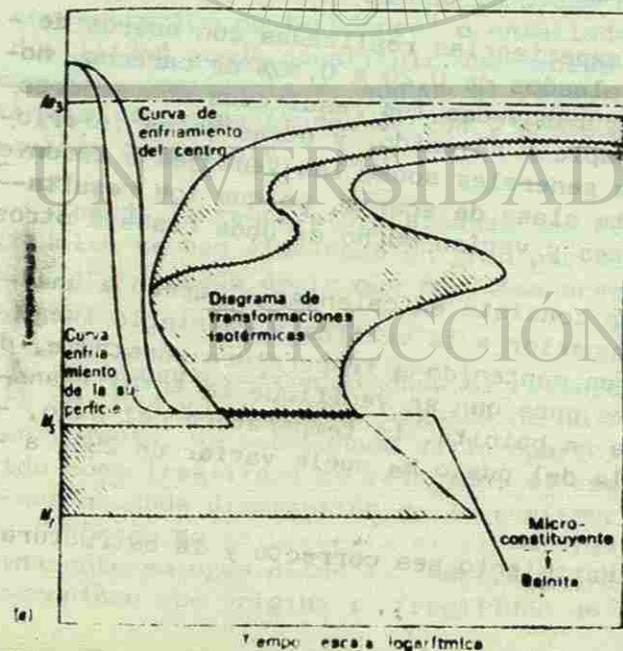
El austempering consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriarlo luego en un baño caliente, que es mantenido a temperatura constante, durante un tiempo suficiente para que se verifique la total transformación de la austenita en bainita. La temperatura del baño, debe ser superior a la del punto  $M_s$  suele variar de 250° a

Para que el tratamiento sea correcto y la estructura

sea totalmente bainítica, el enfriamiento en la primera fase debe ser suficientemente rápido para evitar la formación de perlita.

En la figura, se puede ver los resultados obtenidos -- con un acero de 0,74% de carbono enfriado en un baño de 300° y manteniendo en él durante quince minutos, en comparación -- con los resultados obtenidos en el mismo acero templado directamente y luego revenido.

Recientemente se ha comenzado a utilizar una variante de este proceso para tratar grandes piezas. El acero, después de ser calentado a la temperatura de austenización, ligeramente superior a la crítica, se enfría rápidamente en un baño cuya temperatura es inferior a  $M_s$ , con lo que se consigue salvar la nariz de la "S" aunque se transforma algo de austenita en martensita, y luego se pasa inmediatamente la pieza a un baño cuya temperatura es la precisa para que se efectúe isotérmicamente la transformación bainítica del resto de la masa, que se encuentra todavía en estado austenítico, y así aunque una parte del material se ha transformado en martensita, la mayor parte recibe el tratamiento isotérmico, a pesar de su gran tamaño, sin que aparezcan estructuras perlíticas blandas.



REPRESENTACION ESQUEMATICA SOBRE EL DIAGRAMA TIPO I DEL TRATAMIENTO DE AUSTEMPERING.

DUREZA ROCKWELL C 50

TRATAMIENTO DE AUSTEMPERING

TEMPLADO Y REVENIDO

ESTRICCION EN LA TRACCION

34,5 POR CIENTO

0,7 POR CIENTO

CHOQUE

4,87 KGM

0,40 KGM



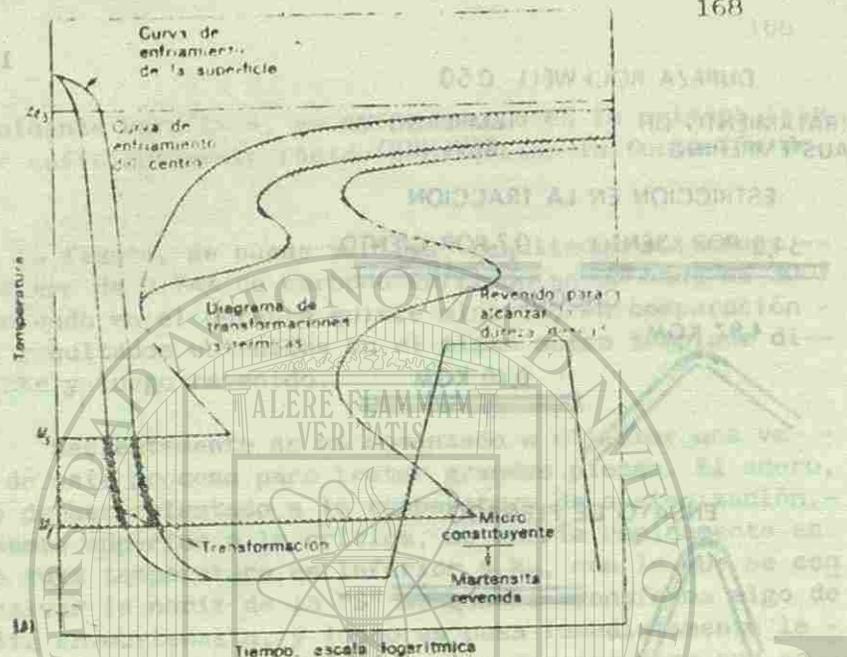
ENSAYO DE PLEGADO



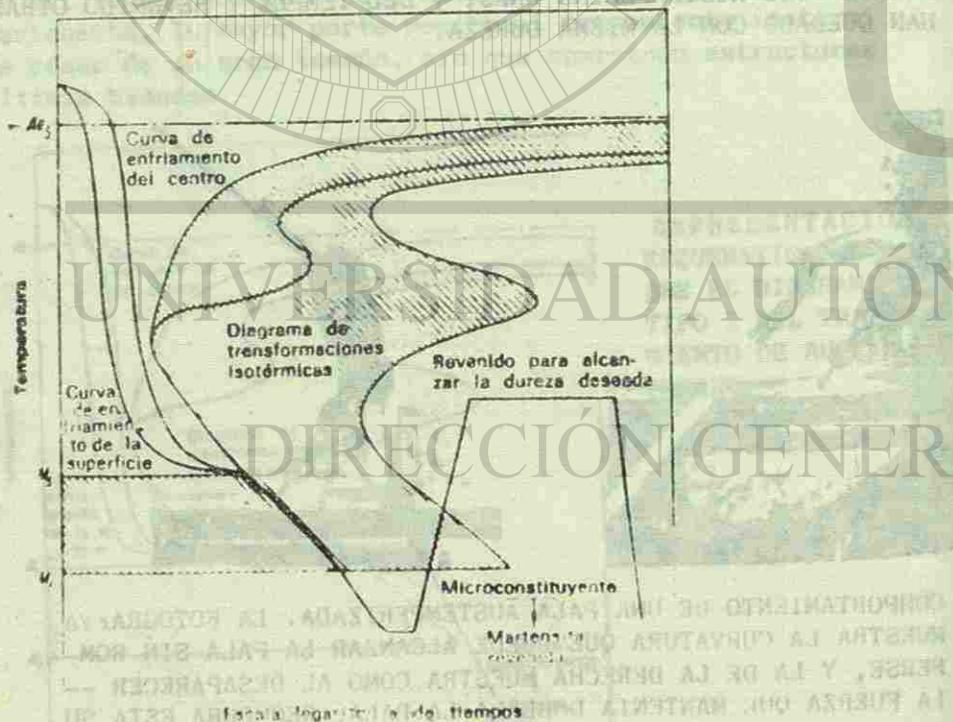
COMPARACION ENTRE LA TENACIDAD Y DUCTILIDAD DE VARILLAS QUE DESPUES DEL AUSTEMPERING UNAS, Y DEL TEMPLE Y REVENIDO OTRAS HAN QUEDADO CON LA MISMA DUREZA.



COMPORTAMIENTO DE UNA PALA AUSTEMPERIZADA. LA FOTOGRAFIA MUESTRA LA CURVATURA QUE PUEDE ALCANZAR LA PALA SIN ROMPERSE, Y LA DE LA DERECHA MUESTRA COMO AL DESAPARECER -- LA FUERZA QUE MANTENIA DOBLADA LA PALA, RECUPERA ESTA SU POSICION ORIGINAL.



REPRESENTACION SOBRE EL MISMO DIAGRAMA DEL PROCESO NORMAL DE TEMPLE DIRECTO SEGUIDO DE REVENDIO.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MARTEMPERING.

**MARTEMPERING.**— Este tratamiento se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura superior a la crítica durante un tiempo suficiente para su completa austenización y enfriándolo luego en un baño de sal fundida, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300° y debe ser superior al punto  $M_s$ , de comienzo de formación de la martensita. El material debe permanecer en el baño caliente el tiempo suficiente para conseguir que toda la masa del acero, incluso el corazón de la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño, no prolongando demasiado la permanencia para evitar que se inicie la transformación en ningún punto, enfriándose luego la pieza al aire. De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocas tensiones residuales. Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se puede dar posteriormente al acero un revenido. Es necesario que el enfriamiento en el martempering sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte a la nariz de la "S" en ningún punto, pues si lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes y al llegar la masa no sería ya de austenita se transformaría en otros constituyentes y al llegar a la zona de formación de la martensita, tendríamos que parte de la masa no sería ya de austenita y no se podría transformar. En piezas gruesas y cuando se utilizan aceros al carbono o de baja aleación ésta condición suele ser difícil de cumplir y por eso éste tratamiento, lo mismo que el austempering, es de aplicación limitada.

A continuación citamos varios ejemplos en los que es muy recomendable el martempering, detallando al mismo tiempo las ventajas que en cada caso se obtienen con este tratamiento.

1ro.— Para la fabricación de los engranajes del mecanismo diferencial de automóviles, se utilizaba en un taller el procedimiento clásico de cementación con temple en aceite. Las piezas eran fabricadas con acero cromo-molibdeno de:  $C = 0,10\%$ ;  $Cr = 0,5\%$  y  $Mo = 0,20\%$ . Eran cementadas a 900° y después templadas primero a 850° y luego a 780°, enfriando en ambos casos en aceite, utilizando además un utilaje especial para evitar las deformaciones. Sin embargo, éstas se producían en un 75% de las piezas, apareciendo variaciones de 0,2 a 0,6 mm. que hacían necesario en enderezado muy costoso y que inutilizaba bastantes piezas por agrietamiento.

Empleando en cambio baños de sales calientes a 200° en lugar de aceite para el enfriamiento, se han obtenido resultados muy notables. Las deformaciones medias no pasan de 0,1 mm, el en-

derezado ha sido suprimido, se han reducido los excesos para el rectificado y se obtienen durezas de 63 a 65 rockwell C, iguales o ligeramente superiores a las obtenidas en el temple en aceite.

2do.- En la fabricación de troqueles de forma complicada con partes delgadas y de gran logitud, fabricados con acero cromo-manganeso, se presentaban deformaciones importantes, que llegaban a ser en bastantes casos superiores a lo permitido. Empleando baños de sales para el enfriamiento se resolvió el problema, pues las deformaciones eran casi inapreciables.

Ensayando diferentes medios de enfriamiento con durezas casi similares, se obtuvieron las siguientes deformaciones medias:

AGUA SALADA..... = 0,3 mm	ACEITE A 20° ..... = 0,06 mm
ACEITE A 100°.. = 0,05mm	BAÑO DE SALES a 200° 0,05mm

Estas cifras revelan la gran ventaja que ofrece el enfriamiento en baño de sales sobre los otros medios de enfriamiento.

#### ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO.

En numerosas aplicaciones industriales es necesario que algunas piezas tengan la superficie muy dura y resistente al desgaste, y la parte central, llamada corazón muy tenaz y relativamente blanda. Los tratamientos térmicos principalmente utilizados para conseguir estas características son los cinco siguientes:

- 1.- Cementación
- 2.- Nitruración
- 3.- Cianuración ó Carbonitruración
- 4.- Endurecimiento Superficial por Llama
- 5.- Endurecimiento Superficial por Corriente de Inducción.

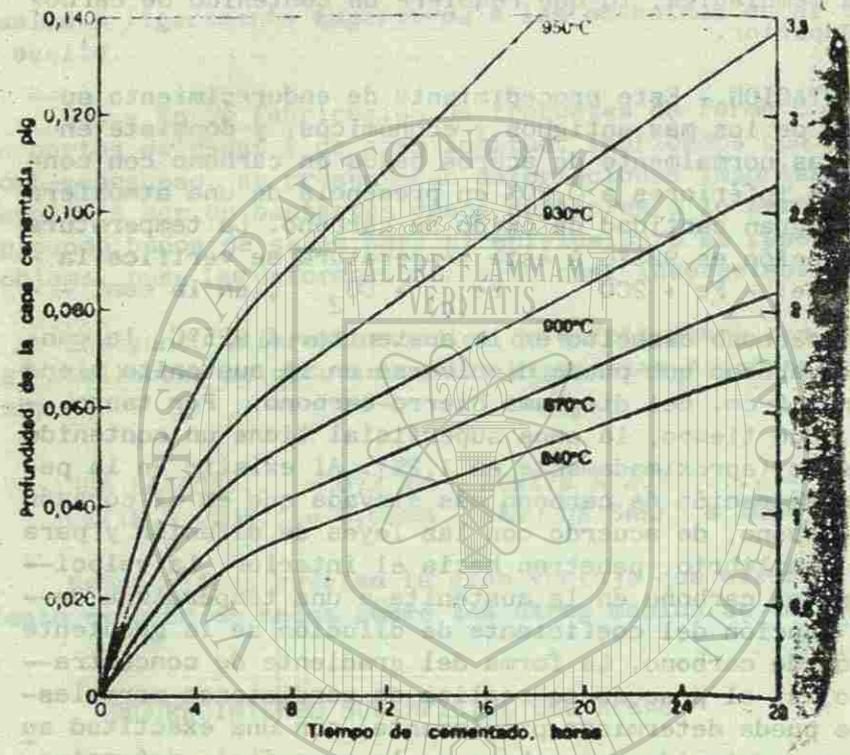
Los tres primeros procedimientos originan una variación en la composición química, ya que el primero supone la adición de carbono el segundo de nitrógeno y la cianuración de ambos, carbono y nitrógeno. En los dos últimos procedimientos no varía la composición química del acero y en esencia, se reducen a

un temple superficial. Ambos procedimientos son aplicables solamente a los aceros templables, lo que requiere un contenido de carbono de 0,35% a superior.

CEMENTACION.- Este procedimiento de endurecimiento superficial es uno de los más antiguos y económicos, y consiste en colocar las piezas normalmente de aceros bajos en carbono con contenidos iguales o inferiores a 0,20% en presencia de una atmósfera que contiene una gran cantidad de óxido de carbono. La temperatura normal de cementación es 925°C. A esta temperatura se verifica la reacción siguiente:  $Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_{(c)} + CO_2$ , en la cual

$Fe_{(c)}$  indica el carbono disuelto en la austenita. A 925°C, la cantidad máxima de carbono que puede disolverse en la austenita viene dada por la línea A cm. del diagrama hierro-carbono. Por tanto, al cabo de muy poco tiempo, la capa superficial tiene un contenido de carbono elevado (aproximadamente en 1,2%). Al existir en la periferia una concentración de carbono más elevada que en el corazón los átomos de carbono, de acuerdo con las leyes de difusión y para restablecer el equilibrio, penetran hacia el interior. La velocidad de difusión del carbono en la austenita a una temperatura determinada, es función del coeficiente de difusión de la gradiente de concentración de carbono. La forma del gradiente de concentración de carbono, si el proceso se realiza en condiciones normales y conocidas, se puede determinar previamente, con una exactitud suficiente, para un contenido de carbono en la superficie determinada, en función de la duración del proceso de concentración. Una vez transcurrido el tiempo que se considere necesario para que, por difusión del carbono, la capa cementada alcance el espesor deseado, la pieza se saca del horno y se deja enfriar.

En la práctica, la cementación puede realizarse con cementantes sólidos, líquidos o gaseosos. Si el medio cementante es sólido, la pieza a tratar se coloca en el interior de una caja cerrada, rodeada completamente por el cementante. El conjunto se calienta a la temperatura adecuada durante el tiempo requerido para que se realice la cementación y después se enfría lentamente. Este procedimiento presenta el inconveniente de no poder trabajar con grandes series, debido a que es un procedimiento en la carga se efectúa fundamentalmente por lotes. Las mezclas cementales comerciales suelen estar formadas normalmente por terroses o trozos relativamente gruesos de un compuesto constituido por carbón vegetal coque y un 20% aproximadamente de un activador tal como el carbonato bórico, de tal modo que al cerrar la caja queda en su interior



RELACION ENTRE LA TEMPERATURA Y DURACION DE LA CEMENTACION Y LA PENETRACION DEL CARBONO

aire suficiente para que se forme óxido de carbono. Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son la gran duración del calentamiento y enfriamiento de la carga, el elevado costo de preparación y colocación de las piezas en las cajas, así como de desarmar éstas y la dificultad de templar directamente las piezas desde la temperatura de cementación.

La cementación gaseosa puede realizarse de manera intermitente ó continua, y se presenta más al posterior tratamiento térmico. Las piezas se colocan en contacto con gases ricos en óxidos de carbono y con hidrocarburos tales como el metano, butano, y propano. Así mismo, el gas natural constituye también un buen cementante. Por lo general estos gases se mezclan antes de entrar en el horno con cantidades determinadas del aire el cual actúa como diluyente y proporciona el oxígeno necesario para la formación de monóxido de carbono, a partir de los hidrocarburos.

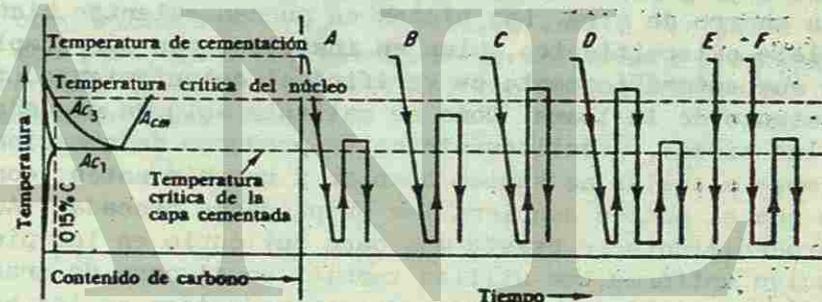
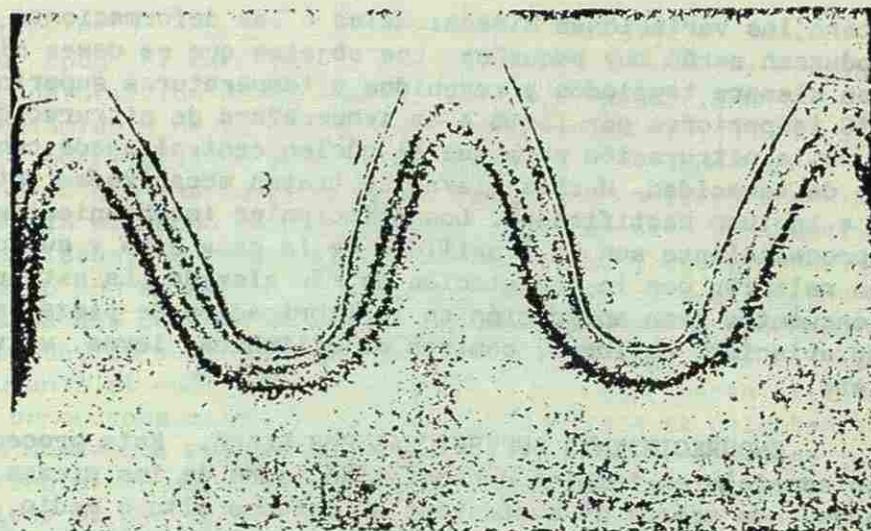
La cementación en medio líquido se realiza en un baño de sales fundidas que tienen hasta un 20% de cianuro sódico (NaCN), el cual proporciona carbono y nitrógeno. La capa cementada obtenida por este procedimiento está compuesta en su mayor parte por carbono y solo en una fracción muy pequeña por nitrógeno. Las temperaturas normales a que se realiza este tratamiento están comprendidas entre 870 y 950°C, utilizándose principalmente en la obtención de capas cementadas de hasta 0,75 mm de profundidad, siendo su principal limitación el costo de las sales cementantes.

**CIANURACION.**— La cianuración es un procedimiento utilizado para endurecer superficialmente los aceros aleados y el carbono mediante la formación de una capa dura de poco espesor, elevada dureza y buena resistencia al desgaste. Este tratamiento se efectúa por inmersión del acero en un baño fundido con un contenido de cianuro sódico de aproximadamente el 30% y a temperaturas comprendidas entre 787 y 870° C seguida normalmente por un temple en agua. La cianuración se diferencia de la cementación en baño de sales en la composición y carácter de la capa dura, pues mientras que en la cianuración ésta tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación ocurre exactamente lo contrario. La cianuración ésta tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación ocurre exactamente lo --

contrario. La cianuración es muy empleada en el endurecimiento superficial de piezas pequeñas. Como los espesores que alcanza la capa dura en los tiempos normales de inmersión (de hasta una hora), no exceden de 0,25 mm (0,0010 pulgadas), la elevada dureza que obtiene no es achacable solamente a la concentración de carbono. Lo que ocurre es que nitrógeno, de una manera análoga al carbono, se combina también con el hierro formando unas agujas de nitruro de hierro, de tamaño submicroscópico, que contribuyen a dar a la capa cianurada la elevada dureza que presenta.

En la carbonitruración, llamada también cianuración gaseosa, se logran los mismos efectos que en la cianuración, utilizando una mezcla formada por amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) ó por hidrocarburos en estado gaseoso. Este procedimiento se utiliza principalmente como sustituto de la cianuración por su bajo costo. La figura muestra la capa dura obtenida por carbonitruración, calentado un acero C1213 en una atmósfera de propano y amoníaco a  $843^\circ\text{C}$  durante veinte minutos, y templando seguidamente el acero en aceite. Midiendo la profundidad de la capa cementada, desde el borde hasta el centro de la zona oscura, con un ocular micro métrico, cada una de cuyas divisiones vale 0,025 mm, se obtiene un espesor de aproximadamente 0.0625 mm.

**NITRURACION.**— En este procedimiento, las piezas a tratar se colocan en una caja cerrada a través de la cual se hace pasar durante toda la operación una corriente de amoníaco, manteniéndose el conjunto de una temperatura comprendida entre  $480$  y  $620^\circ\text{C}$ . Al calentarse el amoníaco a esas temperaturas, se disocia parcialmente en nitrógeno e hidrógeno. El nitrógeno penetra a través de la superficie del acero y se combina con el hierro y elementos de aleación formando nitruros. En la figura se aprecia el gran espesor de la capa dura de un engranaje nitrurado. Con este tratamiento se consiguen durezas elevadísimas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial, alcanzándose en la capa dura de los aceros durezas superiores a 70 rockwell C. Actualmente se ha desarrollado un tipo especial de aceros aleados, denominados aceros de nitruración, con contenidos de 0,25 a 0,50% de carbono y de aluminio, cromo y molibdeno de hasta 3% especialmente adecuados para sufrir este tratamiento. Los procesos de nitruración son muy largos (con un proceso de 50 h se obtiene una capa nitrurada de un espesor aproximado de 0,381 mm) y rara vez se utilizan para la obtención de capas duras de espesor superior a 0,500 mm. Por ser la temperatura de nitruración inferior a la temperatura crítica



Treatment	Cemented Layer	Core
A—adequado para los aceros de grano fino	Grano fino; con carburo en exceso sin disolver	Grano grueso; blando y mecanizable
B—adequado para los aceros de grano fino	Grano un poco más grueso; parte del carburo en exceso se disuelve	Afinado parcialmente; más resistente y tenaz que en A
C—adequado para los aceros de grano fino	Estructura ligeramente gruesa; se favorece la disolución del carburo en exceso; en los aceros de muy alta aleación se promueve la retención de austenita	Afinado; el núcleo adquiere una dureza y resistencia máximas; una combinación de la resistencia y ductilidad mejor que en B
D—adequado para los aceros de grano fino	Afinado; se favorece la disolución del carburo en exceso; la retención de austenita reducida al mínimo	Afinado; blando y mecanizable; tenacidad y resistencia al choque máximas
E—adequado solo para los aceros de grano fino	Estructura gruesa con el exceso de carburo disuelto; austenita retenida; deformaciones mínimas	Grueso, pero duro
F—adequado solo para los aceros de grano fino	Afinado; se favorece la solución del carburo en exceso; la retención de austenita reducida al mínimo	Grueso, buena tenacidad

del acero las variaciones dimensionales o las deformaciones que se produzcan serán muy pequeñas. Los objetos que se desea nitrurar son siempre templados y revenidos a temperaturas superiores a 593°C (superiores por tanto a la temperatura de nitruración) -- antes de la nitruración para que el núcleo central quede con el máximo de tenacidad. Muchas piezas se tratan mecanizadas totalmente e incluso rectificadas. Los principales inconvenientes de este procedimiento son la fragilidad de la capa dura y su costo que en relación con la cementación es más elevado. La nitruración encuentra gran aplicación en la fabricación de piezas motores de aviación, calibres, camisas de cilindros, levas, válvulas, etc.

**ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL POR LLAMA.** -- Este procedimiento consiste en temprar determinadas zonas de las piezas, fabricadas, con aceros de contenidos en carbono alto o medio, calentándolas rápidamente y enfriándolas inmediatamente en agua o en un chorro de aire. Las piezas se pueden calentar bien con un soplete oxiacetilénico, bien en instalaciones más complejas en las que automáticamente se verifica el calentamiento, temple y movimiento de la llama. Como se calienta solo en pequeña parte de las piezas, prácticamente no se producen deformaciones. Las piezas a tratar se suelen temprar y revenir antes, con el fin de que el núcleo adquiera las propiedades deseadas. Aunque este procedimiento se presta más para aplicarlo en las piezas de sección uniforme, se utiliza también en el caso de grandes piezas por su volumen no pueden ser introducidas en los hornos de temple. Este procedimiento se utiliza para aumentar la dureza superficial y resistencia al desgaste de los bulones de los pistones, ejes, engranes grandes, levas e instrumentos manuales.

**ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL POR CORRIENTES DE INDUCCIÓN.** -- En principio, este procedimiento es similar al anterior caracterizándose ambos por ser procedimientos de temple superficial que se realizan sin que varíe la composición química del acero. Este procedimiento se aplica principalmente a los aceros con un contenido de carbono medio. La pieza que se va a endurecer superficialmente constituye el secundario de una instalación de calentamiento por corrientes de alta frecuencia en la que el primario está constituido por varias espiras de tubo de cobre, por cuyo interior circula agua de refrigeración durante la operación. Cuando a través de las espiras del primario pasa una corriente alterna de alta frecuencia se crea un campo magnético alternativo, el cual da lugar al nacimiento en el acero de co-

rrientes de Foucault o corrientes de histéresis. La resistencia que opone el material al paso de estas corrientes origina la transformación de la energía en calor, produciéndose el calentamiento de la pieza. En el endurecimiento superficial -- por corrientes de inducción, encierra gran importancia el hecho de que las corrientes de inducción, encierra gran importancia el hecho de que las corrientes de alta frecuencia se desplazan por la superficie del conductor, conociéndose este hecho con el nombre de efecto pelicular. La profundidad total a que penetra el calor depende tanto de la frecuencia empleada, la cual varía de 2,000 a 500,000 cps. con el tiempo durante el cual puede transmitirse el calor hacia el interior por conducción. Por este procedimiento el calentamiento es sumamente rápido, cuestión de segundos, cortándose la corriente una vez terminado y templándose inmediatamente la pieza al ser enfriada por unos chorros de agua. En el caso de piezas de cierta longitud y de sección recta uniforme, tales como sierras de cinta o husillos largos, se puede aplicar con éxito este procedimiento de una manera progresiva, lográndose un temple superficial con calentamiento por corrientes de inducción.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

BIBLIOTECA GENERAL DE BIBLIOTECAS

