

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

CONTROL METALURGICO DEL RECOCIDO  
DE ACEROS AL CARBON

T E S I S  
QUE PARA OBTENER  
EL TITULO DE :  
QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A :  
ROBERTO MACIAS BARRAGAN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

H. JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE

PRESIDENTE: Ing. Manuel F. Guerrero Fernández  
VOCAL: Ing. Enrique Martínez Martínez  
SECRETARIO: Ing. Carlos Arango Solórzano  
PRIMER SUPLENTE: Ing. José Campos Caudillo  
SEGUNDO SUPLENTE; Dra. Dora R. de Grinberg

Sitio donde se desarrolló el tema:

FACULTAD DE QUIMICA

Ciudad Universitaria, D. F.,

ACERO SOLAR S. A.

Av. Circunvalación # 2860

Tlalnepantla, Edo. de Méx.

SUSTENTANTE: ROBERTO MACIAS BARRAGAN

ASESOR DEL TEMA: ING. ENRIQUE MARTINEZ MARTINEZ

A mis Padres:

LUIS MACIAS SANTIAGO Y JOSEFA BARRAGAN DE MACIAS

Con cariño y gratitud infinita, porque todo me dieron  
sin habérselos pedido.

A MIS ABUELITOS:

JOSE MA BARRAGAN Y GUADALUPE RODRIGUEZ

A LA MEMORIA DE MIS ABUELITOS

EUTIMIO MACIAS Y EDUWIGES SANTIAGO

A mis hermanos:

TERESA

JOSE

MA. ELIA

MA. ELENA

VICTOR

ANA CELIA

JORGE LUIS

MERCEDES ALICIA

A MIS TIOS

RODOLFO

ALBERTO

ALFONSO

JOSE

MA. DE JESUS

CARMEN

OFELIA

ALBERTINA

EN ESPECIAL PARA MIS TIOS PATRICIO MEJIA Y ESPOSA  
QUIENES TANTO ME AYUDARON CON SUS CONSEJOS.

MI AGRADECIMIENTO:

AL I.Q.M. ENRIQUE MARTINEZ MARTINEZ ASESOR DE MI TESIS  
PROFESOR Y AMIGO.

AL I.Q.M. HUMBERTO MALAGON ROMERO POR SU VALIOSA AYUDA  
QUE DESINTERESADAMENTE ME BRINDO.

Y A TODAS LAS PERSONAS QUE DIRECTA E INDIRECTAMENTE ME BRINDAU  
RON SU AYUDA PARA LA ELABORACION DE ESTA TESIS.

## I N D I C E

	Pág.
Introducción	1
Tratamientos Térmicos	3
Influencia de la Velocidad de Enfriamiento	26
Recocido y Objetos del Recocido	30
Diferentes tipos de Recocido	31
Atmósferas Protectoras para el Recocido	39
Experimentación	54
Resultados	56
Conclusiones	69
Bibliografía	71

## INTRODUCCION

La industria de nuestro país se encuentra en desarrollo y es por esto que el campo manufacturero crece desproporcionalmente en relación con los productos terminados de la industria siderúrgica.

A consecuencia de esto, la industrialización se ha enfocado hacia los intereses personales que trae consigo el desequilibrio de la propia industria. Teniendo en cuenta que esta industrialización radica en la unión de los valores humanos y materiales desde su raíz.

Ahora bien, este trabajo no es algo nuevo, es la recopilación de conocimientos que personas de ciencia nos han dejado, y los tomemos como armas para ir resolviendo poco a poco los múltiples problemas que aquejan la mayoría de las industrias. Problemas que ocasionan pérdidas cuantiosas por la falta de una dotación de propiedades mecánicas de los aceros.

Uno de los problemas en darles a los aceros propiedades mecánicas adecuadas para ser laminados además de corregir las estructuras no deseables siendo así como surgió la idea de elaborar este trabajo, ya que mediante el TRATAMIENTO TÉRMICO DEL RECOCIDO podemos dotar de dichas propiedades a los aceros corrigiendo a la vez las estructuras no deseables.

La preparación adquirida de cada uno de nosotros será un factor determinante en el provenir de nuestra Patria, ya que mediante estos conocimientos llevados a la práctica serán los que sirvan para obtener buen resultado en la elaboración de productos terminados.

## TRATAMIENTOS TERMICOS

Tratamiento térmico es un proceso constituido por uno o más ciclos que se hace seguir a un metal o aleación en estado sólido, con el cual se modifica su estructura molecular con el fin de dotarlo de propiedades deseables.

En general este tratamiento debe estar integrado por calentamientos y enfriamientos que pueden ser uno o más pero siempre en estado sólido.

Ese ciclo térmico va a producir en el metal o aleación transformaciones y como consecuencia de ellas se modifica su estado estructural es decir que modifica su estructura de tal forma que cambian sus propiedades.

Todo tratamiento tiene un fin práctico, puede observarse en un diagrama de equilibrio cualquiera, la posibilidad de que exista un cambio en el estado sólido es decir que una aleación sea susceptible o no de tratamiento térmico. Viendo el tipo de transformación se puede saber qué tratamiento es posible aplicar.

Podemos decir que mediante un proceso térmico se persigue conseguir ciertas propiedades con algún cambio estructural como puede ser aumentar la dureza, elevar el límite elástico, aumentar la ductilidad Etc.

Toda modificación estructural implica cierta transformación y para que esos cambios sucedan tiene que producirse en el metal o aleación un proceso físico complejo.

Los tratamientos térmicos más usados son: RECOCIDO, NORMALIZADO, TEMPLE y REVENIDO.

#### RECOCIDO.-

Con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es - ablandar el acero, otras veces sirve para regenerar su estructura o eliminar tensiones internas, consiste en un ciclo de tres etapas las cuales debe seguir todo tratamiento - térmico y que son: Calentamientos a temperaturas adecuadas, permanencia para ho - mogeneizar la temperatura o calor en toda la pieza, seguido de un enfriamiento que - para este caso generalmente son lentos y se efectúan dentro del horno.

#### NORMALIZADO.-

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente - más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. - De esta forma se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Se utilizan lo mismo - para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas que han sufrido trabajos en caliente, en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, también sirve para destruir los - efectos de un tratamiento anterior defectuoso, por medio del normalizado se eliminan tensiones internas uniformiza el tamaño de grano del acero.

En el normalizado, la velocidad de enfriamiento es más lenta que en tem - ple y más rápido que en 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 herra -

mientas, ni en los aleados de construcción.

El espesor de la pieza ejerce bastante influencia en los constituyentes y características que se obtienen en el normalizado de los aceros, esto se debe a la velocidad de enfriamiento que es la que definitivamente regula el tratamiento.

#### TEMPLE.-

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Con este tratamiento se pretende obtener totalmente una estructura martensítica. Para ello se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría más o menos rápidamente en un medio conveniente como puede ser agua, aceite, sales, Etc.

Como la fase gamma de su temperatura de estabilidad se transforma, según las reacciones perlíticas y Bainítica a temperaturas más elevadas que la de iniciación de la martensita.

#### MEDIOS DE ENFRIAMIENTO .-

Es muy importante su estudio, debido a que ellos nos van a dar la velocidad de enfriamiento deseada, para transformar la austenita en un microconstituyente determinado.

Se puede observar que la velocidad de enfriamiento puede variar conforme al medio de enfriamiento.

Así tenemos por ejemplo agua, aceite, sales fundidas.

Enfriamiento en agua.- Temperatura de temple  $15^{\circ} - 20^{\circ}$ , no debe pasar -

de 30°, ya que prolongaría la primera etapa de enfriamiento, con lo que es un inconveniente, porque ello ocasiona que disminuya la velocidad de enfriamiento en la zona de 750-500° C favoreciendo la formación de estructuras de baja dureza.

**Aceite.** - Se suelen emplear aceites animales, vegetales y minerales. Los dos primeros con el uso continuo a temperaturas de 50 a 125° C se descomponen aumentando su viscosidad dando temple bastante irregulares.

Los mejores aceites para el temple son los minerales. Un aceite de temple debe tener las siguientes propiedades:

Su viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites. Si el aceite es muy viscoso, la película próxima a la superficie tiende a carbonizarse, porque las corrientes de convección son muy lentas.

Si la viscosidad es baja, el aceite se adhiere menos a las piezas, pero de tal forma que la temperatura ambiente son de 5° a 9° Engler y a 50° de temperatura son de 2° a 4° Engler.

La volatilidad no debe ser elevada porque se pierde aceite con el uso y se espesa el baño con la pérdida de velocidad de enfriamiento. Teniendo otro inconveniente que al volatizarse el aceite forma burbujas y mucho vapor al rededor de las piezas, prolongándose la fase de enfriamiento con vapor ocasionando puntos blandos.

La temperatura de inflamación y combustión debe ser lo más elevada posible, para evitar un excesivo humo y también peligro de que se inflame el baño. Debe tener igualmente una gran resistencia a la oxidación.

**Sales fundidas.** Para el tratamiento térmico de los aceros, este tipo de me

dio de enfriamiento ha tenido gran aceptación. Están constituidas principalmente por cantidades variables de cloruros, carbonatos, nitritos, nitratos, y cianuros de sodio, potasio y Bario, que se utiliza para temperaturas desde 15 a 1300° C.

Características de los procesos de enfriamiento.- Para conocer la influencia que sobre el temple ejercen diferentes medios de enfriamiento, es muy interesante estudiar las etapas que se presentan en estos procesos.

Primera etapa.- Cuando el acero es introducido en el líquido, como su temperatura es muy alta se forma una capa de vapor que rodea el metal, la película de vapor o sea el enfriamiento se hace por conducción y radiación a través de la capa gaseosa.

Segunda etapa.- Cuando desciende la temperatura de la superficie del metal la película de vapor va desapareciendo. Sin embargo, el líquido hierve toda vía alrededor de las piezas y forman burbujas que rodean el acero. Esta etapa es de más rápido el enfriamiento y es llamada de enfriamiento por transporte de vapor.

Tercera etapa.- Esta etapa se presenta generalmente por debajo de 300° - el enfriamiento lo hace el líquido por conducción y convección cuando la diferencia de temperatura, entre la superficie y el medio refrigerante es ya pequeña.

#### REVENIDO.-

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que la crítica inferior  $A_{c1}$ , enfriándolo luego generalmente al-

aire otras veces en aceite o agua, según la composición.

El objeto del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando las tensiones internas que tienen siempre los aceros templados.

Los factores fundamentales del revenido de los aceros son: La temperatura del calentamiento y la permanencia de estos. El objetivo del revenido es eliminar parcial o total las tensiones internas, reducir la dureza y elevar la resiliencia.

Al transformar la martensita existe una disminución de volumen, y al descomponer la austenita existe un aumento de volumen.

Primera transformación.- Durante el revenido de  $200^{\circ}\text{C}$  ocurre una reducción provocada por la disminución de la forma tetragonal de la martensita, y en consecuencia una precipitación de Carbono. La martensita templeada se convierte en martensita revenida.

Segunda transformación.- Durante el revenido de  $200$  a  $300^{\circ}\text{C}$ , se aumenta el volumen de la pieza lo que está relacionado con la transformación de la austenita residual en martensita revenida.

Tercera Transformación.- El revenido de  $300$  a  $400^{\circ}\text{C}$ . produce la descomposición de la martensita en una mezcla de fase alfa  $\text{Fe}_3\text{C}$ . El contenido de carbono en la ferrita es casi cero. La estructura que se obtiene se denomina TROS/TITA revenida.

Los tratamientos térmicos el recocido en particular resultaría imposible el entendimiento si se desconoce el diagrama Hierro-Carbono.

Un detalle de mucha importancia, es que este diagrama no comprende hasta el 100% de Carbono, sino únicamente 6.67%, esto se debe a que en realidad el diagrama corresponde a una aleación de Fe-Carburo de hierro, ya que el carbono se combina con el hierro dando un compuesto llamado Cementita cuya fórmula es  $Fe_3C$  que contiene 6.67% de Carbono, o lo que es lo mismo la aleación de hierro con 6.67% de esta, constituido por el 100% de Cementita.

El Acero es una aleación y como tal se comporta; aunque esta aleación contiene una serie de elementos básicamente se puede considerar compuesta de hierro y Carbono, ya que este último es el elemento que mayor influencia tiene en las propiedades de la misma. El resto de los elementos tales como: Mn, Si, S, Cr, Mo - Etc.

Aunque en algunos casos estos elementos tienen gran influencia ya que desplazan los puntos críticos, esta influencia resulta mínima si se lo compara con la del Carbono.

Considerando el acero de esta forma y los efectos de los demás elementos como algo secundario, resulta más fácil explicarlo. Y como primera ventaja está la elaboración del diagrama Hierro-Carbono, el cual es un diagrama binario de solo dos componentes. Fig. (1)

En este diagrama quedan determinadas:

La línea Líquidus por la línea A-B-C-D

La línea Sólidus por la línea A-M-C-E-F

El Punto Eutectoide por el punto E

El Eutéctico por el punto C

También se puede observar en el mismo diagrama que se establece una diferencia entre aceros y las fundiciones o hierros colados.

Los aceros quedan comprendidos hasta 2 % C Las fundiciones o hierros colados hasta 6.67%C.

El Eutéctico del diagrama Hierro-Carbono es la lediburita que está localizada en la zona de las fundiciones.

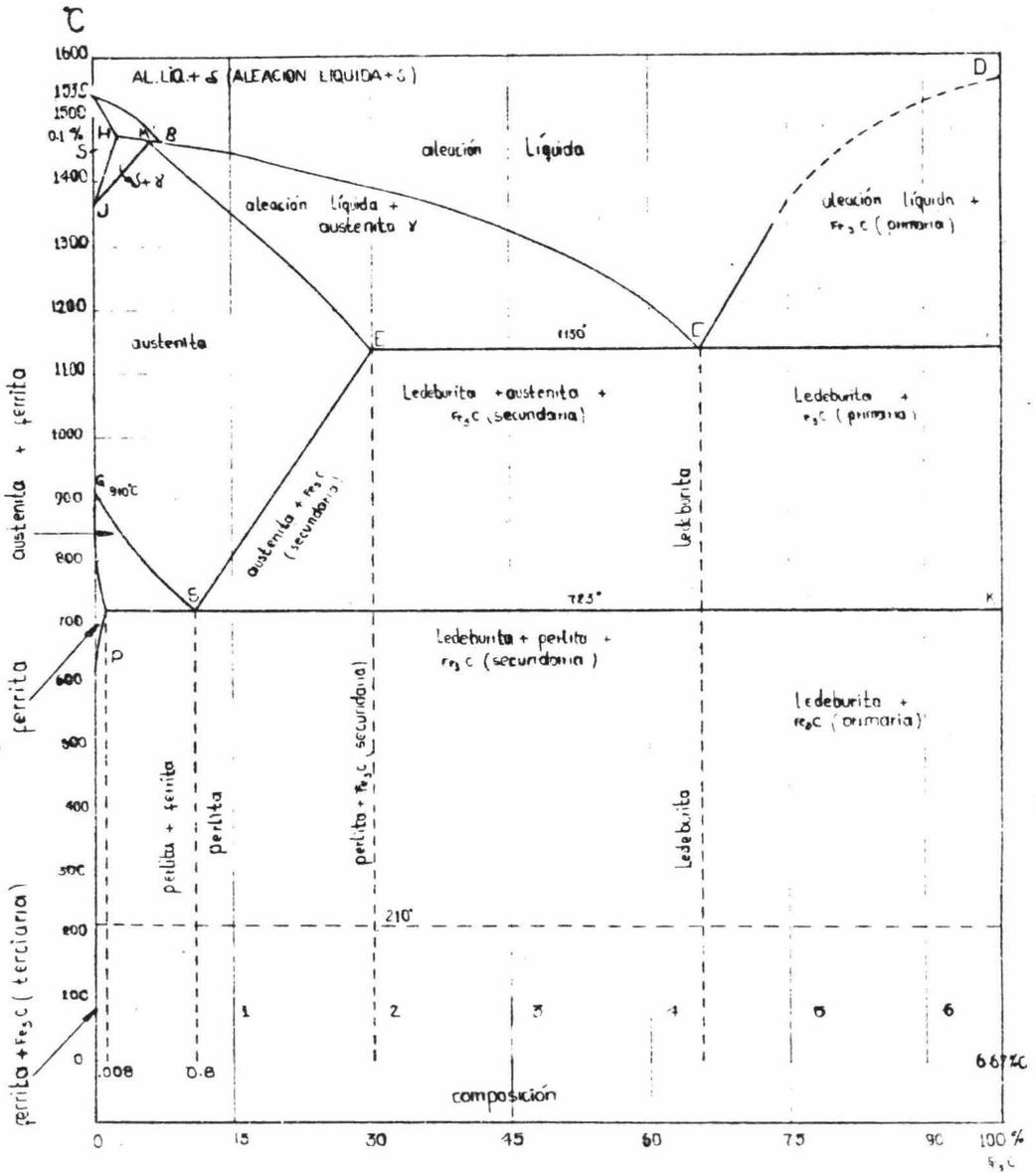
Los Tratamientos térmicos tanto de los aceros como de las fundiciones son muy importantes, pero todo el enfoque de este estudio será sobre el recocido DE ACEROS AL CARBONO Es por esto que únicamente tocaremos la parte comprendida hasta 1135° C es decir mucho después de que han solidificado y hasta 2.0% de Carbono que corresponde a la zona de los aceros. Por lo que de aquí en adelante trataremos solamente una parte del diagrama la cual se muestra por la figura ( 2 ).

Esta parte del diagrama, es similar a un diagrama de parcial solubilidad al estado sólido sólo que hay que tener presente que todas las reacciones que se mencionan son al estado sólido no obstante, la interpretación casi es igual que si se realizara en el proceso de solidificación.

Las fases sólidas que aparecen en el diagrama, reciben nombres propios que recuerdan los utilizados en mineralogía y se definen como:

Las fases sólidas que aparecen en el diagrama, reciben nombres propios que recuerdan los utilizados en mineralogía y se definen como:

FERRITA.



✓ Es una solución sólida de carbón en hierro alfa cuya máxima solubilidad es 0.025 % a 723° C a temperatura ambiente sólo disuelve 0.008 %.

✓ Es una solución sólida intersticial en la que los átomos de carbono ocupan los puntos medios de las aristas paralelas. Cristalizando en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (parámetro 2.85 a 2.90 Å). Es el constituyente más blando, dúctil y maleable de los aceros. Tiene una resistencia a la tracción alrededor de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, un alargamiento de 35% y una dureza BHN de 90 unidades.

#### AUSTENITA.

Solución sólida de carbono en hierro gamma. Se encuentra en los aceros calentados por encima de la temperatura A<sub>3</sub> ó Acm. Con una solubilidad máxima de 1.7% de Carbono a 1135° C al descender la temperatura disminuye la solubilidad hasta el punto A<sub>1</sub> sólo disuelve 0.88% de Carbono por debajo de esta temperatura se descompone en ferrita y cementita ( perlita ) su resistencia es de 88 a 105 Kg/mm<sup>2</sup> y su alargamiento de 10 a 30% no es magnética, pero muy dúctil y tenaz y de elevada resistencia al desgaste aún con dureza de 40 Rc.

#### CEMENTITA.

Es un carburo de hierro ( Fe<sub>3</sub>C ) que contiene 6.67% de carbono y 93.33% de Fe. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico, de parámetro a = 4,5235 Å, b = 5.0888 Å, c = 6,7431 Å los átomos de carbono están situados intersticialmente, rodeando seis átomos de hierro a cada átomo de carbono. Es el constituyente más duro y más frágil de los aceros al carbono HRc 68, es magnética a temperatura ambiente.

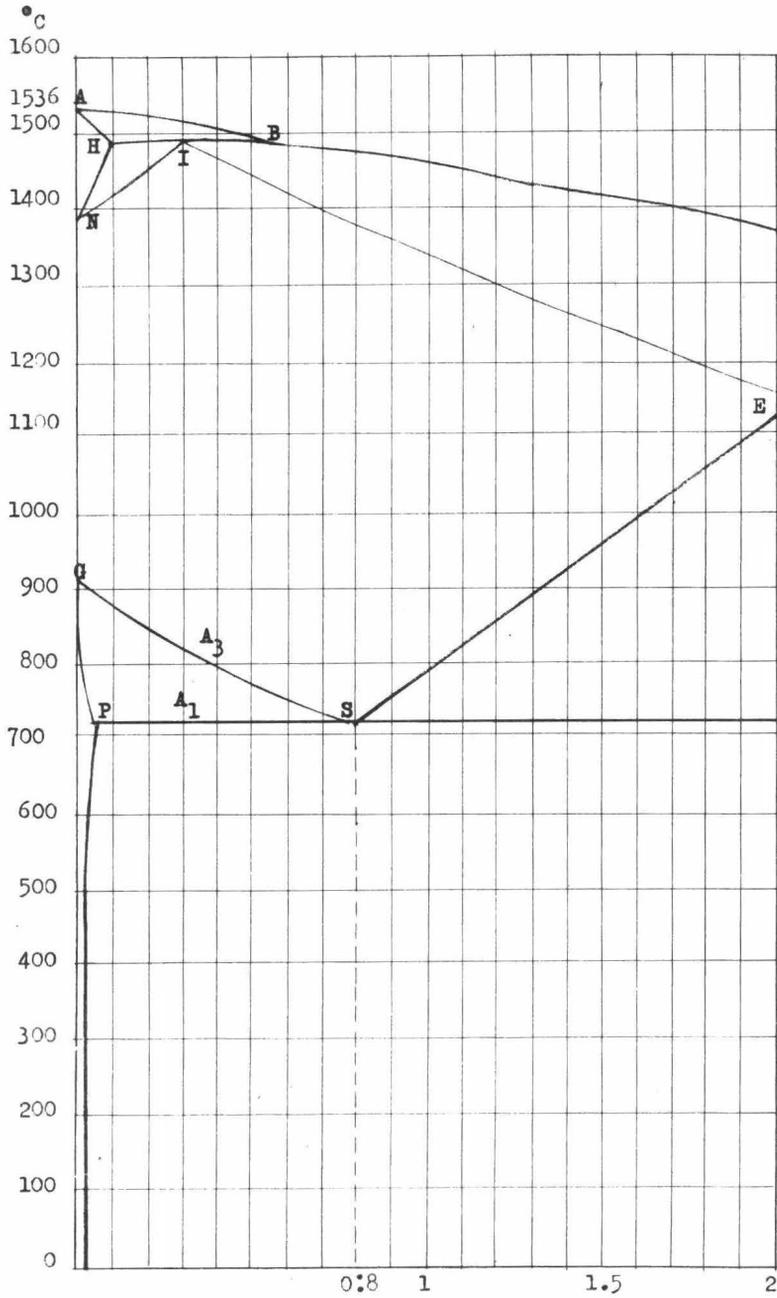


FIG. 2

te pero pierde su magnetismo a 218° centígrados.

#### PERLITA.

Constituyente Eutectoide de 0.88 % C formado por láminas alternadas y -- paralelas de hierro alfa y cementita ( $Fe_3C$ ) proveniente de la descomposición de la austenita en enfriamiento lento al pasar la temperatura de 721° C contiene aproximadamente 13% de  $Fe_3C$  y 87 % de Fe tiene una resistencia a la tracción de 80 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento de 15% aproximadamente.

La figura de estas láminas y la separación depende de la velocidad de enfriamiento e influye en las propiedades mecánicas.

La diferencia que existe entre Eutético y Eutectoide son: Eutético, son -- transformaciones que se efectúan del estado líquido al sólido, Eutectoide todas sus -- transformaciones son al estado sólido.

#### DIAGRAMAS T.T.T.

El diagrama Hierro-Carbono en base a calentamientos infinitamente lentos-- es aquel en el que no intervienen el factor tiempo, considerando que éste es el necesario para que se alcancen las condiciones del equilibrio; pero en la práctica rara vez sucede en esta forma, por lo que hay que contar con un diagrama que considere los di-- ferentes constituyentes que se obtienen al variar la velocidad de enfriamiento. Estos diagramas se conocen como curvas T.T.T. en relación a las variables que considera -- (Tiempo, temperatura, Transformación) También se conocen como curvas de las "S"-- en atención a su forma características, o bien diagramas I-T ( Transformación Isotérmica ).

Cada acero tiene su propio diagrama, el cual ha sido determinado en forma experimental.

Estos diagramas asignan los tiempos requeridos para el inicio, el término o cualquier porcentaje de transformación de la austenita, en las estructuras que de ellas se derivan a cualquier temperatura constante.

Así el diagrama nos indica la transformación de la austenita como una función de la temperatura y el tiempo, permitiéndonos conocer como responderá un acero al ser enfriado desde su estado austenítico.

#### DETERMINACION DE CURVAS T.T.T.

Para la determinación de las curvas de las "S" se utilizan principalmente dos métodos el dilatométrico y el metalográfico.

#### DILATOMETRICO.

El ensayo comienza colocando la probeta del acero en estudio en el fondo de un tubo de cuarzo provisto de una abertura lateral para que la transmisión del calor a la probeta de acero se haga más rápidamente.

Todo el conjunto se introduce en seguida en un horno vertical, en donde se calienta el acero a una temperatura ligeramente superior a la de austenización. Las variaciones de longitud de las probetas se transmiten a un reloj micrométrico por medio de una varilla de cuarzo. Para evitar que el calor llegue al micrómetro, se coloca sobre la tapa de horno un anillo refrigerante interiormente con agua en circulación.

Después de la igualada la temperatura en la probeta de acero, se saca rápidamente todo el conjunto y se mete en otro horno también vertical, donde hay un baño de sales de plomo fundido, cuya temperatura es precisamente la que se ha fijado para estudiar la transformación de la austenita. Al descender la temperatura, el acero de acuerdo con las leyes de dilatación y contracción térmica, se contrae luego al cabo de cierto tiempo, se inicia la dilatación de la probeta, que señala el principio de la transformación de la austenita que termina al cesar esa dilatación.

#### METALOGRAFICO.

En otro método que se utiliza para la determinación de las curvas T.T.T.

Su operatoria es como sigue: Se calienta una serie de probetas hasta la zona de austenización dando el tiempo necesario para que todas ellas alcancen la homogeneización correcta, se pasan a un baño caliente de sales o plomo fundidas y a continuación se sacan a intervalos sucesivos de tiempo las probetas del baño caliente, enfriándolas luego rápidamente en agua lo más fría que sea posible.

Examinando luego las estructuras con ayuda del microscopio se puede conocer el porcentaje de austenita que estaba sin transformar, se convierte en martensita, y los constituyentes formados a altas temperaturas por transformación isotérmica de un cierto porcentaje de austenita. Se conservan después del enfriamiento rápido en el mismo estado que tenían cuando fueron sacados del baño caliente. Y así sucesivamente examinando las demás probetas se pueden estudiar las estructuras obtenidas y conocer el tiempo necesario para la transformación total de la austenita.

## DESCRIPCION DEL DIAGRAMA.

Para describir el diagrama, tenemos como ejemplo el diagrama del acero - 1080 mostrado por la figura ( 3 ) donde tenemos:

## Coordenadas.

En el diagrama se representan sobre el eje de las ordenadas la temperatura y sobre las abscisas los tiempos; estos están representados en escala logarítmica, para poder representar fracciones de segundo hasta semanas.

## Líneas horizontales.

En la parte superior hay dos líneas marcadas  $A_s$  y  $A_f$  que corresponden al límite superior e inferior respectivamente del llamado intervalo crítico, es decir, son temperaturas del inicio y término de la transformación de la austenita.

En la parte inferior se señala otra línea marcada  $M_s$  la cual indica la temperatura a la cual se empieza a formar la martensita y continuará formándose la martensita a medida que baja la temperatura.

## Curvas.

De izquierda a derecha se encuentra primero una curva que empieza a la proximidad de la línea horizontal  $A_f$  o  $A_s$  y que baja hasta  $M_s$ .

Esta curva corresponde al inicio de la transformación de la austenita en los constituyentes que de ella se derivan.

La curva central, normalmente sólo punteada, representa el 50% de la transformación de la austenita.

La curva a la derecha marca el final de la transformación. El punto de in-

AC 100 1080

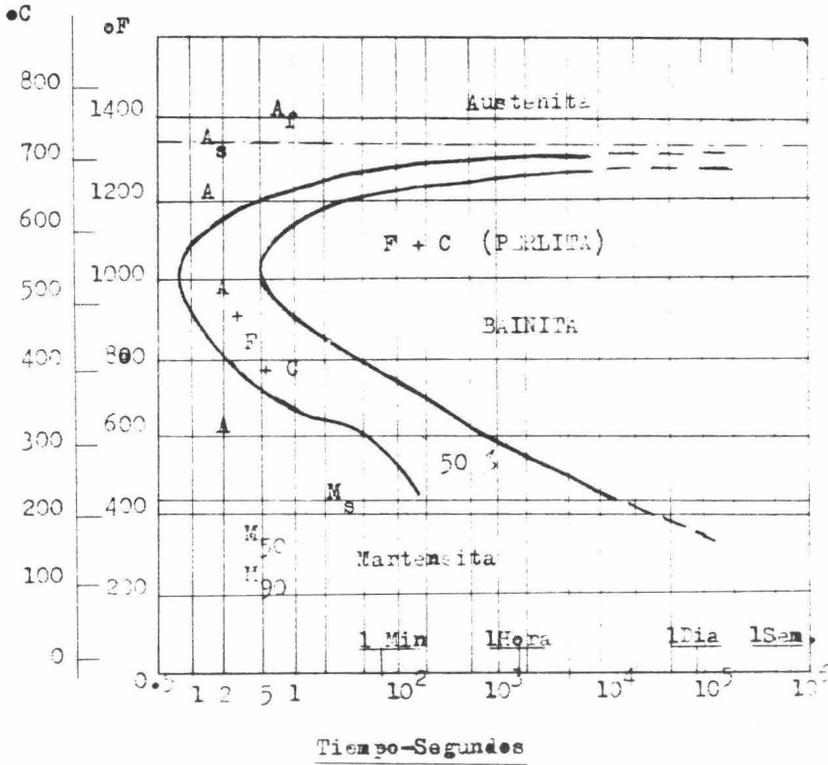


Figura # 3

flexión de las curvas, se le denomina "la nariz" de la curva corresponde al tiempo mínimo al que inicia la transformación y también limita en el sentido vertical la zona de existencia entre la perlita y la bainita.

Campos.

Arriba de la línea ms se encuentra una serie de letras sobre diferentes regiones de la curva. Cada una de ellas indica la fase presente en ese campo.

Así indican:

A.- Austenita

F.- Ferrita

C.- Cementita

B.- Bainita

Como se ha mencionado y se ha podido ver, la curva mostrada corresponde al acero eutectoide, por lo que su estructura después de un enfriamiento lento sólo podrá contener perlita; pero para los Hipereutectoides constituidos por cementita más perlita; se presenta una curva más que indica el inicio de la transformación de la austenita en ferrita o cementita según sea el caso y corresponde a la línea  $A_1$  o  $A_{cm}$  respectivamente del diagrama hierro-Carbono Fig. ( 4 )

#### APLICACION DEL DIAGRAMA.

Los diagramas T.T.T. son de gran importancia en el diseño de los tratamientos térmicos o en todo proceso en que se enfría el acero desde un estado austenítico hasta la temperatura ambiente sabiendo ya que nos señala los cambios que sufre, debido a las diferentes velocidades de enfriamiento.

Para entender como se aplica este diagrama se tomará como ejemplo el empleo de las curvas, de tres diferentes enfriamientos desde  $850^{\circ}$  del acero 1050 y veamos que obtenemos según indica la fig. ( 5 ).

El primer enfriamiento lo hacemos rápidamente de tal forma que la temperatura baje de  $850^{\circ}$  C hasta  $100^{\circ}$  C en poco más de medio segundo como marca la línea ( 1 ) Según el diagrama se obtendrá una estructura martensítica.

Otra pieza del mismo material la enfriamos de  $850^{\circ}$  C a  $100^{\circ}$  C en un tiempo de 5 segundos como marca la línea ( 2 ) al tocar la primera curva, se iniciará la transformación de la austenita a ferrita al tocar la segunda curva a  $600^{\circ}$  se inicia la transformación de la austenita en perlita y antes de tocar la curva llega a la línea  $M_s$  esto quiere decir que la estructura final estará compuesta por ferrita y perlita y un poco de austenita residual.

Otra pieza del mismo material se enfría desde  $850^{\circ}$  hasta  $100^{\circ}$  C en dos minutos curva ( 3 ) según el diagrama se obtendrá ferrita y perlita ya que la transformación terminó alrededor de  $600^{\circ}$  C en el momento en que cruzó la línea terminó la transformación y después de esta temperatura no importa como se enfrió ya que el material no sufrirá ninguna transformación.

#### FACTORES QUE AFECTAN LOS TRATAMIENTOS TERMICOS.

Para conseguir los cambios estructurales necesarios, se recurre a un calentamiento, que por regla general es arriba de los puntos críticos para transformar la estructura original en otra a las nuevas condiciones de equilibrio y a continuación en enfriar a una velocidad determinada, creando así las condiciones bajo las que se forman

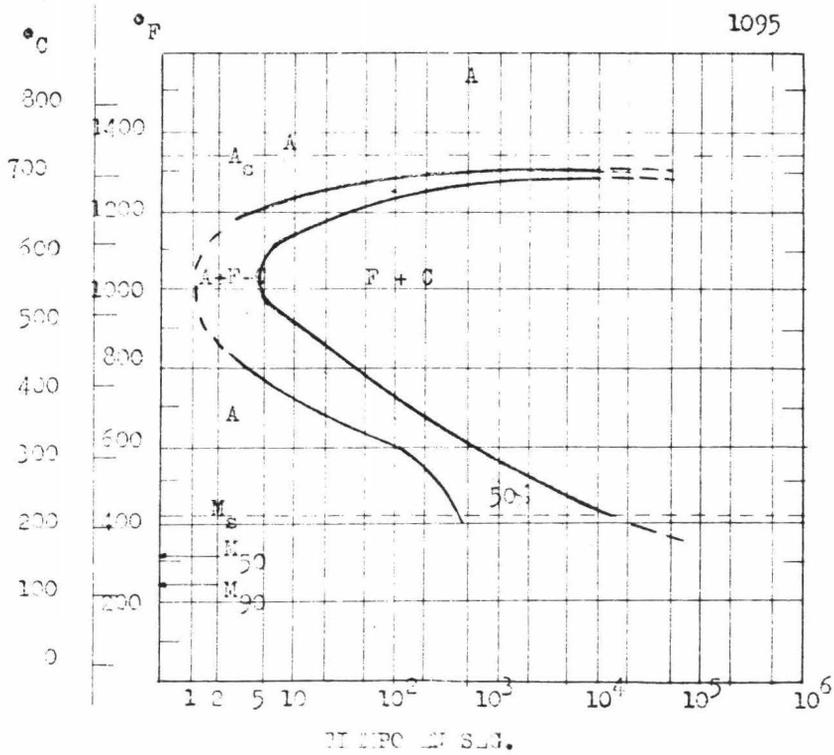


FIG. 4

las diferentes estructuras que imparten sus propiedades al material.

Los factores que mayor influencia tienen sobre los tratamientos térmicos son:

a) Composición química del material.

La composición química del material es de importancia fundamental en el comportamiento de los materiales sometidos a tratamientos térmicos.

Veamos el efecto de cada uno de los elementos que mayor influencia tienen en dicho tratamiento.

**Carbono ( C )** Para subrayar su importancia, es el elemento que mayor influencia tiene sobre las propiedades de los aceros y lógicamente este tiene proyección sobre los tratamientos térmicos. Determinado el diseño del tratamiento y las propiedades que se obtendrán de él. Es oportuno aclarar que los elementos P, S, Si. Este último en pequeñas cantidades, no tiene ninguna influencia sobre los tratamientos.

**Manganeso (mn).**

Este elemento mejora la templabilidad, siendo tan efectivo como el cromo endurece la ferrita, pero reduce la plasticidad. Se combina con el azufre evitando así la fragilidad. Tiene una solubilidad ilimitada en la austenita **CROMO --**  
( cr )

Tiende a formar carburos que mejoran la resistencia a la abrasión, mejora ligeramente la resistencia al ablandamiento en el revenido.

Este elemento eleva los puntos críticos y aumenta la templabilidad tiene una solubilidad de 12% en austenita y una solubilidad ilimitada en la ferrita ( Tabla - A. )

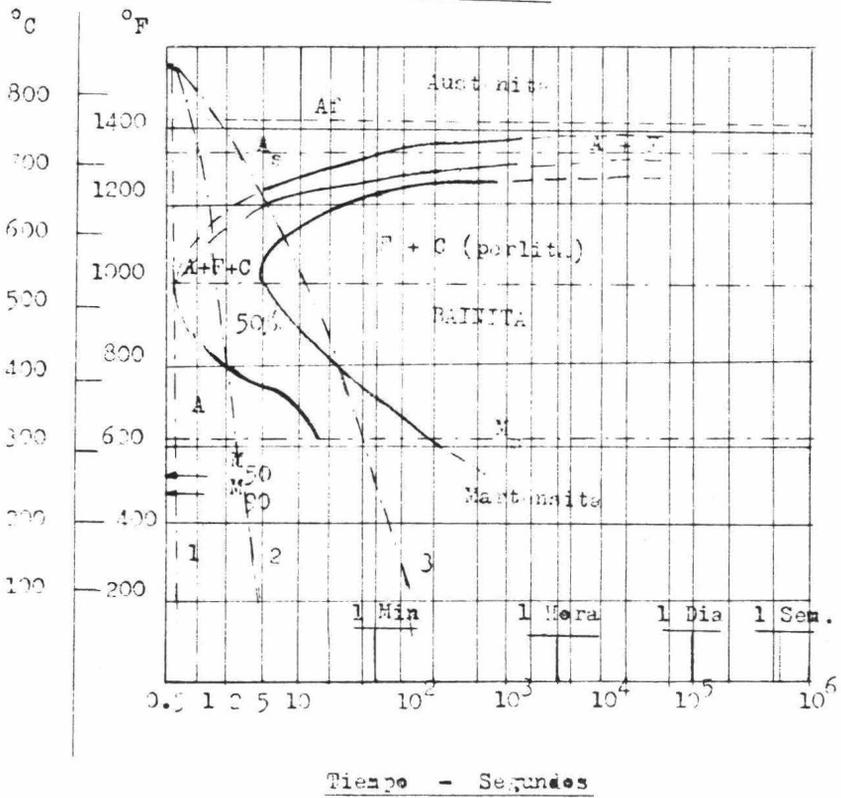
ACERO 1050

Figura 5

### NIQUEL ( Ni )

Es un elemento de aleación muy importante ya que tiene una solubilidad limitada en la austenita y es por esto que igual que ésta, cristaliza en el sistema cúbico de caras centradas.

Es un elemento que forma con el hierro  $\gamma$  una serie de soluciones sólidas. Esta gran infinidad de disoluciones da lugar a que estabilice la fase  $\gamma$  y aunque se disuelve también en hierro  $\alpha$  rebaja la temperatura de transformación de  $\gamma \rightleftharpoons \alpha$ . Con un 30% de Ni esta transformación sólo se realiza por debajo de la temperatura ambiente.

En los aceros baja los puntos críticos y la temperatura de descomposición de la austenita.

### MOLIBDENO. ( Mo )

La acción de este elemento aún en pequeñas cantidades se obtienen efectos considerables tiene una solubilidad de 37.5% en hierro  $\alpha$  estabiliza ésta ampliando su campo, eleva la temperatura y concentración del eutectoide. Tiene gran tendencia a formar carburos que son muy estables.

### VANADIO ( V )

Igual que el molibdeno se disuelve en hierro  $\alpha$  en pequeñas proporciones tiene una gran tendencia a formar carburos. Al ser agregados en pequeñas cantidades de Vanadio se reparten en toda la masa formando núcleos de cristalización proporcionando que el acero solidifique en un grano muy fino. Ver Fig. Tabla A.

Estos elementos van a influir en el proceso ya sea acelerando o retardando la transformación o el período de incubación, pero ello va a depender de la forma como estos elementos de aleación se encuentran en el acero.

Habrán elementos que se disuelvan en la austenita, que es el constituyente de partida en estas transformaciones. Estos elementos estabilizan la austenita y retardan su descomposición. Otros elementos se disuelven en la ferrita. Estos elementos estabilizan la ferrita y catalizan su formación o sea que acortan los tiempos de incubación y transformación.

Los elementos formadores de carburos, en cambio, influyen menos en los tiempos de incubación y transformación de la austenita.

#### ACCION QUE EJERCEN SOBRE EL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO.

Consideremos el diagrama Hierro-Carbono Fig. ( 1 ) el agregado de elementos de aleación que se disuelven en  $\gamma$  retardan las transformaciones, que se producirá a menor temperatura desplazando el punto "S" ( Eutectoide ), hacia abajo y hacia la izquierda, ( punto  $S'$  ) con el cual las líneas  $A_3$  y  $A_1$  se van a desplazar hacia las temperaturas decrecientes,  $A_3'$  y  $A_1'$ .

En cambio los elementos que se disuelven en  $\alpha$  la estabilizan y por lo tanto se amplía el campo de  $\alpha+\gamma$  reduciendo el de  $\gamma$  es a mayor temperatura y las líneas  $A_3$  y  $A_1$  se van a desplazar hacia las temperaturas crecientes  $A_3''$  y  $A_1''$  por lo tanto el punto S ( Eutectoide ) se desplazará hacia arriba y hacia la derecha, Punto  $S''$  Fig. A.

## INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION

Solubles en la austenita ( $\gamma$ )			Solubles en la ferrita ( $\alpha$ )		
No.	ELEMENTO	SOLUBILIDAD	No.	ELEMENTO	SOLUBILIDAD
7	Níquel ( Ni )	ilimitada	4	Cromo ( Cr )	ilimitada
5	Manganeso ( Mn )	"	1	Vanadio ( V )	"
6	Cobalto ( Co )	"	6	Cobalto ( Co )	75 %
4	Cromo ( Cr )	12 %	3	Mo ( Mo )	37.5 %
			7	Aluminio ( Al )	36 %
			2	Tungsteno ( W )	33 %
			7	Silicio ( Si )	18 %
			7	Níquel ( Ni )	10 %

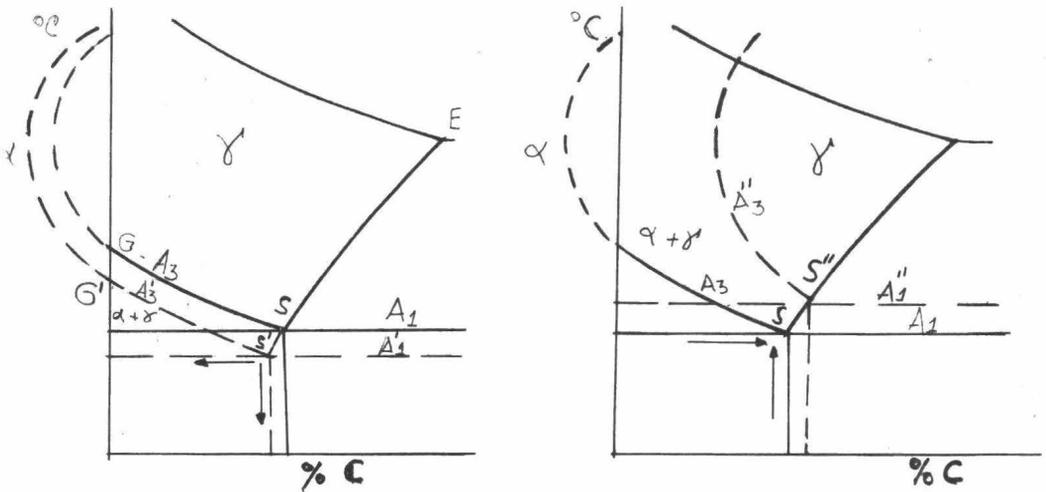
## ACCION SOBRE EL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

Estabilizan la austenita ( amplían su -  
campo )

Disminuyen la temperatura y concen -  
tración del eutectoide.

Estabilizan la ferrita ( amplían su -  
campo )

Elevan la temperatura y concentración -  
del eutectoide.



No: Número de orden que marca la tendencia a formar carburos.

NOTA: La solubilidad indicada puede variar con el contenido de carbono.

#### TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO.

La temperatura de calentamiento es otro de los factores que afectan los tratamientos térmicos y debe tenerse muy en cuenta ya que es el que crea las condiciones de las cuales se parte para la formación de nuevos constituyentes.

Cada tratamiento tiene una temperatura específica que es condicionada por su composición química.

Si la temperatura fuera insuficiente no se forma la estructura que es necesaria para dar lugar a la que finalmente se pretende. Si la temperatura en cambio es -- excesiva, el material sufre efectos nocivos tales como: crecimiento de grano, descar-

buración, deterioro de la superficie y en casos extremos hasta la completa inutilización del material.

Para calcular los puntos críticos  $A_{c_1}$  y  $A_{c_3}$  se utilizan las fórmulas siguientes:

$$A_{c_1} = 723 - 10.7(\%Mn) - 16.9 (\% Ni) + 29.1 (\% Si) + 16.9 (\% Cr) = ^\circ C$$

$$A_{c_3} = 910 - 203 (\%C) - 15.2 (\% Ni) + 44.7 (\% Si) + 104 (\% V) + 31.5(\%Mo) + 13.1 (\% W) - 30 (\% Mn) - 11 (\% Cr) = ^\circ C.$$

#### TIEMPO DE CALENTAMIENTO.

Esto debe ser cuidadosamente medido, ya que en combinación con la temperatura crean las condiciones de las que se parten para la formación de los nuevos componentes estructurales. La determinación del tiempo de calentamiento requiere de mucha experiencia por la serie de elementos que se deben tener en cuenta y que deben combinarse para obtener buenos resultados. Estos elementos son: Composición del material, tamaño y forma de la pieza clase de equipo usado y las condiciones finales que se deseen.

#### VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.

La característica que define a cada uno de los tratamientos térmicos, es básicamente la velocidad de enfriamiento empleada, y que, como ya se dijo de lugar a la formación de los diferentes componentes estructurales.

La velocidad de enfriamiento se controla por diferentes medios, según sea el tratamiento. Las velocidades más lentas se consiguen dejando que las piezas se en-

fríen dentro del horno, al terminar su fase de calentamiento; un aumento de velocidad se logra enfriando al "aire" es decir, sacando la pieza del horno y dejándola que se enfríe a la temperatura ambiente, otra velocidad aún mayor se lograría al someter la pieza en aire a presión; y así sucesivamente puede irse aumentando la velocidad según sea necesario. Posteriores aumentos se consiguen por inmersión de las piezas en: Aceite, agua, o soluciones salinas para velocidades más grandes. De donde provienen los nombres que empíricamente se dá a algunos aceros al mencionarlos como son: Temple al aire, al aceite, o al agua. ( Tabla B )

MEDIO DE ENFRIAMIENTO	RANGO DE ENFRIAMIENTO EN ° C /Seg.	
	EN LOS RANGOS DE TEMPERATURA.	
	650° - 550° C	300° - 200° C
Agua a 18° C	600	270
Agua a 30° C	500	270
Agua a 50° C	100	270
Agua a 75° C	30	200
10% Na OH en Agua	1200	300
10% Na Cl en Agua	1100	300
Aceite	100 - 150	20 - 50

## R E C O C I D O

El Recocido es un tratamiento que tiene por objeto ablandar el acero, -- otras veces además de ablandarlo sirve para eliminar tensiones y regenerar su estructura. Este tratamiento consiste en calentamientos adecuados seguido de enfriamientos - lentos.

El fin de aplicar el recocido a un material es con el objeto de dotarlo de - la mínima dureza y máxima maquinabilidad. Esto se consigue calentando el material a una temperatura legeramente superior a la crítica, siguiendo de un período de per - manencia temperatura suficiente para obtener el estado austenítico, y se enfría. Es - te enfriamiento debe hacerse muy lento y dentro del horno. Se puede decir que esta - forma de descender la temperatura es la característica de este tratamiento que lo dis - tingue principalmente del temple y del normalizado.

En el proceso del recocido se deben distinguir tres períodos o etapas que -- son muy importantes: CALENTAMIENTO, PERMANENCIA, y ENFRIAMIENTO.

En la primera etapa, CALENTAMIENTO que aunque no se le dá mucha im - portancia debe dársele cierta atención sobre todo cuando se trata de perfiles o de pie - zas de gran espesor. Ya que en estas piezas el calentamiento no puede ser uniforme - por su volumen, es por esto que si no se tiene cuidado en este momento, el calenta --

miento del centro de la pieza puede ser menor que el de la periferia o el bordo de la pieza y por consecuencia el calor no es uniforme y puede dar lugar a la formación de grietas, roturas y crearse fuertes tensiones. Para evitar estos problemas se recomienda que cuando se aplique este tratamiento a piezas de gran espesor, el calentamiento sea lento y uniforme de tal forma que el calor llegue hasta el centro de la pieza. En cambio cuando éstas sean sencillas y de poco espesor se pueden meter a temperaturas mayores ya que para estas piezas los efectos de diferencia de temperatura del centro a la periferia de las mismas será mínimo.

#### PERMANENCIA.-

Una vez calentado el material por encima de su punto crítico de 30 a 40°C, se deberá mantener la temperatura para que la transformación sea completa siguiendo un enfriamiento lento, en el cual las transformaciones se desarrollan totalmente y el metal adquirirá la constitución estable a temperaturas bajas.

Las tensiones que se originan por el mal calentamiento es por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías de las piezas o por las contracciones que ocurren al pasar el acero las zonas críticas.

El paso de estas temperaturas de las zonas críticas no es peligroso cuando toda la pieza tiene la misma temperatura o esta diferencia entre el centro y la periferia sea mínima. En cambio para el material de espesor mayor, existe más peligro por el efecto que anteriormente se citó.

Cuando una pieza es calentada aproximadamente a una temperatura  $A_{c1}$  la perlita comienza a transformarse en austenita y cambia la estructura cristalina del hierro

ro de la perlita, pasando de hierro alfa a hierro gamma y el acero que hasta entonces se está dilatando se contrae mientras dura la transformación continuando después la dilatación.

Haciendo un pequeño resumen podemos decir que el recocido es un tratamiento con el cual se puede obtener estructuras deseables para el maquinado, con mínimas durezas y máxima maquinabilidad ablandamientos y regeneración de estructuras.

Su procedimiento calentamiento, permanencia y enfriamiento lento que facilita el desarrollo de las transformaciones.

## DIFERENTES TIPOS DE COCIDO

### RECOCIDO TOTAL.-

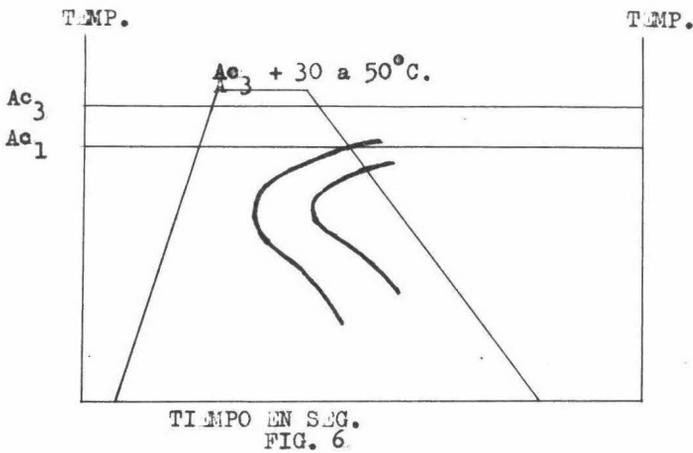
Este recocido se efectúa calentando el material o la pieza de 30 a 50° C por arriba de la línea  $Ac_3$  en los aceros hipoeutectoides y la  $A_{cm}$  en los hipereutectoides, con lo que se consigue para los primeros una estructura homogénea, y para los segundos, un agregado de austenita y cementita aglomerada, eliminando con esto la red que rodea los granos y que imparte fragilidad.

Después de alcanzar dicha temperatura deberá mantenerse por tiempo de una hora por cada 25 mm de espesor de la pieza para que alcance el equilibrio en estas condiciones.

Una vez estando el material con el tiempo suficiente de calentamiento se procede a enfriar con una velocidad lenta de 40-70° C por hora hasta alcanzar una temperatura menor de 300° C después se puede aumentar la velocidad de enfriamiento. De esta manera la estructura austenítica se transforma en totalmente a ferrita y perlita para el caso de los aceros hipoeutectoides y en perlita más Cementita para Hipereutectoides.

Este recocido es muy empleado cuando se requiere eliminar estructuras indeseables como la de la celada, elimina algo de segregaciones presentes.

La fig. ( 6 ) es la representación gráfica de este tratamiento, relacionán -  
dolo a las curvas de la "S" en ella se puede ver como la curva de enfriamiento la to -  
ca a temperatura alta, en la zona de perlita laminar gruesa.



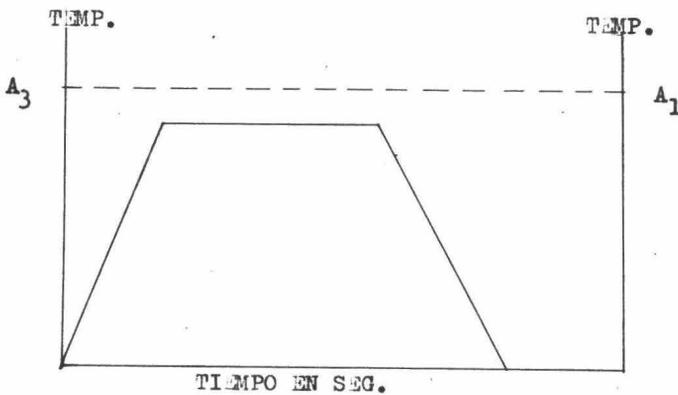
#### RECOCIDO DE RECRISTALIZACION.-

Los aceros que han sufrido severas deformaciones en frío como trefilado la -  
minación o embutido, presentan características que muchas veces son indeseables, de -  
bido a la deformación plástica de los granos que componen la estructura.

La forma de hacer que el material recobre sus propiedades previas a la de -  
formación, para esto se efectúa el recocido de recristalización. Este tratamiento con -  
siste en calentar el acero o la pieza, hasta una temperatura inferior a la  $A_1$  se man -

tiene en esas condiciones por un tiempo determinado, este tiempo va a depender del grado de deformación de la estructura.

El enfriamiento en general es lento, requisito muy drástico ya que no se ha alcanzado la transformación por lo que no hay influencia por parte del enfriamiento. Con este tratamiento los granos deformados por el trabajo en frío recobran su forma equiaxial y con ello se obtienen propiedades de resistencia baja y ductilidad elevada. Fig. 7



#### RECOCIDO GLOBULAR.

Se aplica este tratamiento cuando se desea obtener la mínima dureza y máxima maquinabilidad de un acero, conviene que su cementita no se presente en su forma laminar reticular en su perlita en los aceros Hipereutectoides sino que precipite en

forma de glóbulos.

Esto se consigue con este tipo de recocido para llevarse a la práctica, existen dos formas de hacerlo:

a) Para los aceros de bajo carbón se desarrolla mediante un calentamiento a temperatura subcrítica ligeramente inferior al punto  $A_{c1}$  a la que se mantiene un prolongado tiempo enfriando después muy lentamente.

b) Para los aceros de medio y alto Carbón y para los carburos conviene oscilar la temperatura por arriba y por abajo del punto  $A_{c1}$  enfriando después lentamente dentro del horno.

#### RECOCIDO DE AUSTENIZACION INCOMPLETA.-

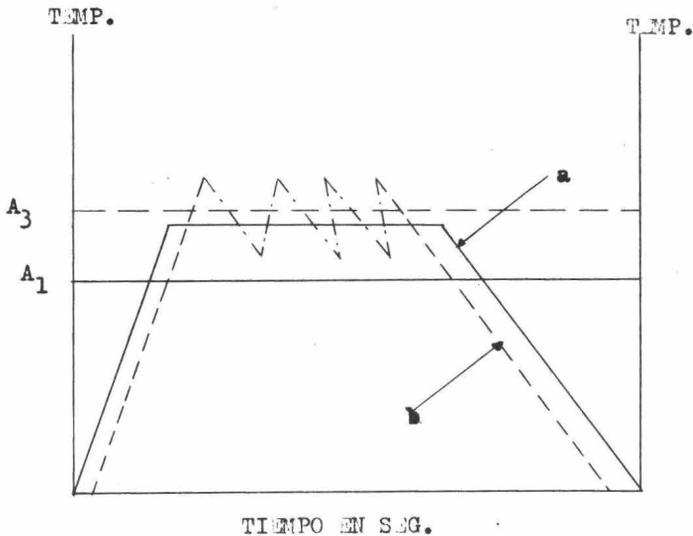
Estos tratamientos se suelen dar a los aceros de mas de 50% de Carbono, se aplica este recocido con el objeto ablandar y mejorar la maquinabilidad del material. Consiste en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior e inferior, seguidos de enfriamientos lentos.

Por medio de estos tratamientos se consigue en los aceros Hipereutectoides que la cementita y los carburos de la aleación adopten una disposición globular que da una dureza muy inferior a cualquier otra microestructura incluso la perlita laminar.

Este tratamiento se efectúa unas veces en un ciclo oscilante de temperatura que son superiores e inferiores a  $A_{c1}$ ; otras veces se emplean en su mayoría temperaturas arriba  $A_{c1}$ .

Al primer tipo de recocido ( Temperaturas oscilantes ) se le llama recocido globular oscilante, y al segundo simplemente recocido globular de austenización in-

completa. Fig. 8



#### RECOCIDO ISOTERMICO .-

Esta clase de recocido ha tenido en los últimos años una gran aceptación, - debido al éxito industrial, ya que tiene la ventaja de ser mucho más rápido que los recocidos ordinarios de enfriamientos lentos.

Actualmente por la información que nos dan los diagramas  $T^T$  es posible conocer y elegir las temperaturas de transformación convenientes para conseguir determinadas microestructuras y sus consiguientes durezas, pudiéndose predecir con bastante aproximación como y cuando se ha de efectuar la transformación de acuerdo con lo preparado.

### EL RECOCIDO ISOTERMICO.-

Consiste en calentar el acero a una temperatura arriba de la crítica  $A_{c1}$  y enfriar lo más rápidamente posible hasta una temperatura inferior a ésta y manteniéndola el tiempo necesario para la transformación y luego se enfría al aire.

Haciendo una tabla de los diferentes tipos de recocido más utilizados como se practican y el objeto del tratamiento. Tabla C.

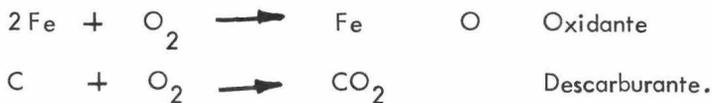
## ATMOSFERAS PROTECTORAS PARA EL RECOCIDO.

La utilización de hornos de atmósfera controlada en los procesos de tratamientos térmicos de aceros es cada día mayor, hace tiempo se vienen imponiendo el uso de baños de sales en casi todos los aspectos, debido a la facilidad de control y su relativo bajo costo de operación.

Las atmósferas protectoras se forman a partir del gas natural o propano mezclados con aire, y sometidos a diversos procesos de descomposición. Debido a las diversas temperaturas a que se encuentran los aceros durante los tratamientos, influyen en las propiedades que se desean obtener.

Por principio hagamos un análisis de los elementos que intervienen en la formación de las atmósferas:

Oxígeno.- Este elemento reacciona con la ferrita del acero para producir Oxido de fierro. Reacciona además con el Carbono en el acero descarburándolo. Es por esta razón, por lo que debe ser eliminado de las atmósferas.



Nitrógeno.- El Nitrógeno en su estado molecular es enteramente pasivo a la ferrita y es satisfactorio para recocidos en aceros bajo Carbón. Si se encuentra puro y seco es pasivo a los aceros altos en Carbón. Sin embargo cuando tiene humedad pue

DENOMINACION	TEMPERATURA DE RECOCIDO.	PRACTICA DEL TRATAMIENTO	OBJETO DEL TRATAMIENTO
Recocido de regeneración o reconocido -- total.	30-50° por encima de $A_3$ (Aceros hipoeutectoides) - 30-50° por encima	Mantener la temperatura aproximadamente 1 h. por cada 25 mm de dimensión menor de la sección seguido de enfriamiento lento dentro del horno.	Obtención de grano grueso para facilitar las operaciones de mecanizado.
Recocido de globulización.	15-50° oscilando alternativamente por encima y por abajo de $Ac_1$ , y por transformación isotérmica a 700° C.	enfriamiento lento hasta $Ar_1$ y después es a voluntad el enfriamiento. Mantener largo tiempo a $Ar_1$ , en seguida se enfría lentamente hasta una temperatura aproximada de -- 600° y se baja la temperatura a voluntad. Calentar por arriba de $Ac_3$ transformación isotérmica a 700° y después se enfría al aire.	Ablandar y favorecer la deformación en frío y la mecanización de los aceros - Hipereutectoides. Globulización de la cementita.
Recocido de Recristalización	Alrededor de 500-600° C (en algunos casos superiores)	ENFRIAMIENTO LENTO	Neutralización de la acritud producida por la deformación de nuevos cristales.
Recocido de eliminación de tensiones.	Por abajo de $Ac_1$ (550-650°). En aleados hasta -- 750-800° C)	Calentamiento lento, mantener la temperatura algún tiempo y enfriamiento lento dentro del horno.	Supresión de las tensiones internas mejora las propiedades en construcciones soldadas y forjadas.
Recocido de difusión.	Muy elevadas 1050-1250° C.	Largo tiempo mayor - de 20 Hrs. Seguido de un enfriamiento a voluntad.	Para eliminar en parte las segregaciones de estructuras de co-lada, forja y laminado.
Recocido de estabilización.	Crecientes hasta 600-700° C., 50° C abajo de $Ac_1$	Mantenimiento corto a la temperatura y enfriamiento a voluntad.	Estabilización de las propiedades mecánicas y eliminación de los fenómenos de envejecimiento.

de causar descarburación.

Hidrógeno.- Este elemento es altamente reductor del óxido de fierro y es por esto un desoxidante poderoso. Si se encuentra completamente seco no causa efectos de descarburación en aceros alto carbón excepto a elevadas temperaturas reacciona con el Carbono para formar metano.



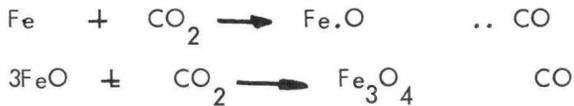
BIOXIDO DE CARBONO.-

Reacciona con la ferrita y causa oxidación y es además descarburante. -

Como descarburante produce la siguiente reacción:



Esta reacción continúa hasta que se agota el contenido de Carbono de la superficie del acero o se agota el  $\text{CO}_2$  presente. Si la fuente  $\text{CO}_2$  continúa se produce Oxidación.



Para los aceros bajo Carbono la relación de CO a  $\text{CO}_2$  puede estar en orden de 2 a 1. Para aceros alto Carbono y dependiendo de la temperatura de tratamiento, esta relación puede ser tan alta como 100 a 1.

MONOXIDO DE CARBONO.-

Reacciona con la ferrita a altas temperaturas para formar carburo de fierro- es por esto Carburizante, y es deseable para tratamiento térmico de aceros al carbón.



A bajas temperaturas tiende a descomponerse en  $\text{CO}_2$  y Carbón libre el --  
cual se deposita en el acero en forma de cenizas.

#### VAPOR DE AGUA.

Es un oxidante y un descarburante energético ya que oxida la ferrita y se --  
combina con el carbón en el acero para formar  $\text{CO}$  e Hidrógeno.



Reacciona con la superficie del acero a muy bajas temperaturas y es la cau--  
sa principal del "azulado" durante el ciclo de enfriamiento.

#### HIDROCARBUROS.-

Los Hidrocarburos más comunes que se encuentran en las atmósferas son:

Metano  $\text{CH}_4$ , Propano  $\text{C}_3\text{H}_8$ , Etano  $\text{C}_2\text{H}_6$ , Butano  $\text{C}_4\text{H}_{10}$

siendo el metano y propano los que más se utilizan.

Su actividad Química para reaccionar depende de la descomposición térmica que sufren a altas temperaturas. Es por esto que cuando se efectúa un tratamiento de recocido se descomponen liberando hidrógeno y depositando hollín en el acero.



Las atmósferas las podemos dividir en:

#### ENDOTERMICAS Y EXOTERMICAS.

Las atmósferas Endotérmicas son el resultado de la DISOCIACION parcial -

o total de una mezcla aire-combustible.

Las Exotérmicas son el resultado de la COMBUSTION parcial o total de una mezcla aire-combustibles.

Para que se obtenga una atmósfera exotérmica la relación aire-gas deberá ser de una proporción de 5:1 y para que la atmósfera sea Endotérmica esta relación deberá ser menor de 5:1.

Existen otra clase de atmósferas las cuales se preparan a base de Nitrógeno, Hidrógeno, Amoniaco anhidro o una mezcla de ellos que puedan hacer una atmósfera rica o pobre.

Para la producción de atmósfera el combustible más utilizado actualmente es el gas natural cuya composición aproximada es:

Metano  $\text{CH}_4 = 8,1 \%$  en Vol.

Etano  $\text{C}_2\text{H}_6 = 12,5 \%$  Vol.

Nitrógeno  $\text{N}_2 = 6,5 \%$

El grado de combustión se logra mediante el control de la relación aire-gas conociendo el volumen teórico de aire requerido para la combustión total o parcial de la mezcla.

Las atmósferas utilizadas en los tratamientos térmicos están clasificadas de acuerdo con los combustibles empleados para su generación y el porcentaje de los elementos obtenidos.

Aplicaciones.

Entre los usos más comunes de este tipo de atmósferas son: Recocado, Nor-

malizado, Revenido, Carburizado, Temple, Cianurado seco sinterizado Etc.

#### ATMOSFERAS EXOTERMICAS.

Son las más económicas y de fácil producción su aplicación más común son en recocido, Normalizado de metales no ferrosos y aceros de bajo Carbón en donde la descarburación no es un factor muy importante ya que éstas tienen un gran poder de descarburación.

#### ENDOTERMICAS.-

Estas atmósferas son el resultado de la disociación parcial o total de una mezcla aire-gas y tal disociación se lleva a cabo en presencia de catalizadores, dentro de una cámara calentada exteriormente ( Fig. 9 ) y su aplicación más común y -- muy generalizada es en los procesos de carburación y carbonitruración en los que sirven de atmósfera en contra la oxidación.

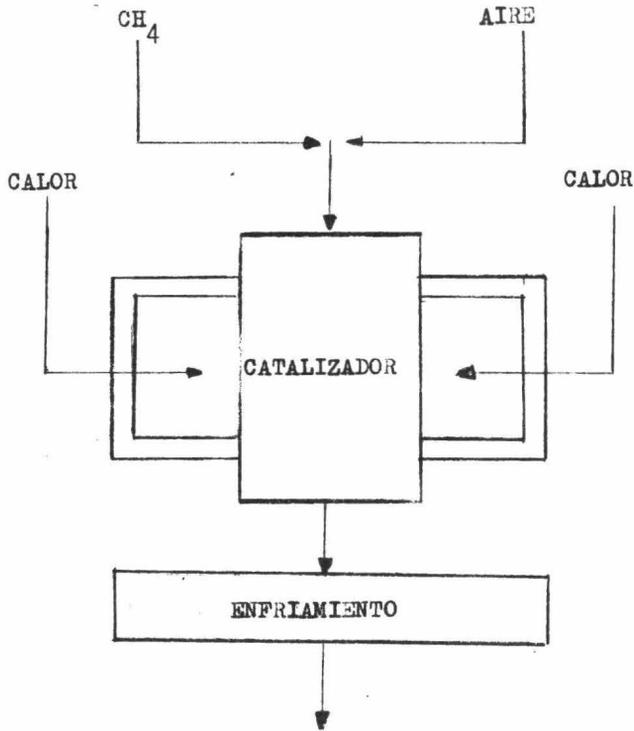


FIG. (9)

#### ATMOSFERA DE NITROGENO.

Este tipo de atmósferas son en realidad atmósferas exotérmicas a las que se les ha eliminado el  $\text{CO}_2$  y el vapor de agua. Su aplicación como atmósfera protectora en el recocido, endureciendo y sinterizado de aceros de bajo medio y alto carbón.

#### Control de Atmósferas.

Durante los tratamientos térmicos de los aceros, debido a la acción de la atmósfera se pueden presentar dos fenómenos en las superficies de los materiales tales

como oxidación y descarburación.

La oxidación es producida por la acción de los gases oxidantes y es por esto que se forman los óxidos de hierro en las capas superficiales del material. Esto da lugar a la formación de cascarilla y aumenta el valor dimensional de la pieza por lo que es un fenómeno nocivo que debe ser eliminado durante los tratamientos.

Descarburación.- Es una pérdida de Carbono en las zonas periféricas de los aceros y hierros debido a la acción de los gases reductores. La eliminación de este fenómeno en los tratamientos es de capital importancia, sobre todo para los aceros de alto carbón, ya que las piezas deben quedar con durezas altas en la superficie cosa que no ocurre cuando se presente este fenómeno.

Veamos unos ejemplos como se utilizan estas atmósferas teniendo en cuenta lo antes expuesto.

En un proceso de carburizado en donde la relación de difusión o penetración de carbón sigue la ecuación general:

$$\text{Penetración} = K \sqrt{t} \quad (\text{horas})$$

donde  $t$  = es el tiempo a temperatura en horas.

$k$  = es la constante de difusión para una temperatura dada.

Temp. °C	VALORES	
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
760	2.97	0.76
816	8.15	0.94
871	20.3	1.13
927	46.4	1.34
982	98.4	1.57
1038	197.2	1.81
1093	371.5	2.06
1149	666.9	2.32
1204	1142.3	2.60

TABLA D

La temperatura y el tiempo a temperatura gobierna la penetración del carbón pero la atmósfera de gas determina la concentración de carbón en la capa.

El potencial de carbón de una atmósfera se puede describir por medio de — dos ecuaciones:



su constante de equilibrio:

$$K_1 = \frac{(\text{CO})^2}{\text{CO}_2}$$

$$\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \longrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$$

$$K_2 = \frac{(\text{CO})(\text{H}_2\text{O})}{(\text{H}_2)(\text{CO}_2)}$$

En la tabla D muestra los valores de K para varias temperaturas.

Ahora si tratamos de terminar el  $\text{CO}_2$  disponible en una atmósfera cuando se quiere procesar un acero 0.60% de C a  $1650^\circ \text{F}$  ( $904^\circ \text{C}$ ) el valor de  $K_1 = 32$  para austenita saturada (1.2% C)

$$\text{El valor de } K_1 \text{ para 0.60 \% debe ser } \frac{K_1}{32} = \frac{0.60}{1.2} \text{ o } K_1 = 16$$

Si el análisis del gas de la atmósfera del horno ha indicado un contenido de 10 % de CO debemos substituir en la ecuación:

$$K_1 = \frac{(\text{CO})^2}{\text{CO}_2} \qquad 16 = \frac{(0.02)^2}{\text{CO}_2}$$

$$\text{Por lo que } \text{CO}_2 = \frac{0.040}{16} = 0.0025 = 0.25 \%$$

Un gas teniendo una composición de 20 % CO, 0.25 %  $\text{CO}_2$  y el resto  $\text{H}_2$  y  $\text{N}_2$  podrá estar en equilibrio o neutral con dicho acero de 0.60 % de C a una temperatura de  $904^\circ \text{C}$  pero podrá carburizar a un acero de menor contenido de carbón, o descarburar a uno de mayor porcentaje a esta temperatura.

#### ATMOSFERA CONTROLADA POR GOTEO DE METANOL.

Existen muchas formas de obtener atmósferas que protegen el tratamiento del recocido, entre ellas tenemos esta que se forma por medio del goteo del metanol.

Se estudia la posibilidad de preparación de una atmósfera controlable obtenida por medio de este método exclusivamente. El potencial de Carbono de la atmósfera, generada puede regularse variando el caudal de metanol introducido dentro del horno.

Los procedimientos de goteo, empleando líquidos orgánicos para generación

de atmósferas, son ampliamente utilizados en la práctica, como consecuencia de su simplicidad en cuanto a la forma de realizar su operación.

Las exigencias crecientes en cuanto a obtención de capas con contenidos superficiales de carbono perfectamente controlado, dentro de estrechos límites ha dado lugar a una tendencia en los procedimientos de goteo con generación de éstas en el mismo horno, y para conseguir que estas mismas ofrezcan una composición bien definida.

Cuando todo esto sucede puede producirse el potencial de carbono de la atmósfera controlando alguno de los componentes de la mezcla gaseosa, normalmente vapor de agua o contenido de anhídrido carbónico, por las condiciones de operación.

El metanol goteado a caudal constante, genera una atmósfera base, que se hace portadora y se enriquece con isopropanol o acetato de etilo, para controlar el potencial de carbono, a partir de la medida del punto de rocío del gas. El empleo de este segundo líquido está justificado por la cantidad del metanol que habría de consumirse para disponer de un átomo gramo de carbono útil para el tratamiento.

También se indica que variando el caudal de metanol puede obtenerse potenciales de carbono distintos correspondientes a la atmósfera base generada. (Fig. 10)

En esta figura se muestra el dispositivo experimental utilizado para estos ensayos. En conjunto está constituido por un horno para tratamiento en atmósfera, un dispositivo para el suministro del metanol y una serie de aparatos para el control térmico del horno y analítico de los gases generados.

El horno es de cámara cilíndrica provisto de virola metálica de acero refractario y cuyo volumen total es variable. La homogeneidad de la atmósfera está ase-

gurada por la acción de un ventilador, situado en la parte inferior de la cámara, impulsado por un motor. El sistema de calefacción del horno es por resistencia eléctrica de 18 KW de potencia. La temperatura máxima de utilización es de 1000° C. La cesta de carga es también cilíndrica.

#### ENSAYOS.-

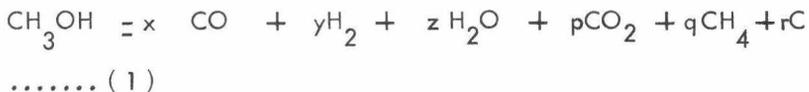
Los ensayos que se llevan a cabo por medio de este procedimiento en relación con la preparación de atmósferas por goteo de metanol y destinados a tratamientos térmicos. Debe considerarse que se trabaja con metanol comercial y que siendo un producto sintético, se suministra con un precio relativamente bajo en comparación con el precio de otros alcoholes. Esto permite obtener una atmósfera a costo reducido y condiciones de generación sencilla. Por cada 610 C.C. de metanol goteado se obtiene un metro cúbico de gas, en condiciones normales de composición aproximada:

32 % de CO y 65 % de H<sub>2</sub>

Las reacciones que se efectúan al intervenir el metano en esta operación son:



La craquización del metanol, como conjunto tiene lugar a la siguiente reacción:



La lentitud en alcanzarse un punto de rocío, en comparación con el caso del anhídrido carbónico, de acuerdo con la variación del caudal del metanol y del

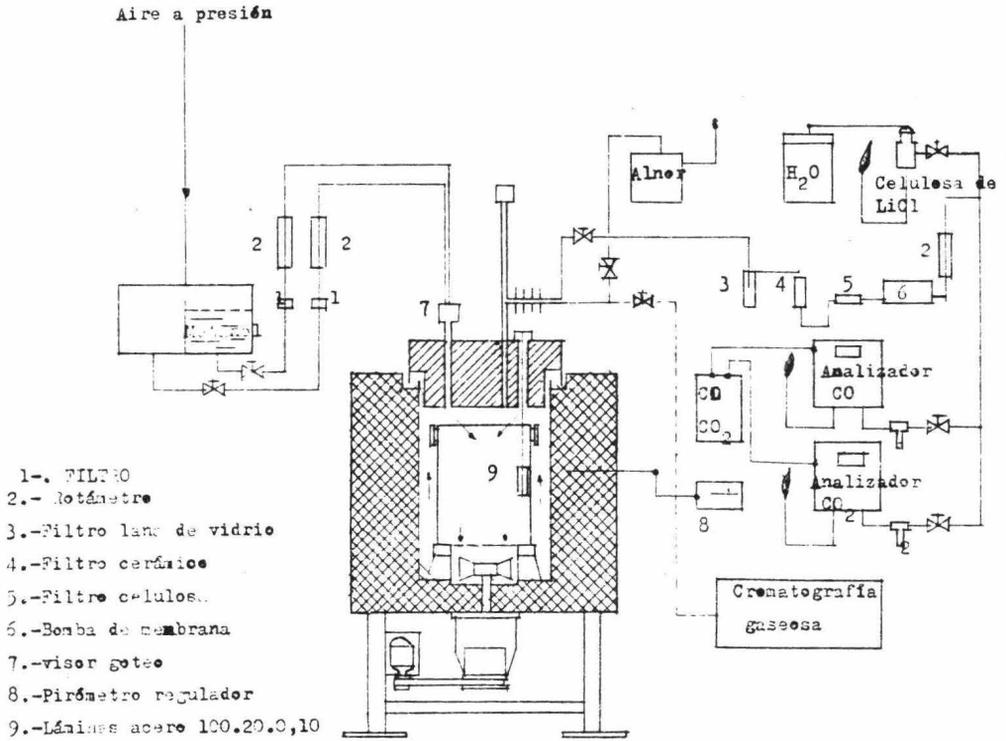


Fig. 10 Esquema de la instalación para ensayos de goteo de metanol.

potencial de carbono de la atmósfera, hace suponer las reacciones siguientes:



Según este esquema, en el que se presinde de los equilibrios químicos en que interviene el metano, cuando disminuye el caudal de metanol tenderán a formarse mayores proporciones de anhídrido carbónico y de vapor de agua en la atmósfera, inmediatamente después de disminuir la velocidad de goteo tiene lugar el aumento de la proporción de anhídrido carbónico por efecto de la reacción (3). Estando en equilibrio (3) se satisface continuamente la relación del potencial de carbono y los contenidos de anhídrido carbónico y de monóxido de carbono de la atmósfera.

La formación del vapor de agua precisa de la reacción del anhídrido carbónico, creando según la reacción de BOUDOUARD, y del hidrógeno procedente de la craquización del metanol según la reacción (2)

Tanto la reacción (2) como la reacción (3) pueden encontrarse en equilibrio pero la reacción (4) del gas de agua se muestra lenta dando lugar a la anomalía observada. Siendo esta reacción más lenta cinéticamente, se desplaza de derecha a izquierda simultáneamente impulsada por rápida transformación de  $\text{CO}_2$  de acuerdo a la reacción (3).

#### CONCLUSIONES.

Los resultados de los ensayos efectuados sobre generación de atmósferas por goteo de metanol, en cantidades de 2000 C. C. / hr. y temperaturas entre  $800^\circ$  y --

950° C sucede lo siguiente:

1.- A partir de metanol puede generarse atmósferas de potencial de carbono variable y regulable a partir del caudal del alcohol suministrado. El intervalo de potenciales de carbono conseguibles depende grandamente de la temperatura de operación.

A temperaturas relativamente bajas 800 y 850° C, se logra alcanzar un potencial de carbono Hipereutectoide incluso con caudales pequeños. A temperaturas mayores 900 y 950° C nunca se alcanzan potenciales Hipereutectoides.

2.- Es posible efectuar el control del potencial de carbono de la atmósfera generada a partir de la medida del punto de rocío del gas o bien del contenido de anhídrido carbónico.

3.- Con toda generalidad podría utilizarse para el tratamiento de los aceros donde no se pretende incorporar carbón sino simplemente evitar la descarburación durante el proceso de austenización necesario para el recocido en este caso tendría la ventaja de un control riguroso del potencial de carbono junto a la sencillez de operación.

Como se puede observar todas estas formaciones de atmósferas para proteger el tratamiento térmico del recocido son muy importantes ya que cada una de ellas actúa diferentemente siéndonos muy provechoso sobre todo para evitar tanto la descarburación como la oxidación que tanto problema causa a los materiales.

## EXPERIMENTACION

En este capítulo trataremos la parte práctica de este trabajo y lo haremos de la siguiente manera:

Se aplicará el tratamiento Térmico de RECOCIDO DE AUSTENIZACION COMPLETA Y AUSTENIZACION INCOMPLETA, a una serie de probetas de bajo y medio Carbono. Tomándose estas probetas de la siguiente forma:

4 AISI 1010, 2 AISI 1030, 2 AISI 1040, 4 AISI 1080. Con el fin de observar su comportamiento después del tratamiento del Recocido de Austenización completa o incompleta.

La secuencia a seguir en la aplicación de los tratamientos mencionados se hará siguiendo un ciclo de calentamiento, permanencia y enfriamiento a las probetas que se les aplique este tratamiento.

Las pruebas que se efectuarán a estas probetas serán:

ANALISIS QUIMICO Al material antes del tratamiento.

PRUEBAS FISICAS ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO.

DUREZA

RESISTENCIA A LA TRACCION

ALARGAMIENTO

REDUCCION DE AREA

LIMITE ELASTICO

COMPRESION

METALOGRAFIA ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO

MICROESTRUCTURA

% FASES PRESENTES

REACTIVO DE ATAQUE

AUMENTOS

Nota: Se considerará compresión O.K. a aquella muestra que después de aplicarle - la prueba de compresión no presente grietas, traslapes, Rechupes o ranuras en los bordes de las muestras. Según prácticas Standard A S T M.

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE ENTREGA (NORMALIZADO)  
PARA LA ELABORACION DE LA PARTE EXPERIMENTAL DE ESTA TESIS.  
ANALISIS QUIMICO

	A ( 1010 )	B ( 1030 )	C ( 1040 )	D ( 1080 )
CARBON ( C )	.09 %	.32 %	.42 %	.79 %
AZUFRE ( S )	.034 %	.035 %	.026 %	.025 %
MANGANESO (Mn)	.48 %	.62 %	.58 %	.54 %
FOSFORO ( P )	.008 %	.009 %	.006 %	.009 %
SILICIO ( Si )	.019 %	.28 %	.26 %	.24 %
CROMO (Cr)	....	.05 %	.02 %	....
COBRE (Cu)	.10 %	.08 %	.12 %	.12 %

PRUEBAS FISICAS

	A	B	C	D
DUREZA	77 Rb	88 Rb	93 Rb	31.5 Rc
RES. A LA TRAC.	49 Kg/mm <sup>2</sup>	67 Kg/mm <sup>2</sup>	70 Kg/mm <sup>2</sup>	106 Kg/mm <sup>2</sup>
ELONGACION	26 %	20 %	18 %	12 %
LIMITE ELASTICO	40.8 Kg/mm <sup>2</sup>	44 Kg/mm <sup>2</sup>	59 Kg/mm <sup>2</sup>	99 Kg/mm <sup>2</sup>
AREA	.316 Cm <sup>2</sup>	.321 Cm <sup>2</sup>	.320 Cm <sup>2</sup>	.316 Cm <sup>2</sup>
REDUCCION DE AREA	45 %	36 %	33 %	24 %
VOLUMEN	1.58 Cm <sup>3</sup>	1.60 cm <sup>3</sup>	1.48 Cm <sup>3</sup>	3.13 Cm <sup>3</sup>

METALOGRAFIA

	A		B		C		D	
MICROESTRUCTURA	PERLITA Y FERRITA		PERLITA Y FERRITA		PERLITA Y FERRITA		PERLITA	
% FASES PRESENTES	5	95	50	50	55	45	100	0
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL 2 %		NITAL 2 %		NITAL 2 %		NITAL 2 %	
AUMENTOS	250 X		500 X		500 X		500 X	

## RECOCIDO DE AUSTENIZACION COMPLETA.

ACERO BAJO CARBON A ( 1010 )

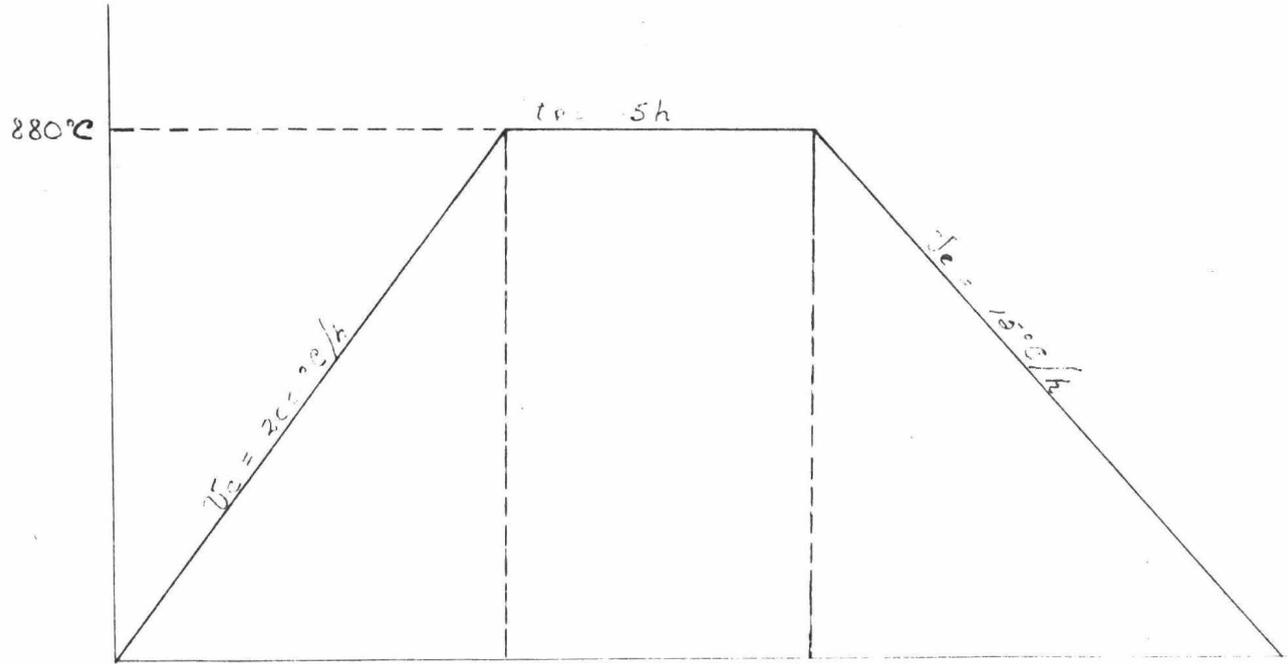
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	200° C / hora
TEMPERATURA DE AUSTENIZACION	880° C
TIEMPO DE PERMANENCIA	.5 horas / . 316 Cm <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE ENFIRAMIENTO	15° C / hora

## PRUEBAS FISICAS

DUREZA ROCKWELL - B	37
RESISTENCIA A LA TRACCION	27 Kg/mm <sup>2</sup> = 39,540 lb/pulg. <sup>2</sup>
LIMITE ELASTICO	18.0 Kg/mm <sup>2</sup> = 25,900 lb/pulg <sup>2</sup>
ELONGACION	24 %
REDUCCION DE AREA	76 %
COMPRESION	O.K.
VOLUMEN DE LA PROBETA	1.58 Cm <sup>3</sup>

## METALOGRAFIA

MICROESTRUCTURA	PERLITA EN MATRIZ FERRITICA
% FASES PRESENTES	92 % DE FERRITA Y 8% DE PERLITA
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL AL 2 %
AUMENTOS	500 X



## RECOCIDO DE AUSTENIZACION COMPLETA.

ACERO MEDIO CARBON B ( 1030 )

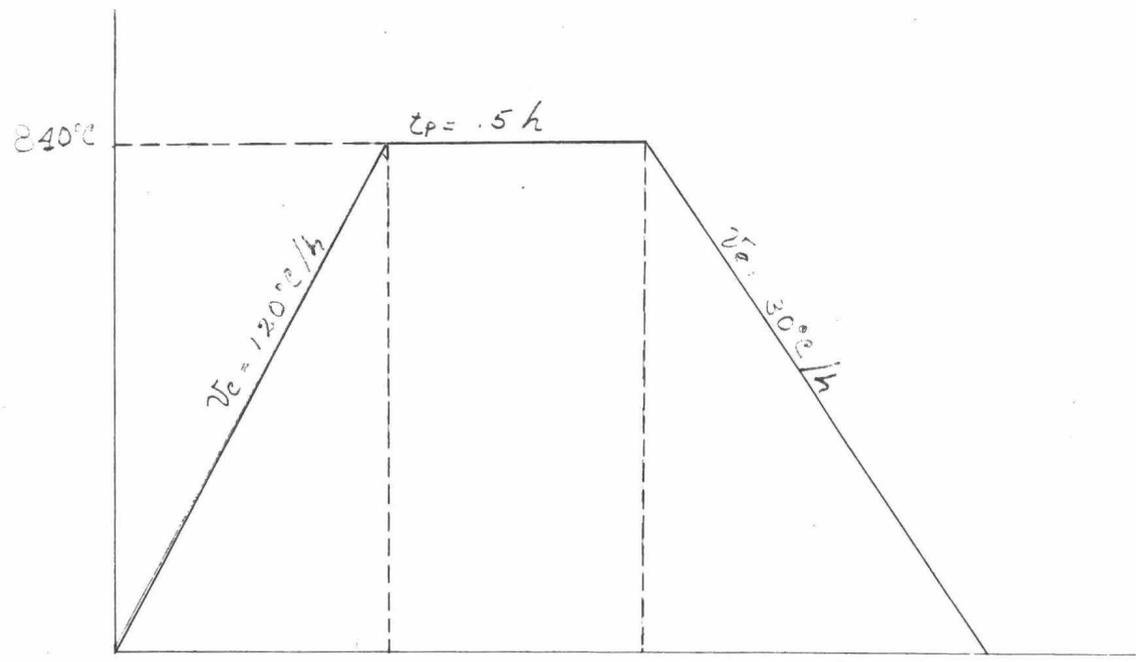
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	120 ° C / hora
TEMPERATURA DE AUSTENIZACION	840 ° C.
TIEMPO DE PERMANENCIA	.5 horas / .321 Cm <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	30° C / hora

## PRUEBAS FISICAS

DUREZA ROCKWELL / B	77
RESISTENCIA A LA TRACCION	49 Kg/mm <sup>2</sup> = 69,200 lb/pulg. <sup>2</sup>
LIMITE ELASTICO	29 Kg/mm <sup>2</sup> = 41,500 Lb/pulg. <sup>2</sup>
ELONGACION	20 %
REDUCCION DE AREA	58 %
COMPRESION	O. K.
VOLUMEN DE LA PROBETA	1.60 Cm <sup>3</sup>

## METALOGRAFIA

MICROESTRUCTURA	FERRITA Y PERLITA SEMIFINA
% FASES PRESENTES	75 % de FERRITA Y 25 % DE PERLITA
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL AL 2 %
AUMENTOS	500 X



## RECOCIDO SUBCRITICO DE GLOBULIZACION

## ACERO MEDIO CARBONO C ( 1040 )

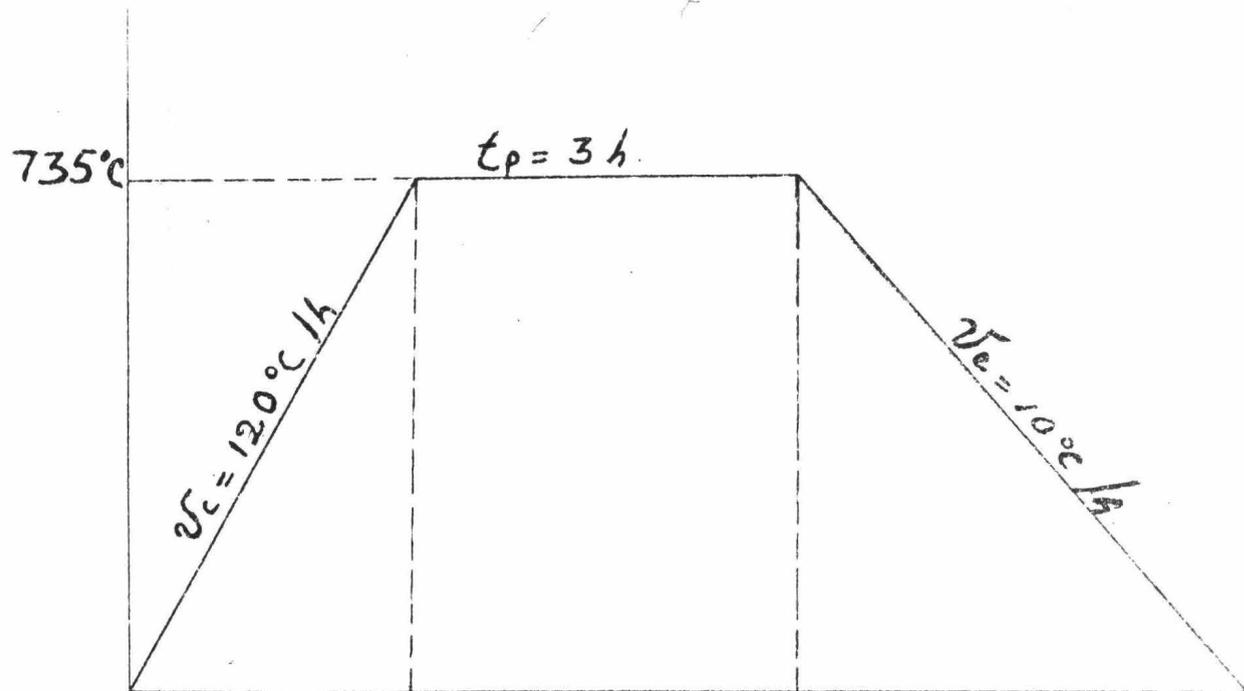
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	120° C/hora
TEMPERATURA DE GLOBULIZACION	735° C
TIEMPO DE PERMANENCIA	3.0 horas / .320 cm <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	10° C / hora

## PRUEBAS FISICAS

DUREZA ROCKWELL - B	87
RESISTENCIA A LA TRACCION	60 Kg/mm <sup>2</sup> = 85,700 lbs/pulg. <sup>2</sup>
LIMITE ELASTICO	40.8 Kg/mm <sup>2</sup> = 58,000 lbs/pulg. <sup>2</sup>
ELONGACION	38 %
REDUCCION DE AREA	56 %
COMPRESION	O.K.
VOLUMEN DE LA PROBETA	1.48 Cm <sup>3</sup>

## METALOGRAFIA

MICROESTRUCTURA	PERLITA GLOBULAR Y FERRITA
% FASES PRESENTES	85 % PERLITA GLOBULAR Y 15 % FERRITA
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL AL 2 %
AUMENTOS	500 X



## RECOCIDO DE AUSTENIZACION COMPLETA

ACERO AL CARBON C ( 1080 )

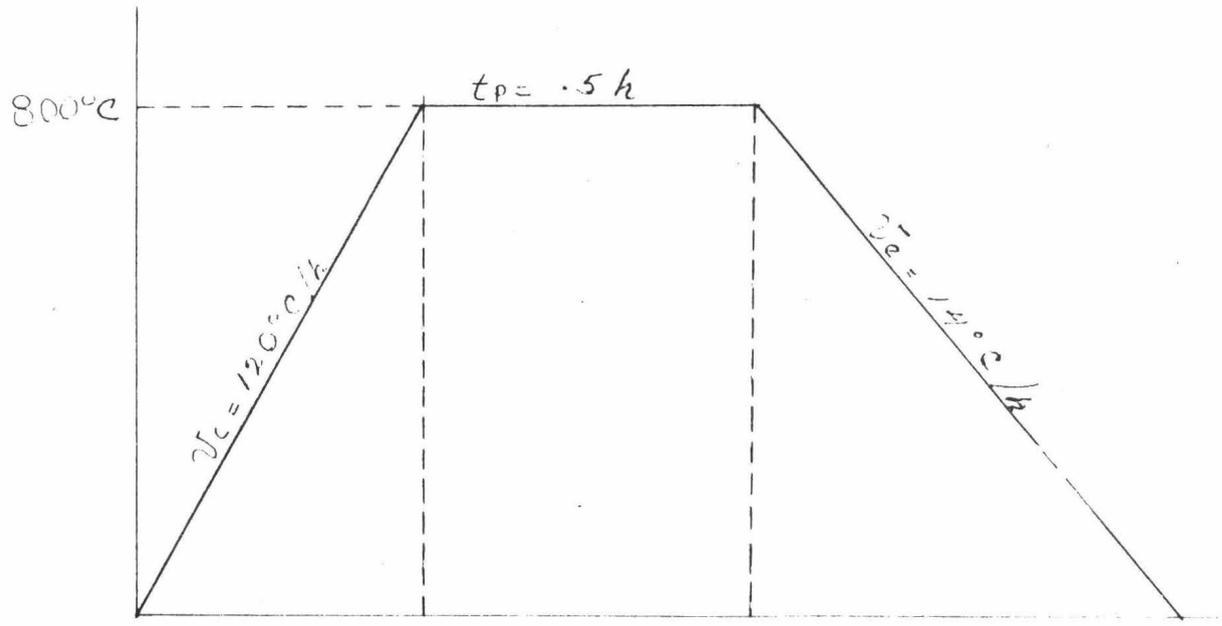
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	120° C / hora
TEMPERATURA DE AUSTENIZACION	800° C
TIEMPO DE PERMANENCIA	.5 horas / .316 Cm <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	14° C/hora

## PRUEBAS FISICAS

DUREZA ROCKWELL - B	96
RESISTENCIA A LA TRACCION	76 Kg/mm <sup>2</sup> = 108,100 lbs/pulg. <sup>2</sup>
LIMITE ELASTICO	61.8 Kg/mm <sup>2</sup> = 87,900 lbs/pulg. <sup>2</sup>
ELONGACION	16 %
REDUCCION DE AREA	38 %
COMPRESION	O.K.
VOLUMEN DE LA PROBETA	3.16 Cm <sup>3</sup>

## METALOGRAFIA

MICROESTRUCTURA	PERLITA SEMIFINA
% FASES PRESENTES	100 % PERLITA
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL AL 2 %
AUMENTOS	500 X



## RECOCIDO SUBCRITICO DE GLOBULIZACION

ACERO AL CARBON D ( 1080 )

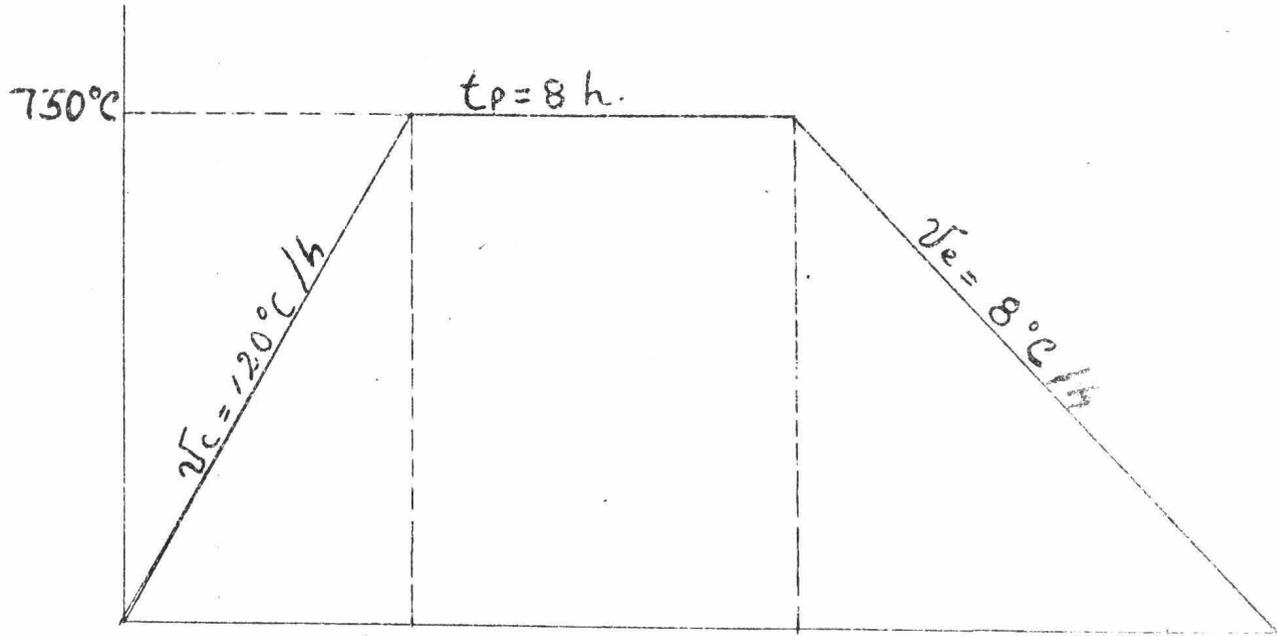
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	120° C / hora
TEMPERATURA DE GLOBULIZACION	750° C
TIEMPO DE PERMANENCIA	8 horas / .316 cm <sup>2</sup>
VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO	8° C/hora

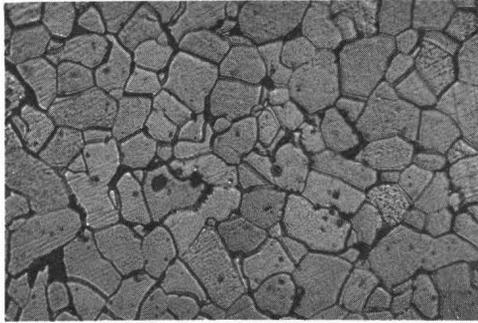
## PRUEBAS FISICAS

DUREZA ROCKWELL - B	92
RESISTENCIA A LA TRACCION	68 kg/mm <sup>2</sup> = 96,900 Lbs/pulg. <sup>2</sup>
LIMITE ELASTICO	60.5 Kg/mm <sup>2</sup> = 86,100 Lbs/pulg. <sup>2</sup>
ELONGACION	40 %
REDUCCION DE AREA	45 %
COMPRESION	O. K.
VOLUMEN DE LA PROBETA	3.16 Cm <sup>3</sup>

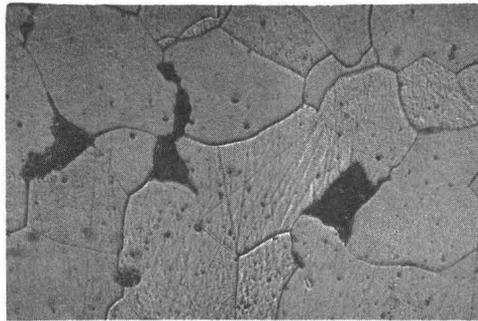
## METALOGRAFIA

MICROESTRUCTURA	PERLITA GLOBULAR
% FASES PRESENTES	99 % DE PERLITA GLOBULAR
REACTIVO DE ATAQUE	NITAL AL 2 %
AUMENTOS	500 X

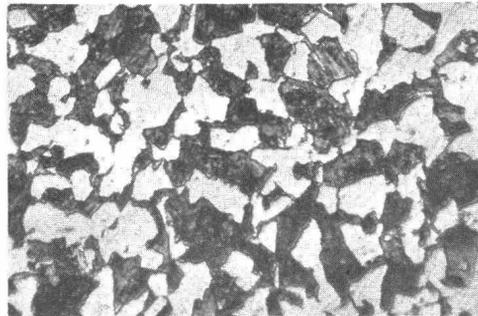




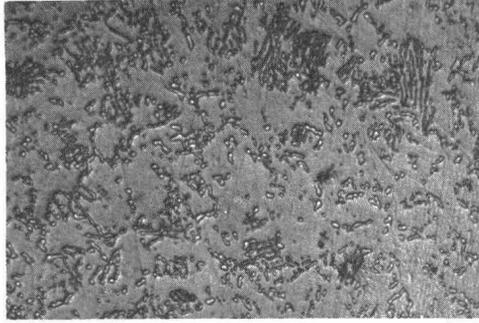
ACERO 1010. NORMALIZADO  
ATAQUE NITAL 500 X



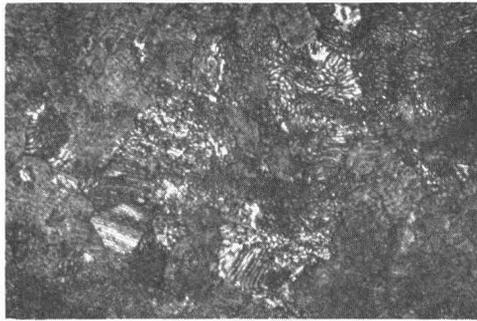
ACERO 1010. RECOCIDO DE AUSTENIZA-  
CION COMPLETA. ATAQUE NITAL. 500 X



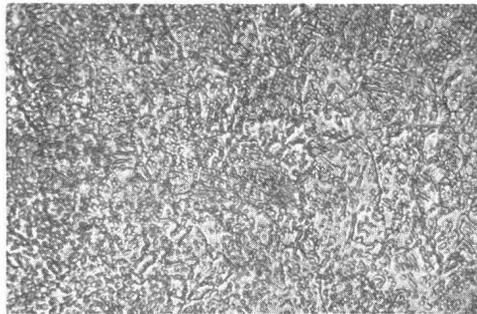
ACERO 1040 RECOCIDO DE AUSTENIZA -  
CION COMPLETA. ATAQUE NITAL. 500 X



ACERO 1040. RECOCIDO SUBCRITICO  
GLOBULAR. ATAQUE NITAL. 500 X



ACERO 1080. NORMALIZADO  
ATAQUE NITAL. 500 X



ACERO 1080. RECOCIDO SUBCRITICO  
GLOBULAR. ATAQUE NITAL. 500 X

## CONCLUSIONES

En los aceros 1030, 1040 y 1080 Se pudieron obtener propiedades mecánicas óptimas para ser maquinados mediante el tratamiento térmico de RECOCIDO. Obteniéndose durezas de 96 a 77 Rb, lo que indica que hubo una disminución considerable si se compara con el grado de dureza del material de entrega.

Los aceros de bajo Carbono, 1010 ó 1020 presentaron pocas ventajas al aplicarles el tratamiento mencionado, por lo que se aconseja trabajarlo tal como se entrega, que generalmente es en estado de Normalizado, siendo muy dúctil y maleable.

Los materiales al ser Recocidos presentan una descarburación superficial, - defecto que puede ocasionar problemas al ser maquinados.

Para obtener buen resultado en los aceros que se les aplique el tratamiento del RECOCIDO DE GLOBULIZACION debe tenerse muy en cuenta los factores Tiempo de Permanencia y la velocidad de enfriamiento, ya que estos dos factores son determinantes para obtener buenos resultados de perlita globular.

La presencia de elementos tales como Cromo, Cobre y Silicio son elementos que influyen en este tratamiento ya que con estos elementos pueden aumentar o disminuir la dureza de los aceros que se vayan a procesar.

## RECOMENDACIONES

Para obtener buen resultado al aplicar el tratamiento del Recocido debemos

tener presente lo siguiente:

El Material debe estar exento de defectos graves, tales como: bigotes, - segregaciones, grietas y traslapes.

Debe tenerse en cuenta el análisis químico del material ya que de esto depende en gran parte el dar buenas temperaturas para obtener buenos resultados, teniendo en cuenta que los materiales deben tener la mínima cantidad de los elementos cromo y cobre, ya que estos elementos son muy nocivos para los aceros al Carbón ya que el cromo y el cobre aumentan la Resistencia a la tracción pero disminuye la ductilidad de los mismos.

Al ser aplicado el Recocido de Globulización debe tenerse muy presente - la VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO, ya que ésta debe ser lo más lenta posible no -- exceda esta velocidad de  $10^{\circ}$  C/hora.

La forma de corregir el defecto de Descarburación Superficial lo podemos - lograr controlando debidamente la atmósfera del horno, o en su defecto utilizando -- Carbón, teniendo la precaución de secarlo antes de ser utilizado por la facilidad que tiene de absorber Humedad. Este método es muy común por lo práctico para corregir este problema.

## BIBLIOGRAFIA

- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS - JOSE APRAIZ BARREIRO  
ACEROS. ED. DOSSAT MADRID 1971.
- HANDBOOK TOMO II HEAT TREATING CLEANING AND FINIS-  
HING AMERICAN SOCIETY FOR METALS  
PARK, OHIO. 1970.
- METALURGIA FISICA PARA INGE- ALBERT G. GUY  
NIEROS. ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO. INC.  
MASSACHUSETTS.
- APUNTES DE TRATAMIENTOS - - DRA. NORA LINDENVALD  
TERMICOS DE ACEROS. U.N.A.M. 1970
- PRONTUARIO METALOTECNICO RAFAEL CALVO RODES  
TOMOS i - II INSTITUTO NACIONAL DE TECNICA  
AERONAUTICA MADRID 1963.
- APUNTES DE TRATAMIENTOS TER- DR. R. BROOK  
MICOS DE ACEROS. I. P. N. 1969
- TECNOLOGIA DEL ACERO JOSE MARIA LASHERAS Y ESTEBAN AUTOR  
DITOR ZARAGOZA 1967.