

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS METALOGRAFICO Y TERMOQUIMICO  
DE ACEROS Y FUNDICIONES

TESIS

QUE EN OPCION AL TITULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

ING. RAMIRO ROBLEDO MONSIVAIS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
JULIO DE 1997

TM

Z5853

.M2

F I M E

1997

R6

ANÁLISIS METALOGRAFICO Y TERMICOQUIMICO.  
1997  
DE ACEROS Y FUNDICIONES



1020119025

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS METALOGRAFICO Y TERMOQUIMICO  
DE ACEROS Y FUNDICIONES

## TESIS

QUE EN OPCION AL TITULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA MECANICA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

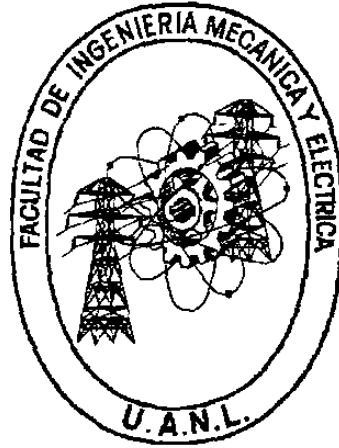
PRESENTA

ING. RAMIRO ROBLEDO MONSIVAIS

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
JULIO DE 1997

# Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



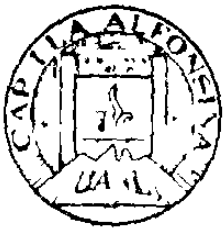
Análisis metalográfico y termoquímico de aceros y fundiciones

## Tesis

Que en opción al título de:  
Maestro en ciencias de ingeniería mecánica  
con especialidad en materiales

Presenta

Ing. Ramiro Robledo Monsivais



**EDNDO TESIS**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO


Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis realizada por el Ing. Ramiro Robledo Monsivais, sea aceptada como opción para obtener el grado de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales.

El comité de tesis

  
M. en C. José Ernesto Bernal Avalos  
Asesor

  
M. en C. Rogelio Rodríguez Alanís  
Co-Asesor

  
M. en C. Heriberto Ruiz Caballero  
Co-Asesor

  
M. en C. Roberto Villarreal Garza  
División de Estudios de Post-Grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León a Julio de 1997.

## PROLOGO

Este trabajo fue elaborado por los Ings. Hilario Jiménez Favela y Ramiro Robledo Monsivais con el fin de tener un apoyo para investigaciones futuras de la ingeniería de aceros y fundiciones. Incluye información de primer nivel, así como estudios metalograficos y termoquímicos de diversos tipos de fundiciones y aceros con sus respectivas micrografias.

También incluye las diferentes microestructuras de acero dependiendo de su contenido de carbono. Además presenta diversos tipos de fundiciones tratadas térmicamente.

Por otra parte incluye tratamientos termoquímicos o superficiales, así como endurecimiento convencional. Así mismo trata de mecanismos y leyes de difusión a los cuales se sometieron los diferentes tipos de aceros y fundiciones complementando la información con curvas y equipo utilizado en estos procesos.

Por ultimo se incluye un capitulo sobre la cementación y el tratamiento en el hierro colado en donde se habla sobre los tratamientos *para endurecimiento superficial en las fundiciones*, sus características y condiciones más adecuadas para desarrollarlo.



## Síntesis

### capitulo I

En este capitulo se hace una clasificación de los aceros según el porcentaje de carbono que contienen. También se hace una clasificación desde el punto de vista de sus aplicaciones (aceros de alta resistencia mecánica, aceros para herramienta y aceros inoxidable).

### Capitulo II

En esta sección se hizo un estudio metalográfico de distintos aceros donde se pueden observar algunas microestructuras de aceros carbonitrurados, descarburados durante el tratamiento térmico, cementados en ambiente gaseoso, cementados y tratados térmicamente, algunas microestructuras de fundiciones grises y hierros nodulares.

### Capitulo III

En este capitulo analizamos diferentes tratamientos denominados termoquímicos que modifican la composición química en la superficie de los aceros, así como analizar materiales cementantes sólidos, cementantes líquidos, atmósferas cementantes gaseosas y finalmente atmósferas nitrurantes.

### Capitulo IV

En este capitulo se analizan los fenómenos que afectan el endurecimiento convencional del acero como es la composición, tamaño de las piezas y medio de enfriamiento así como los factores que intervienen en el temple del acero. Las curvas  $S$  como son afectadas por la variación en su composición, principalmente el contenido de carbono, manganeso y cromo, así como la influencia del tamaño de grano que modifica la forma de la curva  $S$ , modificándose la velocidad crítica del temple.

## Capítulo V

En esta sección se analiza en una forma detallada las diferentes redes espaciales *considerando las estructuras cristalinas de los metales, en lo referente a los mecanismos de difusión se tiene información para comprender ampliamente este fenómeno* además se incluyen las leyes de Fick que describen como sucede la difusión, se incluye el desarrollo matemático de estas leyes.

## Capítulo VI

En este capítulo se hizo un análisis de trayectorias en curvas de transformación isotérmica, *curvas de enfriamiento continuo* usadas en predicción de estructuras de aceros aleados enfriados al aire y varios medio de enfriamiento.

## Capítulo VII

Este tema trata de los baños de sales utilizados para el tratamiento térmico del acero, así como su clasificación de acuerdo al empleo de estas sales, además tienen información *para determinar la concentración del baño.*

## Capítulo VIII

Este punto trata sobre piezas que han sido cementadas y las ventajas que presentan en cuanto a sus características mecánicas, de la capa cementada así como las del núcleo central.

## Capítulo IX

Este capítulo trata sobre como medir la profundidad de la capa cementada, en este trabajo se mencionan varios procedimientos (análisis metalográfico, método por fractura, métodos de dureza, análisis químico).

## Capitulo X

Este tema trata del enfriamiento lento después de la cementación y el revenido utilizando temperaturas intermedias entre las líneas Ac1 y Ac3 y posteriormente un enfriamiento lento por encima de las líneas Ac3.

## Capitulo XI

En esta sección se describe las propiedades y microestructuras de las fundiciones así como los tratamientos térmicos que pueden mejorarlas, el recocido, el temple y el revenido son los mas empleados.

## **INTRODUCCION**

### **1.1. OBJETIVO**

Este trabajo fue realizado con la finalidad de obtener mas información del comportamiento de los aceros y las fundiciones, en base a los diferentes tipos de tratamientos térmicos, análisis metalografico y termoquímico. El objetivo de esta tesis es poder encontrar las causas que provocan que una pieza metálica falle antes de tiempo estimado de vida en base a un análisis metalografico o termoquímico.

El estudio realizado a muestras de aceros, con porcentaje de carbón y algunas fundiciones, información suficiente para poder hacer recomendaciones a industrias de ramo metal-mecanico.

## **METODOLOGIA**

La manera en que se llevó a cabo los análisis de varias muestras sometiéndolos a varios estudios primeramente se obtuvo una información visual anticipada de posibles causas por las que fallaron. Posteriormente se tomaron fotografias de las piezas y después se checa dimensiones contra especificaciones y planos ingenieriles. Una vez hecho esto el paso siguiente consiste en hacer un análisis químico y metalográfico de las muestras para determinar los elementos constituyentes. Por ultimo se llevaran a cabo las diferentes pruebas mecánicas, completando así el ciclo de estudios de las diversas muestras.

# Análisis metalográfico y termoquímico de aceros y fundiciones

## Índice

### Marco teórico

1.1.i	Historia .....	3
1.2.i	Hierro como elemento .....	3
1.3.i	Sistema hierro carbono .....	5

### Capítulo 1 Aceros y sus clasificaciones

1.1	Clasificación según el contenido de carbono .....	9
1.2	Clasificación de los aceros desde el punto de vista de sus aplicaciones .....	10

### Capítulo 2 Microestructuras de algunos aceros

2.1	Microestructuras de aceros de bajo carbono recocidos y normalizados .....	22
2.2	Microestructuras de aceros de alto carbono descarbonizados .....	24
2.3	Microestructuras de aceros cementados en ambiente gaseoso .....	25
2.4	Microestructuras de aceros cementados .....	27
2.5	Microestructuras de aceros cementados y tratados térmicamente .....	29
2.6	Microestructuras de fundiciones grises tratadas por nitruración .....	33

### Capítulo 3 Tratamientos termoquímicos

3.1	Introducción .....	34
3.2	Cementantes sólidos .....	45
3.3	Cementantes líquidos .....	51
3.4	Atmósferas cementantes gaseosas .....	62
3.5	Atmósferas nitrurantes .....	66

### Capítulo 4 Endurecimiento convencional

4.1	Teoría de temple .....	76
4.2	Revenido .....	95

### Capítulo 5 Fenómenos de difusión

5.1	Redes .....	98
5.2	Mecanismos de difusión .....	102
5.3	Leyes de difusión .....	105

### Capítulo 6 Análisis de transformación del estado sólido del acero

6.1	Introducción .....	114
6.2	Ensayo Jominy .....	117
6.3	Curvas TTT en aceros de bajo carbono .....	118
6.4	Curvas TTT en aceros de medio carbono .....	122
6.5	Curvas TTT en aceros de alto carbono .....	129

**Capítulo 7 Baños de cementación**

7.1	Equipos para baños . . . . .	131
7.2	Determinación de la concentración del baño . . . . .	136

**Capítulo 8 Características mecánicas de las piezas cementadas**

8.1	Introducción . . . . .	138
8.2	Características de la capa cementada . . . . .	139
8.3	Características del núcleo central . . . . .	141

**Capítulo 9 Determinación de la profundidad de la capa cementada**

9.1	Introducción . . . . .	146
9.2	Métodos metalográficos . . . . .	146
9.3	Métodos por fractura . . . . .	146
9.4	Métodos por dureza . . . . .	147
9.5	Método de análisis químico . . . . .	147

**Capítulo 10 Tratamientos convencionales después del cementado**

10.1	Introducción . . . . .	148
10.2	Cementación temple directo desde la temperatura de cementación y revenido . . .	148
10.3	Cementación, enfriamiento lento temple a temperatura intermedia entre Ac1 Ac3 y revenido final . . . . .	148
10.4	Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac3 y revenido final . . . . .	149
10.5	Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac3, segundo temple a temperatura ligeramente superior a Ac1 y revenido final .	149
10.6	Austempering y martempering . . . . .	149

**Capítulo 11 Cementación del hierro colado**

11.1	Introducción . . . . .	151
11.2	Recocido . . . . .	151
11.3	Temple y revenido . . . . .	154
11.4	Endurecimiento superficial de las fundiciones por flameado . . . . .	157
11.5	Nitruración de las fundiciones . . . . .	157
11.6	Fundiciones templadas . . . . .	158
11.7	Microestructura de la fundición blanca . . . . .	161

<b>Conclusiones y recomendaciones . . . . .</b>	<b>163</b>
---	------------

<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>166</b>
-------------------------------	------------

Listado de tablas . . . . .	167
-----------------------------	-----

Listado de gráficas . . . . .	168
-------------------------------	-----

Resumen autobiográfico . . . . .	169
----------------------------------	-----

# Marco Teórico

## 1.1.i. Historia

Evolución de los principales procesos y técnicas empleadas para la fabricación del hierro y del acero y referencia de algunos de los más importantes acontecimientos industriales y científicos ocurridos en la historia de la humanidad.

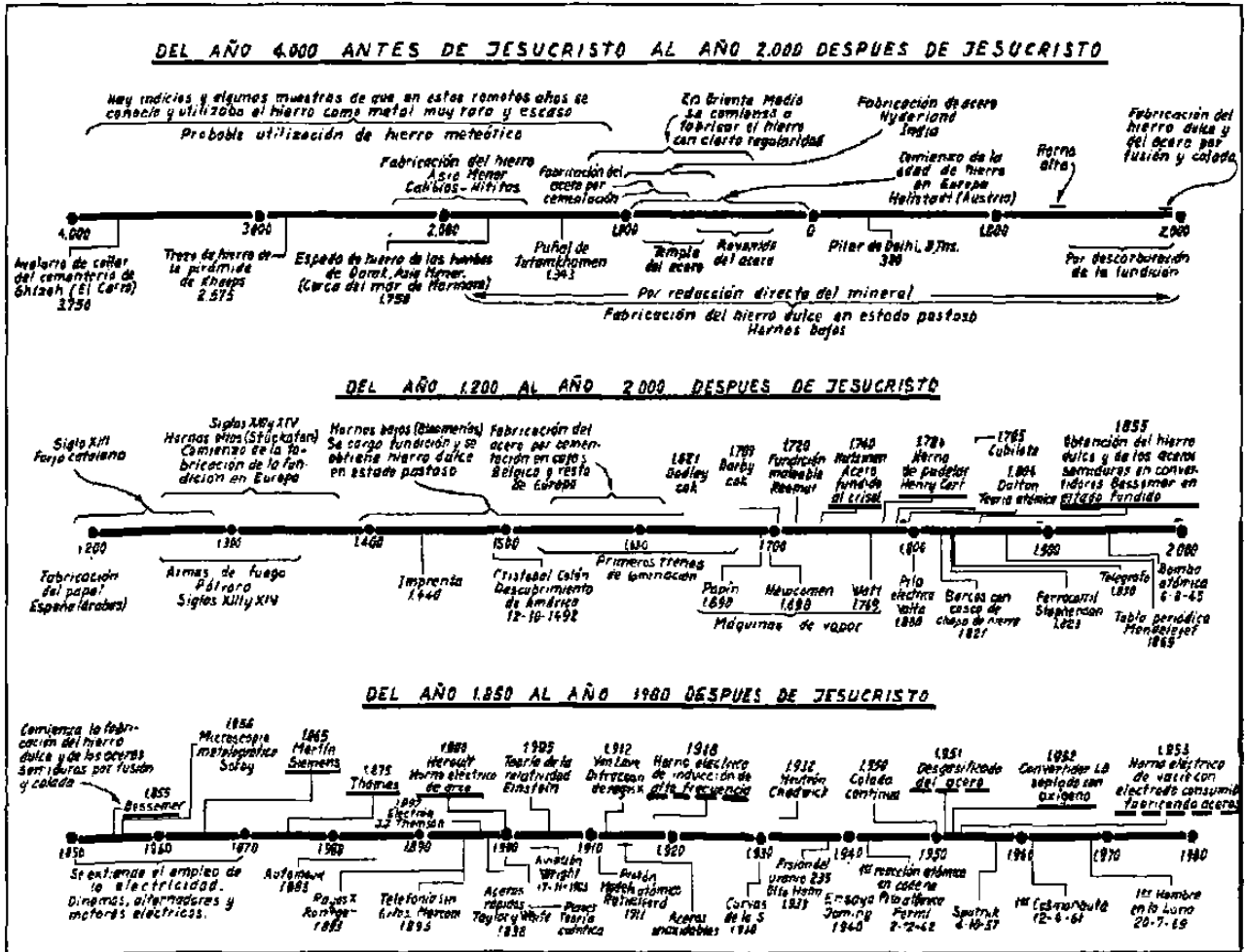


Figura 1 Historia del acero

## 1.2.i.- Hierro como Elemento

En los sistemas metalúrgicos se encuentran muchas especies y distribuciones de fases sólidas. La causa fundamental de esta variedad es la naturaleza cristalina de dichas fases.

Sin embargo, a continuación vamos a estudiar diversos aspectos adicionales de las estructuras cristalinas que afectan profundamente las microestructuras reales que se encuentran en las aleaciones y metales comerciales.

**Alotropía o polimorfismo.** Muchos de los elementos metálicos existen en formas cristalinas alternativas, que dependen de las condiciones externas de temperatura y presión.

Este fenómeno se llama *Alotropía o polimorfismo*. Bajo las condiciones normales de presión atmosférica, cada estado alotropico de un metal existe en equilibrio durante un intervalo de temperaturas, como se muestra en la figura 2 en el caso del hierro.

A temperaturas por debajo de  $910^{\circ}\text{C}$ , los átomos de hierro se encuentran en los puntos de una red espacial cúbica centrada. Si este trozo de hierro se calienta hasta temperaturas por encima de los  $910^{\circ}\text{C}$ , los átomos formaran una fase sólida diferente, en la que los átomos de hierro se encuentran en los puntos de una red cúbica de caras centradas. Al calentar el hierro hasta una temperatura por encima de los  $1400^{\circ}\text{C}$  se produce un segundo cambio alotropico. La fase cúbica de caras centradas se hace inestable y se transforma en una fase cúbica centrada. Cuando un metal de un estado alotrópico a otro, casi todas sus propiedades varían, pero el cambio de mayor importancia desde el punto de vista comercial es uno aparentemente trivial; esto es, el descenso de solubilidad del carbono en el hierro sólido cuando el hierro cambia de fase gamma a la alfa. Este aspecto es la base del temple del acero y se estudiará detalladamente mas adelante.

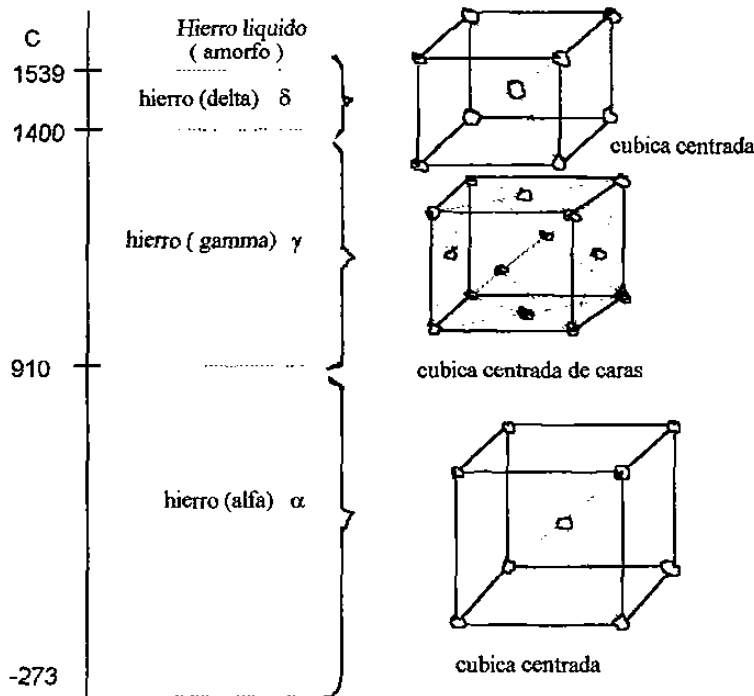


Fig. 2 Intervalos de temperatura en los que las formas alotropicas de hierro existen en condiciones de equilibrio

Aunque las transformaciones alotropicas que se producen en el hierro son de la mayor importancia industrial, existe otros dos ejemplos de Alotropía que merecen atención. Uno de ellos es el cambio de red hexagonal compacta a la estructura cúbica centrada que se produce en el titanio a temperaturas superiores a los  $885^{\circ}\text{C}$ .

Se analizará que dicha demostración afecta en forma vital a la tecnología de las aleaciones de titanio. Otro ejemplo importante de Alotropía tiene lugar en el uranio.

La fase alfa que se encuentra en temperaturas bajas, es ortorrómbica y se mantiene hasta los



668°C. Desde 668 a 774°C el uranio presenta una compleja estructura tetragonal beta con 30 átomos por celda unitaria mientras que por encima de los 774°C la fase estable es una red cúbica centrada. Al forjar o laminar uranio que se encuentra en estado alfa existe una fuerte tendencia a que se produzca una orientación preferida de los ejes cristalinicos.

Los cristales de uranio alfa se comportan de forma poco corriente al ser calentados, pues se contraen en una dirección y se dilatan fuertemente en las otras dos direcciones. Los efectos combinados de la orientación preferida y de la dilatación térmica no uniforme pueden producir una gran distorsión en una probeta de uranio que dicha probeta puede aumentar muchas veces su tamaño original. Esta dificultad se puede vencer, en gran parte, si la orientación preferida calentando el uranio hasta el intervalo de temperaturas en que se forma la fase beta y después enfriándola rápidamente para que se orienten al azar los granos de fase alfa.

### 1.3.i.- Sistema hierro carbono

El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las mas importantes aleaciones de ingeniería. En una forma casi pura, conocida como *hierro dulce*, se utiliza en las alcantarillas para drenaje, material para techos y conductos, y como base para sobre el esmaltar porcelana en refrigeradores, estufas, lavadoras, etc. Un análisis típico de hierro forjado es:

carbono	0.06%
manganeso	0.045%
fósforo	0.068%
azufre	0.009%
silicio	0.101
escoria en peso	1.97

Si se deja enfriar muy lentamente una muestra de hierro lo más puro posible, desde el estado liquido, se puede observar (figura 3) que se solidifica instantáneamente a 1535°C

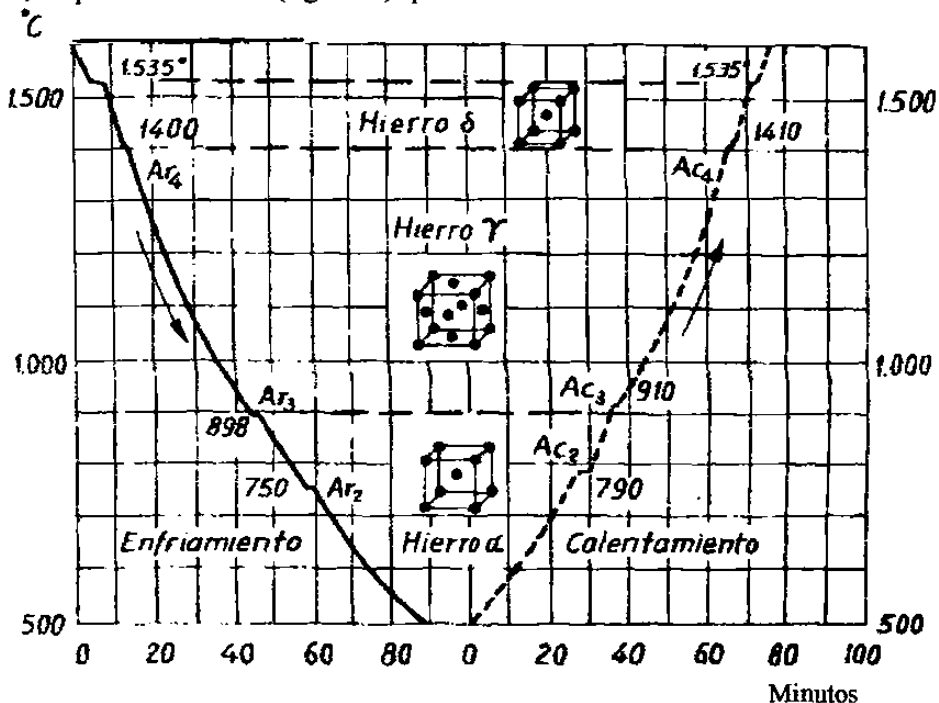


Figura 3 curva de enfriamiento y calentamiento del hierro puro

Al continuar descendiendo la temperatura no se observa nada anormal, en el proceso de enfriamiento, hasta  $1,400^{\circ}\text{C}$  entonces se nota una disminución en la velocidad de enfriamiento debido a un desprendimiento espontaneo de calor. Luego, hacia a los  $898^{\circ}\text{C}$ , se produce otro desprendimiento de calor y se aprecia otra disminución en la velocidad de enfriamiento bastante neta y pronunciada.

Hacia los  $850^{\circ}\text{C}$  vuelve a ocurrir otra parada en el enfriamiento, que es ya la ultima antes de llegar a la temperatura ambiente.

Esas temperaturas en las que ocurre ese fenómeno se llama temperaturas o puntos críticos y se denominan  $Ar_4$ ,  $Ar_3$ ,  $Ar_2$ , respectivamente.

La parada a  $1400^{\circ}\text{C}$  ( $Ar_4$ ) corresponde a un cambio alotrópico del hierro que pasa del estado de hierro delta al de hierro gamma. El punto  $Ar_3$  a  $898^{\circ}\text{C}$ , señala la transformación del hierro gamma en hierro alfa no magnético y el punto  $Ar_2$  a  $750^{\circ}\text{C}$ , corresponde a la transformación del hierro alfa no magnético en hierro alfa magnético.

Cuando el proceso es inverso y se calienta el hierro desde la temperatura ambiente hasta la de  $1550^{\circ}\text{C}$ , los fenómenos se presentan de forma muy parecida, pero a temperaturas muy superiores, recibiendo ahora esos puntos críticos los nombres  $Ac_2$ ,  $Ac_3$ ,  $Ac_4$ .

El  $Ac_2$  se presenta hacia los  $790^{\circ}\text{C}$ , el  $Ac_3$  a los  $910^{\circ}$  y el  $Ac_4$  a  $1410^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente. Esta diferencia que existe entre las temperaturas críticas en el enfriamiento y en el calentamiento, revela la resistencia que oponen los sistema cristalinos a transformarse, indicando además que las temperaturas críticas reales se hallan sin duda entre  $Ac_3$  y  $Ar_3$  y  $Ac_2$  y  $Ar_2$ .

Si se pudiera realizar esos calentamientos o enfriamientos a una velocidad infinitamente lenta, los puntos críticos se hallarían a la misma temperatura en el calentamiento y en el enfriamiento. A esos puntos críticos se les ha dado el nombre de  $Ar$  y  $Ac$ , recordando el proceso que han seguido.

(en francés enfriamiento “refroidissement”, r y calentamiento, “chauffage”, c.).

Cuando hablamos del diagrama teórico hierro carbono, que se refiere a calentamientos o enfriamientos infinitamente lentos, podemos decir que la transformación perlita-austenita, o a la inversa, austenita-perlita, se verifica a  $721^{\circ}\text{C}$ , y en cambio podemos referirnos a un proceso industrial de calentamiento, diremos por ejemplo, que en el calentamiento la transformación perlita-austenita ha ocurrido a  $725^{\circ}$  o  $740^{\circ}\text{C}$ , y el enfriamiento a  $690^{\circ}$  o  $700^{\circ}\text{C}$ . Además hay que tener en cuenta que, así como la temperatura teórica de  $721^{\circ}\text{C}$  es fija, las otras dependen de la velocidad de calentamiento o enfriamiento.

De las diversas transformaciones de los aceros la perlita austenita es una de las mas importantes. Además también la que mejor se señala en los ensayos dilatométricos y en los pirómetros de los aparatos de determinación de puntos críticos y aun en los hornos de tratamiento cuando los aceros llegan a alcanzar esa temperatura.

El hierro puro no sufre en cambio ninguna transformación en la zona de  $721^{\circ}\text{C}$

## Hierro alfa y hierro gamma

El hierro muy puro, de bajísimo contenido de carbono, a temperaturas inferiores a 898°-910°C, se presenta en forma de hierro alfa, que no disuelve al carbono o carburo de hierro, o lo disuelve en cantidades pequeñísimas, variables de 0.024% a 721° a 0.008% a la temperatura ambiente (figura 4).

A temperaturas superiores a 898°-910°C, el hierro se encuentra en forma de hierro gamma, que puede disolver al carbono o carburo de hierro en cantidades hasta de 1.7%.

El hierro alfa no magnético aparece en intervalos 910°-768°C y el hierro alfa magnético a temperaturas inferiores a 768° (figura 5).

El hierro alfa no magnético y el hierro alfa magnético cristalizan en la misma forma, y su aptitud de disolución del carbono, también es casi idéntica

El hierro gamma se diferencia también del hierro alfa por su distinta disposición atómica.

El hierro en estado sólido a la temperatura ordinaria (hierro alfa) adopta la disposición de cubos centrados, en cambio, a altas temperaturas (hierro gamma) se presenta con disposición atómica de cubos de caras centradas ( figura 6)

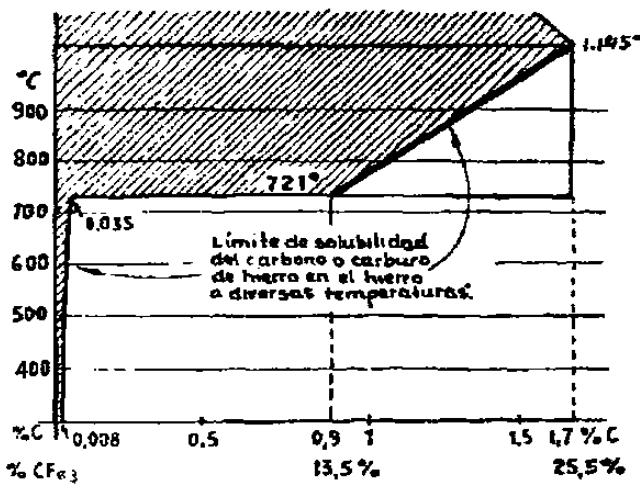


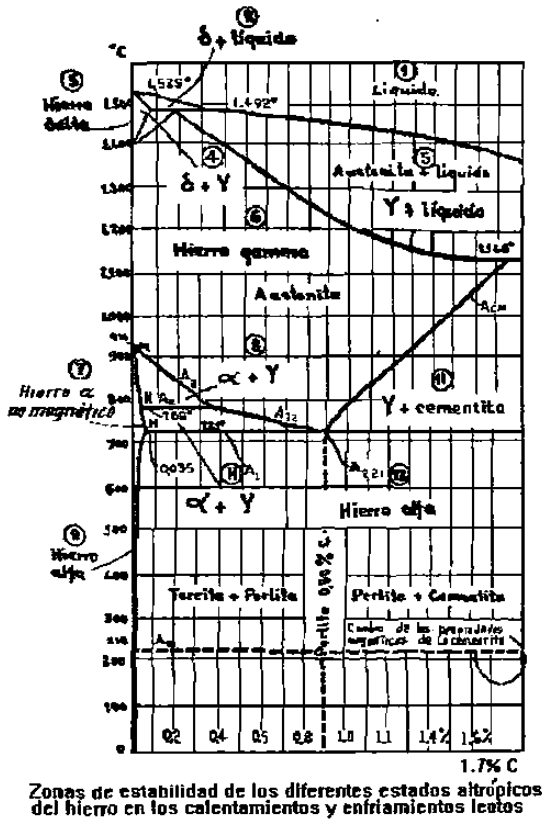
Figura 4 Solubilidad del carbono o carburo de hierro en el hierro en función de la temperatura

Las células cristalinas unitarias de hierro alfa tienen la forma de un cubo con un átomo de hierro en cada uno de los ocho vértices y uno en el centro. Si se eleva la temperatura del hierro puro, esta situación de los átomos se conserva hasta la temperatura de transformación de 910°C, al sobrepasar la cual el hierro alfa se transforma en hierro gamma, y la estructura cristalina se disloca bruscamente apareciendo

La disposición de caras centradas en las que hay un átomo en cada uno de los vértices y un átomo en el centro de la caras.

Hemos pasado pues, del cubo centrado formado por 9 átomos (uno en el centro y 8 en los vértices), al cubo de caras centradas de 14 átomos (6 átomos en las caras y 8 en los vértices).

Estos cubos no están formados en realidad por 9 y 14 átomos, como parece desprenderse de la observación de la figura 6



Como cada uno de los átomos de los vértices, forma parte de otros 7 cubos vecinos y los de los centros de las caras pertenecen también al cubo adyacente, esos cubos contienen en realidad un número de átomos menor.

En el hierro alfa (cubo centrado) la materia correspondiente a cada cubo, es en realidad la de dos átomos.

Uno, el átomo central y otro ( $8 \times 1/8 = 1$ ) correspondiente a  $1/8$  de cada átomo de cada uno de los átomos de los vértices

Figura 5

El hierro gamma cada uno de los átomos del centro de las caras pertenece también al cubo adyacente. Resulta, por lo tanto que el cubo elemental tiene solo la materia de 4 átomos. Uno ( $8 \times 1/8 = 1$ )  $1/8$  de cada uno de los vértices y tres ( $6 \times 1/2 = 3$ ) de  $1/2$  cada uno de las seis caras

La longitud de las aristas de esos cubos elementales se denomina constante o parámetro del sistema cristalino, que para el hierro alfa varía de 2.85 a 2.90 Angstrom y para el hierro gamma varía de 3.65 a 3.70 Angstrom

Aunque el cubo elemental del hierro gamma tiene más átomos que el del hierro alfa, el número total de átomos no ha aumentado al pasar de un estado a otro ha habido una modificación

de estructura cristalina, apareciendo ahora cubos de mayor volumen, o sea que después del cambio, la misma masa de hierro está formada por menos cubos, cada uno de los cuales ocupa más volumen y tiene más átomos

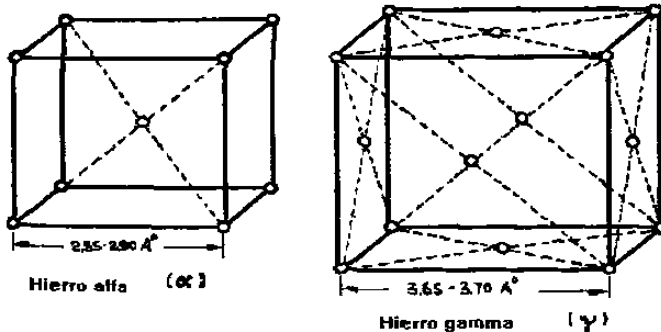


Figura 6