

**UNIVERSIDAD DE MATANZAS
"CAMILO CIENFUEGOS".
FACULTAD DE INGENIERÍAS QUÍMICA Y MECANICA.**



***APUNTES ACERCA DEL TRATAMIENTO
TÉRMICO Y LA CLASIFICACIÓN GENERAL DE
LOS ACEROS.***

Dr. C.T. Ing. Eduardo Torres Alpízar.

NOVIEMBRE, 2004

Índice.

| | Página |
|---|--------|
| Prefacio. | 1 |
| Capítulo I: Lugar que ocupan los aceros dentro del sistema aleante Fe – C. Conceptos metalúrgicos necesarios para el estudio de los aceros. | 3 |
| 1.1 Sistema de aleación Fe – C. | 3 |
| 1.1.1 Estructura cristalina de los metales. | 3 |
| 1.1.2 Retículo cristalino de los metales. | 4 |
| 1.1.3 Teoría de las aleaciones. Conceptos generales. | 5 |
| 1.1.4 Diagramas de estado Fe – C. Diagrama metaestable. | 10 |
| Capítulo II: Tratamiento térmico de los aceros. | 15 |
| 2.1 Transformaciones durante el tratamiento térmico de los aceros. | 15 |
| 2.1.1 Transformaciones durante el calentamiento del acero. | 15 |
| 2.1.2 Transformaciones durante el enfriamiento del acero (Diagrama T.T.T.). | 18 |
| 2.1.3 Transformaciones durante el revenido. | 20 |
| 2.2 Conceptos Prácticos relacionados con el tratamiento térmico de los aceros. | 20 |
| 2.2.1 Tratamiento Térmico de Temple. | 20 |
| 2.2.2 Tratamiento Térmico de Revenido. | 23 |
| 2.2.3 Tratamiento Térmico de Recocido. | 24 |
| 2.2.4 Tratamiento Térmico de Normalizado. | 25 |
| Capítulo III: Influencia de los elementos de aleación en los aceros. | 26 |
| 3.1 Aceros aleados. Clasificación de las impurezas. | 26 |
| 3.2 Influencia de los elementos de aleación en los aceros. | 26 |
| 3.2.1 Influencia de los elementos de aleación en el polimorfismo del hierro. | 26 |
| 3.2.2 Influencia de los elementos de aleación en la ferrita. | 27 |
| 3.2.3 La fase carburo en los aceros aleados. | 29 |
| 3.2.4 Influencia de los elementos de aleación en la cinética de la descomposición de la austenita. | 29 |
| 3.2.5 Influencia de los elementos de aleación en la transformación martensítica. | 30 |
| 3.2.6 Influencia de los elementos de aleación en el crecimiento del grano. | 31 |
| 3.2.7 Influencia de los elementos de aleación en las transformaciones del revenido. | 31 |
| Capítulo IV Clasificación General de los Aceros. | 33 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Aceros de construcción. | 33 |
| 4.1.1 Aceros Estructurales. | 33 |
| 4.1.2 Aceros para cementar. | 34 |
| 4.1.3 Aceros para el mejoramiento térmico. | 35 |
| 4.1.4 Aceros para resortes y muelles. | 36 |
| 4.1.5 Aceros automáticos (resulfurados y refosforados). | 36 |
| 4.1.6 Aceros para cojinetes de bolas (alta resistencia a la fricción). | 37 |
| | |
| 4.2 Aceros de herramientas. | 37 |
| 4.2.1 Aceros de baja templabilidad (principalmente al carbono). | 37 |
| 4.2.2 Aceros de alta templabilidad (de baja aleación). | 38 |
| 4.2.3 Aceros de corte rápido. | 38 |
| 4.2.4 Aceros para matrices. | 40 |
| | |
| 4.3 Aceros con propiedades especiales. | 41 |
| 4.3.1 Aceros inoxidables martensíticos. | 42 |
| 4.3.2 Aceros inoxidables ferríticos. | 42 |
| 4.3.3 Aceros inoxidables y termorresistentes austeníticos. | 42 |
| 4.3.4 Aceros resistentes a bajas temperaturas (criogénicos). | 43 |
| 4.3.5 Aceros austeníticos al manganeso resistentes al impacto (Hadfield). | 44 |
| | |
| Bibliografía. | 45 |
| | |
| Anexos. | 46 |

Prefacio.

En la historia de la humanidad juega un papel de suma importancia el desarrollo de armas, herramientas, instrumentos, aperos agrícolas, maquinarias, etc. que a lo largo de milenios de existencia del hombre han marcado su nivel de desarrollo, de tal modo que importantes cambios sociales, han sido condicionados por el impulso dado a las relaciones de producción, por medio de la introducción de nuevos materiales de construcción y maquinaria novedosa.

La utilización del hierro y el bronce en cada momento histórico provocaron el desarrollo de nuevos procedimientos metalúrgicos que, aunque artesanales y transmitidos de generación en generación sentaron las bases de la metalurgia física tal y como la conocemos en nuestros días. Sorprende en la actualidad la altísima calidad que lograron los herreros y forjadores africanos de la zona cercana al lago Victoria, que desde el siglo VII a.C. obtuvieron aceros de alta resistencia fundiendo hierro en altos hornos construidos de una cerámica que desarrollaron en esa región, y que permitían alcanzar temperaturas de hasta 1400°C. Los aceros obtenidos en las acerías de Damasco para la fabricación de sables y cimitarras así como los aceros que se manufacturaron en el Japón feudal alcanzaron propiedades de dureza y flexibilidad que raramente se encuentran en los aceros industriales en la actualidad.

Al pasar la humanidad a la producción mecanizada a la par con la experiencia empírica y el conjunto de procedimientos asimilados para utilizar los instrumentos de trabajo, adquieren importancia creciente la instrucción, la cultura y los conocimientos científicos, imprescindibles para trabajar con las máquinas e ir las modificando en la medida que las necesidades de la producción lo requerían. Es decir el hombre no sólo utilizó los medios de trabajo existentes sino que desarrolló otros nuevos. La experiencia, los conocimientos científicos y los hábitos de los hombres son indispensables para perfeccionar la técnica, la tecnología de la producción, la labor de los inventores y la racionalización. De hecho la necesidad de fabricar máquinas que cumplieran los requerimientos acordes a los nuevos tiempos creó una demanda de materiales novedosos como nunca antes en la historia humana.

Esta demanda indujo investigaciones que permitieron desarrollar aceros y fundiciones mucho más resistentes. Las tecnologías de fundición, forja y tratamiento térmico de los metales se enriqueció en la misma medida que la humanidad fue aumentando sus niveles de producción. El surgimiento de la industria mecánica se remonta al siglo XVIII cuando en Inglaterra tuvo lugar la primera revolución industrial. Marx habla de la aparición del telar de lanzadera, de la máquina de hilar, las máquinas de vapor de Newcomen y James Watt, la locomotora y el ferrocarril de Georges Stephenson, el barco de vapor en los EE.UU. por Robert Fulton y otros que harían la lista muy larga. Aparecen además las máquinas herramientas; ya era posible la existencia de máquinas que facilitarían la fabricación de otras máquinas. Surgen las tecnologías de unión por remaches que permitieron empezar a unir piezas y elementos de estructuras metálicas. En 1860 en Inglaterra se botó el HMS Warrior, el primer buque con casco de hierro del mundo.

Ninguno de estos éxitos hubiera sido posible sin la existencia de una industria metalúrgica poderosa y de un desarrollo científico técnico que ya mostraba en aquel período un crecimiento acelerado. No obstante ya el acero

común al carbono (que no incluye elementos de aleación) conocido desde la antigüedad, comenzaba a mostrar algunas limitaciones ante las nuevas exigencias que el desarrollo imponía. Ante esta disyuntiva un nuevo paso de avance lo constituyó el desarrollo de aceros aleados que permitieron construir nuevos equipos, automóviles, aviones, armamentos, buques, máquinas herramientas, etc.

La existencia ya a mediados del siglo XIX de una gran cantidad de variedades de aceros para diferentes utilizaciones, hizo necesario darse a la tarea de clasificar los aceros de acuerdo a su composición química, propiedades físicas y mecánicas, teniendo en cuenta fundamentalmente su designación de servicio. El industrial alemán Werner Krupp, fundador del imperio industrial del mismo nombre estableció la primera norma para sus empresas productoras de acero en 1859. Casi simultáneamente se establecieron clasificaciones y normas en los principales países productores de acero como Inglaterra, Estados Unidos, Rusia y Francia.

Este trabajo tiene como objetivo; brindar a los estudiantes de ingeniería mecánica y a los ingenieros tecnológicos, una herramienta que les permita seleccionar un acero, teniendo en cuenta sus características generales de composición química y su designación de servicio, cuando se encuentren realizando Proyectos de Ingeniería Mecánica.

Aunque en el trabajo se acude al empleo de ejemplos de aceros clasificados de acuerdo a la normas norteamericanas AISI y ASTM, es importante puntualizar que lo fundamental a la hora seleccionar un acero es tener en cuenta su composición química, la cual define cual o cuales serían los procesos tecnológicos de fortalecimiento a emplear en cada caso. Tampoco fue objetivo del trabajo brindar una extensa información acerca de caso particulares de selección de aceros. Para ello los lectores deberán auxiliarse de las diferentes normas disponibles en nuestro país y reflejadas en la literatura técnica, tanto impresa como electrónica.

Por último quisiera extender un agradecimiento a todos aquellos que a lo largo de estos años supieron despertar en mí el amor hacia la Ciencia de los Materiales a través de sus enseñanzas. Dedico estas páginas a los Doctores Eleno Alfonso, Urbano Ordoñez, Alejandro Duffus, Marcelino Rivas, Guillermo Govantes (fallecido), y mis compañeros, Ingenieros Julio San Martín (fallecido), Roberto Latorre, y Emilio López. Todos ellos son parte de este trabajo.

Dr. C.T. Ing. Eduardo Torres Alpízar
Autor.

Capítulo I: Lugar que ocupan los aceros dentro del sistema aleante Fe – C. Conceptos metalúrgicos necesarios para el estudio de los aceros.

1.1 Sistema de aleación Fe – C.

1.1.1 Estructura cristalina de los metales.

De acuerdo a su naturaleza los cuerpos pueden ser amorfos a cristalinos. En los cuerpos amorfos el paso del estado de agregación líquido al sólido es gradual. Por ejemplo el vidrio sólido, si se calienta va ablandándose y pasa poco a poco al estado líquido.

La transición inversa será completamente suave, el vidrio líquido en la medida que baja la temperatura se va haciendo cada vez más espeso hasta que finalmente se “solidifica”. En el vidrio no existe una temperatura de transición del estado líquido al “sólido”, tampoco existen las temperaturas (puntos) de cambio brusco de propiedades.

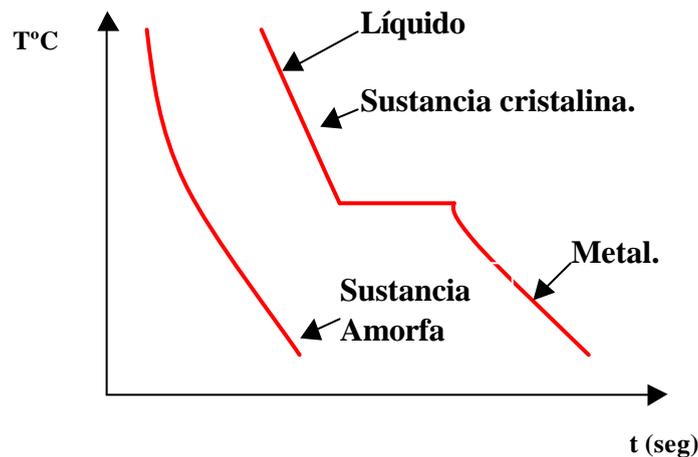


Figura 1: Curvas de enfriamiento correspondientes a un sólido cristalino metálico y un sólido amorfo.

El vidrio sólido transparente ordinario es un líquido espeso subenfriado. Este estado es amorfo, y se caracteriza por la carencia de una temperatura de fusión determinada, y por la inexistencia de una disposición regular de los átomos en forma de red cristalina.

Ahora bien los metales no son cuerpos amorfos sino cristalinos o sea sus átomos están dispuestos en un espacio de acuerdo a un orden geométrico determinado que se repite con determinada regularidad formando una red cristalina. Esta red podemos figurárnosla en forma de una red espacial en cuyos nodos se encuentran los átomos unidos por líneas imaginarias, en otras palabras, **es el conjunto de planos cristalográficos situados paralelamente y a una misma distancia.**

1.1.2 Retículo cristalino de los metales.

Celdilla elemental: Son el conjunto menor de átomos que conservan las mismas propiedades geométricas de la red y que al repetirse muchas veces en el espacio constituirán la red cristalina.

Existen 14 tipos de celdillas elementales. De ellas solo se encontrarán 4 de ellas con sus variantes en los metales y aleaciones metálicas. Estas son:

1. **Red cúbica centrada en el cuerpo (c.c):** La red representa un cubo cuyo parámetro es a . Los átomos están dispuestos en los vértices y en el centro del cubo. Tienen poca densidad de compactación, es decir los átomos ocupan un 68% del volumen de la red, mientras que en la (c.c.c) y la (h.c) ocupan un 74% del volumen. Su número de coordinación es 8. Ej: Fe (α), Mo, Na, etc.
2. **Red cúbica centrada en las caras:** La red tiene forma de cubo de parámetro con 8 átomos en los vértices del cubo y 6 en los centros de cada una de las caras. La densidad de compactación es del 74%. El índice de coordinación es 12. Ej: Fe (γ), Ni, Co, Cu, Al, Ti, etc.
3. **Red hexagonal compacta (hc).** La red tiene forma de prisma recto cuya base es un hexaedro. Tiene dos parámetros, los lados de la base del prisma a y su altura c . Doce átomos están dispuestos en los vértices de la red, 2 átomos en el centro de la base y 3 átomos en el interior de la red. La densidad de computación es 74% y el índice de coordinación es 12. Ej: Ti, Co, Cd, Mg.
4. **Red Tetragonal centrada en el cuerpo:** Tiene forma de prisma recto de base centrada. Los átomos están dispuesto de igual forma que en la (c.c) presenta dos parámetros, el lado de la base a y la altura c . La relación c/a recibe el nombre de grado de tetragonalidad. El índice de coordinación es igual a 8.

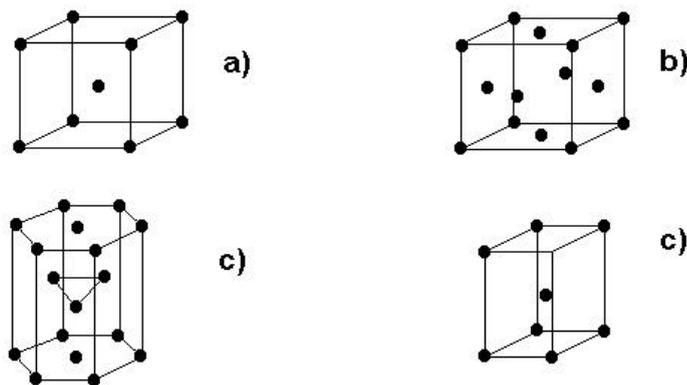


Figura 2 Tipos de redes cristalinas presentes en los metales: a)red cúbica centrada en el cuerpo. b) red cúbica centrada en las caras. c) red hexagonal compacta. d) red tetragonal.

Características de la red cristalina.

- **Parámetros de la red:** Caracteriza las dimensiones de la red en Angstrom. A través de la difracción de Rayos X, se puede calcular el parámetro de una red con una exactitud de una cien milésima de Angstrom ($1\text{Å} = 10^{-9}\text{mm}$).
- **Índice de coordinación:** Es el número de átomos que se encuentran mas próximos y equidistantes de un átomo dado.
- **Número de átomos correspondientes a una celdilla elemental:** En la red cúbica centrada en el cuerpo los átomos de los vértices pertenecen a 8 celdillas. Por consiguiente cada átomo aporta a una celdilla $1/8$ de su volumen. El átomo central pertenece a la celdilla, por lo tanto a una celdilla elemental le corresponde:

$$(1/8 \times 8) + 1 = 2 \text{ átomos}$$

En la red cúbica centrada en las caras al pertenecer los átomos de las caras a dos celdillas la ecuación quedaría:

$$(1/8 \times 8) + (1/2 \times 6) = 4 \text{ átomos}$$

- **Densidad de compactación:** Es el volumen que pueden ocupar los átomos en la red cristalina. Admitiendo que el átomo tiene forma de esfera, pueda calcularse su valor.

1.1.3 Teoría de las aleaciones. Conceptos generales.

Para poder entender a cabalidad los procesos de cristalización y transformaciones de fase, los especialistas se auxilian de los diagramas de equilibrio. Estos describen los procesos que transcurren durante los enfriamientos y calentamientos de un sistema aleante dado. Es decir que si se quiere pronosticar las estructuras que se obtendrán durante un tratamiento térmico dado usando el diagrama de estado de la aleación se podrá realizar este pronóstico. Esto será posible siempre y cuando el enfriamiento o el calentamiento sean de equilibrio.

Un **Diagrama de Estado** es la representación gráfica del estado de una aleación, si varía la composición de una aleación, su temperatura o presión, el estado de la composición de la aleación, su temperatura o presión, el estado de la aleación también cambia, esto se refleja gráficamente en el diagrama de estado.

- **El diagrama de estado muestra los estados estables, es decir, los estados que en esas condiciones poseen el mínimo de energía libre. Por esto el diagrama de estado también puede llamarse diagrama de equilibrio, ya que indica las fases en equilibrio que existen en unas condiciones dadas.**

De acuerdo con esto los cambios de estado reflejados en el diagrama también se refieren a las condiciones de equilibrio, es decir, en ausencia de **sobrecalentamiento ó subenfriamiento**. Sin embargo, para adentrarse en el estudio de un diagrama de estado es indispensable dominar algunos conceptos relacionados con los mismos como aleación metálica, componente, fase, constituyente estructural, etc.

Una **Aleación** es la sustancia obtenida por fusión de dos o más elementos uno de los cuales al menos debe ser un elemento metálico. Como

es natural la estructura de una aleación metálica será más compleja que la de un metal puro y depende principalmente de las interacciones en que intervienen los componentes de la aleación. Aunque estas pueden obtenerse por sinterización, electrólisis o sublimación lo más corriente en la producción de aleaciones es la obtención por fusión de diferentes sustancias.

A continuación se pasará a definir los conceptos de **fase, constituyente estructural y componente**. Se llaman **componentes** a las sustancias simples que componen la aleación. Por lo tanto un metal puro será un sistema de un componente, una aleación de dos metales un sistema binario. El componente principal de una aleación metálica será siempre un elemento metálico. Los compuestos químicos se consideran como componentes si no se disocian en las partes que las componen en el intervalo de temperatura que se analizan.

Fase es la parte homogénea de un sistema separada de las demás partes del mismo (fases) por una superficie de separación, al pasar la cual la composición química o la estructura de la sustancia cambia bruscamente.

Constituyente estructural son los elementos constitutivos de diferentes estructuras cristalinas que pueden estar formadas por una o más fases. Ej: Perlita, Austenita, Ferrita, Ledeburita, Cementita.

Las diferentes formas de combinación de los elementos componentes que se encuentran en la práctica en las aleaciones metálicas pueden ser clasificadas como mezclas mecánicas, soluciones sólidas, compuestos químicos, compuestos electrónicos, fases de lavas y fases de inserción.

1.1.3.1 Mezclas Mecánicas.

Las mezclas mecánicas de dos componentes se forman cuando estos son incapaces de disolverse mutuamente en estado sólido y no reaccionan químicamente formando compuestos. En estas condiciones las aleaciones estarían formadas por cristales de A y B claramente distinguibles en la microestructura.

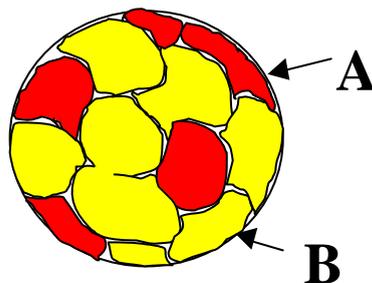


Figura 3 Ejemplo de mezcla mecánica.

El análisis roentgenográfico de esta aleación mostrará que existen las dos redes de los componentes A y B. Si en esta aleación se analizan por separado las propiedades de los cristales A y de los cristales B estos serán idénticos a los de los metales puros A y B.

Las propiedades mecánicas dependen de la relación cuantitativa entre los componentes y del tamaño y forma de los granos siendo sus valores intermedios entre los de las propiedades características de los componentes puros.

1.1.3.2 Combinación química.

Si se forma un compuesto químico.

- a) La relación entre el número de átomos de cada elemento coincide con la proporción estequiométrica la cual puede expresarse por medio de una fórmula sencilla (A_nB_m).
- b) Se formará una red cristalina específica (distinta de los elementos que integran el compuesto químico) en la cual los átomos de los componentes están ordenados de manera regular.

La combinación química también se caracteriza por tener una determinada temperatura de fusión. (disociación) y por variar a saltos las propiedades cuando varía la composición.

Si un compuesto químico se forma con elementos metálicos, en los nodos de las redes se encontrarán los iones con carga positiva retenidos por el gas electrónico, es decir, en este caso por el llamado enlace metálico. El enlace en este caso no es rígido y por esto en determinadas condiciones la cantidad de un elemento cualquiera puede ser mayor o menor al que corresponde a la relación estequiométrica.

⇒ **Por esta causa la formación de compuestos químicos con átomos metálicos no cumple la ley de valencia.**

Al formarse un compuesto químico de un metal con un no - metal aparece el enlace iónico.

Como resultado de la interacción de los elementos en este caso el átomo de metal cede electrones de valencia y se convierte en un ion positivo, y el átomo del metaloide acepta los electrones, los incorpora a su capa exterior y se transforma en ion negativo. En la red de un compuesto de este tipo los elementos son retenidos por la atracción electrostática.

En los compuestos de este tipo el enlace es rígido y la composición química constante y corresponde exactamente a la relación estequiométrica, es decir no puede haber exceso ni defecto de átomos de cualquiera de los elementos que forman el compuesto químico.

1.1.3.3 Soluciones Sólidas.

⇒ ¿Cómo se encuentran los elementos de una aleación en estado líquido?

Al pasar del estado líquido al sólido muchas aleaciones conservan su homogeneidad y por consiguiente la solubilidad. La fase sólida se forma como resultado de la cristalización de una aleación de este tipo llamada solución sólida.

El análisis químico o espectral demuestra que en las soluciones sólidas dos o más elementos muestran que según los datos del análisis metalográfico esta solución, lo mismo que el metal puro tiene granos homogéneos. El análisis roentográfico pone de manifiesto en la solución sólida, lo mismo que en un metal puro un solo tipo de red.

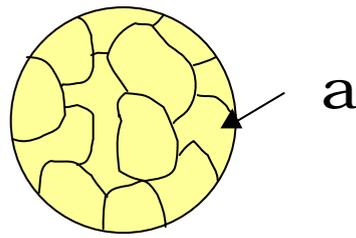


Figura 4 Ejemplo de solución sólida.

Además a diferencia de los compuestos químicos la solución sólida tiene una composición química que no existe con una relación rigurosamente determinada de los componentes, sino en un intervalo de concentraciones.

Tipos de soluciones sólidas.

En toda solución sólida existe un metal en que se disuelven los átomos de la sustancia soluto. De acuerdo a ocurra la disolución existen 2 tipos de solución existen dos tipos de solución sólida.

1. **Soluciones sólidas por sustitución:** El metal A tiene por ejemplo la red representada C.C. La disolución del componente B en el metal A se efectúa por sustitución parcial de átomos de A por átomos de B.

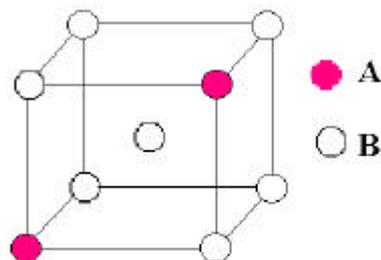


Figura 5 Solución sólida por sustitución.

Soluciones sólidas por inserción. Los átomos del soluto C se sitúan entre los átomos de A.

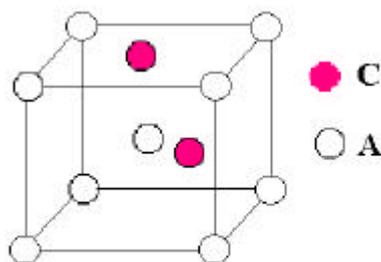


Figura 6 Solución sólida por inserción.

Las soluciones sólidas por sustitución pueden ser limitadas e ilimitadas. Cuando la solubilidad es total cualquier cantidad de átomos de A puede ser sustituida por átomos de B.

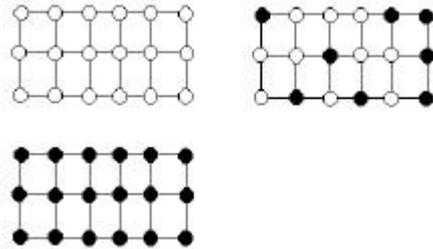


Figura 7 Solución Sólida Ilimitada.

Para esto deben cumplirse dos condiciones.

1. Que ambos metales tengan la misma red cúbica.
2. Que la diferencia entre las dimensiones atómicas sea lo suficientemente pequeña y sobre todo para elementos que se encuentran cerca unos de otros en la tabla periódica.

1.1.3.4 Compuesto electrónicos.

Se conocen también como fases (Hume Rothery) se caracterizan por una relación de los electrones de valencia con respecto al número de átomos ($3/2$, $21/3$ o $7/4$) correspondiéndole a cada relación una red cristalina determinada. Ej $3/2$ c.c y $7/4$ h.c. Se encuentran en muchas aleaciones de Zn, Cu, Sn, Fe y Al. Tienen una red cristalina nueva y mantienen una relación estequiométrica como los compuestos químicos.

Pero si elevamos la temperatura los átomos se distribuyen estadísticamente, distribución esta que permanece cuando descienden las temperaturas. Por lo que podemos considerar a los compuestos electrónicos como un intervalo entre la solución sólida y el compuesto químico. (Ej: sistema Cu – Zn).

1.1.3.5 Fase de Laves y Fases de Inserción.

Fases de Laves: Fases de fórmula estequiométrica AB_2 que se forman entre elementos cuyos diámetros atómicos cumplen aproximadamente la relación 1: 1,2 que forman redes complejas y se encuentran como endurecedoras intermetálicas en las aleaciones resistentes al calor. Ejemplo: $MgCu_2$, $TiCr_2$, Val_2 , $MgZn_2$, $FeBe_2$, WFe_2 .

Fases de Inserción: Se forman entre los metales del grupo de transición y los metaloides de radio atómico pequeño (H_2 , N_2 , C). Si la razón del radio atómico del metal es $< 0,59 \Rightarrow$ Los átomos del metal forman redes sencillas generalmente (cc, ccc, hc) y los átomos del no metal se insertan en los poros de la red en lugares determinados. Son considerados como compuestos químicos y su relación de átomos puede expresarse en fórmulas simples como: M_4X , M_2X , MX , etc, donde M es el metal y X el no metal.

Muchos carburos y nitruros que se encuentran en los aceros y otras aleaciones son fases de inserción.

1.1.4 Diagramas de estado Fe – C. Diagrama metaestable.

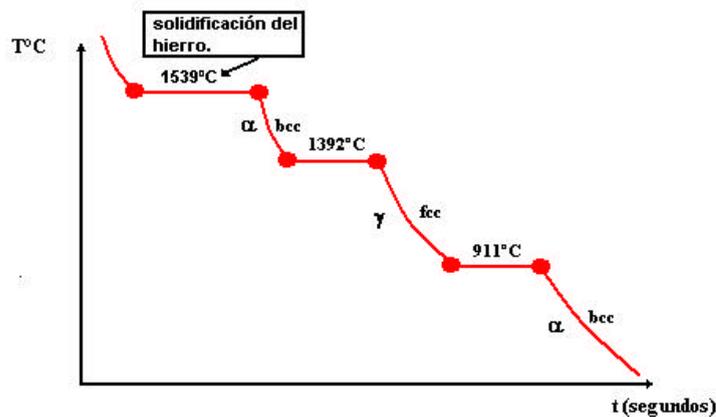
En el caso de las aleaciones ferrosas el diagrama de estado que se toma como punto de partida para el estudio del comportamiento metalúrgico de dichas aleaciones es el diagrama de estado bifásico Fe – C. En este trabajo se toma como punto de partida el estudio de las fases y componentes que componen dicho sistema.

1.1.4.1 Caracterización del Fe y el C.

Características del Hierro.

- Metal de color gris plateado.
- Temperatura de fusión 1539°C.
- Dureza \approx 80 HB y elongación relativa = 50%.
- Presenta dos formas alotrópicas α y γ .

Figura 8 Curva de enfriamiento del hierro puro.



Que el hierro exista en dos formas alotrópicas o redes cristalinas amplía las posibilidades de transformaciones de fases, lo que es lo aprovechado por el tratamiento térmico de las aleaciones de hierro con otros componentes y fundamentalmente con el carbono.

El hierro en unión del carbono tendrá la posibilidad de formar con este último soluciones sólidas en base a los hierros alfa (ferrita) y al hierro gamma (austenita) o también podrá formar compuestos químicos como la cementita (Fe_3C).

Caracterización del carbono (C).

- Es el otro componente en la aleación Hierro Carbono.
- Es un elemento no metálico.
- En estado libre se denomina grafito.

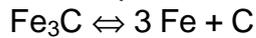
Es muy interesante el hecho de que el carbono en su forma natural (grafito) puede servir para la fabricación de lápices y al combinarse con el hierro puede formar compuestos químicos de características totalmente diferentes como la cementita.

El diagrama de estado hierro carbono visto de manera general, debe extenderse desde el hierro hasta el 100% de carbono, pero como en la práctica

solo empleamos aleaciones metálicas cuyo contenido de carbono no sobrepasa el 5%, solo se estudiará la parte del diagrama que va desde el hierro hasta la cementita la cual se forma a 6,67% de carbono. Por tanto los componentes del diagrama que se estudiará será el Hierro – Cementita.

Caracterización de la cementita (Fe₃C).

- Es un compuesto químico denominado carburo de hierro.
- Su temperatura de fusión es de aproximadamente 1250°C.
- Su dureza es de 800 HB y su elongación cercana al 0%.
- Con otros elementos forma soluciones sólidas denominadas cementitas aleadas.
- Es inestable termodinámicamente y se descompone en determinadas condiciones para dar carbono libre (grafito).



1.1.4.2 Diagramas de estado Fe – C. Diagrama metaestable.

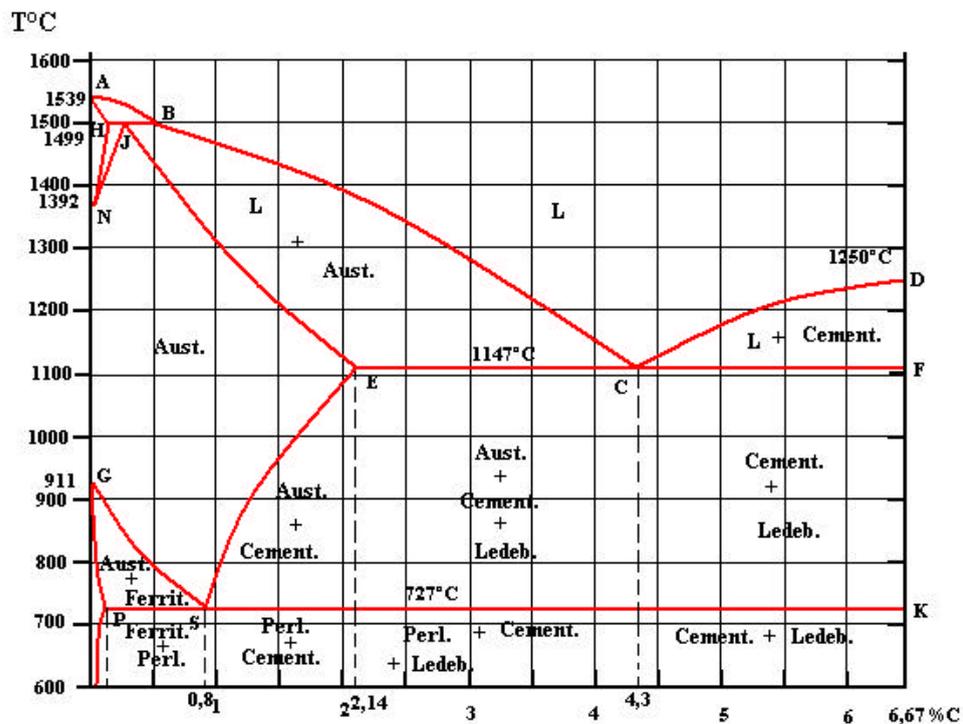


Figura 9 Diagrama Fe – C metaestable.

La línea ABCD es la línea del líquido y la AHJECF la del sólido.

Como el hierro además de formar con el carbono el compuesto químico Fe₃C, tiene dos transformaciones alotrópicas α y γ , en el sistema existen las fases siguientes:

Líquido: Solución líquida de carbono en hierro. Existe por encima de la línea del líquido y se designa por L.

Cementita: Fe₃C, existe en la vertical DFKL se designa por su fórmula química o por C.

Ferrita: Constituyente estructural que es hierro α , el cual disuelve el carbono en cantidades insignificantes. Se representa por Fe_{α} , F ó α . La región de la ferrita en el diagrama hierro carbono se encuentra a la izquierda de las líneas GPQ, y AHN.

Austenita: Estructura consistente en una solución sólida de carbono en hierro γ . La región de la austenita es NJESG. Se designa por A, γ ó Fe_{γ} .

Se estudiará el diagrama analizando fundamentalmente las tres reacciones principales que se representan en líneas horizontales, comenzando el análisis desde las temperaturas más altas hacia las inferiores.

- **Reacción Peritética $L + \alpha \rightleftharpoons \gamma$ ocurre a 1499°C.**

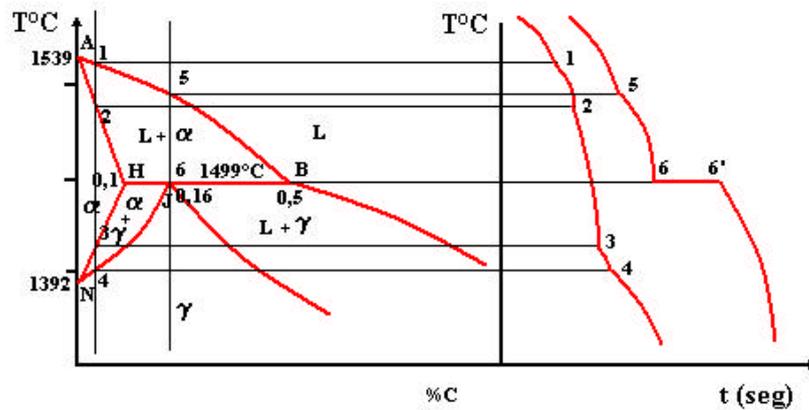


Figura 10 Zona del Diagrama Fe – C correspondiente a la reacción peritética.

Como resultado de esta reacción se formará austenita. Ocurre para aleaciones entre 0,1 y 0,5% de Carbono.

- **Reacción eutéctica. $L \rightleftharpoons \gamma + Fe_3C$ (a 1147°C).**

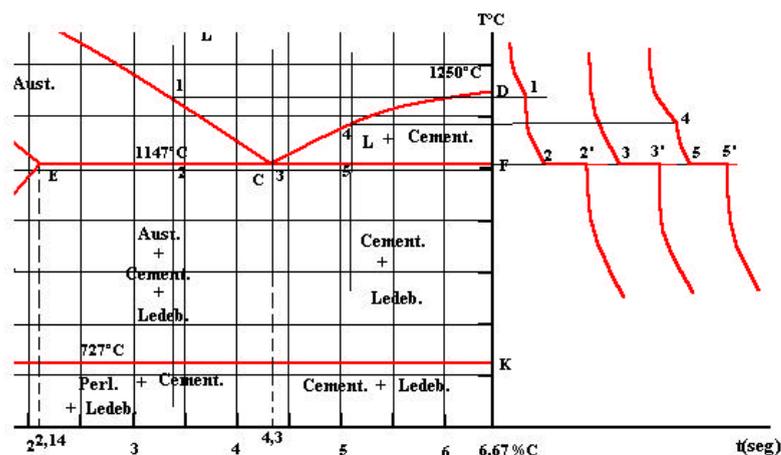
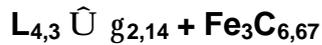


Figura 11 Zona del Diagrama Fe – C correspondiente a la reacción eutéctica.

Como resultado de la reacción se formará la mezcla eutéctica. La mezcla eutéctica de γ y Fe_3C se llama ledeburita.



Ocurre esta reacción para todas las aleaciones con más de 2,14%C. En esta zona se observa además la línea de pérdida de solubilidad de la austenita.

A la cementita segregada de la austenita se le llama secundaria, siendo denominada la que solidifica desde el líquido cementita primaria (ambas estructuras son idénticas).

P Reacción eutectoide. $g \text{ (R)} a + \text{Fe}_3\text{C}$ (a 1147°C).

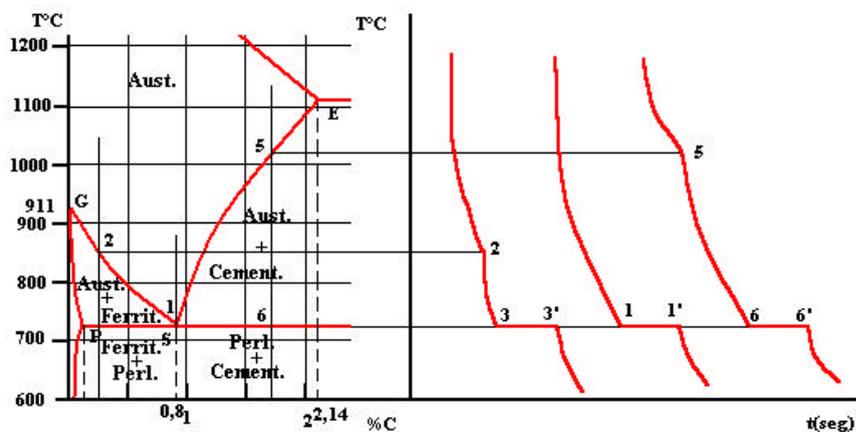


Figura 12 Zona del Diagrama Fe – C correspondiente a la reacción eutectoide.

El producto de la transformación es una mezcla eutectoide. La mezcla de α y Fe_3C se llama perlita. Ocurre para aleaciones de más de 0,02%.

- **Clasificación de los aceros al carbono de acuerdo a la microestructura.**

En el diagrama metaestable se destacan dos tipos de aleaciones técnicas de gran importancia que son los aceros y las fundiciones.

Los aceros al carbono se presentan con un contenido de hasta 2,14%C y las fundiciones desde este valor hasta 6,67%C, aunque en la práctica hasta 5%. Los aceros además de tener el Fe y el C poseen impurezas como Si, Mn, P y S, acerca de las cuáles puede estudiarse en el Metalografía de A.P. Guliáev; sobre todo su influencia en la estructura y propiedades de los aceros.

La introducción del carbono en el Fe modifica las propiedades de este de forma muy significativa y es necesario conocer que ocurre en los aceros al aumentar el % de C. La primera clasificación de los aceros la realizaremos de acuerdo a su estructura de equilibrio.

Hipoeutectoides: Menos de 0,8%C (estructura de ferrita y perlita).

Eutectoides: 0,8%C (Estructura de perlita).

Hipereutectoides: Mas de 0,8%C y menos de 2,14%C (estructura de cementita y perlita).

Producto de la variación de la estructura y de la composición de fases, a medida que aumenta el contenido de carbono ocurre mayor deformación en las redes cristalinas, en las soluciones sólidas y la aparición de cementita muy dura y frágil en mayor cantidad. Además esta se coloca en el borde del grano lo que tiende a fragilizar la estructura del acero de un 0,9 a 1,2%, lo que hace que la resistencia que iba en aumento hasta el momento disminuya mientras que la dureza siempre va a aumentar, disminuyen la resiliencia y el alargamiento relativo.

Es importante también la influencia del carbono en la tenacidad de los aceros. El aumento del contenido de carbono eleva el umbral de fragilidad en frío y hace que disminuya la resiliencia en la región de tenacidad (es decir a temperaturas superiores al umbral de fragilidad en frío).

Capítulo II: Tratamiento térmico de los aceros.

2.1 Transformaciones durante el tratamiento térmico de los aceros.

El estudio de los procesos de T.T. del acero comenzó por D.Chernov de los puntos críticos del acero en 1868.

El postulado de Chernov acerca de que las propiedades de los aceros se determinan por la estructura y que esta depende de la temperatura de calentamiento y de la rapidez del enfriamiento, fue generalmente reconocido y durante los decenios siguientes, los investigadores establecieron la relación entre la estructura y las condiciones de su formación (principalmente la temperatura de calentamiento y la velocidad de enfriamiento). En los años 20 y 30 de este siglo investigadores como el soviético S.Steinberg, los norteamericanos Mell y Bain y los alemanes Weber, Hannerman y Esser, con sus numerosas y profundas investigaciones establecieron la cinética de las transformaciones del acero en sus diferentes composiciones químicas.

2.1.1 Transformaciones durante el calentamiento del acero.

Para el análisis de las transformaciones durante el calentamiento de los aceros, se tomará la parte del diagrama Fe-C correspondiente a las aleaciones por debajo de 1147°C de temperatura y por debajo de 2,14% de Carbono. A las curvas de transformaciones de fase se le asignarán las siguientes nomenclaturas:

- ❖ A1 (Ac1 ó Ar1): Línea de la reacción eutectoide.
- ❖ A3 (Ac3 o Ar3): Línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita.
- ❖ Am (Acm o Arm): Curva de pérdida de solubilidad de la austenita.

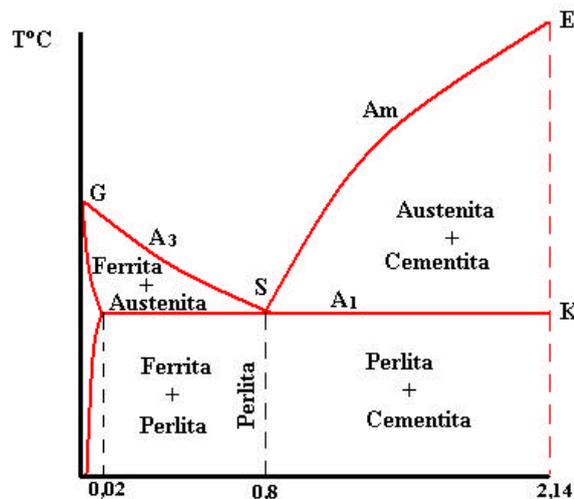


Figura 13 Zona del Diagrama Fe – C correspondiente a la reacción eutectoide con las curvas de transformación de fases empleadas en el tratamiento térmico del acero.

Para el estudio de las transformaciones de fase del acero se utilizará el acero eutectoide es decir, aquel que tiene 0,8%C y 100% de perlita. Durante

las transformaciones de fase del resto de los aceros, habrá que tener en cuenta la presencia de otros constituyentes estructurales como lo son la ferrita y la cementita.

El comienzo de la transformación de Perlita en Austenita solo puede efectuarse, si el calentamiento es muy lento. En las condiciones normales de calentamiento la transformación se retrasa y se obtiene un sobrecalentamiento.

La perlita sobrecalentada por encima del punto crítico se transforma, a velocidad distinta en dependencia del grado de sobrecalentamiento en la austenita.

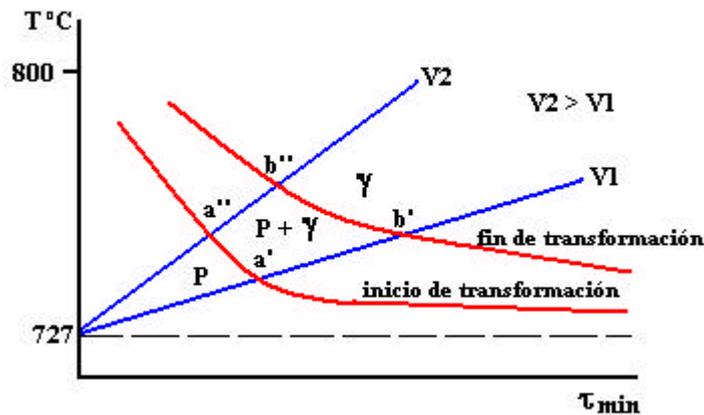


Figura 14 Diagrama de transformación de fase de la perlita durante el calentamiento.

La posición de las curvas muestra que mientras mas altas son las temperaturas la transformación ocurre en un intervalo menor de tiempo y tanto mas elevada es la temperatura de transformación. El tiempo entre el inicio y final de la transformación se denomina de incubación.

La transformación se caracteriza por la formación de austenita y la desaparición de la perlita. Para homogeneizar la composición química después que ocurra la transformación es necesario dar un tiempo de mantenimiento para que mediante los procesos difusivos la composición en carbono de la misma sea la misma en toda la austenita. Téngase en cuenta que la austenita se origina de la ferrita que tiene 0,02%C y de la cementita que presenta 6,67%C. La composición en carbono de ambas fases es muy disímil. Este tiempo de mantenimiento debe tenerse siempre en cuenta desde el punto de vista tecnológico.

2.1.1.1 Crecimiento del grano austenítico.

Una vez finalizada la transformación de perlita en austenita se forma una gran cantidad de granos pequeños de austenita. El tamaño de estos granos caracteriza la magnitud llamada grano inicial de la austenita.

El calentamiento ulterior o el mantenimiento a la temperatura dada, una vez terminada la transformación provoca el crecimiento de los granos de austenita. Este es un proceso que se desarrolla espontáneamente. En ese sentido se distinguen dos tipos de acero.

- Aceros de grano fino hereditario (poco propensos al crecimiento).
- Acero de grano fino hereditario (muy propensos al crecimiento).

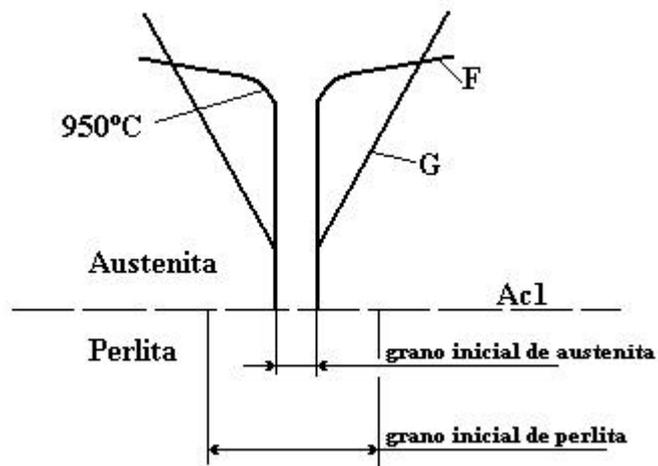


Figura 15 Tendencia hereditaria del acero al crecimiento de grano durante la austenización.

El tamaño de grano obtenido en el acero como resultado de un tratamiento térmico se llama grano real. Los granos crecen durante el calentamiento y no disminuyen de tamaño durante el enfriamiento. Por esto la temperatura máxima de calentamiento del acero en estado austenítico y su granulación hereditaria determinan el tamaño definitivo del grano.

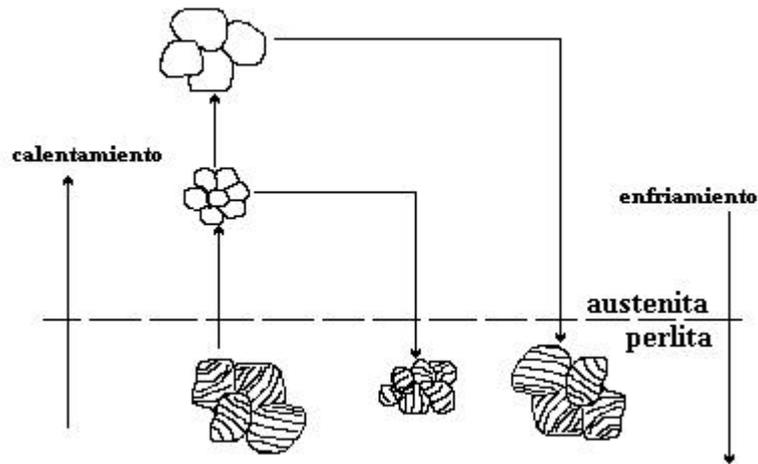


Figura 16 Efecto del sobrecalentamiento de la austenita sobre el tamaño final del grano de perlita.

2.1.2 Transformaciones durante el enfriamiento del acero (Diagrama T.T.T.).

Para el estudio de las transformaciones de fase durante el enfriamiento, emplearemos el diagrama de descomposición isotérmica de la austenita denominado también diagrama T.T.T. el cual se construye en coordenadas temperatura vs tiempo. En esas coordenadas se sitúan sobre el diagrama las curvas de enfriamiento. Para el análisis de este epígrafe se empleará el diagrama T.T.T. correspondiente al acero eutectoide (0,8%C).

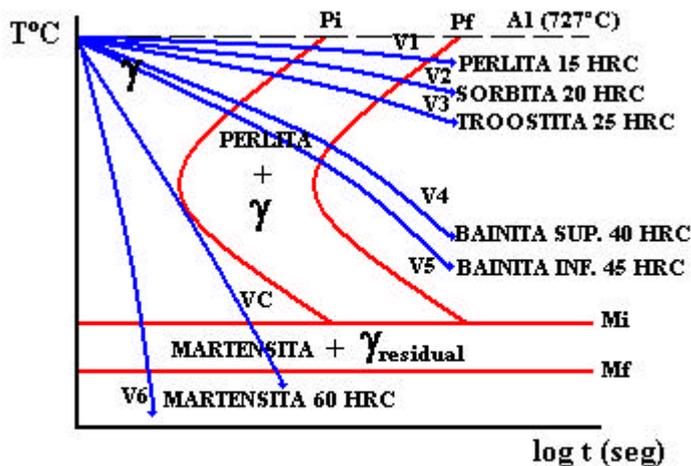


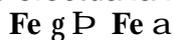
Figura 17 Diagrama de descomposición isotérmica de la austenita (T.T.T.)

De la línea V1 que caracteriza el enfriamiento lento, se obtienen como producto final la perlita de poca dureza (de láminas gruesas). Cuando el enfriamiento es más rápido (V2 y V3) la velocidad de difusión disminuye formándose productos más disperso y más duros.

Para temprar el acero hay que enfriarlo con una velocidad tal que no tenga tiempo de producirse los procesos difusivos de descomposición de la austenita en la región superior de temperaturas. La velocidad mínima de enfriamiento, necesaria para que se forme la martensita a partir de la austenita se denomina **velocidad crítica de temple (VC)**. Para temprar un acero es necesario que se enfríe con una velocidad mayor que la crítica. Si el enfriamiento es menor que la crítica se obtendrán productos perlíticos, principalmente troostita, lo que disminuirá la dureza del acero.

2.1.2.1 Transformación martensítica.

Si la austenita se subenfía hasta la temperatura en la que la red de la austenita a pesar de la presencia de carbono disuelto en ella, es inestable, pero la velocidad de difusión del carbono, debido a la temperatura, es tan pequeña que se efectúa la reestructuración de la red sin que precipite el carbono.



Sus principales características son:

- Ocurre sin difusión.
- Se origina martensita (solución sólida de carbono en hierro α) de red tetragonal.
- El contenido de carbono de la martensita es igual al contenido de carbono de la austenita que la originó.
- La tetragonalidad de la martensita es proporcional al contenido de carbono.
- Se forma una estructura acicular (en forma de láminas o agujas).
- La transformación transcurre a intervalos a partir de la curva de inicio de transformación (M_i) hasta la curva final de transformación (M_f).
- Generalmente (M_f) se encuentran por debajo de 0°C por lo que en la estructura del acero siempre queda un pequeño por ciento de austenita que no se transforma denominado austenita residual.
- Es una transformación irreversible. Es decir, no se obtiene a partir de la martensita, martensita nuevamente.
- El metal queda en estado inestable con gran cantidad de tensiones internas.

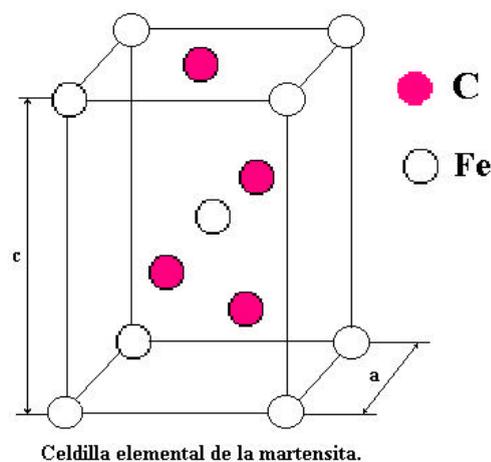


Figura 18 Red cristalina de la martensita.

2.1.3 Transformaciones durante el revenido.

Durante el calentamiento de una estructura martensítica ocurren en el acero las siguientes transformaciones.

1. **Entre 80°C y 200°C:** Primera etapa del revenido. Disminuye la tetragonalidad de la martensita. La martensita que se obtiene con este revenido (martensita revenida con relación c/a cercana a 1) es casi cúbica. Se empieza a precipitar el carbono de la martensita.
2. **Entre 200°C y 300°C:** Segunda etapa del revenido. La austenita residual se transforma en una mezcla formada por solución sólida sobresaturada de carbono en hierro α (martensita revenida). Se forman carburos intermedios ϵ de fórmula Fe_2C .
3. **Entre 300°C y 400°C:** Tercera etapa del revenido. Se eliminan las tensiones residuales y la estructura de los carburos se torna cementítica. La estructura es denominada bainita de revenido (mezcla de cementita y ferrita). Aparece la fragilidad del revenido de primer género. El límite elástico alcanza su valor más elevado.
4. **Más de 400°C y hasta 600°C:** Se obtiene la sorbita y la troostita de revenido (mezclas de ferrita y cementita). Coalece la cementita. La dureza disminuye mucho, pero se obtiene la mayor resistencia a la fatiga.

Conviene llamar la atención que en las mezclas de ferrita y cementita que se obtienen del revenido tienen una forma granular, mientras que las que se obtienen directamente de la austenita son laminares. Estas últimas presentan propiedades mecánicas inferiores a las provenientes del temple y el revenido.

2.2 Conceptos Prácticos relacionados con el tratamiento térmico de los aceros.

➤ **Clasificación general de los tratamientos térmicos de los aceros.**

1. **Volumétricos:** *Temple, Revenido, Recocido, Normalizado, Termomecánico.*
2. **Superficiales:** *Temple Superficial, Tratamientos Termoquímicos.*

2.2.1 Tratamiento Térmico de Temple.

Temple: Consiste en un calentamiento entre 30 – 50°C por encima de Ac_3 para los aceros hipoeutectoides y 30 – 50°C por encima de Ac_1 para los aceros eutectoides e hipereutectoides.

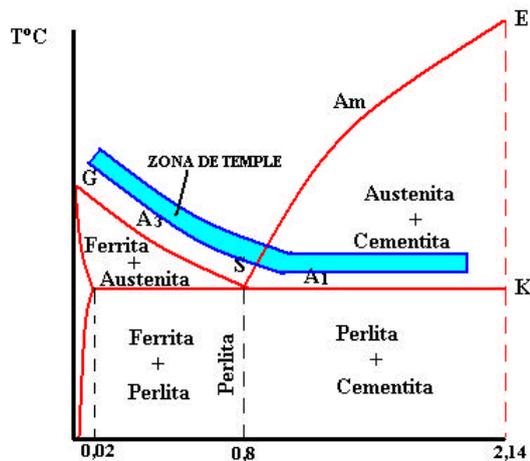


Figura 19 Temperaturas de calentamiento durante los tratamientos de Temple.

seguido de un enfriamiento enérgico en un medio adecuado, con velocidad mayor que la crítica de Temple para obtener una estructura martensítica, dureza y resistencia en el acero.

¿ Por qué los aceros hipoeutectoides se austenizan completamente y los hipereutectoides no?

Si se calienta entre A_{c1} y A_{c3} en los aceros hipoeutectoides queda parte de ferrita en la estructura austenítica y al enfriarse, se hereda en la transformación martensítica y esto ocasiona una disminución de la resistencia y la dureza (este defecto se denomina temple incompleto). Es por ello que en estos aceros se da temple completo (por encima de A_{c3}).

En el caso de los aceros hipereutectoides hay varias razones para no calentar por encima de A_{cm} :

1. Aumenta mucho el tamaño del grano austenítico.
2. Se descarbura más la superficie del acero.
3. Disminuye algo la dureza de la estructura de martensita porque aumenta la cantidad de austenita residual.

Cuando se calienta entre A_{c1} y A_{cm} :

1. La cementita presente en el acero templado aumenta la dureza y la resistencia al desgaste.

Según lo anterior de acuerdo a la temperatura de calentamiento hay dos tipos de temple: **completo e incompleto.**

El tiempo total que dura el tratamiento térmico se compone del tiempo de calentamiento hasta la temperatura dada (T_c) y el tiempo de permanencia a esta temperatura (T_p).

$$T_{total} = T_c + T_p$$

La magnitud de T_c depende de la aptitud del medio para calentar, de las dimensiones de las piezas y de la colocación en el horno. T_p depende de la velocidad de los cambios de fase, la cual está determinada por el grado de calentamiento por encima del punto crítico y por la difusión de la estructura inicial.

En la práctica T_p puede tomarse como $1 \text{ min} \times \text{mm}$ para los aceros al carbono y $2 \text{ min} \times \text{mm}$ para los aceros aleados. El tiempo de calentamiento depende de muchos factores y puede oscilar entre 1 – 2 min para piezas pequeñas en baños de sales y muchas horas en piezas grandes en hornos de cámara.

El tiempo de calentamiento exacto solo puede establecerse por la vía experimental para una pieza dada en las condiciones concretas, pero se puede calcular de forma aproximada para lo cual existen varios métodos. Se puede tomar $1 \text{ min} \times \text{mm}$ en hornos de mufla y piezas de acero al carbono. Para aceros aleados debe incrementarse un 20 – 25%.

Templabilidad: Se entiende por templabilidad la profundidad a la que penetra en la pieza la zona templada. La templabilidad incompleta se explica porque durante el temple, la pieza se enfriará más rápido en la superficie que en el centro.

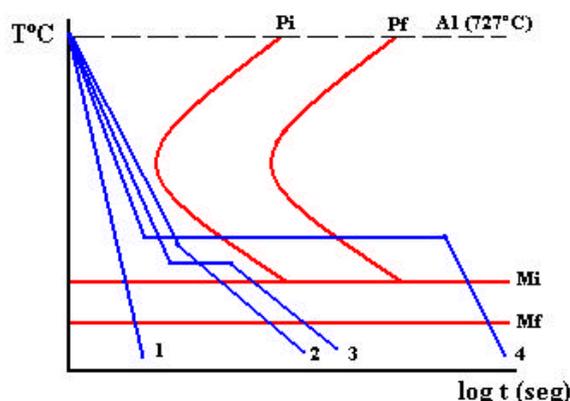
Es evidente que en la medida que disminuye la velocidad crítica de temple aumenta la profundidad de la capa templada, y si la V_c es menor que la velocidad de enfriamiento en el centro de la pieza, esta sección se templará completamente. Por consiguiente, cuanto menor sea V_c , tanto mayor será la templabilidad.

Para valorar prácticamente la templabilidad se utilizará una magnitud llamada diámetro crítico (D_c). El diámetro crítico es el diámetro máximo para una barra cilíndrica que se temple en toda su sección en un medio de enfriamiento dado. Por consiguiente, para un acero dado a cada medio de enfriamiento le corresponde un diámetro crítico.

Si es necesario que una pieza se temple en todo su espesor hay que elegir un acero tal que:

$$D_c > D_{\text{pieza}}$$

Una pieza templada se halla siempre en un estado de tensión estructural. El revenido es un medio necesario y radical para disminuir las tensiones residuales. El calentamiento del acero en el revenido aumenta la plasticidad, esto permite que, en los diversos volúmenes, las deformaciones elásticas se conviertan en plásticas, con lo cual disminuye la tensión.



- **Tipos de temple. Figura 20 Curvas de enfriamiento de los diferentes tipos de temple representadas en el diagrama T.T.T.**

1. Temple continuo (en un solo medio).
2. Temple escalonado (en dos medios).
3. Temple Escalonado (Mantempering).
4. Temple isotérmico (Austempering).

Otros procedimientos de temple.

1. Enfriamiento en chorro de agua (mayor templabilidad).
2. Temple con autorrevenido (para lograr que la dureza disminuya gradual y uniformemente. Se emplea en herramientas, cortafríos, punzones, hachas, etc. Solo se le da dureza al filo.)
3. Enfriamiento subcero (para disminuir la austenita residual).

2.2.2 Tratamiento Térmico de Revenido.

Uno de los orígenes de la aparición de grietas en las piezas templadas es la presencia de tensiones internas producto de la transformación martensítica. Para evitar este defecto es necesario aplicar el tratamiento térmico de revenido posterior al temple.

Revenido: Es un proceso tecnológico de tratamiento térmico que consiste en el calentamiento del acero templado hasta temperaturas por debajo de AC1, mantenimiento y enfriamiento posterior a la velocidad adecuada. Su objetivo es eliminar las tensiones internas y estabilizar la estructura martensítica.

Tipos de Revenido.

- **Revenido Bajo:** Se realiza en el intervalo de temperatura de 150°C a 250°C. Se utiliza para todos los aceros de herramientas de alto contenido de carbono. Prácticamente no disminuye la dureza, pero disminuye las tensiones internas y parte de la austenita residual.
- **Revenido Medio:** Se realiza a 350 – 450°C. Es muy utilizado en muelles y resortes. Disminuye bastante la dureza y se eleva la tenacidad. Se obtiene una estructura de troostita de revenido. También se puede utilizar en herramientas que deban tener buena resistencia con suficiente elasticidad.
- **Revenido Alto:** Se realiza a 500°C – 650°C. En este proceso, la martensita se transforma en sorbita de revenido. Esta estructura garantiza una mejor combinación de resistencia y plasticidad del acero. En la sorbita de revenido la cementita adquiere forma granular, a diferencia de la obtenida en un normalizado. Como consecuencia de esto se eleva notablemente la resistencia con la misma dureza o aún más elevada con relación al acero normalizado. Este tipo de revenido se emplea para piezas de acero que estén sometidas a elevada fatiga o cargas de impacto.

El temple del acero con un ulterior revenido alto se denomina termomejoramiento o bonificado.

2.2.3 Tratamiento Térmico de Recocido.

Recocido: Es una de las operaciones de tratamiento térmico más importantes y utilizadas en el tratamiento térmico del acero. Consiste en calentar el acero hasta una temperatura dada, un mantenimiento a esa temperatura y un enfriamiento lento en el horno. Se obtienen estructuras de equilibrio, son generalmente tratamientos iniciales. Ablandan el acero. Atendiendo a los tipos que existen existen diferentes tipos.

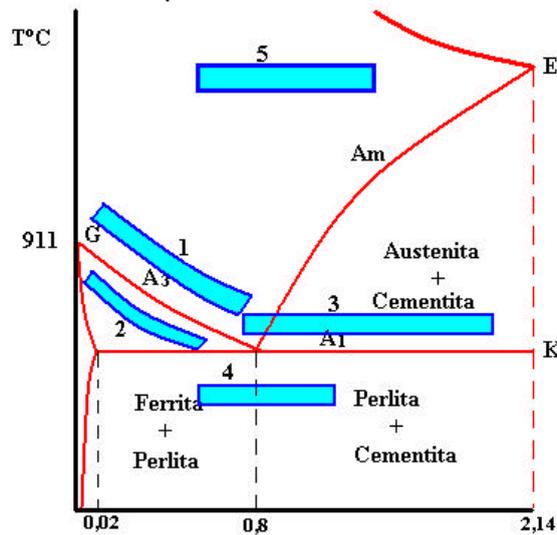
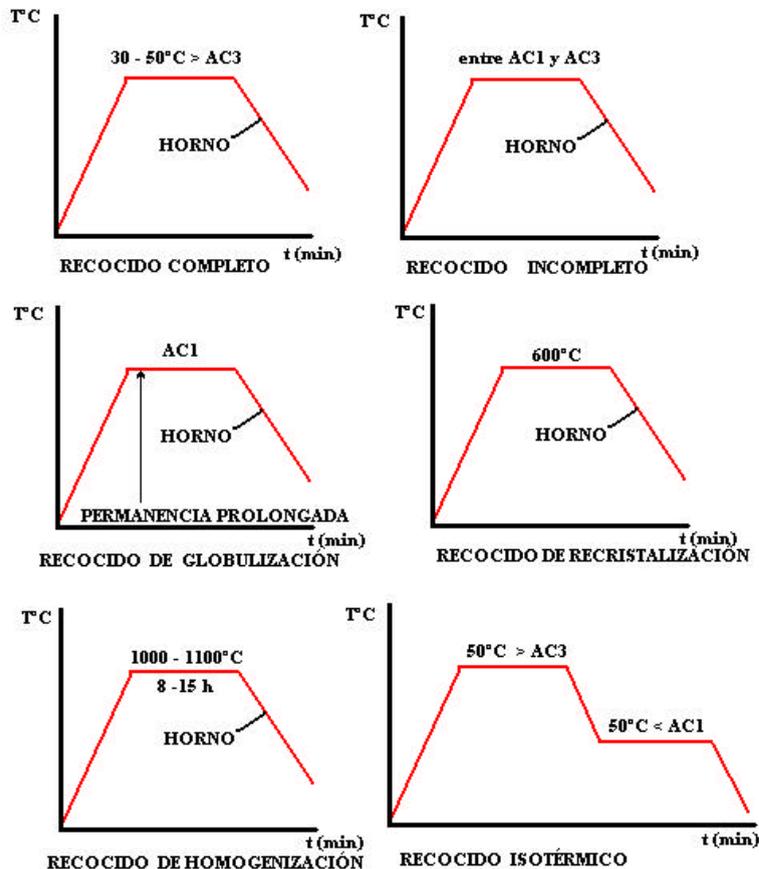


Figura 21 Temperaturas de calentamiento durante los tratamientos de Recocidos.

- **Recocido Completo:** Elimina las estructuras indeseables como la de Windmanstaeten. Afina el grano cuando ha crecido producto de un mal tratamiento. Para aceros hipoeutectoides.
- **Recocido Incompleto:** Elimina tensiones. Solo recristaliza la perlita. Más económico.
- **Recocido de Globulización:** Mejora la maquinabilidad en los aceros eutectoides e hipereutectoides.
- **Recocido de Recritalización:** Disminuye tensiones. Elimina la acritud.
- **Recocido de Homogenización:** Elimina la segregación química y cristalina. Se obtiene grano grueso. Es necesario un recocido completo posterior.
- **Recocido isotérmico:** Economiza tiempo. Se emplea mucho en los aceros aleados. Se mantiene en baños de sales a temperaturas menores que A1 hasta que la descomposición de la austenita se produzca y después se enfría al aire.

Figura 22 Gráficos de tratamiento de los diferentes tipos de Recocido.

1. Completo.
2. Incompleto.
3. Globulización.
4. Recristalización.
5. Homogenización
6. Isotérmico.



2.2.4 Tratamiento Térmico de Normalizado.

Normalizado: Consiste en un calentamiento del acero aproximadamente 30 – 50°C por encima de Ac3 o Ac_m y un enfriamiento posterior al aire. Se produce durante el mismo la recristalización y afino de la perlita. Se realiza con enfriamiento al aire. En el caso de los aceros con bastante carbono y mucha templabilidad, este tratamiento puede equivaler a un temple parcial, donde aparezcan productos perlíticos y martensíticos. Para aceros con bajo contenido de carbono no aleados no existe mucha diferencia entre el normalizado y el recocido. Para aceros de contenido medio (entre 0,3 – 0,5%C) la diferencia de propiedades es mayor que en el caso anterior. El normalizado da más dureza.

Objetivos del normalizado.

- Subsancar defectos de las operaciones anteriores de la elaboración en caliente (colada, forja, etc).
- Preparar la estructura para las operaciones tecnológicas siguientes (por ejemplo mecanizado o temple)
- Puede ser un tratamiento térmico final.

Capítulo III: Influencia de los elementos de aleación en los aceros.

En la práctica industrial llega el momento en que los aceros al carbono no satisfacen todos los requerimientos de designaciones de servicio que desde el punto de vista práctico existen. A veces se requieren aceros que sean capaces de soportar la destrucción debido a la corrosión, que tengan una mayor resistencia mecánica, que presenten mayor templabilidad, que al trabajar a altas temperaturas mantengan dentro de límites aceptables su resistencia mecánica. En esos casos la solución es la adición de elementos químicos que proporcionan al acero estas propiedades. Es por ello que en el presente Capítulo se abordarán las influencias que sobre la microestructura y las propiedades del acero ejercen los elementos de aleación.

3.1 Aceros aleados. Clasificación de las impurezas.

- **Aceros Aleados:** Son aquellos aceros en los cuales con el objetivo de obtener propiedades necesarias se introducen elementos de aleación.
- **Elementos de aleación:** Son los elementos que se adicionan al acero en determinadas concentraciones con el fin de variar su estructura y propiedades. En los aceros industriales, que son sistemas de muchos componentes, los elementos de aleación pueden encontrarse:
a) en estado libre. b) en forma de óxidos, sulfuros u otras inclusiones no metálicas. c) en forma de compuestos intermetálicos con el hierro o entre sí. d) en la fase carburos, en forma de solución en la cementita o de combinaciones independientes con el carbono (carburos especiales). e) en forma de solución sólida.
- **Impurezas Permanentes:** Siempre se encuentran en cualquier acero debido a que es casi imposible eliminarlas del todo durante los procesos metalúrgicos de fabricación del acero. Las impurezas constantes del acero y sus concentraciones habituales son:
Mn: 0,3 – 0,7% Si: 0,2 – 0,4% Al: 0,01 – 0,02%
Ti: 0,01 – 0,02% P: 0,01 – 0,05% S: 0,01 – 0,04%
Estas impurezas en las concentraciones indicadas no pueden ser consideradas elementos de aleación ni los aceros que las contienen, aceros aleados.
- **Impurezas latentes:** Son el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno, que están presentes en cualquier acero en cantidades muy pequeñas. Los métodos para determinarlas químicamente son complicados y por esto el contenido de estos elementos no se indica en las condiciones técnicas ordinarias.
- **Impurezas accidentales:** Pertenecen a este grupo las impurezas que llegan al acero procedentes de los materiales de carga o de forma accidental.

3.2 Influencia de los elementos de aleación en los aceros.

3.2.1 Influencia de los elementos de aleación en el polimorfismo del hierro.

Todos los elementos de aleación que se disuelven en el hierro influyen en el intervalo de temperaturas en que existen sus modificaciones alotrópicas, es decir, desplazan los puntos A3 y A4 por la escala de temperaturas.

La mayoría de los elementos de aleación elevan el punto A4 y bajan el punto A3, ensanchando el campo de existencia de la modificación alotrópica γ (fig.23 a), o bajan A4 y elevan A3, estrechando la región de existencia de la modificación γ (fig.23 b).

En los diagramas esquemáticos de estado hierro – elemento de aleación que se dan en la figura 1, puede verse que por encima de un contenido determinado de manganeso, níquel o algunos otros elementos de aleación (fig. 23 a) el estado γ existe como estable desde la temperatura ambiente hasta la de fusión. Estas aleaciones base hierro se llaman **austeníticas**. Si el contenido de vanadio, molibdeno, silicio, y otros elementos es mayor que un determinado límite, será estable a todas las temperaturas el estado α (fig. 23b). Estas aleaciones a partir del hierro α se llaman **ferríticas**. A diferencia de otras aleaciones a base hierro las austeníticas y ferríticas no sufren transformaciones al calentarse o enfriarse.

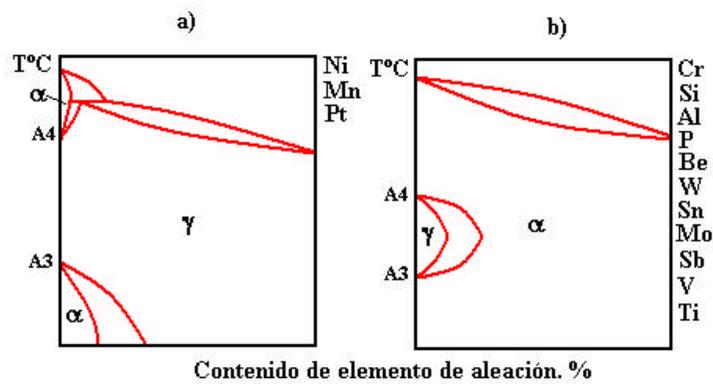


Figura 23 Esquema del diagrama de estado Hierro – Elemento de Aleación.

3.2.2 Influencia de los elementos de aleación en la ferrita.

La solución de los elementos de aleación en el $Fe\alpha$ se efectúa como resultado de la sustitución de los átomos de hierro por átomos de estos elementos. Los átomos de los elementos de aleación que se diferencian de los del hierro por sus dimensiones y estructura, crean en la red tensiones que provocan la variación de su naturaleza. Todos los elementos que se disuelven en la ferrita hacen que varíen los parámetros de la red de esta en un grado mayor, cuanto más se diferencian las dimensiones del átomo de hierro y del elemento de aleación. Los elementos de cuyo radio atómico es menor que el del hierro, disminuyen los parámetros de la red, y los del radio atómico mayor, los aumentan.

Es natural que la variación de las dimensiones de la red α ocasione un cambio de las propiedades de la ferrita: se eleva su resistencia y disminuye la plasticidad. En la figura 24 se muestran los cambios de las propiedades de la ferrita (dureza y resiliencia) cuando se disuelven en ella diversos elementos. Como se ve por el diagrama, el cromo, el molibdeno y el wolframio endurecen la ferrita menos que el níquel, el silicio, y el manganeso. El molibdeno y el silicio (cuando estos últimos están presentes con más del 1%) hacen disminuir la tenacidad de la ferrita, el cromo menos y el níquel nada.

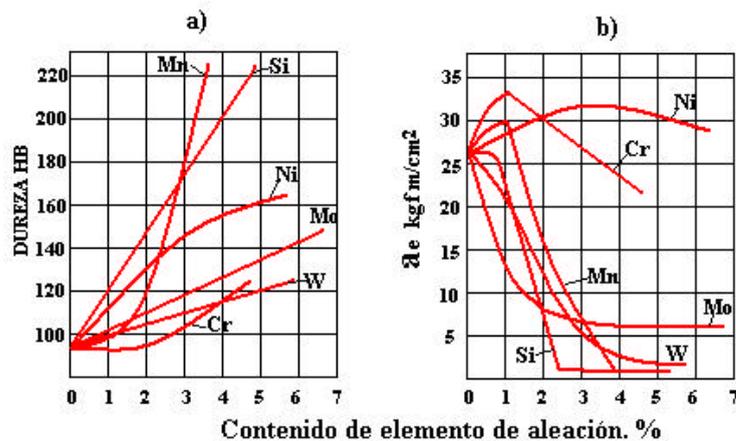


Figura 24 Influencia de los elementos de aleación en las propiedades de la ferrita:
a) dureza; b) resiliencia.

Tiene gran importancia la influencia que ejercen los elementos de aleación en el umbral de fragilidad en frío. La existencia de cromo en el hierro contribuye a que se produzca cierta elevación de dicho umbral, mientras que el níquel hace que baje bruscamente, disminuyendo con ello la tendencia del hierro a las roturas frágiles (Figura 25).

Por tanto de los seis elementos de aleación más difundidos que se han enumerado el níquel tienen un valor especial. El níquel que endurece con bastante intensidad la ferrita, no disminuye su tenacidad y hace que disminuya su umbral de fragilidad en frío, mientras que los otros elementos, si no disminuyen la tenacidad, endurecen la ferrita débilmente (el cromo) o la endurecen mucho, pero hacen que descienda bruscamente su tenacidad (manganeso y silicio).

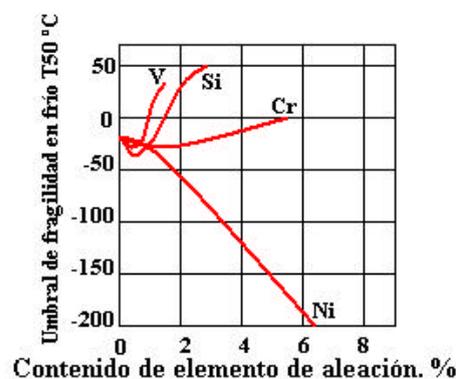


Figura 25 Influencia de los elementos de aleación en el umbral de fragilidad en frío.

3.2.3 La fase carburo en los aceros aleados.

En los aceros sólo forman carburos los metales que en el sistema periódico se encuentran a la izquierda del hierro. Estos metales lo mismo que el hierro pertenecen a los metales del grupo de transición, pero tienen menos ocupado el subnivel electrónico d. Cuanto más a la izquierda se encuentre en el sistema periódico el elemento formador de carburos, tanto menos ocupado estará su subnivel d. De acuerdo con lo expresado formarán carburos en el acero los elementos siguientes: titanio, vanadio, cromo, manganeso, circonio, niobio, molibdeno, hafnio, tantalio, y wolframio.

Se ha establecido que en los aceros pueden formarse los carburos siguientes:

- **Carburos del grupo I: M_3C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C .** Tienen estructura cristalina compleja. El representante típico es la cementita.
- **Carburos del grupo II (fases de inserción): MC , M_2C .** Tienen red cristalina simple y cristalizan con un déficit considerable de carbono.

La letra M representa el elemento formador de carburo que origina el carburo indicado. Sin embargo los carburos indicados no existen puros en los aceros. Los carburos de todos los elementos de aleación contienen hierro en disolución, y si en el acero existen varios elementos capaces de formar carburos, también contendrán estos elementos. Así en el acero al cromo – manganeso en vez de carburo puro $Cr_{23}C_6$ se forma el carburo $(Cr, Mn, Fe)_{23}C_6$, que lleva en disolución hierro y manganeso.

Como los carburos tienen la misma fórmula química se disuelven mutuamente, resulta por ejemplo, que si en un acero hay titanio y niobio no se formarán dos tipos de carburos separados, sino un carburo común, en el cual “en iguales condiciones” entra el titanio y el niobio.

Conviene advertir que las fases de inserción son difícilmente solubles en la austenita. Esto significa que durante el calentamiento (incluso si es muy elevado), pueden no pasar a la solución sólida. En esto se distinguen de los carburos del grupo I, que durante el calentamiento se disuelven fácilmente en la austenita. Todas las fases de carburo poseen alta temperatura de fusión y gran dureza. Las fases de inserción superan en este sentido a los carburos del grupo I.

3.2.4 Influencia de los elementos de aleación en la cinética de la descomposición de la austenita.

La cinética de la descomposición de la austenita determina el comportamiento de del acero durante el tratamiento térmico. Y la influencia de los elementos de aleación en la cinética de las transformaciones de la austenita es muy grande.

Los elementos que solo se disuelven en la ferrita o la cementita sin formar carburos especiales sólo ejercen una influencia cuantitativa en los procesos de transformación. Aceleran la transformación (a este tipo solo pertenece el cobalto) o la retardan (la mayoría de los elementos, entre ellos el manganeso, el cobre, el níquel y otros).

Los elementos que forman carburos introducen variaciones no solo cuantitativas sino cualitativas en la cinética de la transformación isotérmica. Así los elementos de aleación que forman carburos solubles en la austenita, a diferentes temperaturas influyen de distinto modo en la velocidad de descomposición de la austenita: a 700 – 500°C (formación de la perlita) retardan la transformación; a 400 – 500°C la retardan mucho, y a 400 – 300°C (formación de la bainita) la aceleran.

Así pues en los aceros aleados con elementos formadores de carburos (cromo, molibdeno, wolframio) se observan dos máximos de la velocidad de descomposición de la austenita (dos narices en las curvas de descomposición), separados por una región de gran estabilidad de la austenita subenfriada. La descomposición isotérmica de la austenita tiene dos intervalos de transformación perfectamente definidos: la transformación en estructuras laminares (perlítica) y la transformación en estructuras aciculares (bainítica).

En la Figura 26 se da una representación esquemática del diagrama de la transformación isotérmica (se muestra únicamente al principio de la transformación).

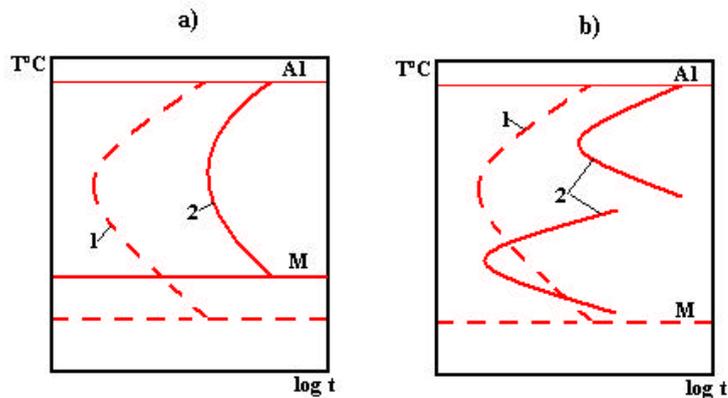


Figura 26 Esquema de los diagramas de la descomposición isotérmica de la austenita. a) acero al carbono (1) acero ligado con elementos que no forman carburos (2); b) acero al carbono (1) y acero ligado con elementos que forman carburos.

La propiedad más importante prácticamente de los elementos de aleación es la de ser capaces de retardar la velocidad de descomposición de la austenita en la región de la transformación perlítica, lo que se expresa por el desplazamiento de la línea hacia la derecha en el diagrama de descomposición isotérmica de la austenita. Esto contribuye a que la templabilidad sea mayor y al subenfriamiento de la austenita hasta el intervalo de la transformación martensítica siendo más lento el enfriamiento, por ejemplo, cuando se enfría en aceite o al aire, lo que naturalmente va ligado a la disminución de la velocidad crítica de temple.

3.2.5 Influencia de los elementos de aleación en la transformación martensítica.

Los elementos de aleación no influyen en la cinética de la transformación martensítica, la cual por lo visto es igual en todos los aceros. Su influencia se manifiesta aquí exclusivamente en la posición del intervalo de temperaturas de

esta transformación y esto, a su vez, se refleja también en la cantidad de austenita residual que se fija en el acero templado. Algunos elementos elevan el punto martensítico y disminuyen la cantidad de austenita residual (aluminio, cobalto), otros no ejercen influencia en él (silicio), pero la mayoría hace que descienda el punto martensítico y que aumente la cantidad de austenita residual (Figura 27). En el diagrama puede verse que en el 5% de Mn baja el punto martensítico hasta 0°C, por consiguiente, con este contenido (u otro mayor) de este elemento de aleación puede fijarse el estado austenítico por enfriamiento.

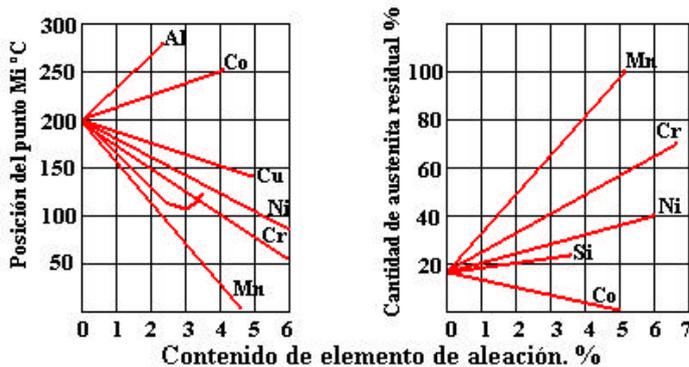


Figura 27 Influencia de los elementos de aleación en la temperatura de transformación martensítica (a), y en la cantidad de austenita residual (b). Los aceros contienen 1% de carbono.

3.2.6 Influencia de los elementos de aleación en el crecimiento del grano.

Todos los elementos de aleación disminuyen la tendencia del grano de austenita al crecimiento. Excepciones de la regla son el manganeso y el boro, los cuales contribuyen a que crezca el grano. Los demás elementos, que afinan el grano, ejercen diversa influencia en: el níquel, el cobalto, el silicio y el cobre (elementos que no forman carburos) influyen relativamente poco en el crecimiento del grano; el cromo, el molibdeno, el wolframio, el vanadio, y el titanio afinan mucho el grano (estos elementos se han enumerado en el orden en que aumenta la intensidad de su acción). Esta diferencia es consecuencia directa de la distinta estabilidad de los carburos (y nitruros) de estos elementos. Los carburos excesivos, no disueltos en la austenita, impiden el crecimiento del grano de la austenita. Por esto en el acero, si hay en él aunque sea solamente una pequeña parte cantidad de carburos no disueltos, conserva la estructura de grano fino hasta temperaturas de calentamiento muy elevadas.

3.2.7 Influencia de los elementos de aleación en las transformaciones del revenido.

Los elementos de aleación retardan el proceso de descomposición de la martensita. Ciertos elementos, como el níquel o el manganeso influyen de un modo insignificante, mientras que la mayoría de (cromo, molibdeno, silicio, etc) lo hacen considerablemente.

Esto se debe a que los procesos que se desarrollan durante el revenido tienen carácter difusivo, y la mayoría de los elementos de aleación retardan la transformación de los carburos, sobre todo en la etapa de coagulación.

Para obtener iguales resultados, el acero aleado con elementos como el cromo, molibdeno, silicio y otros, tiene que ser calentado durante una temperatura más alta o hay que aumentar la duración del revenido en comparación con el revenido del acero al carbono.

Capítulo IV Clasificación General de los Aceros.

4.1 Aceros de construcción.

Los aceros de construcción en la rama de construcción de maquinarias, se destinan a la fabricación de piezas de máquinas, máquinas herramientas y otros mecanismos. Ellos abarcan fundamentalmente aceros de bajo y medio contenido de carbono, los cuales generalmente se alean con níquel, cromo, silicio y manganeso y se les adicionan ciertas cantidades de elementos formadores de carburos como molibdeno, vanadio y titanio.

Los aceros de construcción se pueden subdividir en los siguientes subgrupos:

1. **Aceros Estructurales.**
2. **Aceros para cementar.**
3. **Aceros Termomejorables.**
4. **Aceros para muelles.**
5. **Aceros automáticos.**
6. **Aceros para cojinetes de bolas y rodillos.**

Estos aceros se clasifican de acuerdo a la norma AISI en correspondencia con la tabla 1.

| Nº AISI: | Descripción | Ejemplo |
|-------------|--|--------------------|
| 10XX | Son aceros sin aleación con 0,XX % de C | (1010; 1020; 1045) |
| 11XX | Aceros resulturizados (de fácil labrado) | (1118; 1137; 1145) |
| 12XX | Aceros refosforados y resulturizados | (1211; 1213; 1216) |
| 13XX | Aceros al manganeso | (1330; 1335) |
| 2XXX | Aceros aleados al Ni | (2165; 2120; 2245) |
| 23XX | Aceros aleados con 3,5% de Níquel | |
| 25XX | Aceros con 5% de Níquel | |
| 3XXX | Aceros al Cromo - Níquel | (3415) |
| 4XXX | Aceros al molibdeno | |
| 40XX | Aceros al Carbono – Molibdeno | (4024, 4023) |
| 41XX | Son aceros aleados con Mn, Si, Mo y Cr | (4140; 4118) |
| 43XX | Aceros aleados con Cr Mo y Ni | (4317) |
| 46XX ó 48XX | Aceros aleados al Molibdeno - Níquel | |
| 5XXX | Aceros aleados al Cr | (50B40; 5046) |
| 51XX | Aceros aleados con bajo Cromo | (5160; 5120; 5115) |
| 52XX | Aceros con medio contenido de Cromo | (52100) |
| 53XX | Aceros con alto contenido de Cromo | |
| 6XXX | Aceros aleados al Cromo Vanadio | (6118; 6150) |
| 86XX ó 87XX | Aceros al Níquel Cromo Molibdeno | (8617; 8627) |
| 92XX | Aceros al Manganeso Silicio | (9250; 9255; 9250) |

4.1.1 Aceros Estructurales.

Se utilizan generalmente en estructuras, por lo que se subdividen en estructuras por lo que deben presentar buena soldabilidad y no se deben someter al tratamiento térmico de endurecimiento. Por el contenido de manganeso se subdividen en 2 grupos:

- ◆ Con contenido normal de manganeso (0,40 – 0,80%)
- ◆ Con contenido elevado de manganeso (1 – 1,2%)

La más alta calidad de los aceros en comparación con los aceros de calidad ordinaria, está condicionada por una mayor pureza del contenido de inclusiones no metálicas, fósforo (no mayor de 0,035 ó 0,040%) y azufre (no

mayor de 0,040%). Los aceros de más bajo contenido de carbono (hasta 0,20%) se fabrican tanto calmados (desoxidados con aluminio y ferrosilicio) como efervescentes (desoxidados solo con ferromanganeso), y con más altos contenidos de carbono solo calmados.

Los aceros efervescentes de bajo contenido de carbono poseen elevada plasticidad y se utilizan para piezas y artículos que se obtienen por estampado en frío con embutido profundo. Estos aceros no se someten al tratamiento térmico.

Ejemplo de aceros estructurales: AISI: 1008; 1012; 1015; 1020.

4.1.2 Aceros para cementar.

Estos aceros deben tener bajo contenido de carbono (0,1 – 0,25%). En estos aceros (una vez realizada la cementación, el temple y el revenido), se obtiene una dureza superficial en el orden de los 60 HRC y en el centro de 15 – 30 HRC.

En ocasiones se precisa de una dureza o resistencia en el núcleo mucho mayor que la que ofrece el acero de bajo contenido de carbono, por ello los aceros para cementar se dividen en tres grupos.

- Aceros de núcleo que no se endurece.
- Aceros de baja aleación cuyo núcleo se endurece poco.
- Aceros de mediana aleación de núcleo endurecible.

Cada uno de estos aceros presenta después del tratamiento térmico las estructuras siguientes en el núcleo.

- Ferrito Perlítico(Ej: AISI 1020).
- Bainítico. (Ej: AISI 5120)
- Martensítico.(Ej: AISI 4118)

La elección de la marca del acero para las piezas cementadas se basa en los razonamientos siguientes:

1. Para las piezas de configuración simple, que no sufren cargas importantes, deben emplearse aceros al carbono simples.
2. Para las piezas que experimentan grandes tensiones y choques, deben emplearse aceros al cromo níquel de gran resistencia.
3. Para piezas de configuración compleja que no conviene que se deformen al templarse (por ejemplo los piñones) deben emplearse aceros aleados que se templen en aceite.

4.1.3 Aceros para el mejoramiento térmico.

Los aceros que reciben el mejoramiento o bonificado son los que contienen de 0,3 a 0,5% de carbono y diversos elementos de aleación (Cr, Ni, Mo, Mn, Si) en cantidades inferiores al 5%. También pueden tener elementos afinadores del grano en pequeñas cantidades <0,1%. El tratamiento térmico consiste en un calentamiento por encima de la temperatura de transformación de fase (alrededor de 30 a 50°C), o sea a temperaturas que oscilan entre 820 y 850°C en dependencia de la composición química, mantenimiento a la temperatura de temple y enfriamiento enérgico. El revenido siempre será alto y estará entre 550 y 650°C.

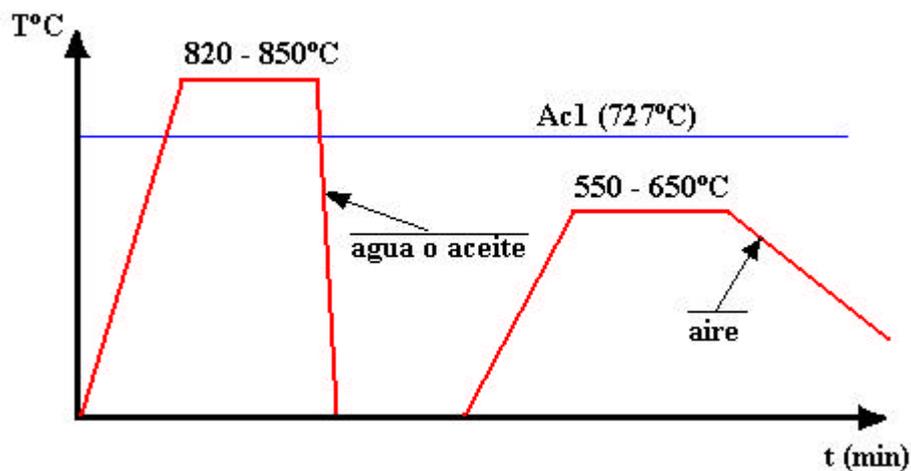


Figura 28 Esquema general de los tratamientos térmicos de termomejoramiento.

Los procedimientos empleados para mejorar las propiedades mecánicas del acero son:

1. Aumento del contenido de carbono.
2. Adición de elementos de aleación. Afinado del grano.
3. Endurecimiento por deformación plástica en frío.
4. Afinado del grano.
5. Endurecimiento por deformación plástica en frío.
6. Dispersión de los componentes estructurales.

El procedimiento más adecuado es aquel que a la vez que eleva la dureza y la resistencia, afecta poco la tenacidad y la plasticidad. Como en este tratamiento térmico se persigue un temple a corazón, la selección de uno u otro acero para mejorar, depende de la templabilidad del mismo o sea de su contenido de elementos de aleación.

Los aceros para mejorar se dividen en 5 grupos, los cuales se diferencian por el aumento sucesivo de los elementos de aleación.

I Grupo – Aceros al carbono simples: Se emplean para piezas con diámetro entre 10 – 15 mm con termomejoramiento. Su enfriamiento es en agua. Ej: AISI 1045, 1043.

II Grupo – Aceros de baja aleación: Poseen elementos de aleación no muy caros (Si, Mn, Cr) preferiblemente Cr. Se seleccionan para piezas de diámetros de alrededor de 20 mm como máximo que precisen templabilidad total. Se enfrían en aceite. Ej AISI 5140.

III Grupo – Aceros aleados con Mo, Mn, Ti: Para piezas con diámetros entre 20 – 40 mm. Se enfrían en aceite. Ej AISI 4150

IV Grupo – Aceros al Ni: Contienen de 1 a 1,5% de Ni. El níquel aumenta la templabilidad. Se emplean para secciones de 40 a 70 mm de diámetro. Se enfrían en aceite. Ej: AISI 3135.

V Grupo – Aceros con alto contenido de Ni: Se emplean para diámetros mayores de 70 mm los cuales requieran templabilidad total. Se enfrían en aceite. Ej: AISI 3435.

4.1.4 Aceros para resortes y muelles.

Los aceros para resortes y muelles deben poseer propiedades especiales debido a las condiciones de trabajo de los muelles (cilíndricos y planos). Estos elementos sirven para amortiguar, empujar y en virtud de esto la principal propiedad que deben poseer debe ser un alto límite elástico y un elevado límite de fatiga. Estas condiciones se logran con contenidos de carbono de entre 0,5 y 0,7%C. Además se alean con Si, Mn, Cr V, W, Ni que aumentan el límite de elasticidad. Los aceros más utilizados son: AISI 9250, 9255, 9260, 5160, 6150.

Los aceros para muelles logran sus propiedades después del temple a 820 – 870°C (enfriamiento en agua o aceite según el caso), para lograr una transformación martensítica completa y uniforme en todo el volumen del metal. El revenido se da a temperaturas de entre 350 a 450°C por lo que clasifica como revenido medio. Al final del proceso se obtiene una dureza de 40 – 50 HRC y una estructura de troostita.

4.1.5 Aceros automáticos (resulfurados y refosforados).

Estos aceros se diferencian de los otros aceros de construcción por los elevados contenidos de fósforo (hasta 0,15%) y azufre (hasta 0,3%). Su principal característica es su buena maquinabilidad, porque el azufre forma una gran cantidad de inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS), que altera la continuidad del metal, y el fósforo, y el fósforo disolviéndose en la ferrita disminuye su tenacidad. Durante su elaboración se forma viruta corta y frágil, lo que tiene gran importancia cuando se trabaja en máquinas herramientas automáticas y de control numérico (CNC). Se obtiene además una superficie lisa y limpia.

Su principal defecto es la reducida plasticidad, por lo que se emplea para piezas de poca responsabilidad (pasadores, casquillos, etc).

Ejemplos:

- Aceros resulfurizados: AISI 1118; 1137; 1145
- Aceros resulfurizados y refosforados: AISI 1211; 1213; 1216

4.1.6 Aceros para cojinetes de bolas (alta resistencia a la fricción).

Por su composición pertenecen a los aceros para herramientas. Los de mayor aplicación son los aceros al Cr con alto contenido de carbono. El contenido hipereutectoide de carbono (0,95%) y de cromo (1,3 – 1,65%), aseguran después del temple, la obtención de una dureza uniforme, resistencia al desgaste por rozamiento y buena tenacidad.

La tecnología de tratamiento incluye: Recocido de globulización, temple y revenido.

El objetivo del recocido es disminuir la dureza y obtener la perlita globular de grano fino. Consisten en calentamiento a una temperatura alrededor de 750°C durante largo tiempo. El enfriamiento se realiza en el horno.

El temple se realiza con calentamiento entre 830 y 860°C y el enfriamiento se realiza en aceite. El revenido se ejecuta entre 150 y 160°C para obtener una dureza de 62 a 65 HRC.

La estructura es de agujas finas y dispersas.

4.2 Aceros de herramientas.

Los aceros de herramientas van a trabajar en condiciones diferentes a los aceros de construcción y generalmente en ellos deben destacarse 1 ó 2 propiedades en dependencia del tipo de herramienta. Así, en una herramienta la condición principal a cumplir por el acero debe ser, conservar el filo cortante durante un período largo de tiempo. Para instrumentos de medición las condiciones se parecerán a las de corte, pero las presiones de trabajo son menores.

En los troqueles el acero experimenta cargas térmicas y de choque considerables, distribuidas por una superficie relativamente grande. Aquí desempeña un papel primordial la tenacidad. Por lo tanto para diferentes tipos de herramientas se utilizan diferentes aceros.

Los aceros de herramientas se pueden subdividir en los siguientes subgrupos:

- 1. Aceros de baja templabilidad (principalmente al carbono).**
- 2. Aceros de alta templabilidad (aleados 1 – 3% de elementos de aleación).**
- 3. Aceros de corte rápido.**
- 4. Aceros para matrices.**
- 5. Aceros para matrices de conformación en frío.**
- 6. Aceros para matrices de conformación en caliente.**

4.2.1 Aceros de baja templabilidad (principalmente al carbono).

Son fundamentalmente aceros al carbono con contenidos de este elemento entre 0,7 y 1,3%. La estructura inicial de los mismos posee la perlita de tipo laminar. Debido a esto se someten por lo general a un recocido de globulización con el objetivo de transformar la perlita laminar en globular. Para obtener una alta dureza (60 – 63 HRC), estos aceros se templean en agua. La estructura después del temple es de martensita, en el caso de los aceros hipoeutectoides y los eutectoides, y martensita más cementita en el caso de los aceros hipereutectoides. El revenido se realiza a temperaturas entre 150 y 170°C. La alta dureza del acero se conserva durante el calentamiento hasta la

temperatura de 200°C. La templabilidades de 10 – 12mm. El enfriamiento de temple se realiza en agua.

Los aceros clasificados como AISI/SAE W108 y W209 (0,8% C) se utilizan en herramientas pequeñas y que sufren impactos y los W110 (1,1% C) se emplean en herramientas cuya temperatura de trabajo no sobrepasa los 200°C.

4.2.2 Aceros de alta templabilidad (de baja aleación).

Aquí se agrupan a los aceros con contenidos de carbono entre 0,7 y 1,3% que poseen elementos de aleación (fundamentalmente Cr, Mn, Si, W) en cantidades entre 1 y 3%.

En comparación con los aceros al carbono tienen las siguientes ventajas.

- **Mayor templabilidad (Permite elaborar herramientas mayores).**
- **Menor sensibilidad al sobrecalentamiento.**
- **Posibilidad de aplicar refrigerantes menos enérgicos (permite elabora herramientas de configuraciones más complejas).**

Los aceros más utilizados de acuerdo a las normas AISI/SAE son: F – 1, S – 1, O – 1, O – 2.

La temperatura de temple es de 830 – 880°C. La estructura de temple es de martensita y carburos en exceso de manera general. El revenido se realiza a temperaturas de 140 a 180°C. La dureza nunca debe ser menor a los 61 HRC. El enfriamiento de temple se realiza en aceite.

Estos aceros se utilizan para fabricar brocas, fresas, escariadores, avellanadores, brochas y otras herramientas de hasta 35 mm de diámetro. El defecto fundamental de estos aceros es la tendencia a la descarburación.

4.2.3 Aceros de corte rápido.

Se utilizan ampliamente para fabricar las mas diversas herramientas de corte que trabajan a altas velocidades y fuerzas de corte. Poseen un contenido de carbono entre 0,8 y 1,5 % de carbono. Son aceros de alto contenido de elementos de aleación. Entre estos el más importante es el Wolframio, quien conjuntamente con otros elementos químicos refractarios (Mo, Cr, V, Ti) es el encargado de garantizar las estabilidad al rojo o mantenimiento de las propiedades del acero a elevadas temperaturas de corte (alrededor de 700°C).

La estructura después del recocido es de perlita y carburos (hasta el 25%). Su dureza es de 207 – 255 HB.

En el temple el acero rápido se calienta (habitualmente en baño de sales) hasat temperaturas de entre 1250 y 1290°C en dependencia de la marca del acero. La alta temperatura de temple es necesaria para disolver una parte de los carburos y obtener durante el calentamiento austenita de alta aleación, lo que asegura una alta estabilidad térmica del acero.

Debido a la pequeña conductividad térmica del acero rápido, para evitar la aparición de grietas, el calentamiento para el temple se realiza con uno o dos precalentamientos: a 400 – 500°C y a 800 – 850°C.

Durante el enfriamiento (de ordinario en aceite) la austenita se transforma en martensita, pero no totalmente, sino que una parte (25 – 30%) de la misma conserva la forma de austenita residual.

La estructura después del temple es de martensita, carburos y austenita residual. La dureza en ese estado es de alrededor de 62 HRC. Durante el revenido a temperaturas entre 550 y 600°C, que de ordinario es triple (3 revenidos), tiene lugar la precipitación a partir de la martensita de carburos finos y dispersos, y además ocurre la transformación de la austenita retenida en martensita revenida. Este proceso provoca una elevación de la dureza hasta 64 HRC.

Otra variante del tratamiento térmico consiste en aplicar temple subcero (enfriamiento en gases licuados hasta - 80°C) seguido de un solo revenido.

Las principales marcas de aceros de corte rápido recogidas por la norma AISI/SAE son: M1, M2, M7, T4, T15.

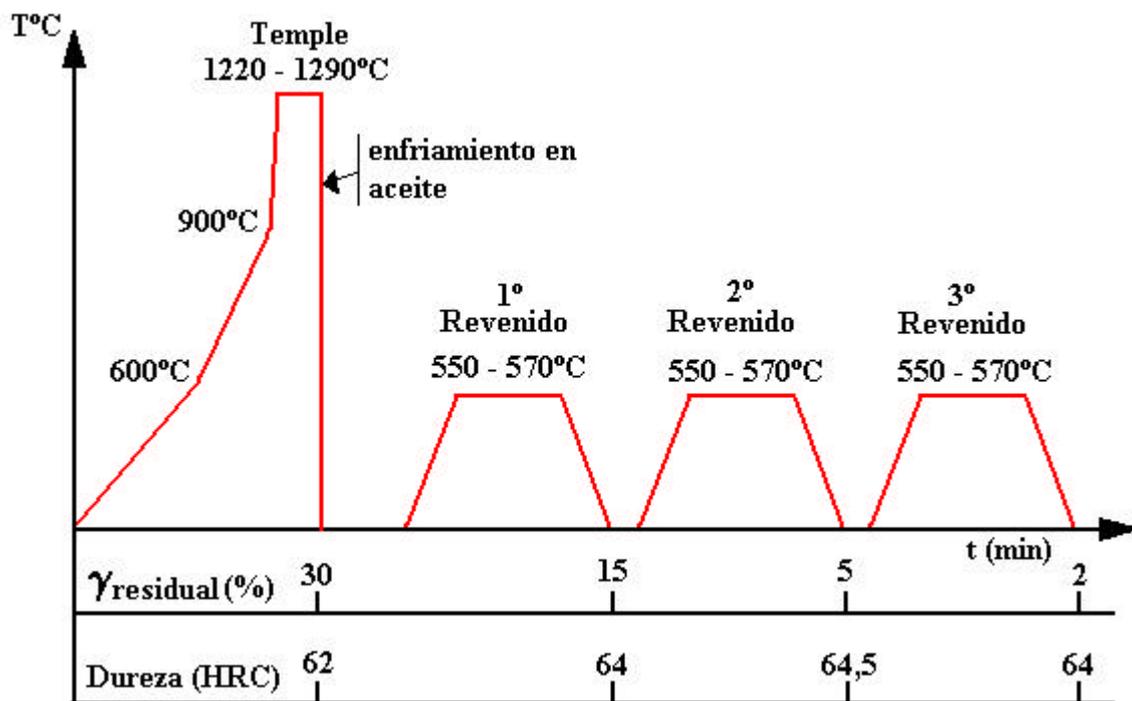


Figura 29 Esquema de tratamiento térmico de las herramientas de acero rápido sin tratamiento a temperaturas bajo cero.

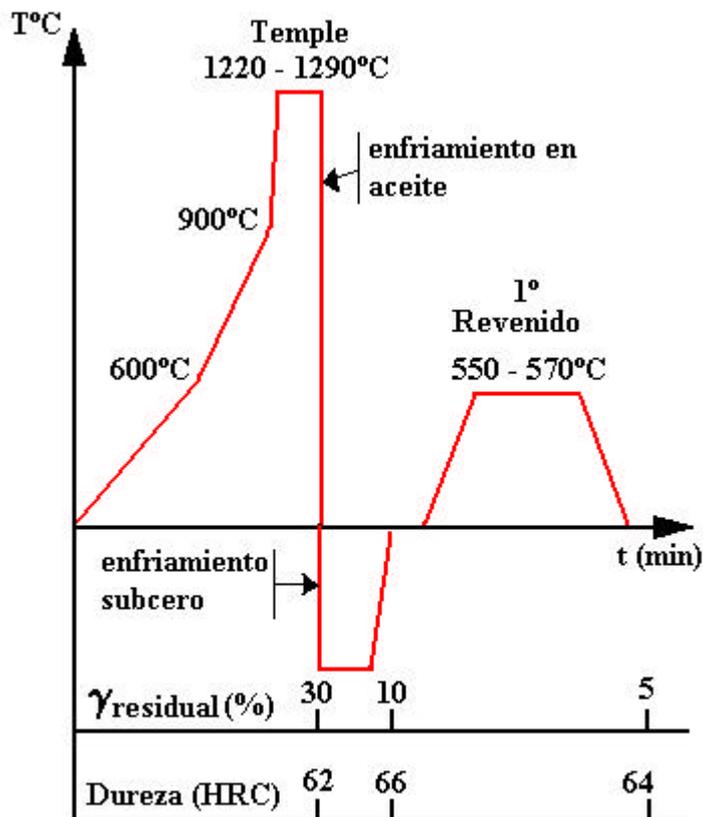


Figura 30 Esquema de tratamiento térmico de las herramientas de acero rápido con tratamiento a temperaturas bajo cero.

4.2.4 Aceros para matrices.

4.2.4.1 Aceros para matrices de conformación en frío.

Las herramientas para estampar el metal en frío trabajan en condiciones de intenso desgaste bajo cargas considerables y diferente carácter de la carga (presión, choques), así como calentamiento por fricción de las capas superficiales. Por lo tanto deben poseer las siguientes propiedades:

- Alta dureza y resistencia al desgaste.
- Suficiente tenacidad.
- Pequeña deformación en el temple.
- Buena templabilidad.

Para matrices y estampas pequeñas (25 – 30 mm) se pueden utilizar los aceros al carbono de los tipos AISI/SAE: W108, W209, W110. Para matrices un poco mayores se emplean aceros de alta templabilidad de los tipos AISI/SAE: F – 1, S – 1, O – 1, O – 2.

Para estampas grandes con presiones hasta 1600 MPa, se utilizan aceros con 1,0 a 1,2% de carbono y alrededor de 12% de Cr. El tratamiento térmico de estos aceros es muy similar al de los aceros de corte rápido. Consiste en un calentamiento escalonado hasta 1000 – 1050°C y el revenido a temperaturas de 150 – 170°C. El revenido puede hacerse doble si el por ciento

de austenita residual después del temple es elevado. La dureza después del tratamiento térmico es de 61 - 63 HRC. El enfriamiento del temple se realiza en aceite.

Las marcas mas utilizadas de estos aceros se corresponde de acuerdo a la AISI/SAE con las siguientes marcas: A- 2, D- 3, D- 2.

4.2.4.2 Aceros para matrices de conformación en caliente.

Los aceros para matrices destinadas a la conformación en caliente deben poseer altas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas, soportar calentamientos y enfriamientos cíclicos sin formación de grietas, así como una alta templabilidad.

El acero AISI/SAE: L- 6 posee entre 0,4 y 0,5% de carbono y alrededor de 2% de níquel que le da alta resistencia al impacto por golpes, de ahí que se destine a estampas y herramental de conformación en caliente que trabaja en martillos, martinets y otras máquinas de conformar mediante cargas dinámicas. Su temple alcanza entre 200 y 300 mm de profundidad.

La temperatura del temple se encuentra entre 820 y 850°C con enfriamiento en aceite. El revenido se da a temperaturas entre 500 y 580°C. La dureza que se debe alcanzar se encuentra entre 35 – 45 HRC.

Los aceros AISI/SAE: H- 11, H- 13, H- 10, y H- 20, se utilizan para estampas de recalado y laminado en caliente y para moldes de fundición bajo presión. La adición de wolframio, cromo y otros elementos refractarios le conceden a estos aceros termorresistencia y estabilidad al rojo. Para disolver los carburos complejos que se originan como resultado de la composición química antes señalada los aceros se templan a temperaturas de 1050 a 1100°C y se enfrían en aceite. El revenido se da a temperaturas de 560 a 650°C y se obtiene una dureza de 45 – 50 HRC.

4.3 Aceros con propiedades especiales.

Los aceros con propiedades especiales contienen una cantidad grande de elementos de aleación (entre 8 y 50%), de ahí sean considerados como aleaciones complejas de muchos componentes.

Los con propiedades especiales se pueden subdividir en los siguientes subgrupos:

- 1. Aceros inoxidables y termorresistentes (martensíticos, ferríticos, austeníticos).**
- 2. Aceros resistentes a bajas temperaturas (criogénicos).**
- 3. Aceros austeníticos al manganeso resistentes al impacto.**
- 4. Aceros inoxidables y termorresistentes (martensíticos, ferríticos, austeníticos).**

La destrucción superficial de un metal por la acción del medio exterior se llama corrosión. El hierro puro y los aceros de baja aleación no resisten la corrosión en el agua, la atmósfera y en otros medios, porque la película de óxidos que forma no es suficientemente densa y no aísla el metal de la acción química del medio. La introducción en el acero más de 12% de Cr, hace que este sea resistente a la corrosión en la atmósfera, y en muchos otros medios industriales. En cambio las aleaciones que poseen menos de 12% de Cr sufren el mismo grado de corrosión que el hierro. Y las aleaciones que poseen más de 12 – 14% de Cr se comportan como metales nobles; es decir, no se oxidan en

el aire, el agua, y en una serie de ácidos, sales y álcalis. Los aceros inoxidable se subdividen en:

- **Aceros inoxidable martensíticos.**
- **Aceros inoxidable ferríticos.**
- **Aceros inoxidable y termorresistente austeníticos.**

4.3.1 Aceros inoxidable martensíticos.

Se emplean en las instalaciones termoenergéticas donde se combine la resistencia a la corrosión y temperaturas de hasta 500°C. En ellos se obtiene estructura de martensita por enfriamiento al aire.

El tratamiento térmico recomendado para estos aceros consiste en un temple con calentamiento entre 1000 y 1050°C con enfriamiento al aire, seguido de un revenido entre 250 y 750°C en dependencia del acero y las propiedades que se deseen obtener.

Según la ASM y la AISI los aceros más utilizados son: 403, 410, 416, 420, 431.

4.3.2 Aceros inoxidable ferríticos.

Aceros inoxidable con contenidos de Cr entre 17 y 28%, sin ningún tipo de elementos austenizantes. Se emplean para piezas de hornos, muflas, fundas de termopares, y otras piezas que soportan elevadas temperaturas (1050 – 1150°C), sin sobre las mismas actúen grandes esfuerzos mecánicos. De ahí que puedan denominarse también aceros refractarios.

Presentan como inconveniente el crecimiento del grano ferrítico cuando este se calienta, y que esta estructura no puede afinarse por medio del tratamiento térmico, porque estos aceros no poseen transformaciones de fases. Alrededor de 700°C surge en ellos la fase intermetálica σ , la cual disminuye la cual disminuye la resistencia al impacto. En esta cuestión influye también el tiempo de mantenimiento (100 horas a 590°C).

Según la ASM y la AISI los aceros más utilizados son: 405, 430, 430F, 446.

4.3.3 Aceros inoxidable y termorresistente austeníticos.

Los aceros inoxidable austeníticos se pueden agrupar en cuatro grupos principales:

- a. 18 Cr – 8 Ni con o si elementos especiales estabilizadores como: molibdeno, titanio, niobio, etc.
- b. 20 Cr – 10 Ni
- c. 16 Cr – 13 Ni
- d. Aceros austeníticos termorresistentes: 24 Cr – 12 Ni y 25 Cr – 20 Ni

Sus temperatura de fusión oscilan entre 1400 y 1430°C, presentan coeficientes de dilatación lineal 50% superiores al acero al carbono. Su conductividad térmica es de un 40% a un 50% menor que la de los aceros al carbono. Presentan buenas propiedades en caliente a altas temperaturas, las cuales se consideran refractarios, y termorresistentes (trabajan a temperaturas de 1000°C).

Presentan como problemas fundamentales:

- a. Tendencia al agrietamiento.
- b. Precipitación de carburos de Cr (corrosión intercrystalina).

c. Formación de la fase intermetálica σ .

Para evitar la formación de carburos de Cr que disminuyen, su resistencia a la corrosión se alean con elementos estabilizadores como el Ti y el Nb. Se formarán la carburos de Ti y Nb primero que los de Cr.

Pueden ser austeníticos o autenítico ferríticos. Para determinar la estructura de su matriz metálica se emplean diferentes diagramas estructurales de los cuales el más conocido es el Diagrama de Shaeffler.

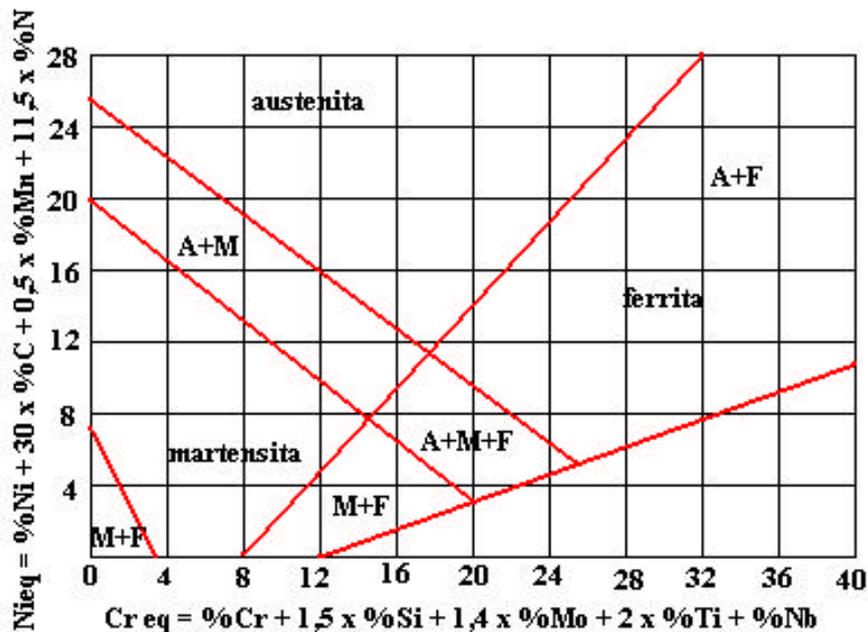


Figura 31 Diagrama de Shaeffler.

Para utilizarlo se calculan los valores de Ni equivalente y de Cr equivalente y se plotean en el gráfico hasta determinar el campo que caracteriza a la aleación. Las fases presentes en el diagrama son la austenita, la martensita y la ferrita.

Los del grupo termorresistente se endurecen por envejecimiento entre 600 – 750°C. Eleva la dureza por precipitación de fases en exceso. Este tratamiento eleva la termorresistencia. Solo se utiliza si las piezas trabajan períodos cortos. A más de 100 horas las fases excesivas coagulan. Ej de estos aceros de acuerdo a las normas AISI – ASTM: 301, 302, 304, 308, 309, 310, 316, 321, 347.

4.3.4 Aceros resistentes a bajas temperaturas (criogénicos).

Se conocen por aceros criogénicos, aquellos que son utilizados en máquinas y equipos para producir, almacenar y transportar gases licuados, que por lo tanto, se explotan hasta las temperaturas de ebullición del oxígeno (-183°C), nitrógeno (-196°C), neón (-247°C), hidrógeno (-253°C), y helio (-269°C), así como hidrocarburos (metilo, butano y otros), cuya temperatura de ebullición se encuentra en el intervalo entre -80 y -180°C. Estos aceros suelen ser a la vez inoxidables. Presentan contenidos de Cr de aproximadamente 18%

y contenidos de Ni de 20%. Sus contenidos de carbono oscilan entre los 0,008 y 0,20% de carbono. Reciben el nombre también de aceros superausteníticos. En la actualidad el níquel se sustituye por manganeso en cantidades aproximadas de 20%. Se endurecen por envejecimiento, debido a que su austenita es muy estable debido a las altas cantidades de Ni y Manganeso.

Estos aceros no cuentan con clasificación en las normas AISI, y ASM. Por lo general estos aceros debido a su alta especialización aparecen clasificados con marcas de fabricantes.

4.3.5 Aceros austeníticos al manganeso resistentes al impacto (Hadfield).

Aceros austeníticos con 0,8 - 12% de carbono y de 12 a 18% de manganeso. Presentan frecuentemente con adiciones de Mo, Cr y Ni. Se emplean en piezas que trabajen en condiciones de grandes cargas de impacto, combinadas con desgastes abrasivos (palas de excavadoras, cangilones de dragas, esteras de bulldóceres, cruces de vías de ferrocarril, etc).

Se emplea con tratamiento térmico de temple (Temperaturas de 1050 a 1100°C) en agua. El revenido de alivio de tensiones se realiza a temperaturas de 150 – 200°C. Después del temple se obtiene una estructura de austenita (con durezas de 150 a 250 HB) que adquiere acritud con el golpeo (Hasta 550 HB). Debido a la elevada capacidad de endurecimiento del acero el maquinado es muy difícil.

De acuerdo a la norma ASTM las marcas más empleadas son ASTM: A128, A128 E-1, A128 C.

Bibliografía.

1. ALFONSO BRINDIS, E. Apuntes sobre la interrelación entre la composición – microestructura - propiedades del acero. Universidad de Matanzas, 2002. Disponible en la IntraWeb de la Facultad de Ingenierías Química y Mecánica de la UMCC en <http://lib.figm.umcc.cu/download.asp?id=steel/cover.pdf&typ=book>
2. A.S.T.M. Atlas of microstructures. A.S.T.M. Editions . New York . 1988 .
3. AVNER, SIDNEY. Introducción a la metalurgia física - 2 ed -. Editorial Ciencia y Técnica. Instituto del libro. La Habana. 1970. p 288 – 289.
4. BARINOV, N; LANDA, A. Metalurgia y metalografía - 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1976. p 149 - 150.
5. BARRET, CHARLES. Estructura de los metales – 1 ed -. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p.
6. CALLISTER, WILLIAM D. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7
7. CIME. Grupo Científico - Técnico. Recuperación de piezas por métodos de soldadura. CIME. La Habana, 1996, p 367.
8. C.I.M.E. Grupo Nacional para la Recuperación de Piezas. Manual de recuperación de piezas – 1 ed -. C.I.M.E. La Habana. 1993.
9. DUFFUS SCOTT, ALEJANDRO. Conferencias de Ciencia de los Materiales y Metalografía de las uniones soldadas. CIS. Facultad de Mecánica. UCLV. 1995. 250 p.
10. GULIAEV, A P. Metalografía. Tomos 1 y 2. Editorial Mir. Moscú. 1983. p 186 188.
11. HALE, RICK. Behavior and manufacturing properties of materials. Colocada en 15/2000. Disponible en la World Wide Web en <http://www.engr.ukans.edu/~rhale>
12. KEY TO STEEL. Influence of Alloying Elements on Steel Microstructure. Key to Steel Web Site. Actualizada en septiembre del 2001. Consultada en enero del 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
13. KEY TO STEEL. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. Actualizada en septiembre del 2001. Consultada en enero del 2002. Disponible en la World Wide Web KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 – 78.
14. RAYNOR, G.V; RYVLIN, V.G. Phase Equilibria in iron ternary alloys – 1 ed - . The Institute of Metals. North American Publications Center. U.S.A. 1988. 485 p.

Anexos.

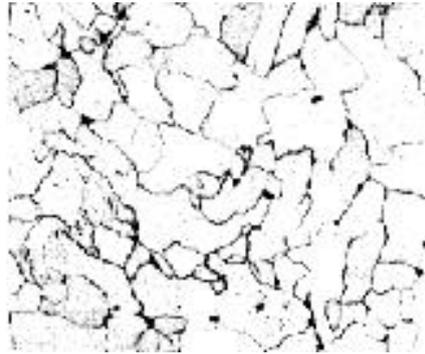


Figura 1 Acero con 0,025 % de Carbono (Hierro Armco) (200X) estructura de ferrita.

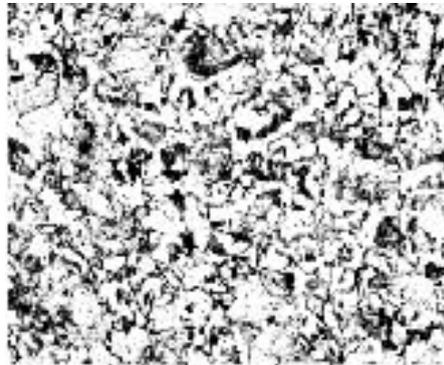


Figura 2 Acero con 0,45 % de Carbono (Hipoeutectoide) (200X) estructura de ferrita y perlita.



Figura 3 Acero con 0,8 % de Carbono (Eutectoide) (200X) estructura de perlita laminar.

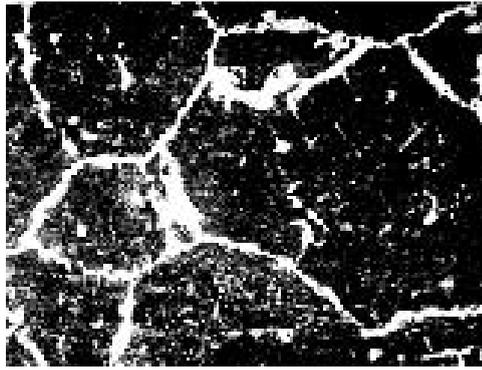


Figura 4 Acero con 1,4 % de Carbono (Hipereutectoide) (200X) estructura de perlita y cementita.

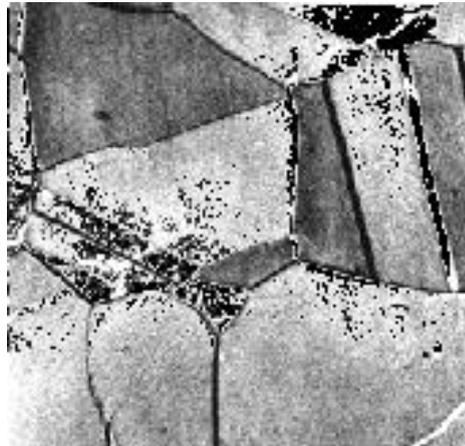


Figura 5 Acero inoxidable austenítico AISI (300X) estructura de austenita.



Figura 6 Estructura de Martensita de un acero AISI 1080 (300X).



Figura 7 Estructura de Bainita de un acero AISI 1080 (300X).

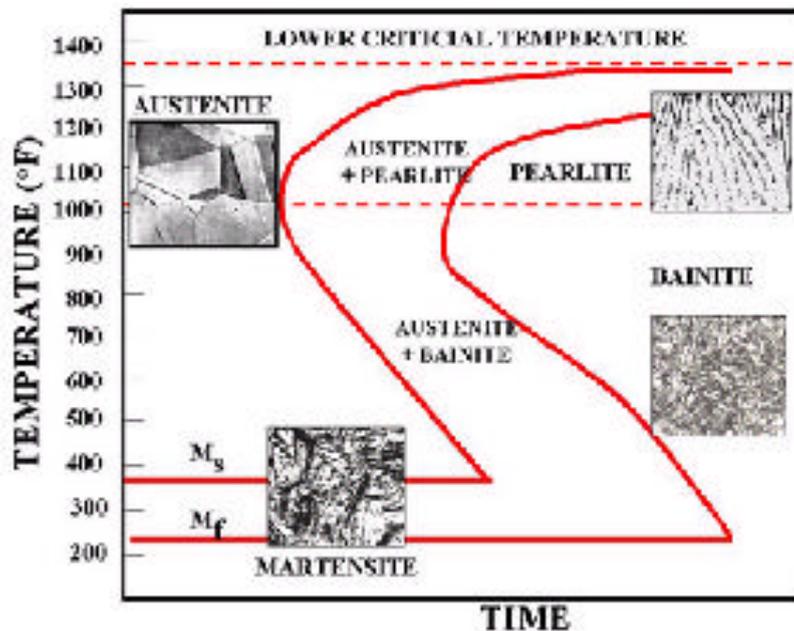


Figura 8 Estructuras que se originan durante el enfriamiento de un acero eutectoide al carbono.

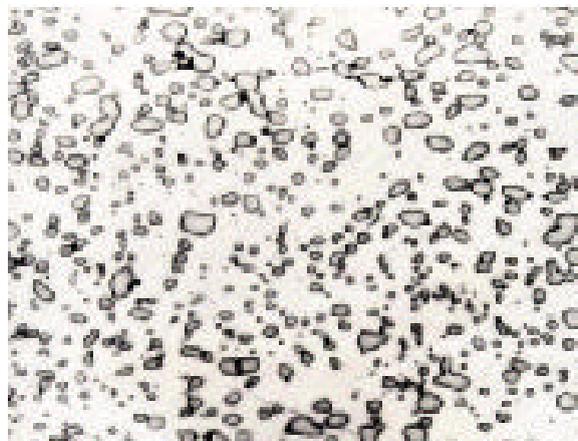


Figura 9 Estructura de Perlita globular de un acero AISI 1080 (300X).