

Capítulo I

Aceros y sus clasificaciones

Introducción

Para clasificar el acero se pueden utilizar varios métodos:

- Según el contenido de carbono: Se clasifica de dos formas como hipoeutectoides, eutectoides, hipereutectoides; o bien de bajo carbono, medio carbono y alto carbono
- Según su utilización: Generalmente se refiere al uso final que se le dará al acero, como *acero para maquinas, para resortes, para calderas, estructural o acero para herramientas*
- Según el método de fabricación o manufactura: Este da lugar a *acero bessemer, de hogar abierto, de horno eléctrico, de crisol, acero al oxígeno, etc.*
- Según su composición química: Este método indica por un sistema numérico el contenido aproximado de los elementos importantes en el acero.

1.1.- Clasificación de los aceros según el contenido de carbono

Los aceros se denominan *hipoeutectoides* cuando su contenido en carbono varía de 0 al 0.87%; *eutectoides*, cuando el carbono alcanza el 0.88%, e *hipereutectoides*, si el contenido de carbono oscila de 0.88 al 1.70%.

El porcentaje de carbono en las fundiciones clasifica a estas como de: *hipoeutecticas*, si su contenido en carbono es de 1.7 a 4.3%; de *eutecticas*, cuando el porcentaje de carbono es del 4.3%, y de *hipereutecticas* si contienen de 4.30 a 6.67% de carbono.

En las figuras 1.1.1, 1.1.2, y 1.1.3 representan esquemáticamente los 3 tipos de aceros

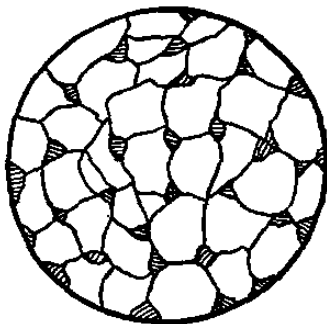


Figura 1.1.1 Hipoeutectoide 0.15% de carbono aproximadamente
Estructura ferrita + perlita
cementita

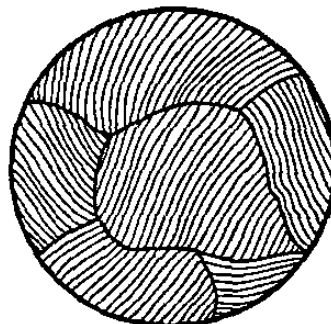


Figura 1.1.2 Eutectoide 0.88% de carbono
Estructura 100% de perlita

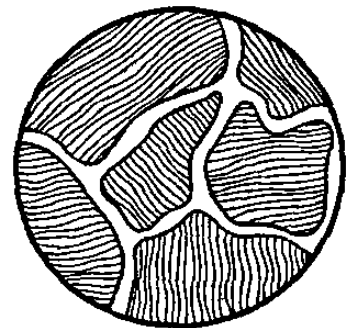


Figura 1.1.3 Hipereutectoide más de 0.88% de carbono
Estructura perlita +

Algunas veces, los aceros se clasifican con base en el amplio rango contenido de carbono, como sigue:

Aceros de bajo carbono: contenidos en el rango desde 0 hasta 0.25% de carbono

Aceros de medio carbono: de 0.25% a 0.55% de carbono

Aceros de alto carbono: mas de 0.55% de carbono.

1.2 Clasificación de los aceros desde en punto de vista de sus aplicaciones

Desde el punto de las aplicaciones, los aceros, tanto comunes como especiales, pueden ser clasificados del modo siguiente.

- 1) Aceros de fácil deformación en frío
- 2) Aceros para tratamientos termoquímicos
- 3) Aceros estructurales de alta resistencia mecánica
- 4) Aceros para herramientas y matrices
- 5) Aceros inoxidables
- 6) Aceros para otras aplicaciones

Los aceros comunes son mas versátiles que los especiales, en el sentido de que un mismo acero puede servir para diversos tipos de aplicaciones. En los aceros especiales se busca, en general, intensificar el comportamiento en relación con una aplicación determinada. Ello lleva muchas veces a sacrificar de algún modo otras propiedades.

Como los aceros comunes son mas baratos que los especiales, el criterio que debe seguirse para elegir el acero requerido para una aplicación determinada, es la de analizar primeramente el comportamiento del acero que mejor responda a las características impuestas. Solo si las propiedades de ese acero resultan insuficientes para el fin que se persigue, se deberá pensar en la utilización de un acero especial, que satisfaga mejor los requerimientos exigidos.

La interpretación de las características que se muestran en las tablas I a VI requiere ciertas consideraciones.

Para designar en dichas tablas a los aceros, se han adoptado con preferencia las designaciones conocidas con la sigla SAE, que son las más conocidas entre nosotros e internacionalmente. En estas designaciones (salvo en el caso de los aceros de herramientas), las dos últimas cifras del número característico representan el contenido nominal de carbono (en centésimas por ciento). Las dos primeras cifras identifican al grupo al que pertenece el acero, de acuerdo con su composición química.

En los aceros inoxidables, las designaciones AISI son más conocidas entre nosotros que las SAE y han sido por ello preferidas.

En algunos tipos de aceros, de la tabla VI que carecen de designación SAE o AISI, se han empleado las designaciones con las que son más conocidos esos aceros en nuestro país.

Debe tenerse en cuenta que las dimensiones de las piezas de acero influyen en las propiedades mecánicas a obtener con un tratamiento térmico determinado. Los valores de las tablas, cuando se indica un tratamiento temple, corresponden a los obtenidos con probetas previamente normalizadas, fabricadas a partir de barras de diámetros pequeños y sometidas al tratamiento indicado en cada caso.

Los valores correspondientes a las propiedades mecánicas deben considerarse como típicos. Cuando las tablas indican valores máximos y mínimos en relación con la resistencia mecánica y alargamiento de rotura, dichos valores pueden considerarse exigibles, si se especifica que las dimensiones de las probetas deben responder a las normas IRAM (probetas cortas proporcionales), y ser extraídas de barras de no más de 25 mm de diámetros.

I Aceros de fácil deformación en frío

En muchas aplicaciones, la característica principal requerida en el acero es su adaptación a los procesos de deformación plástica en frío, necesarios para fabricar las piezas.

Los aceros que más se adaptan a estos procesos son los comunes de bajo contenido de carbono. Ello se debe a que tanto el carbono, como la mayoría de los elementos de aleación, reducen la capacidad de deformación plástica en frío.

Dos aceros típicos de fácil deformación en frío son los llamados SAE 1010 y SAE 1020 cuyas características se muestran en la tabla I.

TABLA I Aceros comunes

TIPO DE ACERO		SAE 1010	SAE 1020	SAE 1010	SAE 1020	
Composición química	Carbono%	0,08-0,13	0,17-0,23	0,42-0,5	0,90-1,04	
	Silicio %	0,15-0,30	0,15-0,30	0,15-0,3	0,15-0,30	
	Manganeso %	0,30-0,60	0,30-0,60	0,60-0,9	0,30-0,50	
	Fósforo %	0,04 Máx.	0,04 Máx.	0,04 Máx.	0,04 Máx.	
	Azufre %	0,05 Máx.	0,05 Máx.	0,05 Máx.	0,05 Máx.	
Propiedades mecánicas con los tratamientos térmicos más usados ¹	Normalizado	Enfriar el aire desde	900° a 940° C	900° - 940° C	880° - 920° 880° - 920° C	
		Resistencia a la tracción kg/mm ²	40 ± 6	49 ± 7	70 ± 11 95 ± 15	
		Límite de fluencia km/mm ²	20 ± 3	24 ± 3	35 ± 5 47 ± 7	
	Alargamiento de rotura %	35 ± 5	30 ± 5	20 ± 3 12 ± 2		
	Temple y revenido ²	Temp. de temple			850° ± 10	800 ± 10° C
		Temp. de reven.			600° C	450° C
		Resist. a la tracción kg/mm ²			75 ± 11	130 ± 20
		Alargamiento de rotura %			25 ± 4	13 ± 2
	Sentido de variación de algunas propiedades tecnológicas. ³					
	Principales aplicaciones ⁴		Chapas, tubos, barras y alambres. Pzas. cementadas y cianuradas. Varillas para hormigón.	Chapas, tubos, barras, alambres y perfiles. Pzas. cementadas y cianuradas. Bulones. Varillas para hormigón.	Chapas, tubos, y alambres. Pzas. las y fas. Bulones de alta resistencia. Resor	Barras y alambres. Pzas. forjadas resistentes al desgaste. Matrices. Dispositivos. Resortes. Herramientas.

Cuando se requieren características excepcionales de deformación plástica, se especifican aceros comunes, con menor contenido de carbono que el SAE 1010. Ello es necesario en operaciones llamadas de embutido profundo.

Entre los aceros aleados que mejor se comportan en las operaciones de deformación plásticas en frío, figuran los aceros inoxidables de estructura austenítica o ferrítica (véase la tabla V) y el acero SAE 4130, cuyas características figuran en la tabla III

II Aceros para tratamientos termoquímicos

El contenido de carbono de los aceros especificados para procesos de cementación y de cianuración debe ser bajo (en general inferior al 0.40 por ciento).

TABLA II Aceros especiales para tratamientos termoquímicos

TIPO DE ACERO		SAE 4028	SAE 8620	SAE 3310 ²	SAE 4135	
Propiedades mecánicas con los tratamientos más usados ¹	Composición química	Carbono % Manganeso % Silicio % Cromo % Níquel % Molibdeno Fósforo % Azufre %	0,25-0,30 0,70-0,90 0,20-0,30	0,18-0,23 0,70-0,90 0,20-0,35 0,40-0,60 0,40-0,70 0,15-0,25 0,035 Máx. 0,040 Máx.	0,08-0,13 0,45-0,60 0,20-0,36 1,40-1,75 3,25-3,75 0,025 Máx. 0,025 Máx.	0,33-0,38 0,70-0,90 0,20-0,35 0,80-1,10 0,15-0,25 0,035 Máx. 0,040 Máx.
	Cementación	Cementar a 920 C Temple directo desde 850 C en aceite. Revenir a 150°C.	Dureza capa 58-63 Rc. Resistencia a la tracción núcleo 1 3 5 ± 20 kg/mm ² Límite fluencia núcleo 1 0 6 ± 16 kg/mm ² Alargamiento núcleo 12 ± 2 %	Dureza capa 58-63 Rc Resistencia a la tracción núcleo 1 3 5 ± 20 kg/mm ² Límite fluencia núcleo 1 0 6 ± 16 kg/mm ² Alargamiento núcleo 12 ± 2 %	Dureza capa 55-60 Rc Resistencia a la tracción núcleo 1 2 5 ± 19 kg/mm ² Límite fluencia núcleo 1 0 0 ± 15 kg/mm ² Alargamiento núcleo 15 ± 2 %	
	Carbonitruración	Carbonitrurar a 840 C Templar directamente desde 840 C en aceite a 180°C Revenir a 200 C				Dureza capa 82-87 RA. Resist. a la tracción núcleo 1 6 0 ± 24 kg/mm ² Límite fluencia núcleo 1 3 5 ± 20 kg/mm ² Alargamiento núcleo 8 ± 2 %
	Nitruración gaseosa	Templar en aceite desde 850 C Revenir a 550°C Nitrurar a 500°C.				Dureza capa 85-90 R 15 N Resist a la tracción núcleo 1 1 0 ± 16 kg/mm ² Límite fluencia núcleo 1 0 4 ± 5 kg/mm ² Alargamiento núcleo 17 ± 2 %

En los procesos de carbonitruración y de nitruración gaseosas pueden emplearse aceros con contenidos de carbono de hasta el 0,50 por ciento. Debe sin embargo analizarse cuidadosamente otros aspectos de su composición química, para evitar problemas de fragilización..

Ciertos procesos modernos de nitruración en sales, conocidos con los nombres de Tenifer y de sulfinitización, pueden aplicarse adecuadamente a una gama de aceros bastantes amplia. Las ventajas de esos tratamientos son sin embargo mayores en relación con aceros comunes de bajo y medio carbono.

III Aceros estructurales de alta resistencia mecánica

Los elementos fundamentales de las máquinas, motores y vehículos, se construyen con aceros que deben poseer una elevada resistencia mecánica (en particular a la fatiga) y adecuada tenacidad.

TABLA III Aceros especiales estructurales

TIPO DE ACERO		SAE 4130	SAE 5140	SAE 4140	SAE 4340
Composición química	Carbono %	0,28-0,33	0,38-0,43	0,38-0,43	0,38-0,43
	Manganeso %	0,40-0,80	0,70-0,90	0,75-1,00	0,60-0,80
	Silicio %	0,20-0,35	0,20-0,35	0,20-0,35	0,20-0,35
	Cromo %	0,80-1,10	0,70-0,90	0,80-1,10	0,70-0,90
	Níquel %	—	—	—	1,65-2,00
	Molibdeno %	0,15-0,25	—	0,15-0,25	0,20-0,30
	Fósforo %	0,035 Máx.	0,035 Máx.	0,035 Máx.	0,035 Máx.
Azufre %	0,040 Máx.	0,040 Máx.	0,040 Máx.	0,040 Máx.	
Propiedades mecánicas con los tratamientos térmicos más usados	Normalizado	Resist. a la tracción 68 ± 7 kg/mm ² Lím. fluencia 44 ± 5 kg/mm ² Alargamiento 26 ± 3 %	Resist. a la tracción 81 ± 8 kg/mm ² Lím. fluencia 48 ± 5 kg/mm ² Alargamiento 23 ± 2 %	Resist. a la tracción 104 ± 11 kg/mm ² Lím. fluencia 67 ± 7 kg/mm ² Alargamiento 18 ± 2 %	Resist. a la tracción 130 ± 13 kg/mm ² Lím. fluencia 88 ± 9 kg/mm ² Alargamiento 12 ± 2 %
	Temple y revenido	Temp. de temple 800-850° C Temp. de revenido 600° C ± 10 Medio de temple agua para 4130 resto aceite	Resist. a la tracción 90 ± 9 kg/mm ² Lím. fluencia 80 ± 8 kg/mm ² Alargamiento 21 ± 2 %	Resist. a la tracción 90 ± 9 kg/mm ² Lím. fluencia 74 ± 7 kg/mm ² Alargamiento 21 ± 2 %	Resist. a la tracción 116 ± 12 kg/mm ² Lím. fluencia 112 ± 11 kg/mm ² Alargamiento 17 ± 2 %
SENTIDO DE VARIACION DE ALGUNAS PROPIEDADES TECNOLOGICAS		← Capacidad de deformación plástica ← → Templabilidad → ← Soldabilidad ← → Dificultad de mecanización →			
Principales aplicaciones		Chapas, tubos, Pzas. mecánicas de pequeño tamaño.	Pzas. mecánicas del tamaño normal usado en industria automotriz.	Pzas. mecánicas con exigencias especiales o de mayor tamaño que las de automotores.	Pzas. mecánicas de gran tamaño o con exigencias muy rigurosas.

Esas características se consiguen con aceros llamados de medio carbono, en los que este elemento aparece en porcentajes nominales comprendidos entre 0,30 y 0,50 por ciento. Se utilizan estos aceros fundamentalmente con tratamientos de temple y revenido. Este último se realiza a temperaturas relativamente altas, del orden de los 600°C, para asegurar una adecuada tenacidad.

Entre los aceros comunes, los más empleados para estas aplicaciones son los que tienen un porcentaje nominal de carbono comprendido entre 0,35 y 0,45 por ciento. Las características del acero SAE 1045 (con 0,45 por ciento nominal de carbono) figuran en la tabla I.

Los aceros aleados más utilizados en la fabricación de piezas de alta resistencia son presentados en la tabla III. La elección entre los cuatro aceros de dicha tabla debe basarse fundamentalmente en el tamaño de las piezas. Esto se vincula con la templabilidad, propiedad que aumenta, para los aceros de la tabla III, de izquierda de derecha. Cuanto mayores son las dimensiones de una pieza, mayor debe ser la templabilidad del acero empleado, a igualdad de otras características.

A veces las condiciones de aplicación exigen márgenes de templabilidad muy estrechos. En ese caso puede ser necesario emplear otros aceros, cuya templabilidad esté comprendida entre las correspondientes a los aceros de la tabla. La adopción de otros aceros, distintos a los presentados en la tabla, puede hacerse también por razones económicas o de disponibilidad.

El grupo de aceros que estamos considerando no presenta en general buenas características de soldabilidad y de capacidad de deformación plástica en frío. Esta última puede mejorarse mediante tratamientos térmicos de globulización.

El acero SAE 4130 constituye una excepción importante pues, pese a su relativamente elevada resistencia mecánica, tiene buena soldabilidad y gran capacidad de deformación en frío. La facilidad de mecanización de los aceros estructurales se ve mejorada cuando el azufre supera un valor mínimo, del orden del 0.03 por ciento. El límite superior suele fijarse en 0.05 por ciento para evitar otros problemas asociados a un contenido excesivo de inclusiones. Cuando se especifica contenidos de azufre en la forma indicada, los aceros suelen ser llamados resulfurados.

IV. Aceros para herramientas

Estos aceros deben poseer fundamentalmente las siguientes propiedades: alta resistencia al desgaste (tanto en frío como en caliente); elevada tenacidad y poca distorsión al ser sometidos a tratamientos térmicos.

Entre los aceros comunes, esas propiedades se logran adecuadamente, dentro de ciertos límites, con el acero SAE 1095, cuyas características figuran en la tabla I. Mejores resultados se obtienen con variantes de dicho acero que son designadas, por la norma SAE, con la letra W, seguida de un número.

TABLA IV Aceros especiales para herramientas y matrices

TIPO DE ACERO	Acero de corte rápido SAE T-2	Acero para trabajos en frío SAE A-2	Acero para trabajos en caliente SAE H-11	Acero resistente al choque SAE S-1
Carbono %	0,75-0,85	0,95-1,05	0,30-0,40	0,45-0,55
Silicio %	0,20-0,40	0,20-0,40	0,80-1,20	0,25-0,45
Manganeso %	0,20-0,40	0,45-0,75	0,20-0,40	0,20-0,40
Cromo %	3,75-4,50	4,75-5,50	4,75-5,50	1,25-1,75
Vanadio %	1,80-2,40	-	0,30-0,50	0,15-0,30
Molibdeno %	0,70-1,00	0,90-1,40	1,25-1,75	-
Tungsteno %	17,50-19,00	-	-	1,00-3,00

Los aceros W pueden ser considerados comunes, aunque a veces se especifican pequeños contenidos de elementos adicionales.

Cuando en una aplicación determinada, las propiedades de los aceros W no satisfacen las exigencias impuestas, se debe recurrir a aceros especiales. Estos pueden ser clasificados, de acuerdo con las propiedades que más interesan en cada caso, del modo siguiente:

- 1) Aceros de corte rápido
- 2) Aceros para trabajos en frío
- 3) Aceros para trabajos en caliente
- 4) Aceros resistentes al choque

La tabla IV indica las características de los aceros más empleados dentro de cada uno de dichos grupos.

En los aceros de corte rápido, los elementos fundamentales son el tungsteno y el molibdeno. Estos elementos confieren a los aceros una elevada dureza, a las temperaturas que se desarrollan durante las operaciones de mecanizado, cuando éstas se realizan a gran velocidad. Por ellos estos aceros se llaman de corte rápido.

Las cantidades de tungsteno y de molibdeno varían mucho en los distintos aceros de corte rápido, no siendo necesario que ambos estén presentes simultáneamente.

Otros elementos que se adicionan a los aceros de corte rápido, para aumentar su dureza, son el cromo, el vanadio y el cobalto. El acero T-2, cuyas características figuran en la tabla IV, suele ser llamado 18-4-2 por sus contenidos nominales respectivos de tungsteno, cromo y vanadio.

Los aceros especiales para trabajos en frío, se caracterizan por su gran dureza y su baja deformación durante los tratamientos térmicos. Suelen ser elemento importante porque permite el temple al aire, lo cual reduce las deformaciones. Muchos aceros indeformables tienen, como indicado en la tabla IV, un contenido nominal de cromo del 5 por ciento. Otros, de mayor precio, contienen hasta 12 por ciento de cromo mientras que, con menor grado de indeformabilidad, pueden usarse aceros de bajo contenido de elementos adicionales. Estos últimos deben ser templados en aceite, por no ser suficiente el enfriamiento al aire.

Todos los aceros para trabajos en frío tienen un contenido de carbono del orden del 1 por ciento, para asegurar dureza elevada después del temple.

Los aceros para trabajos en caliente, y los resistentes al choque, tienen en común un contenido relativamente bajo de carbono. Ello se requiere por la importancia que tiene la tenacidad en las aplicaciones para las que se especifican estos tipos de aceros.

La presencia de tungsteno o molibdeno es imperiosa en los aceros para trabajos en caliente, pero es menos importante en los aceros resistentes al choque.

Las aplicaciones especifican de cada uno de los tipos de acero de herramientas se detallan en la tabla IV.

V. Aceros inoxidables

Esos aceros se caracterizan por su elevada resistencia a la corrosión. Dicha resistencia se logra por la incorporación de cromo en porcentajes superiores al 11 por ciento siempre que el carbono se mantenga bajo. La presencia de níquel, en cantidades también elevadas, contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables, cosa que también hace el

molibdeno, en porcentajes menores. Las características de los aceros inoxidable de mayor uso industrial figuran en la tabla V.

TABLA V Aceros inoxidables

TIPO DE ACERO		AISI 304 (Austenítico)	AISI 316 (Austenítico) resistente al calor)	AISI 410 (Martensítico)	AISI 430 (Ferrítico)
Composición química	Carbono %	0,08 Máx.	0,25 Máx.	0,25 Máx.	0,15 Máx.
	Silicio %	1,00 Máx.	1,50 Máx.	1,00 Máx.	1,00 Máx.
	Manganeso %	2,00 Máx.	2,00 Máx.	1,00 Máx.	1,00 Máx.
	Cromo %	18-20	24-26	11,50-13,50	14,18
	Níquel %	8-12	19-22	—	—
	Fósforo %	0,045 Máx.	0,045 Máx.	0,04 Máx.	0,04 Máx.
Azufre %	0,030 Máx.	0,030 Máx.	0,03 Máx.	0,03 Máx.	
Propiedades mecánicas nominales, con los tratamientos términos más usados.	Recocido de solubilidad	Enfriar rápi- damente des- de 1000 - 1100° C			
		Resist. a la tracción	63 kg/mm ²	68 kg/mm ²	
	Lím. de fluencia	26 kg/mm ²	28 kg/mm ²		
Temple y revenido	Templado des- de 980° C				
	Revenir a 200° C			135 kg/mm ²	
Resist. a la tracción.				100 kg/mm ²	
Lím. de fluencia				15 %	
Normalizado	Enfriar al aire desde 760 - 830° C				
	Resistencia a la tracción				53 kg/mm ²
Lím. de fluencia				32 kg/mm ²	
Alargamiento				30 %	

El cromo, actuando solo, en los porcentajes que poseen estos aceros, amplía el campo ferrítico hacia temperaturas más altas y hacia contenidos relativamente elevados de carbono. Por eso los aceros inoxidables, a base de cromo exclusivamente, tienen estructura totalmente ferrítica.

En algunos casos, limitando algo al contenido de cromo, puede obtenerse estructura austenítica a temperaturas no muy elevadas. En ese caso el acero inoxidable con cromo es susceptible de temple martensítico.

El agregado de níquel, en porcentajes superiores al 7 por ciento, permite que los aceros inoxidables adquieran estructura austenítica a temperatura ambiente, con cualquier tipo de enfriamiento. Los aceros se denominan en ese caso austeníticos, por oposición a los anteriores a los que se designa como ferríticos o martensíticos. Los aceros inoxidables tienen bajo contenido de carbono, porque este elemento reduce la resistencia al fenómeno de corrosión intercrystalina, vinculado a la precipitación de carburos en los contornos granulares.

El acero AISI 304 conocido como acero 18-8 (por sus contenidos nominales de cromo y de níquel) es el de uso más general dentro de los aceros inoxidables. Cuando se requiere una mayor resistencia a la corrosión, suelen usarse otros tipos similares, siendo el mejor en ese sentido el AISI 316 que contiene de 2 a 3 por ciento de molibdeno, y muy bajo contenido de carbono.

Cuando es importante la corrosión a elevada temperatura, se emplea el acero AISI 310 y otros con mayores contenidos de cromo y de níquel.

El acero AISI 410 (con temple martensítico) se emplea en aplicaciones que requieren elevada dureza (por ejemplo, en la fabricación de cuchillos).

Por último, el acero AISI 430 es un sustituto más económico, pero menos resistente a la corrosión, que el acero AISI 304. Por otra parte, la apariencia del acero AISI 430 es más similar a la de las piezas cromadas que la del AISI 304. Por ese motivo, y por su menor costo, suele ser preferido en aplicaciones ornamentales, sobre todo en proximidad con piezas de acero cromado.

Los aceros inoxidable, tanto austeníticos como ferríticos, son de fácil deformación en frío, por su bajo contenido de carbono.

VI. Aceros para otras aplicaciones

En la tabla VI se muestran las composiciones químicas y los tratamientos térmicos más corrientes de 5 aceros típicos que representan a otras tantas familias que se definen por sus aplicaciones específicas.

En las notas de la mencionada tabla se indican las principales características y aplicaciones de estos tipos de acero.

Tabla VI Aceros para otras aplicaciones

Aceros especiales para resortes ¹ SAE 5160	Aceros para rulemanes ² SAE 52100	Aceros para matrices pretempladas ³ ASM 6F4	Aceros de alta resistencia al desgaste ⁴ Tipo Hadfield	Aceros para aplicaciones eléctricas ⁵ Chapa-Silicio
Comp. química	Comp. química	Comp. química	Comp. química	Comp. química
C 0,56-0,64% Si 0,56-0,35% Mn 0,75-1,00% Cr 0,70-0,90% P 0,035% máx. S 0,040%	C 0,98-1,10% Si 0,20-0,35% Mn 0,25-0,45% Cr 1,30-1,60% P 0,025% máx. S 0,025% máx.	C 0,18-0,23% Si 0,20-0,35% Mn 0,63-0,78% Ni 3,00-3,25% Mo 3,25-3,50% P 0,035% máx. S 0,045% máx. Cr 0,15 % máx.	C 1,00-1,40% Mn 10-14% Si 1% máx. P 0,10% máx. S 0,05% máx.	Carbono nominal C, 0,05% Silicio nominal 1,10%

Dentro de las clasificaciones de los aceros según sus utilizaciones; (para maquinas, para resortes, para calderas, aceros estructurales, o acero para herramientas) trataremos la clasificación de los aceros para herramientas.

Cualquier acero utilizado como herramienta puede clasificarse técnicamente como acero para herramientas, sin embargo, el termino suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o formado.

Métodos de clasificación de los aceros para herramientas.

- 1.- Uno es según los medios de templado que se usen, como aceros templados en agua, aceros templados en aceite y aceros templados al aire.
- 2.- El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas.
- 3.- Un ultimo método de agrupación es basado en el empleo del acero para herramientas, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad , aceros para trabajar en frío.

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI (American Iron and Steel Institute) tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones y características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que mas se utilizan se han agrupado en siete grupos y cada grupo o subgrupo se le ha asignado una letra del alfabeto, como sigue:

Tabla VI-a Grupos de aceros para herramientas

GRUPO	SÍMBOLO	Y	TIPO
Templados en agua	W		
Resistentes al impacto	S		
Trabajo en frío	O		Templable en aceite
	A		Mediana aleación y templable en aire
	D		Alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H		(H1 - H19, incluso base cromo H20 - H39, incluso base tungsteno H40 - H59, incluso, base molibdeno)
	T		Base tungsteno
	M		Base molibdeno
Moldes	P		Aceros para moldes (P1 - P19, incluso, bajo carbono; P20 -P39, incluso otros tipos)
	L		Baja aleación
Propósitos específicos	F		Carbono - tungsteno

Tabla VII Identificación y tipo de clasificación de aceros para herramientas

Tipo	C	ELEMENTOS DE IDENTIFICACIÓN		PORCENTAJE		Mo	Co	Al
		Mn	Si	Cr	Ni				V	W
ACEROS PARA HERRAMIENTAS TEMPLABLES EN AGUA								
SÍMBOLO W								
W1	0.60/1.40							
W2	0.60/1.40					0.25		
W5	1.10			0.50				
ACEROS PARA HERRAMIENTAS RESISTENTES AL IMPACTO								
SÍMBOLO S								
S1	0.50			1.50		2.50		
S2	0.50		1.00				0.50	
S5	0.55	0.80	2.00				0.40	
S7	0.50			3.25			1.40	
ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN FRÍO								
SÍMBOLO O, TIPOS TEMPLABLES EN ACEITE								
O1	0.90	1.00		0.50		0.50		
O2	0.90	1.60						
O6	1.45		1.00				0.25	
O7	1.20			0.75		1.75		
SÍMBOLO A, MEDIANA ALEACIÓN, TIPOS TEMPLABLES EN AIRE								
A2	1.00			5.00			1.00	
A3	1.25			5.00		1.00	1.00	
A4	1.00	2.00		1.00			1.00	
A6	0.70	2.00		1.00			1.00	
A7	2.25			5.25		4.75	1.00	1.00
A8	0.55			5.00			1.25	1.25
A9	0.50			5.00	1.50	1.00		1.40
A10	1.35	1.80	1.25		1.80			1.50
D2	1.50			12.00				1.00
D3	2.25			12.00				
D4	2.25			12.00				1.00
D5	1.50			12.00				1.00
D7	2.35			12.00		4.00		1.00
								3.00
ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA TRABAJO EN CALIENTE								
SÍMBOLO H, H1 - H19 INCLUSO TIPOS BASE CROMO								
H10	0.40			3.25		0.40		2.50
H11	0.35			5.00		0.40		1.50
H12	0.35			5.00		0.40	1.50	1.50
H13	0.35			5.00		1.00		1.50
H14	0.40			5.00			5.00	
H19	0.40			4.25		2.00	4.25	4.25
H20 - H39 INCLUSO TIPOS BASE TUNGSTENO (H27 - H39 NO DESIGNADOS)								
H21	0.35			3.50			9.00	
H22	0.35			2.00			11.00	
H23	0.30			12.00			12.00	
H24	0.45			3.00			15.00	
H25	0.25			4.00			15.00	
H26	0.50			4.00		1.00	18.00	
H40 - H59, INCLUSO TIPOS BASE MOLIBDENO (H40, H44 - H59 NO DESIGNADOS)								
H41	0.65			4.00		1.00	1.50	8.00
H42	0.60			4.00		2.00	6.00	5.00
H43	0.55			4.00		2.00		8.00

ACEROS PARA HERRAMIENTAS DE ALTA VELOCIDAD
SÍMBOLO T BASE TUNGSTENO

Tipo	C	ELEMENTOS		DE	IDENTIFICACIÓN		PORCENTAJE		Mo	Co	Al
		Mn	Si		Cr	Ni	V	W			
T1	0.70			4.00		1.00	18.00				
T2	0.80			4.00		2.00	18.00				
T4	0.75			4.00		1.00	18.00			5.00	
T5	0.80			4.00		2.00	18.00			8.00	
T6	0.80			4.50		1.50	20.00			12.00	
T8	0.75			4.00		2.00	14.00			5.00	
T15	1.50			4.00		5.00	12.00			5.00	

* SÍMBOLO M, TIPOS BASE MOLIBDENO

M1	0.80			4.00		1.00	1.50	8.00			
M2	0.85/1.00			4.00		2.00	6.00	5.00			
M3	1.05			4.00		2.40	6.00	5.00			
M4	1.30			4.00		4.00	5.50	4.50			
M6	0.80			4.00		1.50	4.00	5.00		12.00	
M7	1.00			4.00		2.00	1.75	8.75			
M10	0.85			4.00		2.00		8.00			
M30	0.80			4.00		1.25	2.00	8.00		5.00	
M34	0.90			4.00		2.00	2.00	8.00		8.00	
M36	0.80			4.00		2.00	6.00	5.00		8.00	
M41	1.10			4.25		2.00	6.75	3.75		5.00	
M42	1.10			3.75		1.15	1.50	9.50		8.00	
M43	1.20			3.75		1.60	2.75	8.00		8.25	
M44	1.50			4.25		2.25	5.25	6.25		12.00	
M46	1.25			4.00		3.20	2.00	8.25		8.25	
M47	1.10			3.75		1.25	1.50	9.50		5.00	

ACEROS PARA HERRAMIENTAS PARA FINES ESPECÍFICOS
SÍMBOLO L, TIPOS BAJA ALEACIÓN

L2	0.50/1.10			1.00		0.20					
L3	1.00			1.50		0.20					
L6	0.70			0.75	1.50				0.25		

SÍMBOLO F TIPOS CARBONO TUNGSTENO

F1	1.00						1.25				
F2	1.25						3.50				

ACEROS PARA MOLDES, SÍMBOLO P
P1 - P19, INCLUSO TIPOS DE BAJA CARBONO (P7 - P19 NO DESIGNADOS)

P2	0.07			2.00	0.50				0.20		
P3	0.10			0.60	1.20						
P4	0.07			5.00							
P5	0.10			2.25							
P6	0.10			1.50	3.50						

P20 - P39, INCLUSO OTROS TIPOS (P22 - P39 NO DESIGNADOS)
SÍMBOLO S

P20	0.30			1.25					0.25		
P21	0.20				4.00						1.20

Capítulo 2

Microestructuras de algunos aceros

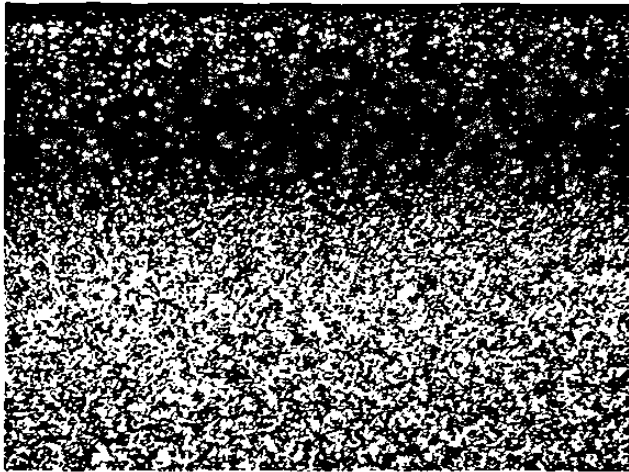
Estudios metalograficos de distintos aceros

Composición química estandarizada de aceros para tratamientos termoquimicos

Steel	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
Carbon Steels								
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...
1012 mod	0.10-0.15	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	0.30	0.30	...
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...
1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...
1039	0.37-0.44	0.70-1.00	0.040 max	0.050 max	...	...	...	...
Resulfurized Steels								
1113	0.13 max	0.70-1.00	0.07-0.12	0.24-0.33	...	...	...	...
1117	0.14-0.20	1.00-1.30	0.040 max	0.08-0.13	...	...	...	...
Alloy Steels								
3110	0.08-0.13	0.45-0.60	0.025 max	0.025 max	0.20-0.35	3.25-3.75	1.40-1.75	...
3110H	0.07-0.13	0.30-0.70	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	3.20-3.80	1.30-1.80	...
4118	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.40-0.60	0.08-0.15
4118H	0.17-0.23	0.60-1.00	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.30-0.70	0.08-0.15
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	...	0.80-1.10	0.15-0.25
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30
4320	0.17-0.22	0.45-0.65	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	1.65-2.00	...	0.20-0.30
8617	0.15-0.20	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25
8617H	0.14-0.20	0.60-0.95	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.15-0.25
8620	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25
8620H	0.17-0.23	0.60-0.95	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.15-0.25
8720	0.18-0.23	0.70-0.90	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.20-0.30
882H	0.19-0.25	0.70-1.05	0.035 max	0.040 max	0.20-0.35	0.35-0.75	0.35-0.65	0.30-0.40
9310	0.08-0.13	0.45-0.65	0.025 max	0.025 max	0.20-0.35	3.00-3.50	1.00-1.40	0.08-0.15
AMS 6470 (a)	0.38-0.43	0.50-0.70	0.040 max	0.040 max	0.20-0.40	...	1.40-1.80	0.30-0.40
Tool Steel								
H13(b)	0.35	...	...	...	...	...	5.0	1.50
Maraging Steel								
18% Ni (300 CVM) (c)	0.03 max	0.10 max	0.010 max	0.010 max	0.10 max	18.5	...	4.8

Algunas microestructuras de aceros carbonitrurados

Acero 8620



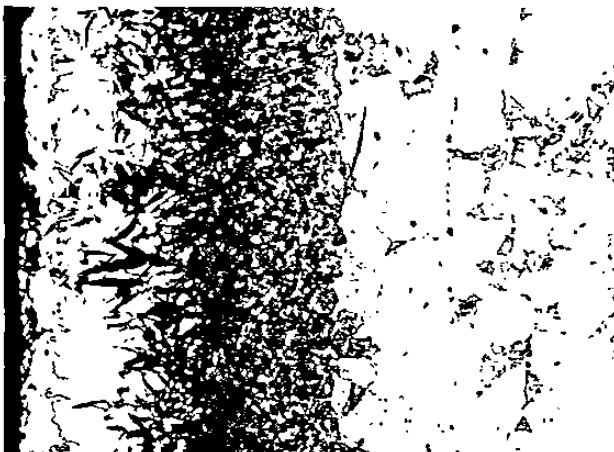
Nital 100x
 Barra de acero carbonitrurada por 4 horas a 1,550°F (843°C) y
 enfriada en aceite no templada pero estabilizada por tratamiento subcero
 los esta estructura normal para tratamiento en caja consiste en martensita y
 partículas de carburos y pequeñas cantidades de austenita retenida
 martensita

Acero 1020



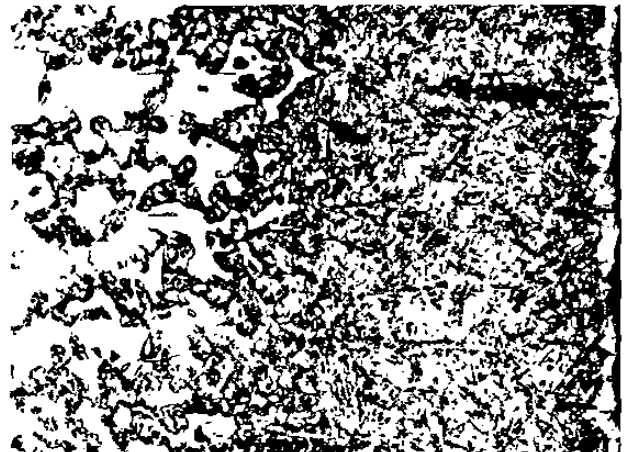
Nital 500x
 Acero carbonitrurado y enfriado en aceite. Mostrando
 efectos del también alto potencial del carbono la parte blanca de
 (izquierda) muestra cementita; la siguiente es austenita retenida)
 entrelazada con narices de martensita y la matriz es de
 (derecha)

Acero 1010



Nital 200x
 Carbonitrurado a 1,450°F (788°C) y enfriada en aceite mostrando
 alto carbono, bajo nitrógeno en la caja (parte izquierda de la micrografía)
 con estructura similar a la anterior, el corazón (derecha de la micrografía)
 es predominantemente de ferrita

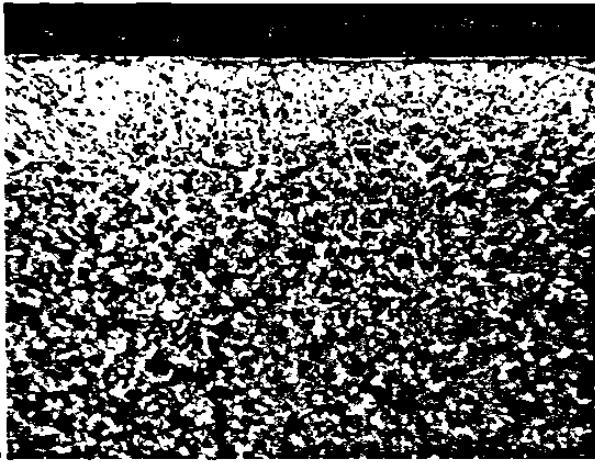
Acero 1017



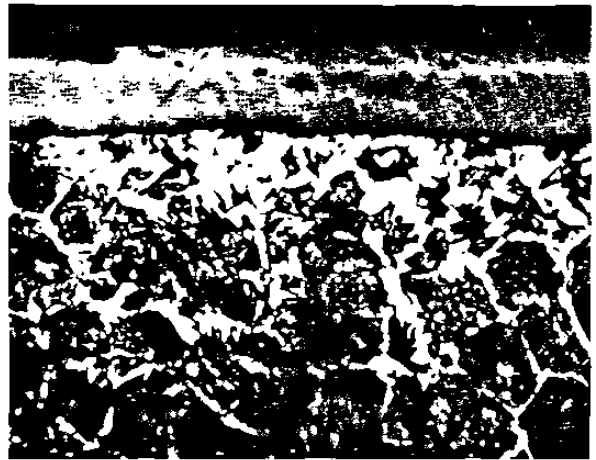
Nital 200x
 Carbonitrurado y enfriado en aceite, mostrando (derecha)
 una capa de metal descarbonado (ferrita) posterior martensita y el
 corazón del material (izquierda) contiene partes de ferrita
 (constituyentes claros)

2.2 Microestructuras de algunos aceros descarburados durante su tratamiento térmico

Acero 1060



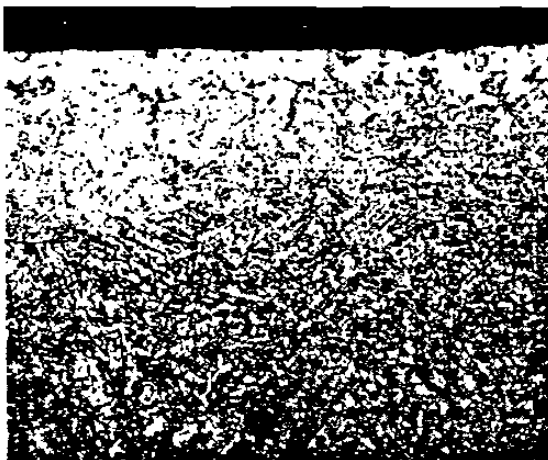
Acero 1060



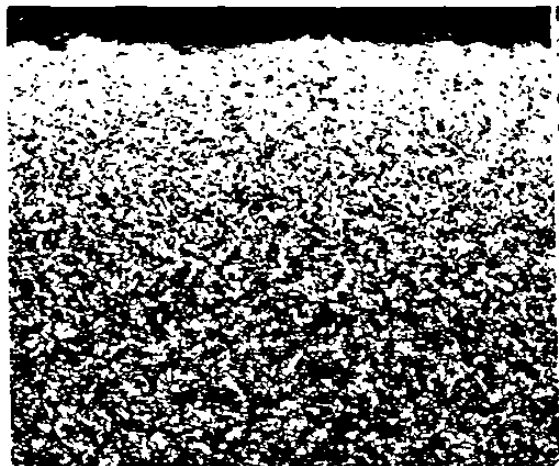
Picral 100x
 Calentado a 2,200°F (1,204°C) por 1 hora antes del proceso de rolado para obtener la lamina a su espesor.
 Nota. En laminas delgadas la superficie (la parte superior de la micrografia) presenta áreas descarburadas (las áreas claras superiores) Perlita sin resolver y ferrita

Picral 500x
 Descarburado, tratado 1,600° a 1700°F (871° a 927°C) durante 12 minutos y enfriado al aire.
 Nota.- la escama (parte superior de la micrografia) presenta particulas descarburadas (escamas), perlita (áreas oscuras) y algunos granos de ferrita

Acero 1064



Acero para resortes 5160



Picral 500x
 Lamina rolado en frío austenizada a 1,500°F (816°C) enfriado a 600°F (316°C) y sostenido (hasta completar la transformación isotérmica) y enfriada al aire revenido a 700°F (371°C) la estructura consiste en mezclas de bainita y revenida, presenta zonas descarburadas (parte superior)

2% Nital 110x
 Barra de 0.632 pulgadas de diámetro.
 Austenizado a 1600 F (871°C). Enfriado durante 5 minutos a 140°F (60°C). Revenido a 800°F (427°C) durante 40 minutos Nota.- La estructura consiste en martensita y zona descarburada

2.3 Microestructuras de aceros cementadas en ambiente gaseoso

Acero 1018



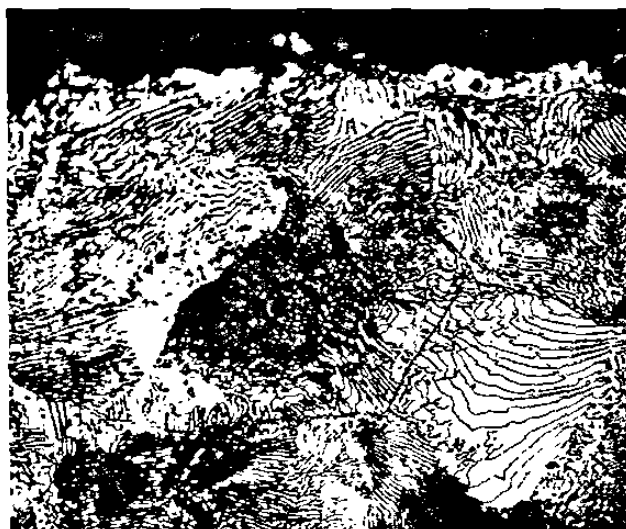
1% Nital 500x
 Cementado durante 10 horas. La superficie contiene de 0.60 a 0.70% de carbono. La estructura consiste en granos de ferrita (áreas claras), rodeando los contornos de los granos de austenita y algunos granos perlita (áreas oscuras)

Acero 1018



1% Nital 500x
 Cementado por 4 horas. La superficie tiene un contenido de carbono 0.70 a 0.80%. es rica en perlita en la periferia las áreas oscuras son perlita; áreas de ferrita en los contornos de austenita

Acero 1018



1% Nital 500x
 Cementado durante 6 horas. Su superficie contiene 0.90 a 1.00% de carbono. Una delgada lamina de carburos en los contornos de los granos., principalmente contiene granos de austenita en matriz perlítica

Acero 1018



1% Nital
 Cementado durante 16 horas a su superficie. Tiene un contenido medio de carbono de 1.00 a 1.10% la superficie principalmente son carburos, una lamina delgada de carburo en los bordes de los granos de austenita teniendo matriz perlítica.

Microestructuras de algunos aceros 1018 cementado en ambiente gaseoso

Acero 1018



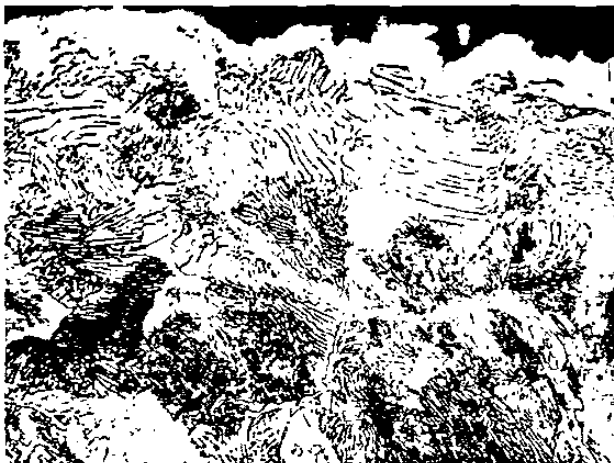
1% Nital 500x
 Cementado durante 18 horas en un horno continuo a 1700°F (927°C) enfriado a 100°F (538°C) en 2 horas 10 minutos, enfriado superficie bajo atmósfera en el vestibulo del horno. Una partículas separadas de carburos (aproximadamente 0.90% de carbono) cubierto en matriz líneas de perlítica

Acero 1018



1% Nital 500x
 Cementado por 12 horas a 1,700°F (927°C) durante 2 horas 10 minutos y enfriado en el horno a 100°F (538°C) La contiene aproximadamente 1.10% de carbono La capa de superficie es carburo; una lamina de carburo fuera de las los granos de austenita superior en matriz perlítica

Acero 1018



1% Nital 500x
 Cementado durante 5 horas a 1700°F (927°C) en un horno tipo pozo con un contenedor de gas enfriado el horno a 1000°F (538°C) durante 2 horas 10 minutos y enfriado en aire a temperatura ambiente una capa laminada descarburada (ferrita), causadas por la salida de la cobertura de la superficie. La matriz es perlita con carburos y austenita superior en los cuerpos de los granos.

Acero 1018



1% Nital 500x
 Cementado con gas en las mismas condiciones que el anterior excepto que los perdidas del horno son mas mucho severos La capa descarburada (ferrita) es debida a la salida del cementante. La estructura consiste en matriz de perlita. carbono difuso en los granos de los cuerpos

2.4 Microestructuras de aceros cementados

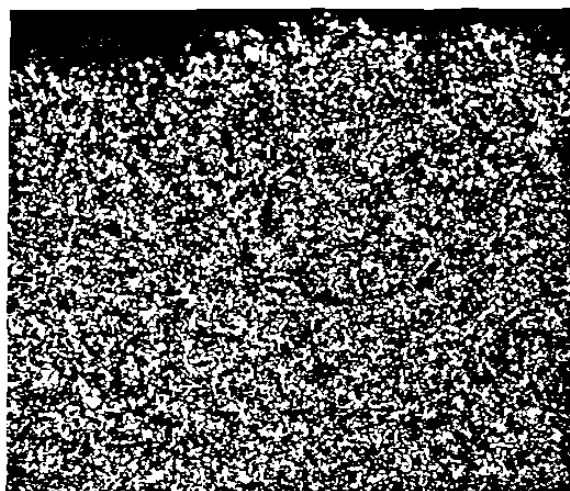
Aceros 9310 cementados entre 1,700°F a 1,725°F (927°C a 941°C) durante 4 horas en un horno tipo pozo enfriados en el horno de 1,500° a 1,525°F (816°a 829°C) y, mantenidos por 4 horas, luego enfriados para templar en aceite hasta 300°F (149C). Las cajas contiene carbón difieren por la variación de potencial de la atmósfera cementante

Acero 9310

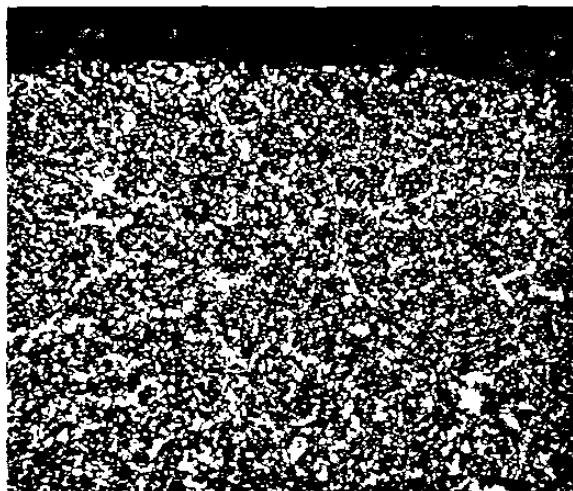
Acero 9310



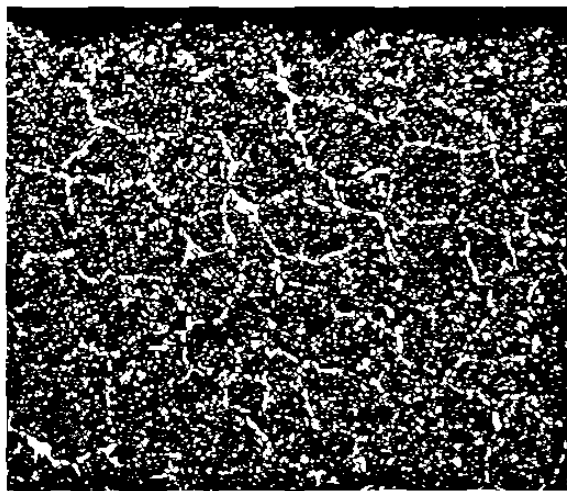
2% Nital 500x
 cementado con gas en caja a máximo contenido .
 contiene una caspa con 0.60% de carbono



2% Nital 500x
 Cementado con gas en caja tiene un contenido máximo
 de 0.85% de carbono



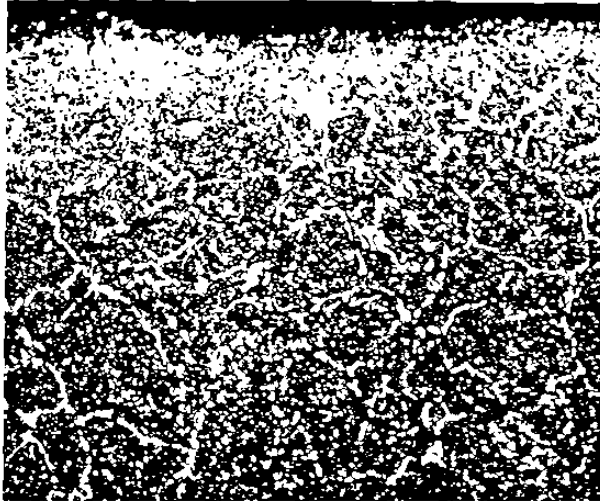
2% Nital 500x
 Cementado con gas en caja con un contenido máximo
 máximo 0.95% de carbono (optimo)



2% Nital 500x
 Cementado con gas en cajas con un contenido
 de 1.05% de carbono

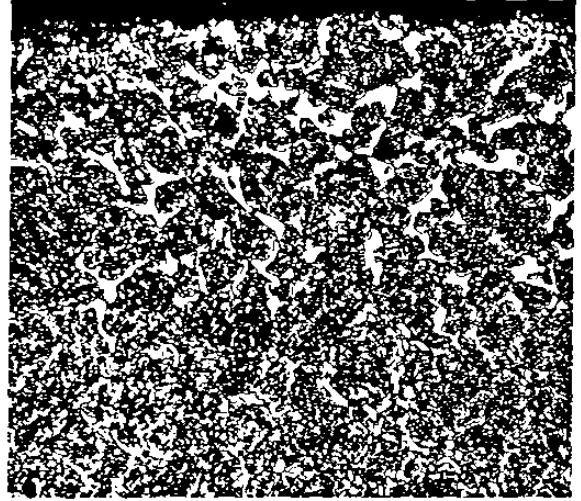
Aceros 9310 cementados de 1,700°F a 1,725°F (927°C a 941°C) durante 4 horas en un horno tipo pozo enfriados en el horno de 1,500° a 1,525°F (816°a 829°C) y, mantenidos por 4 horas, luego enfriados para templar en aceite hasta 300°F (149C). Las cajas contiene carbón difieren por la variación de potencial de la atmósfera cementante

Acero 9310



2% Nital 500x
Cementado con gas en caja tiene un contenido máximo de 1.10% de carbono

Acero 9310



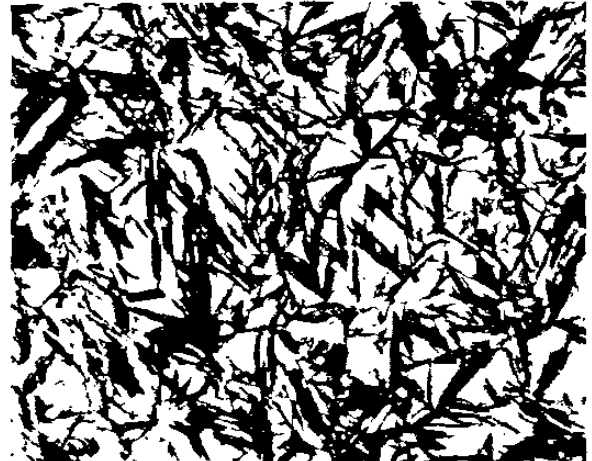
2% Nital 500x
Cementado con gas en caja tiene un contenido máximo de 1.20% de carbono

Acero 4620



Nital 1000x
Cementado durante 4 horas con un carbón de potencial que alcanza 1.00% a 1725°F (941°C) y templado en aceite por 1 hora a por 1 hora a 360°F (182°C). La microestructura (0.90% contenido de carbono) consiste de 35% de austenita retenida (por rayos x) y martensita revenida

Acero 4620



Nital 1000x
Cementado durante 8 horas con un carbón de potencial alcanza 1.00% a 1725°F (941°C) y templado en aceite 360°F (182°C). La microestructura (0.95% contenido de carbono) consiste de 45% de austenita retenida (por rayos x) y revenida

2.5 Microestructuras de algunos aceros cementados y tratados termicamente

Acero 8720



5% Nital 1000x
 Cementado durante 9 horas a 1700°F (927°C) con gas en caja con un potencial de carbono de 1.35% y difundido por 2 horas a temperatura con potencial de 0.90% de carbono la profundidad de cementación es de 0.005 a 0.010 pulgadas y enfriado lentamente en el horno a temperatura ambiente. La microestructura consiste en áreas claras de carburos en matriz de perlita laminar

Acero 3310H



4% Picral, 0.01% Cl 500x
 Cementado con algunos granos de cuarzo calentado a una temperatura de 1700°F (927°C) por 12 horas, enfriado en el horno a una temperatura de 1000°F (538°C) y posteriormente la estructura consiste en largas trazos de martensita desordenada en matriz de austenita retenida

Acero 3310H



4% Picral, 0.01% HCl 1000x
 Cementado como la anterior solo que el ataque es mas oscuro uno otros detalles de la microestructura (martensita y austenita retenida) dentro del son debidos a la forma quebrada de las trenzas de la martensita tienden horas ya ser oscurecidas por el ataque del reactivo martensita

Acero 8620



500x Picral
 Acero (granos de cuarzo) cementado durante 11 horas a temperatura de 1,700°F (927°C) posteriormente enfriado horno hasta una temperatura de 1150°F (843°C) durante 2 templado en aceite a 380°F (193°C) laminas largas de revenida conteniendo microgrietas severas

Microestructuras de algunos aceros tratados termoquímicamente que presentan microgrietas y alteraciones durante los procesos de cementado gaseoso en caja

Acero 8620

Acero 4620



Picral 1000x
 Cementado durante 11 horas a 1,700°F (927°C) enfriado en el horno hasta 1,550°F (843°C) durante 2 horas y posteriormente templado en aceite a 380°F (193°C) el espécimen fue sujeto a un esfuerzo de compresión máximo de 600,000 libras sobre pulgada cuadrada (4137 MPA) por 11.4 millones de ciclos en prueba de fatiga. estructura reblandecida y desarrolladas microgrietas

Nital 500x
 Cementado con gas y templado muestra una alteración en su microestructura (tiras claras y grises) formada por un óxido de aluminio inclusión en forma de cuerda. La alteración la cual fue deformada es cerca de 0.010 pulgadas de radio en contacto con la superficie

Acero 8822H

Acero 4118H

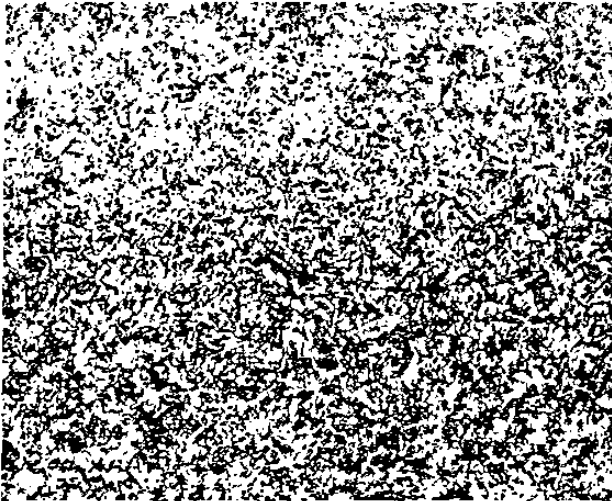


2% Picral 7500x
 Cementado durante 15 horas a 1,700°F (927°C) enfriado en el horno a 1,480°F (804°C) y mantenido 1 hora posteriormente templado en aceite a 350°F (177°C) y mantenido por 1 hora. El área de alteración mostrada es una replica micrográfica para altos aumentos. Las microgrietas rodeadas alteradas por inclusiones de bandas deslizadas en martensita

4% Nital 250x
 Barra cementada por 8 horas por medio gaseoso a (927°C) enfriada en aceite, calentada a 1,550°F (843°C) durante 1 hora y mantenido por 15 minutos en aceite a 340°F (171°C) La superficie completamente descarbonada (capa blanca) la estructura consiste en: la superficie de ferrita la zona de transición de ferrita superior martensita de bajo carbono y matriz de martensita revenida

Microestructuras que presentan algunos aceros 1012 después de tratamiento termoquímico de carbonitrurado

Acero 1012



Acero 1012



4% Nital

150x

Acero modificado (0.30% Ni, 0.30% Cr) rolado en frío con una capa carbonitrurada (en 3% de amoníaco, 15% de metano, residuo de gas endotermico) 1 hora a 1,550°F (843°C) y enfriado en aceite, pero no revenido. La estructura de la capa es excesivamente rica en carbono es descrita en la siguiente micrografía

4% Nital

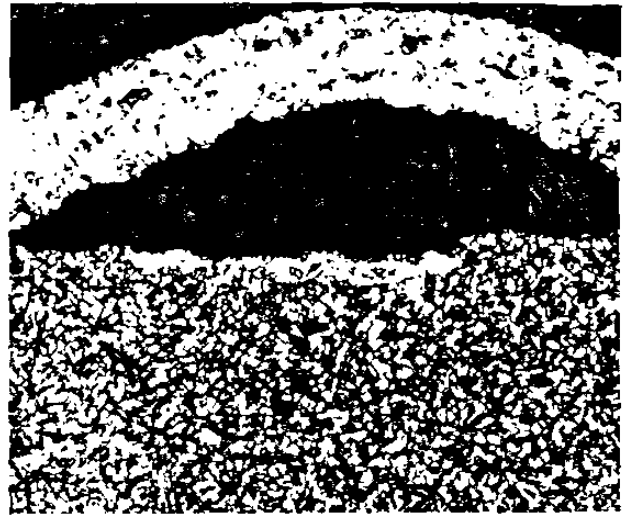
500x

Mismo acero que el anterior pero mas amplificado. La carbonitruración consiste en capa de martensita, austenita fina retenida, y martensita revenida así misma (narices negras). Capa efectiva con dureza de 50 Rockwell-C y 0.012 pulgadas, máxima dureza 66 Rockwell-C

Acero 1012



Acero 1012



No pulida, no atacada

200x

Mismo acero excepto que se utilizo un barrido de electrones en la micrografía de la fractura transversal de la ampolla. La ampolla es causada por la formación de hidrogeno biatómico gas adjunto e inclusiones no metálicas cerradas a la superficie

4% Nital

400x

Mismo acero que el anterior pero se encuentra pulido y atacado para revelar la microestructura de la capa carbonitrurada (martensita no revenida, austenita retenida, partículas de carburos y bainita) rodeando la ampolla.

Microestructuras de algunos aceros tratados termoquímicamente por cianurado y nitrurado gaseoso

Acero 1020

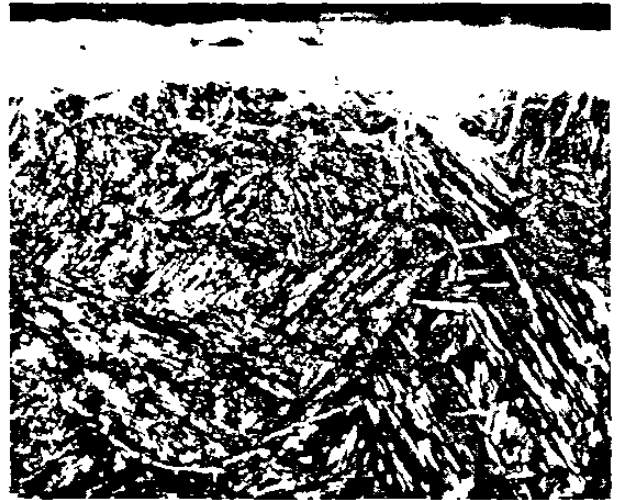


2% Nital
400x

100x

El acero fue cianurado en un baño de sales a 1,550°F (843°C) por 1 hora y enfriado en agua debido a los bajos aumentos se muestra la capa de transición y la estructura del corazón. La oscuro son impresiones de 500 gramos del indentador Tukon de microdureza espaciados 0.003 plg. convertidos a escala Rockwell-C la microdureza Tukon equivale en rango de 61 Rockwell-C en la capa a 25.5 Rocwell-C en el corazón

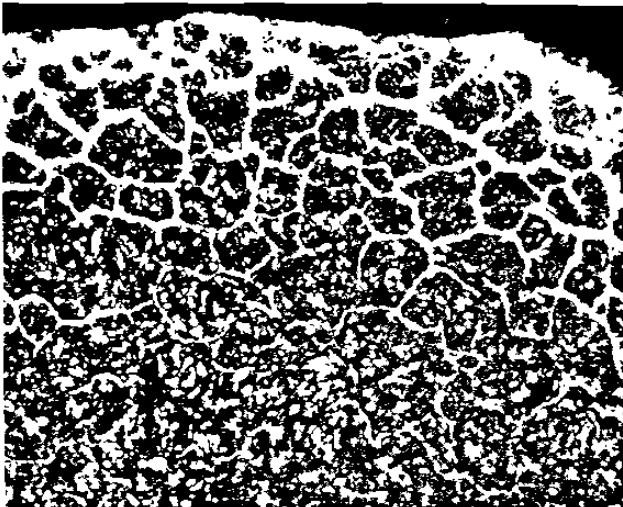
Acero AMS 6470



2% Nital

Acero procesado en condiciones como la anterior excepto que el tiempo de nitrurado fue 36 horas la profundidad de la capa blanca es de 0.0009 a 0.001 pulgadas la plaqueta nitruro de hierro puede ser la composición de la capa

Acero H13

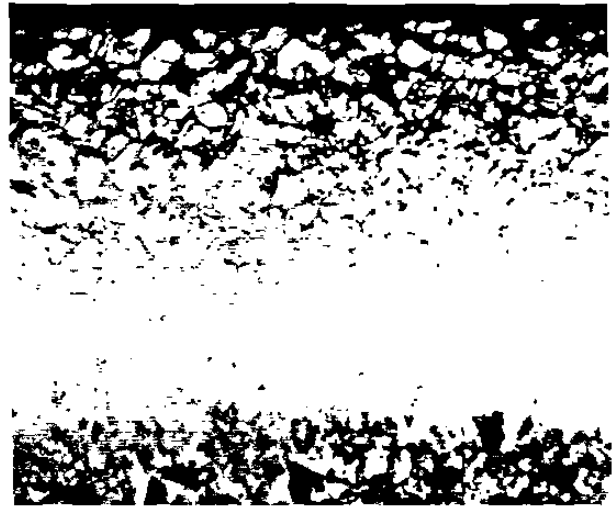


2% Nital
500x

300x

Fue templada y revenida la superficie fue activada por gas nitrurado a 1,890°F (1,032°C) en el vacío y enfriada en gas nitrógeno triplemente templado a 950°F (510°C) La profundidad de la capa de 60 Rocwell-C es de 0.0002 a 0.0005 pulgadas de profundidad. La red de los cuerpos de los granos es nitruro de hierro están presente a través de la capa de martensita

Acero 300 CVM



Cloruro férrico

Acero tratado en una solución a 1,500°F (816°C) la superficie activada por gas nitrador por 24 horas a 825°F (441°C) aparece nitruro de hierro como capa oscura

2.6 Microestructuras de fundiciones grises y hierros nodulares tratados por nitruración

Hierro gris clase 30

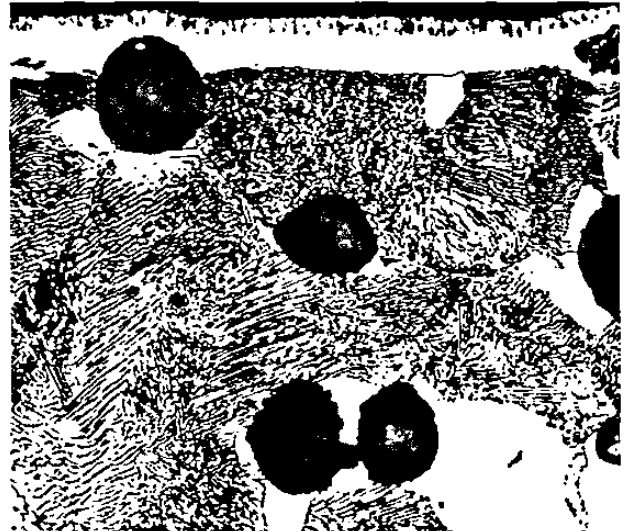


3% Picral
500x

500x

Nitrurado por baño de sales líquidas a 1060°F (571°C) por 3 horas y enfriado en agua. Las hojuelas de grafito son de tipo A en una matriz de perlita. La capa de nitruro de hierro (blanco) en la superficie
Nota - la microestructura evidentemente tiene nitrógeno que emigra a lo largo de las hojuelas de grafito

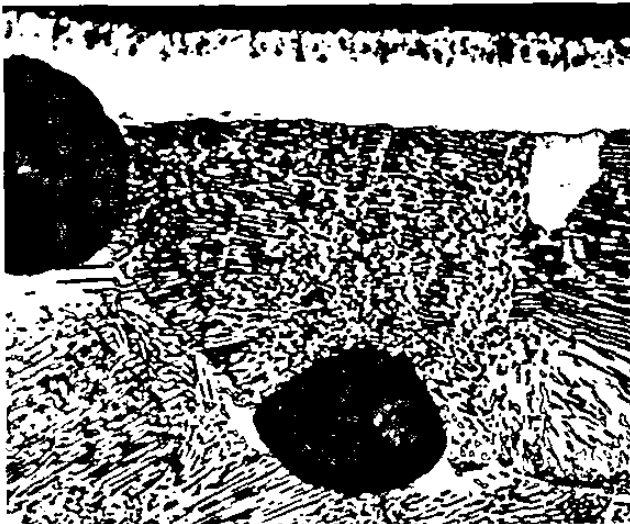
Hierro dúctil grado 80-55-06



3% Picral

Nitrurado por baño de sales líquidas a 1060°F (571°C) por 3 horas y enfriado en agua. La capa de nitruro de hierro (blanco) en la superficie con piel porosa. Nódulos de grafito en matriz de perlita y ferrita libre (constituyentes claros)

Hierro dúctil grado 80-55-06

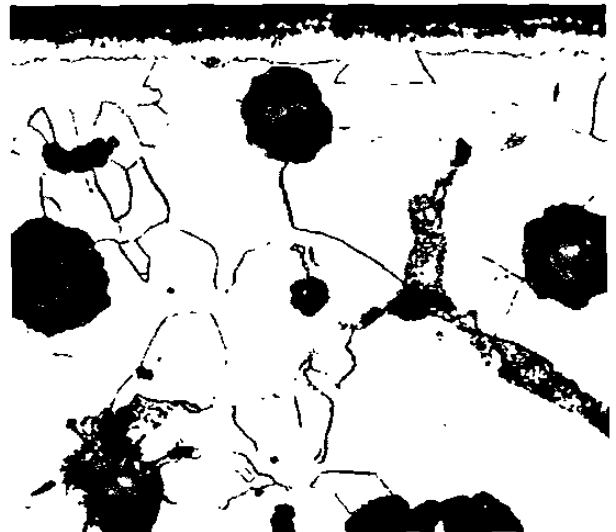


3% Picral
500x

1000x

Igual que la anterior pero los aumentos revelan detalles de los nodulos de grafito (esferoidales) La matriz perlitica (laminas alternadas con áreas claras de ferrita y cementita) y la piel porosa de la capa de nitruro de hierro

Hierro dúctil grado 65-45-12



3% Picral

Nitrurado por baño de sales líquidas a 1060°F (571°C) 3 y enfriado en agua. Presenta nódulos de grafito en matriz de ferrita (claros) con algo de perlita (grises irregulares), la capa de nitruro de hierro (blanco) en la superficie

CAPITULO III

RESUMEN

En este capítulo analizaremos los diferentes tratamientos denominados termoquímicos que nos modifican la composición química en la superficie de los aceros así como se analiza materiales cementantes sólidos, cementantes líquidos atmósferas cementantes gaseosas y finalmente atmósferas nitrurantes.

Algunas aplicaciones industriales requieren una superficie dura y resistente al desgaste llamada capa o región superficial y una relativamente suave y tenaz en su interior llamada parte interna, se analizan los métodos que cambian la composición química superficial del acero como son la carburización por la adición de carbono, la nitruración, por la adición de nitrógeno y la cianuración por la adición de carbono y de nitrógeno.

Cementación sólida. Se analizan algunos métodos para efectuar la cementación con materias sólidas, se señalan tres fases diferentes: 1) producción de carbono naciente en las proximidades del acero, 2) Absorción del carbono en la zona periférica del acero y 3) difusión del carbono hacia la zona central, también se marcan los principales inconvenientes de los cementantes sólidos.

Cementación líquida. Es un método de endurecimiento superficial en el hierro y el acero por calentamiento en un baño de cianuro líquido donde se genera la difusión del carbono en el hierro gamma, también se analiza tipos de baños como son de casco ligero y casco profundo, se analiza la penetración de carbono en acero ordinario y aceros aleados a diversas temperaturas mediante gráficas, así como penetración del carbono en aceros para tiempos y temperaturas variables.

Cementación gaseosa. Habiendo estudiado el papel tan importante que desempeña el óxido de carbono (CO) en la cementación con materias sólidas parece que bastaría colocar las piezas en presencia de ese gas a elevada temperatura para conseguir una capa endurecida. Sin embargo la práctica ha demostrado que de esta forma no se consiguen buenos resultados y que para obtener capas cementadas de composición y espesor homogéneos es necesaria la presencia de hidrocarburos en la atmósfera carburante además del óxido de carbono. Se presentan principales gases utilizados como superficie carbonosa en gases carburizantes así como principales variables de proceso.

Nitruración gaseosa. Es un procedimiento de endurecimiento superficial en el que por absorción de nitrógeno se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de durezas de acero, se analizan las principales ventajas de este proceso así como la teoría de la nitruración. Se estudia el diagrama hierro-nitrogeno como base de este proceso.

Capítulo III

Tratamientos Termoquímicos

3.1 Introducción

Numerosas aplicaciones industriales requieren una superficie dura y resistente al desgaste, llamada *capa o región superficial*, y una relativamente suave y tenaz en su interior, llamada *parte interna*. Existen métodos de tratamientos termoquímicos.

- 1.- Carburización
- 2.- Nitruración
- 3.- Cianuración o carbonitruración,

Los métodos que cambian la composición química superficial del acero son: la carburización por la adición de carbono, la nitruración por la adición de nitrógeno y la cianuración por la adición de carbono y de nitrógeno.

Carburización

Carburización. ° Este es el mas viejo y uno de los mas baratos métodos de endurecimiento superficial. Un acero de bajo carbono, generalmente como de 0.20% de carbono o menos, se coloca en una atmósfera que contiene grandes cantidades de conocido de carbono. La temperatura de carburización usual es de 1700°F a esta temperatura tiene lugar la siguiente reacción.



Donde $\text{Fe}_{(c)}$ representa el carbono disuelto en la austenita. La máxima cantidad de carbono que puede disolverse en austenita a 1700°F esta señalada en el diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro en la línea Acm. Por tanto rápidamente forma una capa superficial de alto carbono, (como del 1.2%). Como la parte interna es de bajo contenido de carbono los átomos de carbono que tratan de alcanzar el equilibrio empezaran a difundir hacia adentro.

La rapidez de difusión de carbono en austenita, a una temperatura dada, depende del coeficiente de difusión y el gradiente de concentración de carbono.

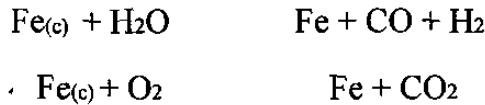
En condiciones de operación estándar y conocidas, con la superficie a una concentración fija de carbono, se puede predecir la forma del gradiente de carbono, con razonable exactitud, como una función del tiempo transcurrido. Después de que la difusión ha tenido lugar la cantidad de tiempo requerida, dependiente de la profundidad deseada para la parte externa, la pieza se saca del horno y se enfría. Si la pieza se enfría en horno y se examina microscópicamente, el gradiente de carbono será visible en el cambio gradual de la estructura.

En la parte superficie está la zona hipereutectoide de perlita con una red blanca de cementita, seguida sólo por la zona eutectoide de perlita y finalmente la zona hipoeutectoide de perlita y ferrita, con la cantidad de ferrita aumentando hasta que se alcanza la parte interna. Esto se ilustra en la figura 3.1.1. La profundidad de la superficie dura puede medirse

microscópicamente con un ocular de micrómetro. El gradiente de carbono y la profundidad de la superficie dura, pueden determinarse experimentalmente colocando la pieza en un torno maquinando muestras para análisis químico, con incrementos de 0.005 pulg hasta que se alcanza la parte interna. Se hace el análisis para determinar el contenido de carbono y los resultados pueden graficarse como en la figura 3.1.2. La figura 3.1.2 y la tabla II muestran la relación de tiempo y temperatura con la profundidad de la parte externa.

La ecuación de carburización dada anteriormente, $Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_{(c)} + CO_2$, es reversible y puede proceder a la izquierda, eliminando carbono de la capa superficial si el acero se calienta en una atmósfera que contiene dióxido de carbono (CO_2). Esto se llama descarburización.

Otras posibles reacciones de descarburización son



La descarburización es un problema principalmente con los aceros al alto carbono y los aceros para herramienta. La superficie, carente de carbono, no se transformará a martensita en un endurecimiento ulterior, y el acero se dejará con una cubierta suave. Para muchas aplicaciones con herramientas, los esfuerzos a que se somete la pieza en servicio son máximos en la superficie o cerca de ella, de manera que la descarburización es peligrosa.

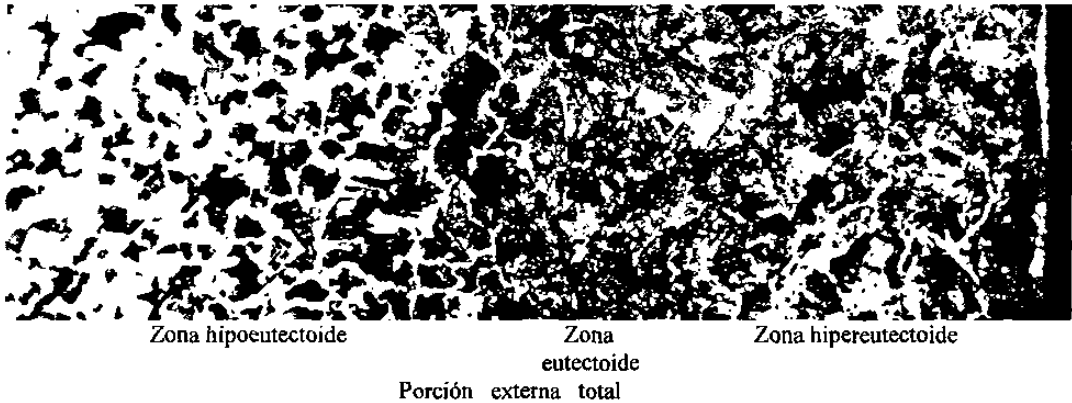


Figura 3.1.1 Acero con 0.20% de carbono, carburizado por empaquetamiento a 1700°F durante 6 horas y enfriado en el horno, atacado químicamente en nital al 2% 30x

La figura 3.1.4 muestra la descarburización en la superficie de un acero al alto carbono. La descarburización puede prevenirse mediante una atmósfera endotérmica de gas en el horno, a fin de proteger la superficie del acero del oxígeno, del dióxido de carbono y del vapor de agua. Una atmósfera endotérmica de gas se prepara haciendo reaccionar mezclas relativamente ricas de aire y de gas hidrocarburo (por lo general, gas natural) en un generador calentado externamente en presencia de un catalizador de níquel. El gas producido consta de 40% de nitrógeno, 40% de hidrógeno y 20 % de monóxido de carbono.

La carburización comercial puede llevarse a cabo por medio de *material sólido de carburización*, gas rico en carbono, y carburización por líquido. En el primer proceso indicado, las fuerzas están rodeadas por un compuesto de carburización en un recipiente cerrado.

El recipiente se calienta a la temperatura adecuada durante la cantidad de tiempo requerida, y luego se enfría con lentitud.

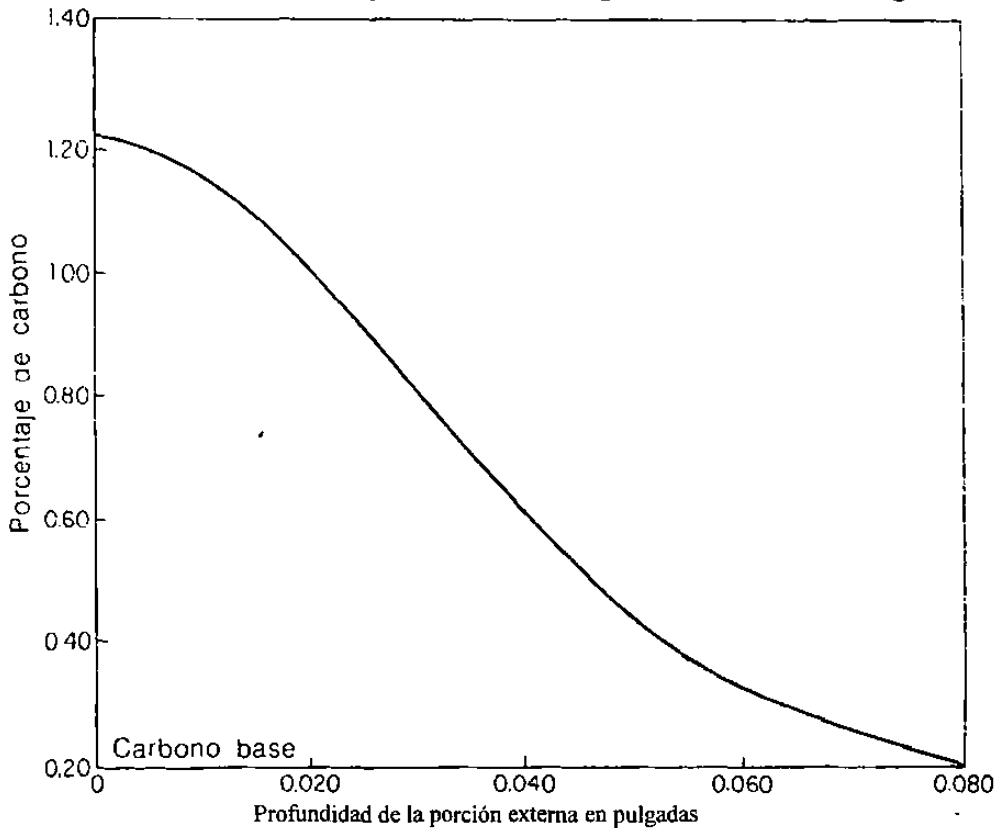


Figura 3.1.2 Gradiente de concentración de carbono en un acero carburizado con 0.080 pulgadas de porción externa total

Este es esencialmente un método por "lote" y no se presta para alta producción. Los compuestos comerciales de carburización suelen constar de carbón vegetal de madera dura, coque y aproximadamente 20% de carbonato de bario como activador. El compuesto de carburización está en la forma de gruesas partículas o trozos, así que cuando la cubierta se sella sobre el recipiente, habrá dentro de éste suficiente aire atrapado para formar monóxido de carbono.

Las principales ventajas de este método son que no se requiere una atmósfera preparada y es eficiente y económico para el procesamiento individual de pequeñas cantidades de piezas, o de grandes piezas masivas. Las desventajas son: que no es muy adecuado para producir parte delgadas superficiales carburizadas que deben controlarse a tolerancias reducidas; no puede proporcionar el estrecho control del carbono superficial que se obtiene mediante el método de carburización por gas;

Las piezas no pueden templarse directamente desde la temperatura de carburización, y se consume excesivo tiempo al calentar y enfriar la carga. Debido a la variación inherente en la profundidad de la región superficial y al costo de los materiales de carburización, este método por empaquetamiento no se utiliza en piezas que requieren una profundidad de la región externa inferior a 0.030 pulg y cuando las tolerancias son de por lo menos 0.010 pulg.

La carburización *por gas* puede ser por lotes o continua y se presta mejor para producir en gran escala tratamientos térmicos. El acero se calienta en contacto con monóxido de carbono y/o un hidrocarburo, puede ser metano, propano, gas natural o hidrocarburo fluido vaporizado.

TIEMPO, <i>H</i>	TEMPERATURA, °F					
	1500	1550	1600	1650	1700	1750
1	0.012	0.015	0.018	0.021	0.025	0.029
2	0.017	0.021	0.025	0.030	0.035	0.041
3	0.021	0.025	0.031	0.037	0.043	0.051
4	0.024	0.029	0.035	0.042	0.050	0.059
5	0.027	0.033	0.040	0.047	0.056	0.066
6	0.030	0.036	0.043	0.052	0.061	0.072
7	0.032	0.039	0.047	0.056	0.066	0.078
8	0.034	0.041	0.050	0.060	0.071	0.083
9	0.036	0.044	0.053	0.063	0.075	0.088
10	0.038	0.046	0.056	0.067	0.079	0.093
11	0.040	0.048	0.059	0.070	0.083	0.097
12	0.042	0.051	0.061	0.073	0.087	0.102
13	0.043	0.053	0.064	0.076	0.090	0.106
14	0.045	0.055	0.066	0.079	0.094	0.110
15	0.047	0.057	0.068	0.082	0.097	0.114
16	0.048	0.059	0.071	0.084	0.100	0.117
17	0.050	0.060	0.073	0.087	0.103	0.121
18	0.051	0.062	0.075	0.090	0.106	0.125
19	0.053	0.064	0.077	0.092	0.109	0.128
20	0.054	0.066	0.079	0.094	0.112	0.131
21	0.055	0.067	0.081	0.097	0.114	0.134
22	0.056	0.069	0.083	0.099	0.117	0.138
23	0.058	0.070	0.085	0.101	0.120	0.141
24	0.059	0.072	0.086	0.103	0.122	0.144

Tabla 3.1 Profundidad de la porción externa en pulgadas al carburizar

La práctica comercial es utilizar gas transportador, como el obtenido con un generador endotérmico y enriquecerlo con uno de los gases de hidrocarburos.

Previamente se mencionó que las piezas carburizadas a menudo tendrán una delgada capa de alto carbono. Hay dos razones por las que puede evitarse esta capa hipereutectoide:

a) si la pieza se enfría lentamente desde la temperatura de carburización, se formará una red proeutectoide de cementita en las fronteras de grano. A endurecimiento subsecuente, sobre todo si el acero se calienta por debajo de la línea A_{cm} , se conservará alguna cementita de frontera de grano en la pieza terminada, lo cual es una causa frecuente de falla.

b) El contenido de carbono hipereutectoide en la superficie aumentará la cantidad de austenita retenida; por tanto, si el acero se alea altamente, el contenido de carbono de la parte externa no deberá ser mayor que el contenido eutectoide de 0.80% de carbono. Empleando un periodo de difusión, durante el cual el gas se desvía pero la temperatura se mantiene, la carburización por gas permite que el carbono

superficial se reduzca a cualquier valor deseado. El empleo del *periodo de difusión* también produce un trabajo mucho más limpio por disipación del depósito de carbón (hollín) durante el tiempo que el gas no fluye.

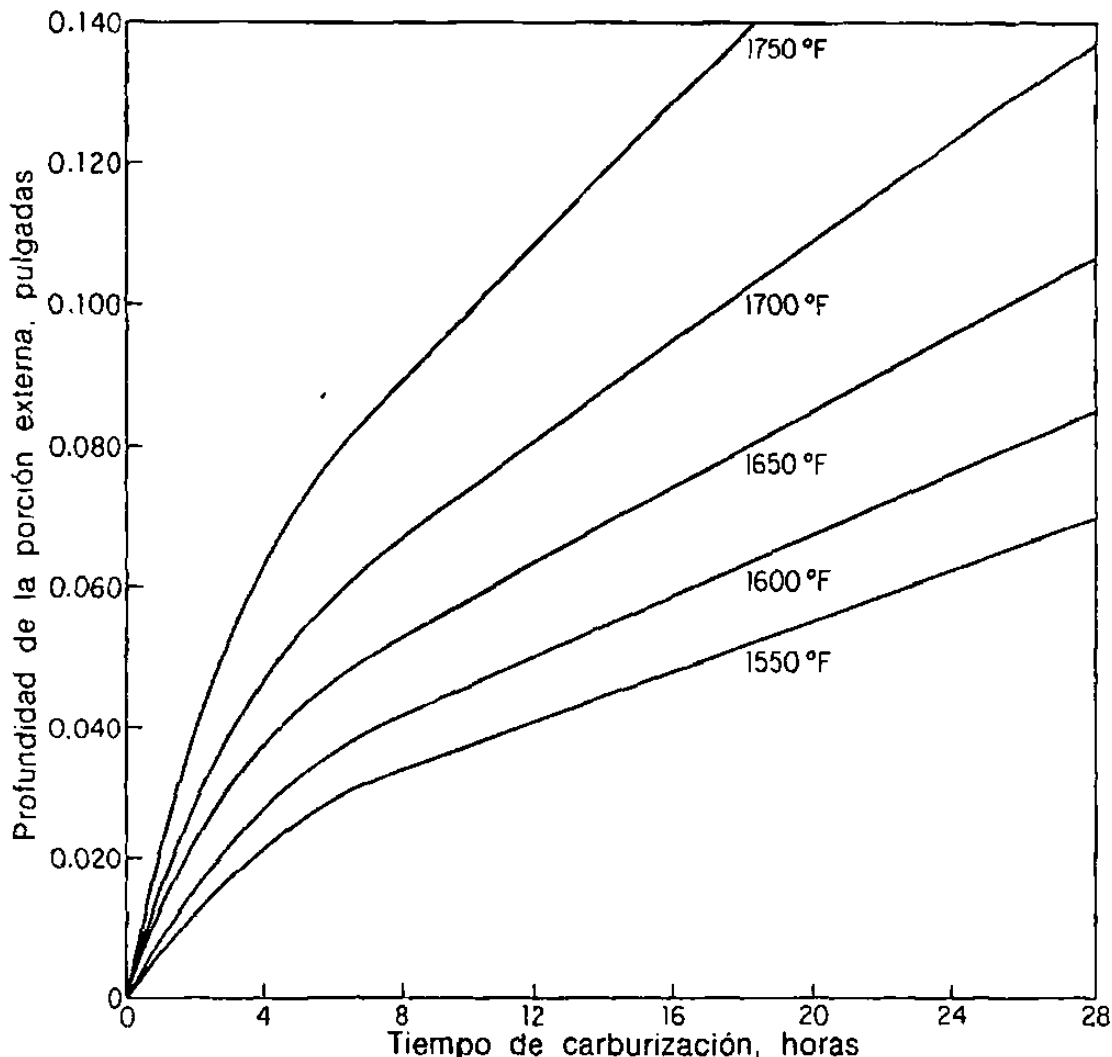


Figura 3.1.3 Relación del tiempo y la temperatura con la profundidad de la porción externa

La carburización por gas permite un manejo más rápido por templado directo, menor costo, alrededores, más limpios, más estrictos control de calidad, y mayor flexibilidad de operación en comparación con la carburización por material sólido.

La carburización por *liquido* es un método de endurecimiento superficial del acero que consiste en colocar a éste en un baño de cianuro fundido, de modo que el carbono se difundirá desde el baño hacia adentro del metal y producirá una parte superficial, comparable a la resultante de la carburización por empaque o por gas.

La carburización por líquido puede distinguirse de la cianuración por el carácter y composición de la superficie dura producida. Las superficies endurecidas con cianuro son más altas en nitrógeno y más bajas en carbono; lo inverso es cierto para las superficies endurecidas por carburización por líquido. Las superficies endurecidas con cianuro pocas veces tienen una profundidad mayor de 0.010 pulg; los baños de carburización por líquido permiten

endurecidos superficiales tan profundos como 0.250 pulg. Los baños de sal a baja temperatura (endurecimiento superficial ligero) generalmente tienen un contenido de cianuro de 0.20% y operan entre 1550 y 1650 °F. Éstos se adaptan mejor para profundidades de parte superficial hasta de

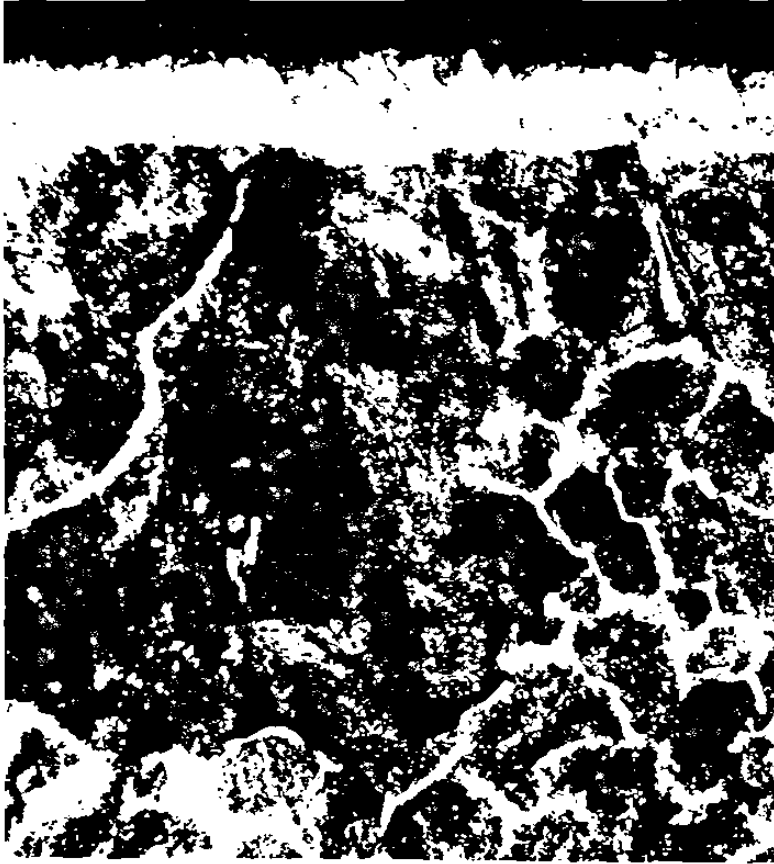


Figura 3.1.4 Capa descarbonizada de ferrita sobre la superficie de un acero al alto carbono recocido. Atacado químicamente en nital al 2% 200x

0.030 pulg. Los baños de sal a altas temperaturas (endurecimiento superficial profundo) suelen tener un contenido de cianuro de 10% y operan entre 1650 y 1750 °F

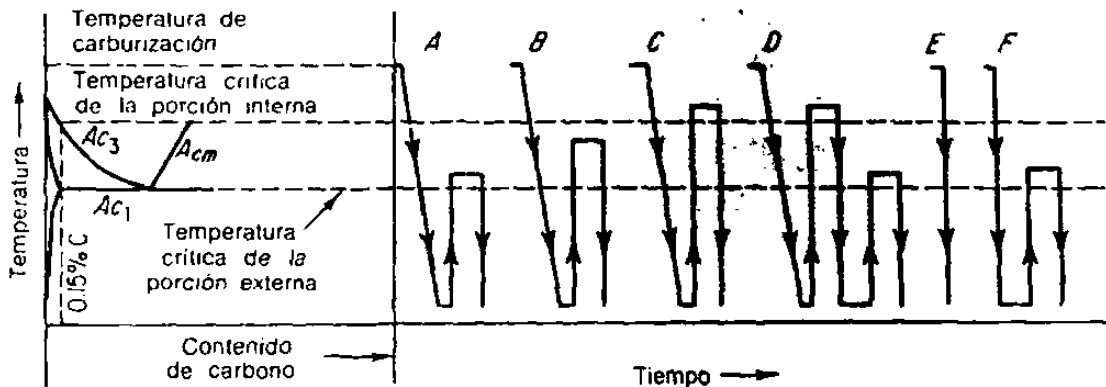


Figura 3.1.4 Diversos tratamientos térmicos para aceros carburizados

Además, se utilizan para producir endurecimientos superficiales de 0.030 y 0.120 pulg, aunque es posible alcanzar 0.250 pulg. En general, la carburización por líquido se adapta mejor a piezas de pequeño y mediano tamaños, ya que las piezas grandes son difíciles de procesar en baños de sal. Las ventajas de la carburización por líquido son: a) eliminación de oxidación y problemas de hollín, b) profundidad de la superficie dura y contenido de carbono uniformes, c) gran rapidez de penetración, y d) el hecho de que el baño proporcione alta conductividad térmica, reduciendo de ese modo el tiempo requerido para que el acero alcance la temperatura de carburización. Las desventajas son: a) las piezas deben lavarse totalmente después del tratamiento para prevenir la herrumbre; b) es necesaria una revisión y un ajuste regulares de la composición del baño, a fin de obtener profundidad uniforme de la superficie endurecida; c) algunas formas no pueden manejarse porque flotan o llevan consigo cantidades excesivas de sal, y d) las sales de cianuro son venenosas y requieren cuidadosa seguridad.

Tratamiento térmico después de la carburización

Como el acero se carburiza en la región de austenita, el templeado directo desde la temperatura de carburización en la región de austenita, el templeado directo desde la temperatura de carburización endurecerá tanto la parte externa como la interna si la rapidez de enfriamiento es mayor que la rapidez crítica de enfriamiento. El templeado directo de los aceros de grano grueso suele dar lugar a fragilidad y distorsión, de manera que este tratamiento sólo debe aplicarse a aceros de grano fino. Los aceros aleados rara vez se utilizan en la condición de templeado sin tratamiento térmico ulterior, debido a la gran cantidad de austenita retenida en la parte superficial endurecida. La figura 3.1.5 muestra una representación diagramática de varios tratamientos de endurecimiento para aceros carburizados, junto con las propiedades de la superficie externa endurecida y el centro de la pieza.

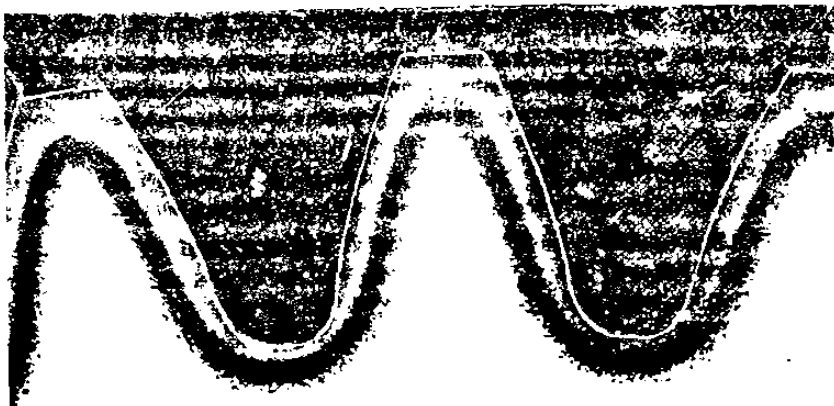


Figura 3.1.6 Engrane apropiadamente carburizado endurecido y revenido. Atacado químicamente en nital 2% 7x

Cuando una pieza carburizada se endurece, la parte exterior aparecerá como una zona de martensita clara, seguida por una zona más oscura de transición (fig. 3.1.6).

La parte exterior dura o efectiva se mide desde la orilla exterior hasta la parte media de la zona oscura. De la naturaleza del gradiente de carbono, la parte superficial dura contiene la

porción de la parte superficial superior al 0.40% de carbono y es aproximadamente igual a las dos terceras partes de la superficie endurecida total.

Mediciones transversales de dureza pueden utilizarse para obtener la profundidad de la superficie endurecida efectiva, ya que la parte media de la zona transversal es de aproximadamente Rockwell C50.

Cianuración y carbonitruración

Las superficies externas endurecidas contienen carbón y nitrógeno se producen en baños líquidos de sal (cianuración) o mediante atmósferas gaseosas (carbonitruración).

Las temperaturas utilizadas suelen ser inferiores a las empleadas en carburización, estando entre 1400 y 1600°F. La exposición es por un tiempo más corto, y se producen partes externas más delgadas, hasta de 0.010 pulg para cianuración y hasta de 0.030 pulg para carbonitruración.

En la *cianuración*, la proporción de nitrógeno y carbono en la superficie dura externa producida por un baño de cianuro depende de la composición y de la temperatura en el baño, siendo esta última la más importante. El contenido de nitrógeno es más alto en los baños que funcionan en el extremo inferior del intervalo de temperatura que en aquellos que operan en el extremo superior del intervalo. Generalmente, el contenido de carbono de la superficie endurecida es menor que el producido por carburización, variando desde 0.5 hasta 0.8%.

La superficie endurecida también contiene hasta 0.5% de nitrógeno; por ende, las superficies endurecidas resistentes al corte por lima pueden obtenerse en el templado, a pesar del relativamente bajo contenido de carbono. Se dispone de diversas mezclas de cianuros para el baño que se emplean los baños de más altas concentraciones de cianuro de sodio, la mezcla que más se utiliza está formada por 30 % de cianuro de sodio, 40% de carbonato de sodio y 30 % de cloruro de sodio.

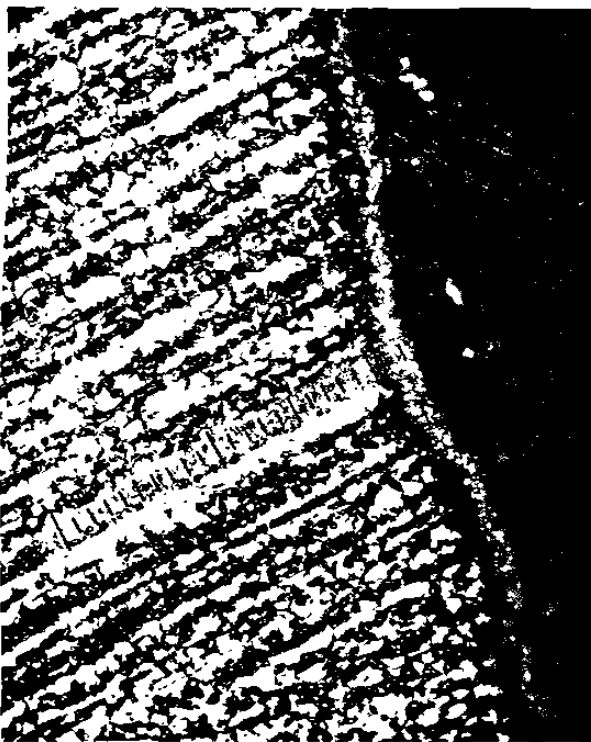
Esta mezcla tiene un punto de fusión del 140°F y se conserva estable, en condiciones de operación continuas. Los agentes activos de endurecimiento de los baños de cianuración, carbono y nitrógeno no se producen directamente del cianuro de sodio (NaCN). El cianuro fundido se descompone ante la presencia de aire en la superficie del baño, para producir cianuro de sodio (NaNCO), el cual a su vez se descompone como sigue:



El contenido de carbono de la superficie endurecida desarrollado en el baño de cianuro aumenta al incrementarse la concentración de cianuro del baño, proporcionando de este modo considerable flexibilidad. Un baño que opera a 1550°F y contiene aproximadamente 3% de cianuro puede utilizarse para restablecer el carbono en los aceros descarbonados, mientras que un baño con 30% de cianuro a la misma temperatura desarrollará una capa dura de 0.005 pulg en la superficie de un acero al 0.65 % de carbono en 45 min. Este proceso es particularmente útil para partes que requieren una porción externa muy dura y delgada, como tornillos, pequeños engranes, tuercas y pernos. Las principales desventajas de la cianuración son las mismas que las mencionadas para la carburización por líquido.

La carbonitruración es un proceso de endurecimiento superficial en el cual un acero se calienta en una atmósfera gaseosa de tal composición que el carbono y el nitrógeno se absorben

simultáneamente. El término carbonitruración es engañoso porque implica un proceso de nitruración modificado. Realmente, la carbonitruración es un cambio de carburización, y el término *nitrocarburización* sería más descriptivo. El proceso también se conoce como *cianuración seca* y *cianuración por gas*. Las atmósferas utilizadas en carbonitruración generalmente incluyen una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y monóxido de carbono producido en un generador endotérmico, como en el de carburización por gas. El gas portador se proporciona al horno bajo presión positiva a fin de prevenir infiltración por aire y actúa como una sustancia inerte para los gases activos (hidrocarburos y amoníaco), haciendo de este modo que el proceso sea más fácil de controlar. El gas enriquecedor es generalmente propano o gas natural y constituye la principal fuente para el carbono añadido a la superficie. A la temperatura del horno, al amoníaco añadido (NH_3) se disocia para proporcionar el nitrógeno a la superficie del acero. La figura 3.1.7 muestra una superficie externa carbonitrurada, obtenida al calentar un acero C1213 en una atmósfera amoníaco-propano a 1550°F durante 20 min, seguida de un templado en aceite.



Cada división del ocular de micrómetro es de 0.001 pulg y la profundidad efectiva de la superficie dura, medida hasta la parte media de la zona oscura de transición, es de aproximadamente 0.0025 pulg.

Figura 3.1.7 Porción externa carbonitrurada sobre un acero AISI C1213 Calentado a 1550°F durante 20 minutos en una atmósfera de amoníaco-propano y luego templado en aceite. Atacado químicamente en nital 2% 125x profundidad de la porción externa aprox. 0.0025 pulgadas

La presencia de nitrógeno en la austenita responde de las principales diferencias entre carbonitruración y carburización. La austenita carbono-nitrógeno es estable a temperaturas inferiores y permite rapidez de enfriamiento más lentas que la carburización en la operación de endurecimiento. Debido al tratamiento a menor temperatura y al templado en aceite en vez de templado en agua, se reduce la distorsión y hay menos peligro de que haya fisuras. Como el nitrógeno aumenta la capacidad de endurecimiento, la carbonitruración de aceros al carbono menos caros para muchas aplicaciones dará lugar a propiedades equivalentes a las que se obtienen en los aceros aleados carburizados por gas. También se ha encontrado que la resistencia de una superficie carbonitrurada al reblandecimiento durante el revenido es marcadamente mayor que la de una superficie carburizada.

Nitruración

Este proceso para endurecimiento superficial de aceros aleados en una atmósfera constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoníaco y amoníaco disociado.

La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción de nitrógeno con ciertos elementos de aleación. Aunque, a temperaturas adecuadas y con la atmósfera apropiada, todos los aceros son capaces de formar nitruros de hierro, los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contienen uno o más de los principales elementos de aleación que forman el nitruro. Estos elementos son aluminio, cromo y molibdeno. El nitrógeno debe proporcionarse en la forma atómica o naciente, en tanto que el nitrógeno molecular no reaccionará.

Las piezas que se nitrurarán se colocan en un recipiente hermético, a través de el cual se proporciona continuamente la atmósfera de nitruración, mientras que la temperatura se eleva y mantiene entre 925 y 1050°F. El ciclo de nitruración es muy largo, dependiendo de la profundidad de la superficie dura deseada. Como se muestra en la figura 3.1.8, un ciclo de 60 hr dará lugar a una profundidad de la superficie dura de aproximadamente 0.024 pulg a 975 ° F.

Una superficie endurecida por nitruración consta de dos zonas distintas. En la zona exterior, los elementos que forman el nitruro, incluyendo el hierro, se han convertido en nitruros.

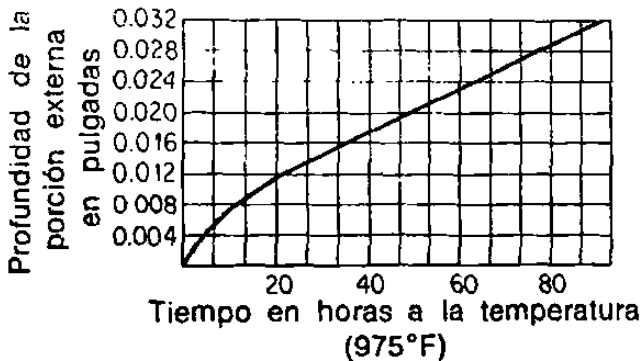


Figura 3.1.8 Profundidad de la porción externa contra tiempo a 975°F

Esta región, que varía en espesor hasta un máximo de unos 0.002 pulg, comúnmente se conoce como *capa blanca*, sólo los nitruros aleados se han precipitado. Una microestructura típica, ilustrada en la figura 3.1.9,

muestra la capa blanca y la región externa del nitruro que está por debajo. La estructura de la parte central, de color más claro, puede verse por debajo de la superficie externa nitrurada.

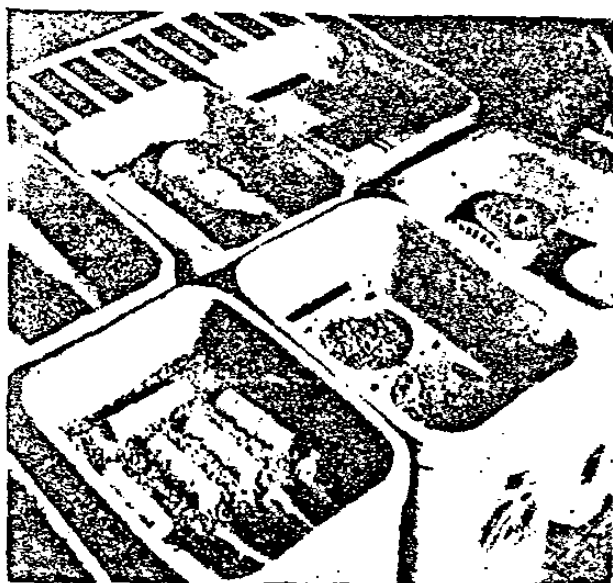
3.2 Cementación Sólida

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastantes uniformes en toda la masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste y a la penetración, y el núcleo central muy tenaz, para poder soportar los choques a que están sometidas. Los procedimientos más usados en la actualidad para conseguir estas características, gran dureza y mucha tenacidad, al parecer opuestas entre sí, son los siguientes: la cementación, la cianuración, la carbonitruración, la nitruración, la sulfurización, el temple local, el depósito por soldadura de delgadas capas superficiales de aceros de elevado contenido en carbono y el cromato duro.

La cementación, que es el más antiguo de todos esos procedimientos de endurecimiento superficial, consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante, y manteniendo todo el conjunto, durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Luego se templen las piezas y quedan con gran dureza superficial.

Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementantes gaseosos.

Se emplean acero aleados y sin aleación, de bajo contenido en carbono, generalmente de 0,08 a 0,25% de C y excepcionalmente algunas veces se cementan también aceros hasta de 0,40 % de C.



Piezas preparadas para cementar en cajas

el alma o núcleo central y la periferia o capa cementada, existiendo entre ellas otra tercera zona de transición de menor importancia (fig. 3.2.1).

La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850°C y 1.000°C, siendo las temperaturas próximas a 900°C las más utilizadas.

En el proceso de cementación se pueden distinguir dos etapas distintas: 1.ª absorción del carbono por el acero, y 2.ª mejoramiento de características por medio de tratamientos térmicos adecuados

La cantidad y distribución del carbono absorbido por las piezas depende:

1.º De la composición del acero sometido a la cementación. 2.º De la naturaleza de la substancia cementante, y 3.º De la temperatura y de la duración de la cementación.

Una pieza después de cementada se puede considerar compuesta por dos zonas principales de composición química diferente;

Por quedar después de la cementación, la capa exterior con un alto contenido en carbono y el corazón con la composición inicial, es posible obtener luego gran dureza en la periferia y alta tenacidad en el núcleo. Pero, como sólo con la cementación, las piezas no adquieren esas propiedades, es necesario darles después unos tratamientos térmicos adecuados. Después de la cementación, la periferia a pesar de tener un elevado contenido en carbono, está todavía relativamente blanda y el núcleo central, aun siendo de muy bajo contenido en carbono, puede ser frágil por tener la estructura muy grosera, por haber permanecido el acero durante mucho tiempo a alta temperatura.

Como la periferia y el núcleo central de las piezas cementadas son de distinta composición, necesitarán diferentes tratamiento, pero como ambas son inseparables, esos tratamientos deberán ser de tal naturaleza, que actúen favorablemente sobre las dos partes, o que sí favorecen a una, sean lo menos desfavorables para la otra.

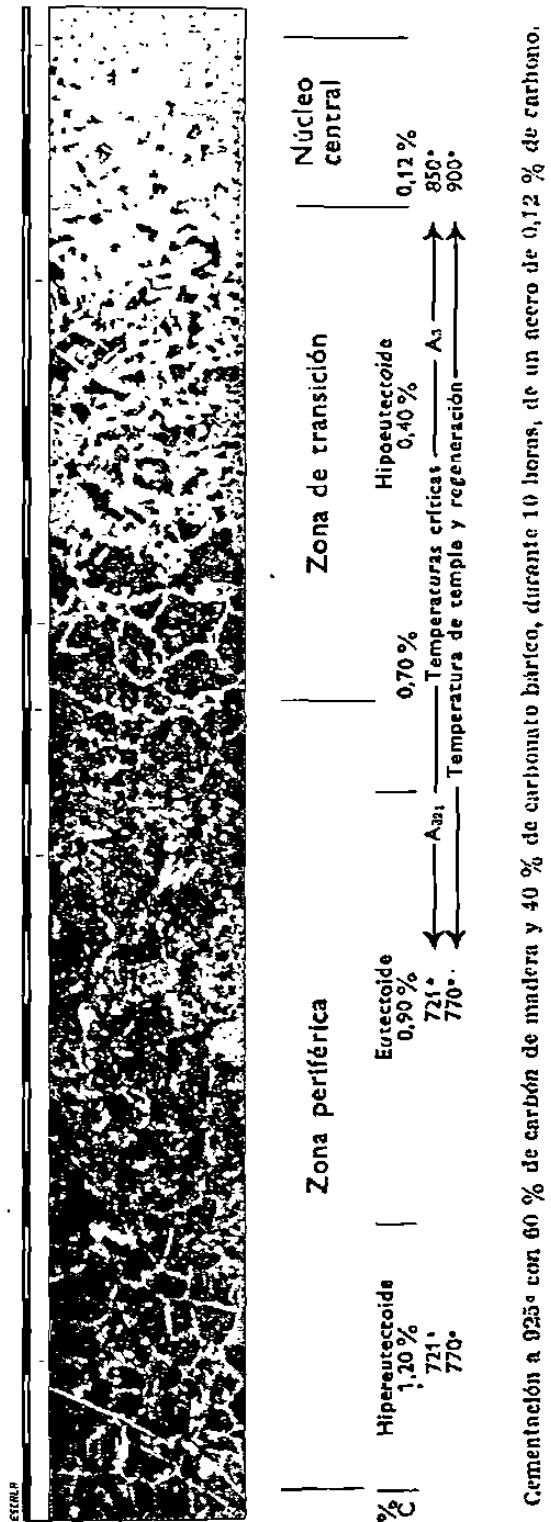
Cementación a 925°C con 60% de carbón de madera y 40% de carbonato bórico, durante 10 horas, de un acero de 0,12% de carbono.

En este capítulo estudiaremos también la cianuración y la carbonitruración porque, lo mismo que la cementación, en esos procesos hay un notable aumento del contenido en carbono en la periferia de las piezas.

Sin embargo, estos tres tratamientos se diferencian porque en los dos primeros el acero absorbe además de carbono cierta cantidad de nitrógeno, que se combina formando nitruros, que contribuyen también a que se consiga gran dureza en la superficie de las piezas.

Capa cementada Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la

cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero y recibe el nombre de capa dura la zona superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 58 a

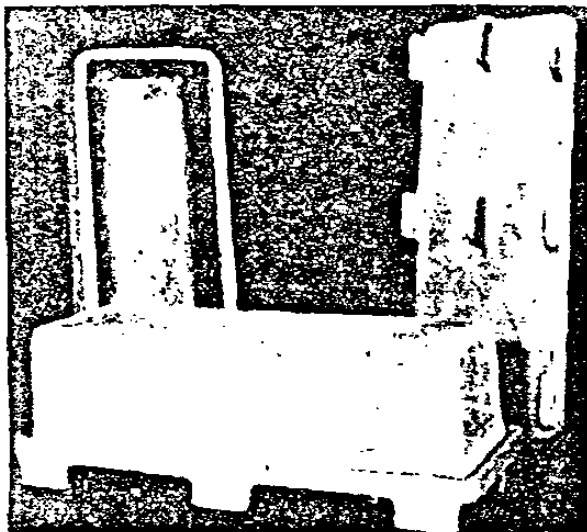


Cementación a 925° con 60 % de carbón de madera y 40 % de carbonato bórico, durante 10 horas, de un acero de 0,12 % de carbono.

Figura 3.2.1 Zonas de cementación

60 Rockwell-C., y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a 0,50-0,80 % de C.

Aunque de unos casos a otros hay bastantes diferencias, se puede considerar que en la mayoría de las piezas cementadas el espesor de la capa dura varía de la cuarta parte a la mitad (0,25 a 0,5) de la profundidad de la capa cementada.



**Cajas de cementar de acero refractario
al calor 25% de Cr y 20% de Ni**

A veces en lugar de hacer referencia a la profundidad de la capa cementada señala según preferencias la capa con carbono superior a 0,3 o 0,5% de carbono (fig. 3.2.5). Esto se hace porque en ocasiones ese espesor es caso aproximadamente el de la capa dura.

Conviene tener en cuenta todo esto al estudiar espesores de capa cementada, capa dura, etc.

Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos:

1.º Capas delgadas con menos de 0,50

mm de espesor de cementación. Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas deben de utilizarse siempre sin rectificado posterior.

2º Capas medias de 0,50 a 1,50 mm. Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos o gaseosos, con acero al carbono, débilmente aleados o de alta aleación.

3º Capas de gran espesor, superiores a 1,50 mm. Son obtenidas, generalmente, por cementación con materiales sólidos y con cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje, que suelen fabricarse con capas cementadas de 3 a 4 mm son cementadas con gases.

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, conviene que el contenido en carbono de la capa cementada no pase de 1% y debe procurarse que la parte periférica de la pieza después de rectificadas, queda aproximadamente con 0,8 a 0,9 % de carbono, con lo que se obtienen en el temple durezas de 62 a 65 Rockwell-C. Siempre conviene obtener durezas superiores a 60 Rockwell-C. Siempre conviene obtener durezas en que la lima ya no marca al acero.

Cuando el contenido en carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0,90% de carbono, suelen aparecer redes de cementita o de carburos que pueden hacer frágil a la capa cementada y con tendencia a descascarillarse. En estos casos conviene dar a las piezas después de la cementación un recocido de difusión a 800°-900°C en una atmósfera o baño apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se

uniformiza bastante el contenido en carbono y se evitan posibles desconchamientos en las piezas cementadas.

Cementación con materias sólidas

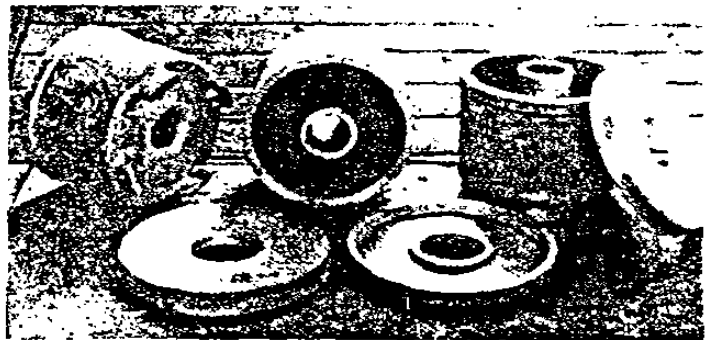
Se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. La más empleadas suelen ser el carbón vegetal, el negro animal, huesos calcinados, cuero, cok, etc., mezclados con carbonatos de bario, calcio y sodio.

El carbón sólo, no se emplea porque con él no suelen conseguir concentraciones de carbono en la periferia del acero, superiores a 0,65% de C. Mezclándolo en cambio con carbonatos alcalinos o alcalino-térreos, se alcanza hasta 1,20 % de carbono.

Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fue la mezcla Carón preparada con 60 % de carbón vegetal y 40 % de carbonato bórico. El carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con el carbonato bórico en polvo. Recientemente se ha comprobado que se puede disminuir el contenido de carbonato bórico, obteniéndose muy buenos resultados con porcentajes de 10 a 15 %, sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio de 8%, el rendimiento disminuye ya notablemente. Se suele añadir también un 20% de cok como diluyente, porque aumenta la velocidad de penetración del calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de las cajas y disminuye el coste de la mezcla. Como activadores también se suelen emplear el carbonato cálcico y el carbonato sódico. Es importante que el carbón esté bien seco, porque pequeñas trazas de humedad, pueden dar lugar a decarburaciones locales y luego a puntos blandos en las piezas después del último temple.

Durante mucho tiempo se creyó que la cementación de los aceros extra-dulces se verificaba, al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior.

Pero se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se verifica siempre por medio de los gases que se desprenden al calentarse las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el óxido de carbono el principal agente carburante.

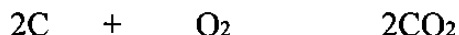


Cajas de acero refractario al calor para cementar engranajes

Si se coloca un trozo de acero rodeado de materias carburantes y se calienta a 925°C en el vacío, de forma que no haya gases a su alrededor, el acero no absorbe carbono. Para que la cementación se verifique, ha de ponerse el carbono en contacto con la superficie del acero caliente en un estado adecuado para que se verifique la absorción. El éxito de la cementación, depende en gran parte de la aptitud del medio carburante para suministrar y rodear la superficie del acero con carbono, en un estado que se puede llamar activo, de tal naturaleza que su absorción por el acero se efectúe rápidamente. La experiencia ha demostrado que el carbono naciente que se forma en el interior de las cajas de cementación al descomponerse

el óxido de carbono, se encuentra en un estado muy favorable para que se produzca la cementación.

El proceso de cementación por el carbón vegetal, coque, etc., se explica en la siguiente forma: El carbón a elevada temperatura, en contacto con el oxígeno del aire que hay siempre en el interior de las cajas, entre los huecos que deja la materia cementante, da óxido de carbono (CO) según la siguiente reacción:



Luego el óxido de carbono formado se descompone a elevada temperatura en carbono naciente y dióxido de carbono.



En alguno procesos (en especial cementación gaseosa) también se realiza la cementación por la acción del metano que se descompone en hidrógeno y carbono naciente de acuerdo con la siguiente reacción:



En todos los casos el carbono naciente que se forma es el que produce la cementación. Al estar en contacto con el hierro a alta temperatura se combinan



formándose carburo de hierro o cementita, y luego al difundirse el carbono de hierro hacía el interior de las piezas es cuando puede decirse que se produce verdaderamente la cementación.

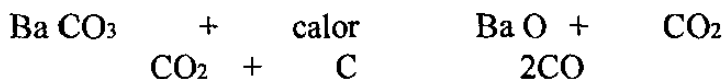
En todos los casos, para que se verifique con facilidad la absorción del carbono, es necesario que el acero se encuentre en estado austenítico, con el hierro en forma de hierro gamma, condición que se cumple utilizando las temperaturas normales de cementación. En esas condiciones, de 850° a 950°C el acero puede absorber hasta 1.40% de carbono aproximadamente, pudiéndose llegar hasta 2.11% de C a 1,145°C. Cuando el hierro se encuentra en estado alfa a temperaturas más bajas, la capacidad de absorción del carbono es, en cambio, muy limitada. A 722°C, por ejemplo, el hierro alfa sólo puede disolver 0.024% de carbono, aproximadamente.

El carbono, después de haber pasado el acero, queda disuelto en el hierro gamma y de acuerdo con las leyes de difusión, al existir en la periferia una concentración más elevada que en el interior, penetra hacia el corazón.

En el proceso de cementación se señalan, por tanto, tres fases diferentes:

- 1a *Producción de carbono naciente en las proximidades de la superficie de acero.*
- 2a *Absorción del carbono en la zona periférica del acero; y*
- 3a *Difusión del carbono hacia la zona central.*

Los carbonatos, y en especial el carbonato bórico, que se emplean mezclados con el carbón vegetal, aceleran la penetración del carbono naciente, que es como hemos señalado antes, el verdadero agente carburante, al facilitar la formación de óxido de carbono de acuerdo con las siguientes:



El CO producido se descompone en todos los casos, produciéndose carbono naciente

2 CO + C + CO₂ y el BaO producido reacciona con el CO₂ obteniéndose nuevamente BaCO₃.

Como las mezclas cementantes pierden con el uso su actividad, es necesario renovarlas periódicamente, siendo una práctica muy corriente preparar las mezclas utilizando de 3 a 5 partes de la usada y una de la nueva.

Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son:

- 1.º La gran duración de la operación, generalmente demasiado larga, ya que es necesario calentar hasta muy altas temperaturas las grandes cajas de cementación.
- 2.º El elevado consumo de combustible, necesario para calentar el cementante y las cajas.
- 3.º El elevado coste de preparación y colocación de las piezas en las cajas.
- 4.º La dificultad de templar directamente las piezas desde la caja y, por tanto, la imposibilidad de emplear dispositivos automáticos para el temple al trabajar con grandes series, y
- 5.º La irregularidad de temperaturas en el interior de las grandes cajas de cementación.

Penetración y distribución del carbono

La profundidad de la capa cementada aumenta con la temperatura y con la duración de la cementación y depende también de la actividad del carburante empleado y de la composición del acero que se va a cementar (fig. 3.2.2).

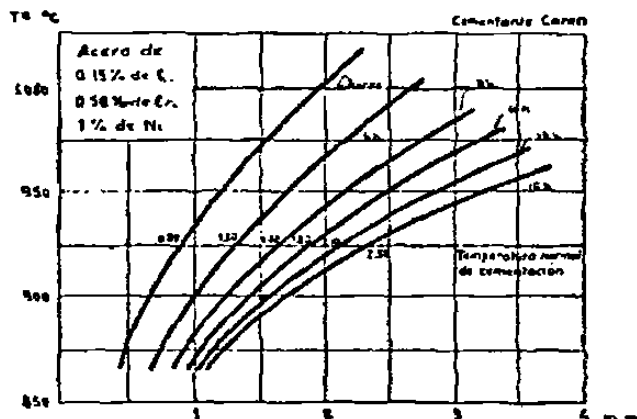
Aunque la penetración del carbono no se verifica con idéntica velocidad en los diferentes tipos de aceros, en la práctica industrial no son muy sensibles las diferencias entre las penetraciones que se consiguen en los aceros al carbono y los aceros al níquel, cromo-níquel, etc.

La absorción del carbono por el hierro gamma, es tanto más activa cuanto menor sea el porcentaje en carbono del acero. A medida que la carburación progresa, cuando el porcentaje de carbono aumenta, la velocidad de absorción disminuye, comportándose en ese caso el acero como una solución que se aproxima a su grado de saturación.

Figura 3.2.2 Profundidad de la penetración del carbono (capa cementada) que se consigue a diferentes temperaturas, en función de las horas de cementación

Cementando un acero cromo-níquel de 0,15% de C, 0,50% de Cr y 1% de Ni, a 925°C con la mezcla Carbón de 60 % de carbón vegetal y 40% de carbonato bórico, se obtiene al cabo de 4 horas una profundidad de 0,89 mm y una velocidad media de penetración de 0,22 mm por hora. A las 8 horas se llega a 1,60 milímetros y alas 16 horas, a 2,30 mm (fig. 3.2.2).

Cuando la cementación se verifica a bajas temperaturas, la penetración del carbono es muy pequeña y, en cambio, el porcentaje en carbono de la periferia es mayor que cuando se efectúa la cementación a temperaturas próximas a 925°C



3.3 Cementación Líquida

La cementación líquida es un método de endurecimiento superficial en el hierro y el acero por calentamiento en un baño de cianuro líquido donde se genera la difusión del carbono en el hierro gamma este casco endurecido presenta porcentajes de nitrógeno y carbono los valores de capa pueden alcanzar hasta 0.250 pulgadas.

TIPOS DE BAÑOS

A) Baños de temperatura baja. (casco ligero) usualmente operan en un rango de temperatura de 1550°F a 1650 °F en algunos de los casos se puede ampliar el rango de 1450° a 1700°F. Los espesores de capa formados van desde 0.003 pulgadas a 0.030 pulgadas la composición del baño se describe en la tabla 3.3.1.

Las reacciones químicas de los baños a baja temperatura son complejas se describen a continuación:

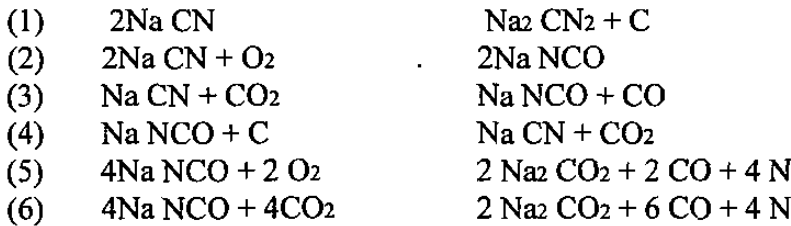
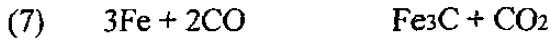


TABLA 3.3.1 Composición de los baños de baja temperatura

Constituyente	Composición del baño %	
	baja temperatura (1550 a 1600 °F)	Alta temperatura (1650 a 1750 °F)
Cianuro de Sodio	10 a 23	6 a 16
Cloruro de Bario	0 a 40	30 a 55
Otras Sales Alcalinas (a)	0 a 10	0 a 10
Cloruro de Potasio	0 a 25	0 a 20
Cloruro de Sodio	20 a 40	0 a 20
Carbonato de Sodio	30 máx.	30 máx.
Aceleradores (b)	0 a 5	0 a 2
Cianato de Sodio	1.0 máx	0,5 máx.
Densidad del baño fundido	110 lb/ft ³ a 1650 °F	125 lb/ft ³ 1700 °F

(a) Cloruro de Calcio y Estroncio

(b) Dioxido de manganeso, Oxido de Boro, Fluoruro de Sodio y Carburo de Silicio



Los baños de baja temperatura o casco ligero usualmente operan con altos contenido de cianuro respecto a los baños de alta temperatura.

BAÑOS DE ALTA TEMPERATURA (Casco Profundo)

Estos operan en un rango de temperatura de 1650 °F a 1750 °F. Cuando se desea una rápida penetración del carbono los rangos se elevan de 1800 a 1900 °F. El rango del casco endurecido en estos baños oscila de 0.020 pulgadas a 0.120 pulgadas y en algunos casos arriba de 0.250 pulgadas estos baños tienen mayor proporción de cloruro de bario ver tabla 3.3.1

Además de las reacciones que ocurren en los baños de baja temperatura se pueden agregar las siguientes 2 reacciones a estos baños :



Los contenidos preferentes de cianuro se pueden ver en la tabla 3.3.2

TABLA 3.3.2
Relación de temperatura de operación y contenido de cianuro de sodio en el baño líquido

Temperatura °F	Cianuro de Sodio (Na CN)%		
	Min.	Preferente	Max
1500	14	18	23
1550	12	16	20
1600	11	14	18
1650	10	12	16
1700	8	10	14
1750	6	8	12

GRADIENTES DE CARBONO.

La figura 3.3.1 muestra los gradientes de carbono producidos por una carburización líquida en unas barras de acero SAE - 1020 a 1550°F, 1600°, 1750 °F en diferentes tiempos de operación.

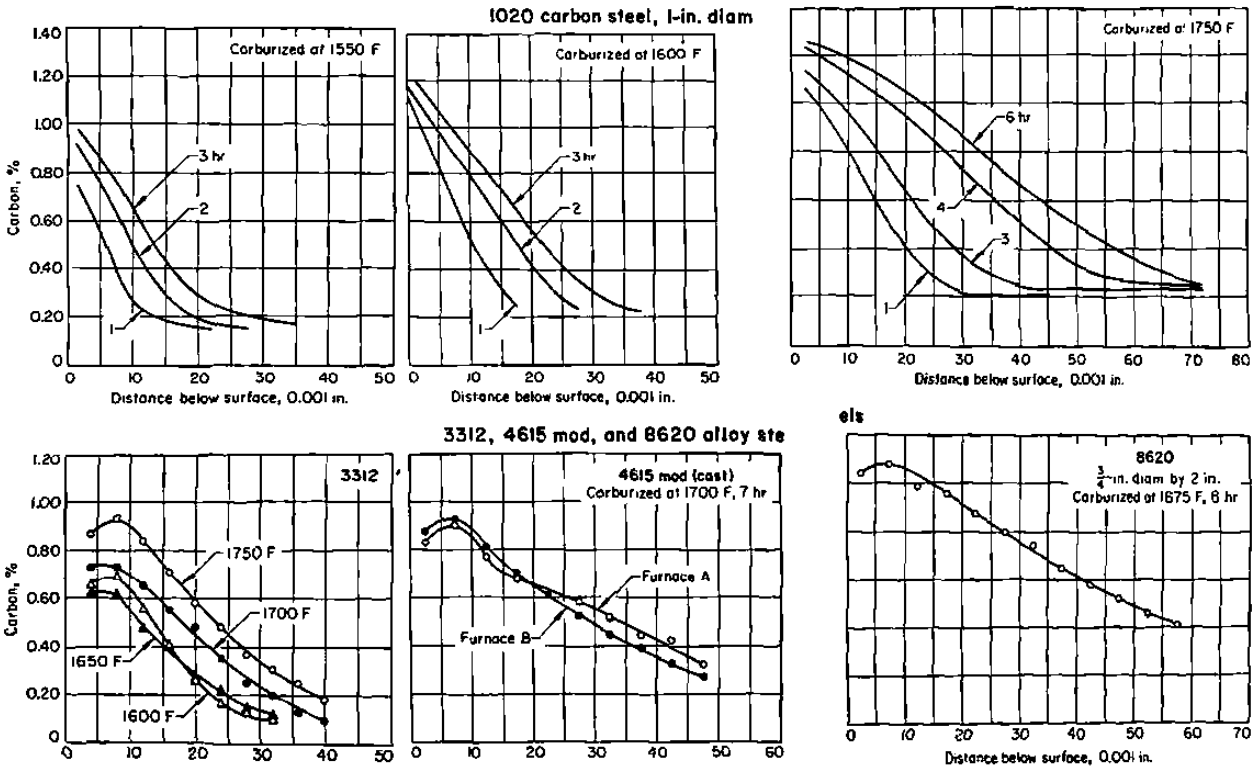


Figura 3.3.1 Penetración de carbono en barras de acero ordinario y aleados a diversas temperaturas

PENETRACIÓN DEL CARBONO

En la carburización líquida son determinantes la temperatura de carburización y la duración del ciclo de carburización. Los efectos de la composición química del acero son relativamente menores. Una formula simple de estimar el casco carburizado obtenido en la carburización líquida es:

$$C = K \sqrt{t}$$

Donde el valor de C es el casco en pulgadas, K es una constante la cual representa la penetración en la primera hora de calentamiento y t es el tiempo de calentamiento en hora. Los valores de K para tres diferentes temperaturas son: 0.012 pulgadas (1500 °F), 0.018 pulgadas (1600 °F), 0.025 pulgadas (1700 °F).

GRADIENTES DE DUREZA

Asociado con el gradiente de carbono y causado por este las variaciones de dureza a diferentes distancias bajo las superficies se muestra la figura 3.3.2 para un acero al carbono SAE - 1020, y aceros aliados SAE - 4620 y SAE - 8620

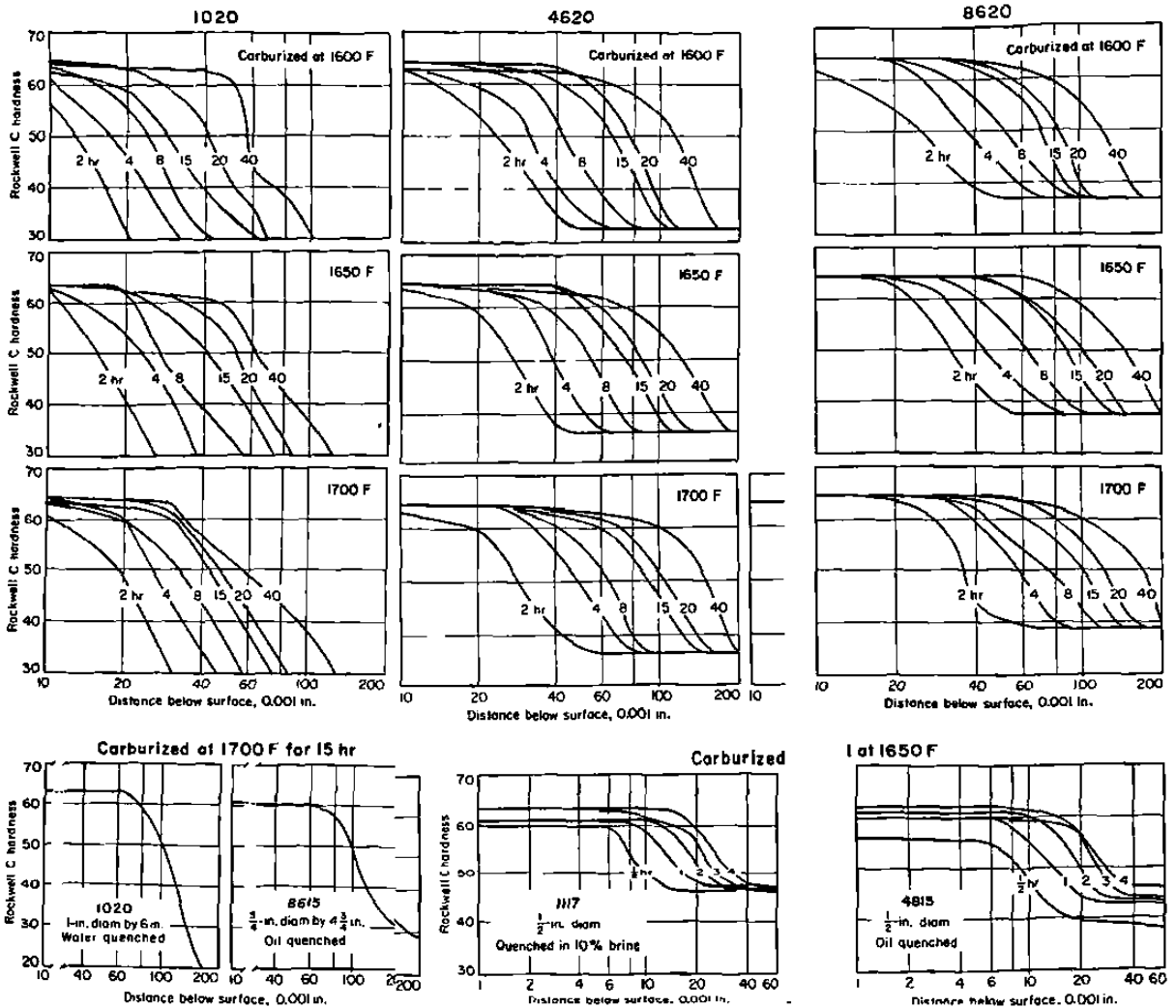


Figura 3.3.2 Penetración de carbono en barras de acero para tiempos y temperaturas variables

Sales de cementación y nitruración

Sales de cementación

Baño (1)

Características:

Zona de trabajo	600 a 900°C
Peso específico	1.3
Calor específico	0.30
Potencia calorífica por litros y °C	0.39
Profundidad de penetración	0.60 mm.
Toxicidad	Muy elevada: por alto contenido de cianuro

Aplicación:

Este baño se utiliza para lograr durezas superficiales elevadas, con poca profundidad de carburación. Las temperaturas de cementación pueden oscilar de los 850° a los 920°C. Periódicamente deberá controlarse por valoración, el contenido de cianuro del baño, teniendo estipulado un porcentaje mínimo del 50% y un máximo del 70%.

Observaciones:

Las piezas tratadas con este tipo de sales no pueden someterse a rectificado profundo, dado que la capa de cementación es ligera y la dureza conseguida inicialmente disminuirá de forma sensible. Los aceros oxidados apenas se dejan cementar en este tipo de baño, y para ellos, es necesario cementar con baños más activados (fig. 3.3.1, gráfico).

Tiene fundamental importancia el acabado superficial de las piezas, ya que las superficies muy pulimentadas, retardan la absorción del carbono, mientras que los acabados más bastos, facilitan la cementación.

Las piezas cementadas en este tipo de sales, no admiten el apagado directo en baño caliente (isotérmico), a base de sales de bajo punto de fusión (120°C).

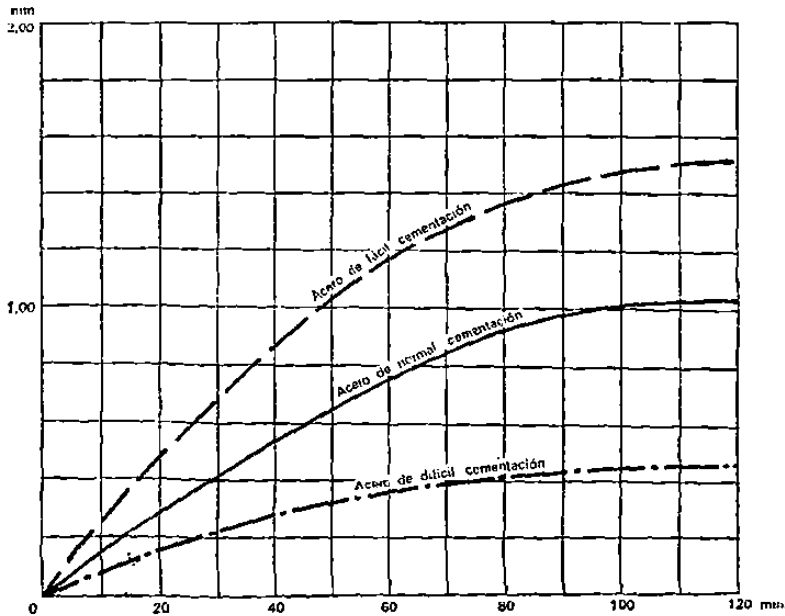


Figura 3.3.5 Gráfico indicando las profundidades logradas en sales de cementación sin activadores

Baño (2)

Sal de cementación ligeramente activada, con porcentaje medio de cianuro (25 a 30%).

Características:

Zona de trabajo	650 a 950 °C
Peso específico	1.4
Calor específico	0.28
Potencia calorífica por litros y °C	0.40
Profundidad hasta	0.60 mm.
Toxicidad	Elevada: contiene cianuro

Aplicación:

Con estas sales y operando a temperaturas normales de cementación (920-230°C), se consiguen penetraciones de unas tres décimas de milímetro en un tiempo aproximado de media hora. Este baño es adecuado para la cementación de piezas donde el rectificado sea omitido, y para la cementación de piezas donde el rectificado sea omitido, y para la cementación de grandes sales donde se requiera dureza superficial en la capa cementada. Para cementaciones de penetración más profunda, deben aplicarse los baños (3) y (4), que a continuación detallaremos.

Observaciones:

La regeneración del baño se efectúa por la aportación de sales nuevas necesarias para mantener el nivel del baño. En procesos de cementación donde el arrastre es mínimo (por tratarse de piezas grandes y de superficies lisas), será necesario, cada ocho horas de trabajo, vaciar una parte del baño con una cuchara adecuada y sustituirla por otra de sales nuevas.

El potencial de carbono de la capa cementada, varía según sea la aleación del acero y profundidad alcanzada. Generalmente con este baño se puede estipular un porcentaje del 0,80% de carbono, en la primera y segunda décima alcanzada.

Baño (3)

Sal de cementación con mediano contenido de CNNa (40%), con activadores y reguladores del potencial de carbono.

Características:

Zona de trabajo	600 a 940 °C
Peso específico	1.70
Calor específico	0.18
Potencia calorífica por litros y °C	0.42
Profundidad hasta	1.80 mm.
Toxicidad	Elevada: contiene cianuro

Aplicaciones:

Con este tipo de sales, se pueden cementar fácilmente todos los aceros de cementación, aleados u ordinarios, al carbono. Las temperaturas normales de cementación se estipulan entre los 880 y 930°C (según sea el tipo de acero). La regeneración del baño se efectúa por la aportación necesaria de sales nuevas, para mantener el nivel del baño.

Periódicamente deberá controlarse la concentración de cianuro, por valoración. En los procesos de cementación prolongados y de poco arrastre de sales, será necesario retirar cada doce horas de trabajo, una parte del baño, substituyéndolo por sales nuevas a fin de mantener el porcentaje adecuado de sales activas.

Para alcanzar una profundidad de cementación predeterminada, conviene introducir, junto a la carga a cementar, algunas probetas del mismo material y superficie de acabado, pudiendo así contrastar, mediante fractura, la penetración alcanzada.

Este tipo de sales, son apropiadas para todas aquellas piezas que después de la cementación y temple, deban ser rectificadas.

Observaciones:

La profundidad de cementación dependerá, en todos los procesos, del tiempo, temperatura, tipo de acero, baño correcto y acabado superficial de las piezas.

Las piezas cementadas en este baño, no admiten el apagado directo en baño isotérmico, a base de sales que fundan a 120 °C; altamente peligroso.

Baño (4).

Sales de cementación profunda con bajo contenido de CNNa (8-10%), altamente activadas y reguladas.

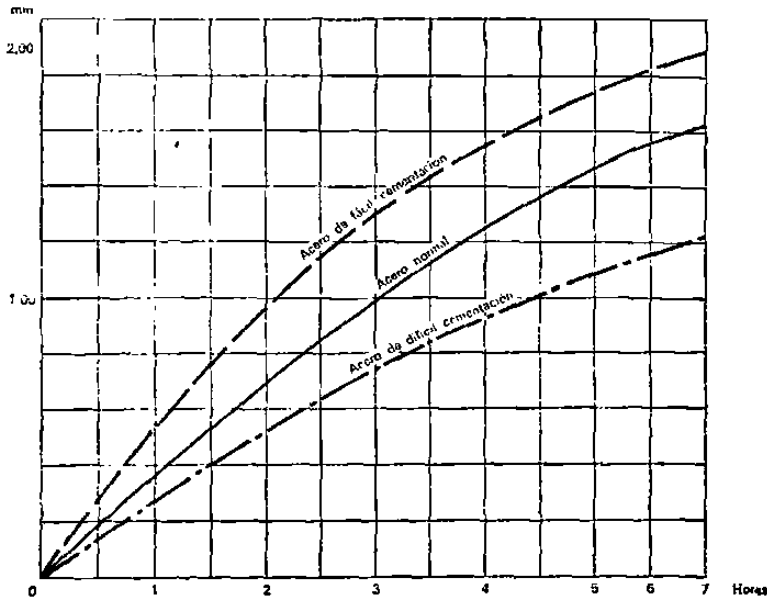


Figura 3.3.6 Gráfico indicando las profundidades logradas con sales de cementación activadas

Características:

Zona de trabajo	40 a 940 °C
Peso específico	2.5
Calor específico	0.17
Potencia calorífica por litros y °C	0.44
Profundidad hasta	2 mm. y más
Toxicidad	Elevada: contiene cianuro

Aplicación:

En todas aquellas piezas que necesitan una cementación más profunda de la que, económicamente, es posible alcanzar con el baño (3), o bien, en las piezas que deban ser rectificadas a más de la cuarta parte de la capa cementada, debe aplicarse este tipo de sales. El campo de aplicación de este baño, comprende toda la industria de construcción de maquinaria, automatización, herramientas y fabricas de arnas. Es un baño universal aplicable para todas las profundidades de cementación (fig. 3.3.6).

Las penetraciones que se consiguen a una temperatura constante de 930 °C, con relación al tiempo, son las siguientes:

En 2 h.	0.8 a 1 mm.
En 4 h.	1.3 a 1.5 mm.
En 6 h.	1.6 a 2 mm.

El porcentaje de carbono de la capa cementada es de 0.8 a 0.9% y con disminución regular y progresiva hacia el núcleo.

Es el baño indicado para todos los aceros de cementación, y particularmente, para los aceros al cromo-molibdeno y cromo-níquel, etc.

Observaciones:

Estas sales carburan más profunda e intensamente que las sales que componen el baño (3), permitiendo un rectificado hasta de, aproximadamente, la mitad de la capa cementada, sin que la dureza disminuya por debajo de los 60 Hrc, teniendo, entre otras ventajas, la carburar, con pleno éxito, aceros de cementación de baja calidad; no se producen sobrecarburaciones en ninguna clase de aceros, omitiendo en consecuencia cualquier recocido de difusión. Con este baño, los procesos de cementación quedan considerablemente reducidos.

Periódicamente deberá controlarse la concentración de CNNa, por valoración, manteniéndola entre el 8 y el 10%

Las piezas cementadas con estas sales, permiten un apagado directo en baños isotérmicos, siempre que sea respetado el porcentaje de cianuro que distingue este tipo de baño.

Observaciones respecto a los baños de cementación

La cementación efectuada en baño de sales y operando a elevadas temperaturas (920° - 930°C), no presenta sobrecarburación perceptible; por el contrario, permite una regular absorción del carbono y su mejor difusión. Las temperaturas elevadas favorecen la solución del carbono en mayores proporciones. Si después de la cementación se procede a enfriar directamente el material en un baño caliente, este enfriamiento rápido inhibe el material carburado de una sobrecarburación, aunque el porcentaje de carbono en la periferia sea del 1,2%. Los carburos que pudieran formarse, son segregados en forma granular finísima y difusa, siendo del todo aceptables (aumento de durezas.).

Después de una cementación profunda en baño de sal, con temperaturas y composición del baño adecuados, no es necesario el recocido de difusión.

El control de temperaturas es del todo necesario en los procesos de cementación. Pequeños errores de temperatura, pueden modificar sensiblemente la duración del proceso, particularmente cuando se trate de alcanzar las mayores profundidades de cementación. El control de temperaturas deberá efectuarse con instrumentos de precisión, y que queden registrados los tiempos y temperaturas.

Los baños deberán cuidarse con esmero para lograr procesos regulares de cementación. Cualquier agregado al baño que no entre en su formulación, con toda seguridad, alterará la buena marcha del mismo. Igualmente tiene una gran importancia la utilización de crisoles adecuados.

Deben descartarse los crisoles fabricados con aceros con elevados porcentajes de níquel.

Los crisoles más idóneos para la cementación, son los fabricados con aceros dulces y el menor porcentaje de carbono posible.

Cada jornada de trabajo será necesaria una revisión y limpieza del fondo del baño; todos los lodos que puedan formarse son perjudiciales para su buen rendimiento (ver capítulo: *Manutención de los baños de sales*).

El baño de cementación deberá ser controlado por períodos más o menos espaciados, según sea la cadencia de trabajo. Mantener la concentración determinada de Cca del baño, asegura una cementación regular en cada proceso. Una capa cubrebaño (grafito), demasiado compacta, dificulta la cementación. Es necesario que la superficie del baño presente lagunas sin cubrir.

Conclusión

Las temperaturas de cementación en baños de sales pueden estipularse entre los 900° y 930°C

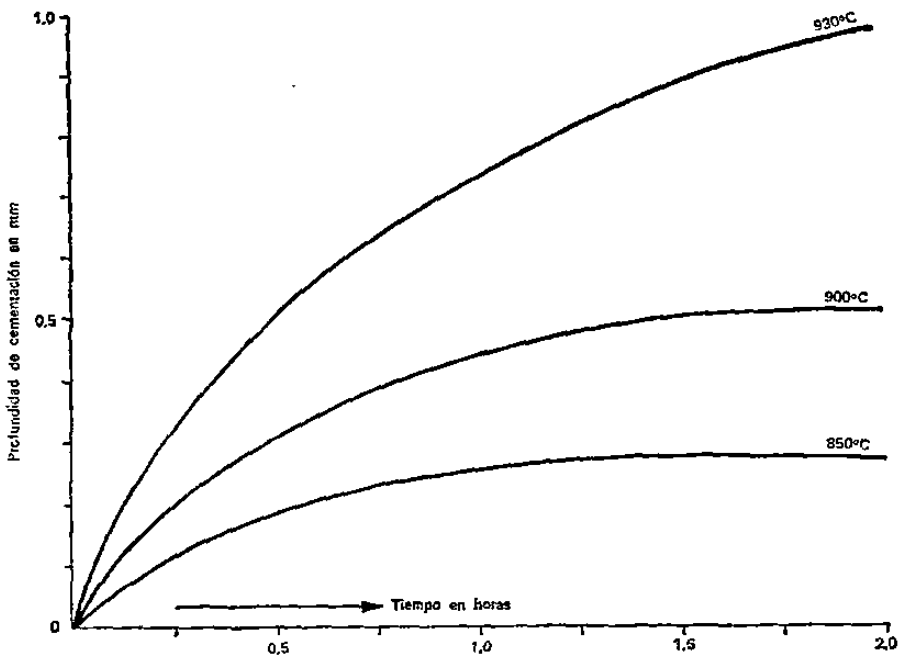


Figura 3.3.7 El ensayo ha sido efectuado empleando un acero de fácil cementación, y con sales activadas

Cementado a temperaturas inferiores a los 900°C, por ejemplo, a 880°C, los tiempos necesarios para lograr una misma profundidad son duplicados, y cementado a unos 850°C, son hasta de cuatro veces más en relación con los 930°C. La figura 34.3, representa las profundidades alcanzadas con relación a temperaturas y tiempos.

-La cementación bien ejecutada en baños de sales, da excelentes resultados, omitiendo perfectamente el recocido de difusión imprescindible cuando la carburación del acero es efectuada por otros procedimientos.

- Las temperaturas deberán controlarse estrictamente, si se quiere alcanzar un máximo de economía de tiempo y de calidad, en el procesos de cementación.

-La manutención de los baños deberá ejecutarse a diario y como norma establecida. Como se ha expuesto, cualquier interferencia que afecte la composición del baño, puede anular la buena marcha de la operación.

Nitruración

Baño de nitruración (5)

Sal de nitruración:

Con la aplicación de las sales de nitrurar se obtienen resultados nitrurantes excelentes, tratándose de aceros apropiados para nitruración.

Al mismo tiempo las sales nitrurantes extienden su aplicación a aceros de construcción al carbono, de baja aleación, austeníticos y fundiciones.

Efecto que ejerce el proceso en los aceros

Durante el tratamiento, el material absorbe carbono y nitrógeno del baño. Dadas las bajas temperaturas en que se opera (550 - 470 °C), la penetración del carbono es muy lenta, combinado con el nitrógeno retenido, una capa poco frágil, cuya composición es de un 25% de carburo y de un 75% de nitruro de hierro.

Cuando el acero sometido a tratamiento no contiene grandes porcentajes de elementos formadores de nitruros, tales como son el cromo, aluminio, tungsteno, vanadio, etc. la dureza superficial alcanzada varía poco. Sin embargo la resistencia a la fatiga de esta capa de compuestos, es mucho más elevada que la conseguida en las capas cementadas. Además del aumento de resistencia a la fatiga, este proceso aumenta considerablemente la resistencia al agarrotamiento, particularmente para las piezas que trabajan con escasa lubricación.

La capa dada por la aplicación del proceso, posee propiedades de compresión: con estas tensiones se aumenta considerablemente la resistencia a la fatiga de las piezas en estado templado y revenido (bonificadas). Estas tensiones de compresión son originadas por el nitrógeno que se encuentra en la zona de difusión.

Esta elevación de la resistencia a la fatiga, es muy remarcada en los aceros de construcción bonificables y de cementación, con bajos porcentajes de elementos de aleación. Si estos tipos de aceros una vez efectuado el proceso nitrurante se enfrían bruscamente en agua, se pueden alcanzar coeficientes en el aumento de la resistencia a la fatiga, del orden del 80% al 120%, para los aceros de cementación y del 50% al 60% para los aceros bonificables.

En los aceros austeníticos y para las fundiciones, pueden igualmente lograrse aumentos de resistencia a la fatiga del 20 % al 30% .

Aplicación de estas sales nitrurantes: en diferentes piezas que se pueden favorecer con el proceso de nitruración por sus efectos antidesgaste y aumento de resistencia a la fatiga.

Antidesgaste

Camisas de cilindro, engranajes de bomba de aceite, árboles de levas, engranajes construidos con aceros austeníticos, piezas para compresores, pistones hidráulicos, máquinas de coser, etc.

Aumento de resistencia a la fatiga

Piezas de aeronáutica, bielas para motores diesel, culatas de fundición, cigüeñales, pivotes a esfuerzos alternados.

Tratamiento térmico

Temperatura de trabajo : 520-560 °C

Tiempos de permanencia: 5 a 45 minutos

Enfriamiento : aire o agua

Composición química de algunos baños de sales

Sales para bajas temperaturas, revenidos, martempering y austempering.

45% NaNO₂ más 55% KNO₃

Sales para bajas temperaturas, revenidos, temple isotérmico y oxidación azul

50% NaNO más 50% KNO₃

Pre calentamiento de aceros rápidos y austenización de aceros hasta 1,000 °C

30% KCl más 70% BaCl₂

Austenización de aceros rápidos y de aceros en caliente

95% BaCl₂ más SiO₂ más bórax

Sales para primer apagado de los aceros rápidos y recocidos, etc.

30% BaCl₂ más 20% NaCl más 50% CaCl₂

Baño de cementación

40% NaCN más 10% NaCl más 20% BaCO₃ más BaCl₂

Baño antidesgaste

Para este baño suele utilizarse un baño compuesto de dos tipos de sales: uno de bajo punto de fusión, basado en carbonato sódico mas cloruro potásico; la otra sal es la portadora de azufre o el selenio, y esta constituida por cloruro potásico, cianuro sódico y sulfito sódico; el contenido de este ultimo en el baño oscila del 12 al 14%

3.4 CEMENTACIÓN GASEOSA

Habiendo estudiado anteriormente el papel tan importante que desempeña el óxido de carbono (CO) en la cementación con materias sólidas, parece que bastaría colocar las piezas en presencia de ese gas a elevada temperatura para conseguir una capa endurecida.

Sin embargo la práctica ha demostrado que de esta forma no se consiguen buenos resultados y que, para obtener capas sementadas de composición y espesor homogéneos es necesaria la presencia de hidrocarburos en la atmósfera carburante además del óxido de carbono.

Se ha comprobado experimentalmente que el óxido de carbono a la elevada temperatura que se emplea en la cementación y en las condiciones que generalmente suelen encontrar en los hornos, es muy estable y poco activo y en cambio si se le añaden hidrocarburos, estos se disocian fácilmente dando carbono naciente (C) que pasa al acero, siendo en este último caso la cementación más intensa.

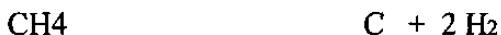
El gas natural y propano son fuentes preferentes de carbono naciente. Los mejores resultados se obtienen empleando hidrocarburos diluidos en otros gases constituidos principalmente por óxido de carbono, nitrógeno, hidrogeno, etc.

Las atmósferas carburantes se preparan generalmente empleando un volumen de gas portador (ver tabla 3.4.1) por un volumen de gas diluyente (ver tabla 3.4.2) .

Tabla 3.4.1 Principales gases usados como superficie carbonosa en gases carburizantes

Constituyente	Gas natural			Gas de Coke	Gas butano Comercial	Gas propano Comercial
	Pittsburg	Kansas	Indianapolis			
Composicion, % en Volumen						
CO ₂		0.8	0.4	2.2	.....	.....
O ₂.....		..0.4		..0.8	.....	.....
N.....	8.0	8.4	..6.0	..8.1	.....	.....
CO.....		.....	.....	..6.3	.....	.....
H.....		.....	.....	46.5	.....	.....
CH (METANO)	83.4	84.1	87.2	.32.1	.....	.....
C ₂ H (ETANO)	15.6	6.7	6.0	.....	.....	.....
C ₂ H (ETILENO) .....				..3.5	.....	..2.5....
C ₂ H (BENZANO) .....				..0.5	.....	.....
C ₂ H (BUTANO) .....				.....	..93.0	.....
C ₂ H (PROPANO) .....				.....	..7.0	..96.0..
C ₂ H (ISOBUTANO) .....				.....	.....	...1.5...
GRAVEDAD ESPECIFICADA						
.....	0.61	0.63	0.61	0.44	1.95..	...1.52...

La reacción principal en la cementación gaseosa es la siguiente:



La utilización del gas portador en la cementación gaseosas, es muy interesante por ser más económico el uso de un gas portador barato que rellena fácilmente la cámara del horno, al que se añade una pequeña cantidad de hidrocarburos de precio elevado.

El uso del gas de relleno, al entrar en la atmósfera del horno en proporción adecuada, sirve para diluir el hidrocarburo que se introduce en el horno, y evita la formación de hollín que a veces se presenta cuando la cementación no se hacen las debidas precauciones.

Tabla 3.4.2 Principales gases portadores usados como gas carburizante

Clase	Metodo de preparacion	relacion. are-comb	Composicion por volumen					punto de rocio	gasto requerido pies ³	naturaleza de la atmosfera
			N	CO	CO2	H2	CH4			
102	base exotermica	6	71.5	10.5	5	12.5	0.5	-40	155	combustible
201	base nitrogeno	9	97.1	1.7		1.2		-40	135	no combustible
202	base nitrogemo	6	75.3	11		13.2	0.5	-40	160	combustible
302	base endotermica	2.5	39.8	20.7		38.7	0.8	+25 -5	200	combustible
402	base carbon		64.1	34.7		1.2		-20	12.5 lb	combustible

De esta forma, además, se consigue un gran potencial de cementación empleando solo cantidades muy pequeñas de metano.

El gas portador desplaza además el aire o gases que puedan existir en la cámara de los hornos y asegura una cierta presión en su interior.

Los gases portadores constituidos por elementos o cuerpos inertes como el nitrógeno no dan buenos resultados, ya que conviene que contengan siempre un cierto porcentaje de CO y de H₂ para que la eficacia del gas carburante sea máxima y no se gaste parte del metano en reaccionar con los elementos perjudiciales como el oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono, que siempre existen en mayor o menor cantidad en las atmósferas.

La presencia de hidrogeno es también indispensable para la cementación gaseosas. Aunque aparezca extraño, es necesario que un elemento tan descarburante, este presente en este tipo de atmósferas. Al existir hidrogeno en la atmósfera del horno se evitan los depósitos carbonosos

sobre las piezas, que en su ausencia aparecen por descomposición de los hidrocarburos y dificultan la cementación.

En todas las atmósferas carburantes existen CO₂ y H₂ como elementos derivados de las reacciones fundamentales de cementación :



El proceso de cementación esta formado por dos fases: la primera, carburación a temperatura elevada y la segunda de difusión, a más baja temperatura (800°C) aproximadamente

PRINCIPALES VARIABLES DE PROCESO

Efecto de la temperatura.

La difusión se incrementa con la temperatura el valor más común es de 1700°F. (ver fig. 3.4.1).

Esta temperatura permita un rápida carburización sin un excesivo deterioro del equipo, particularmente los elementos resistivos del horno algunos casos las temperaturas pueden llegar hasta 1800 °F para unos resultados consistentes en la carburización es importante la uniformidad de temperatura sobre la carga de trabajo, el diseño del horno, la densidad de carga y una buena conducción de calentamiento en la cámara del horno.

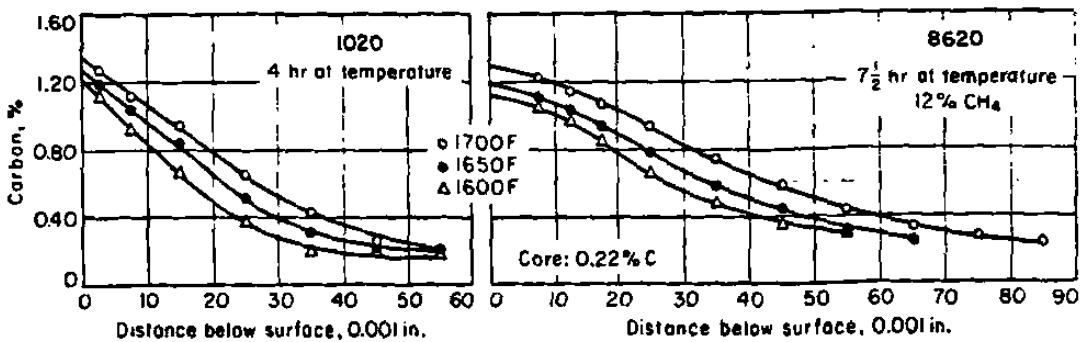


Figura 3.4.1 Gradiente de carbono para aceros 1020 y 8620 carburizados en tres atmosferas El acero 1020 fue carburizado encapsulado en un horno; el acero 8620 en un horno de fosa recirculando los gases

Efecto del tiempo.

Una expresión matemática desarrollada por F. E. Harris involucra el efecto de temperatura y tiempo:

$$\text{Profundidad de capa} = \frac{31.6 \quad t}{10 \exp. (6700/ T)}$$

Donde la profundidad de la capa esta dada en pulgadas; t es el tiempo en horas; T es la temperatura absoluta en grado Rankine.

Harris también desarrollo una expresión para calcular el tiempo de carburización y tiempo de difusión:

$$\text{Tiempo de carburización} = \text{Tiempo total de proceso} \frac{(C - C_i)^2}{(C_o - C_i)^2}$$

$$\text{Tiempo de difusión} = \text{Tiempo total} - \text{Tiempo de carburización}$$

Donde el tiempo total es en horas

- C_i es la concentración de carbono en el núcleo,
- C_o es el centro de concentración en la superficie y
- C es la concentración deseada.

3.5 NITRURACIÓN GASEOSA

La nitruración es un procedimiento de endurecimiento superficial en el que por absorción de nitrógeno, se consiguen durezas extraordinarias en la periferia de las piezas de acero.

Los objetos que se desea nitrurar son siempre templados y revenidos antes de la nitruración, para que el núcleo central quede con una resistencia elevada y sea capaz de resistir, durante el trabajo, las grandes presiones que le transmitirá la capa exterior dura. Las piezas después de templadas y revenidas se colocan en una caja cerrada, a través de la cual se hace pasar durante toda la operación una corriente de amoníaco. Todo el conjunto se introduce dentro de un horno, en el cual se mantiene una temperatura muy próxima a 500°C. Al calentarse el amoníaco a esas temperaturas, se disocia, según la siguiente reacción: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$, formándose nitrógeno atómico, que se combina con el aluminio, cromo, molibdeno, hierro de los aceros formando nitruros en la capa periférica.

Con procesos normales de 20 a 80 horas de duración, se obtienen capas nitruradas de espesores variables desde 0,20 a 0,70 mm.

Como después de la nitruración las piezas quedan ya duras superficialmente, no es necesario enfriarlas rápidamente desde elevada temperatura, después de estar completamente mecanizadas, como se hace en la cementación, evitándose, por tanto, las deformaciones que en esos enfriamientos que se originan. Además la nitruración no modifica las características que se han obtenido previamente en el núcleo por temple y revenido, siempre que este último haya sido hecho a temperatura superior a 500°C.

Por ser la temperatura de nitruración relativamente baja, no hay aumento del tamaño del grano y tampoco es necesario someter las piezas nitruradas a ningún tratamiento de regeneración posterior. Además con este tratamiento se pueden conseguir durezas muy superiores a las que se obtienen en la cementación.

La marcha normal de trabajo suele ser la siguiente:

Las barras laminadas o las piezas en bruto de forja o estampación se mecanizan hasta que queden con un exceso de unos 2 mm sobre las medidas finales. Se templan a la temperatura correspondiente y después se les da un revenido para conseguir en el núcleo la dureza o resistencia deseada. Luego se termina la mecanización de las piezas dejándolas casi exactamente a las medidas finales. Algunas veces se les da a continuación un tratamiento a 500°- 600°C (temperatura inferior a la de revenido) para eliminar las tensiones de mecanizado. Después se protegen las superficies que no se quiere endurecer y se desengrasan. Finalmente se realiza la nitruración, pudiéndose efectuar posteriormente un ligerísimo rectificado.

Ventajas de la nitruración

Las propiedades más notables de las piezas nitruradas son las cinco siguientes:

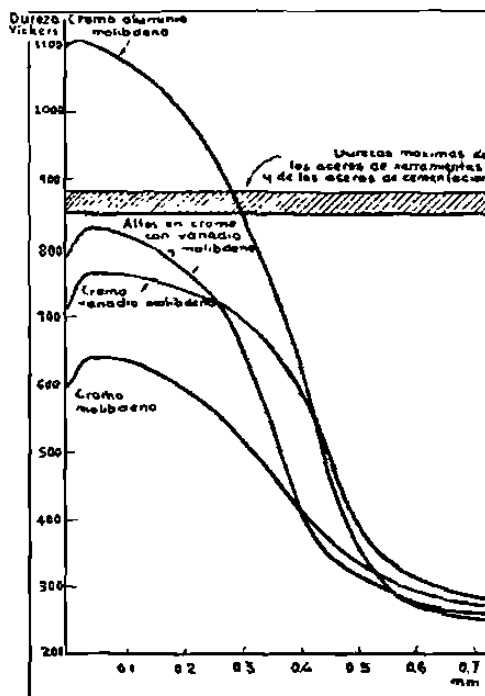
1.a GRAN DUREZA.- Después de la nitruración, se consiguen durezas elevadísimas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial (fig. 3.5.1).

Figura 3.5.1 Durezas que se obtienen después de la nitruración de diferentes tipos de aceros

Las piezas nitruradas puede quedar con durezas comprendidas entre 1,100 a 650 Vickers, según la composición del acero. Cuando interesa que la capa dura sea de gran tenacidad, conviene utilizar aceros, que después de la nitruración queden con durezas relativamente bajas (650 a 850 Vickers), porque las capas nitruradas de máxima dureza tienen menor tenacidad.

2.a GRAN RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.-

Los aceros, después de la nitruración, resisten mejor la acción corrosiva del agua dulce, agua salada, vapor o atmósferas húmedas que los aceros ordinarios, y por eso, este proceso es muy utilizado para las piezas que deben sufrir la acción de ciertos agentes corrosivos. Su resistencia al ataque por metales o aleaciones fundidas de aluminio, cobre, etc., también es mucho mayor que la de los aceros ordinarios. En el caso de que interese la máxima resistencia a la corrosión, no deben rectificarse las piezas después de nitruradas.



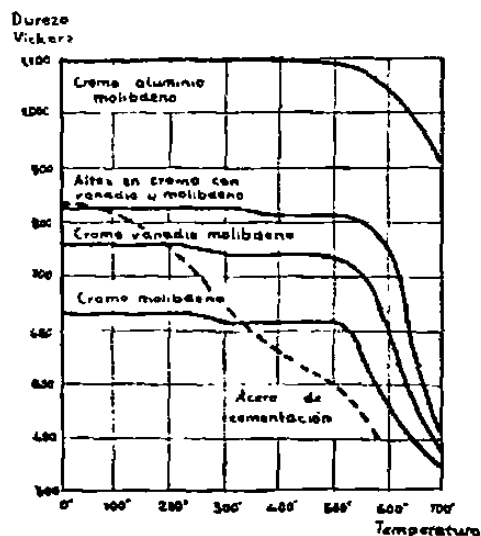
3.a AUSENCIA DE DEFORMACIONES.-

Como en el tratamiento de nitruración, no es necesario enfriar las piezas rápidamente, desde alta temperatura, en agua o aceite, se evitan los graves inconvenientes de los enfriamientos rápidos, que pueden dar origen a deformaciones importantes.

4.a ENDURECIMIENTO EXCLUSIVO DE DETERMINADAS SUPERFICIES DE LAS PIEZAS.-

Durante la nitruración se pueden proteger perfectamente las superficies de las piezas que no se desea endurecer, aunque sean de formas complicadas e irregulares, dejando libres para nitrurar exclusivamente las zonas que deben quedar duras

5.a RETENCIÓN DE LAS DUREZAS A TEMPERATURAS ELEVADAS.- Las capas nitruradas conservan gran dureza hasta los 500°C, especialmente cuando la duración del calentamiento no es muy prolongada. En la figura 3.5.2 se puede apreciar el comportamiento de varios aceros y su dureza después de haber permanecido a diversas temperaturas durante una hora. Figura 3.5.2



En la figura 3.5.3 se señalan a temperaturas variables desde 0° a 600°C las durezas de los aceros nitrurados. Se observa que las piezas nitruradas mantienen a temperaturas elevadas durezas

superiores a las que se consiguen con otros procedimientos de endurecimiento de la capa periférica, como la cementación, temple superficial, etc., ya que la capa dura, obtenida por estos métodos, pierde dureza muy rápidamente a partir de los 200°C.

Esa propiedad es muy interesante para órganos de máquinas en los que pueden presentarse sobrecalentamientos accidentales, por falta de lubricación. En este caso, si el material está cementado, al disminuir la dureza de una pieza, puede agarrotarse el mecanismo, y en cambio no ocurrir nada si el acero está nitrurado.

Figura 3.5.3

Teoría de la nitruración

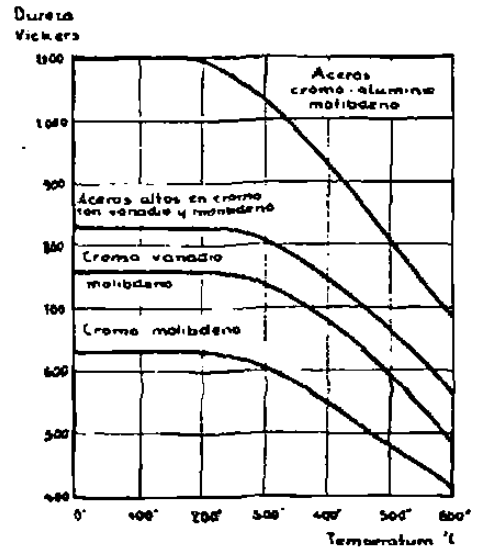
La acción endurecedora que el nitrógeno ejerce sobre el hierro y los aceros, fue descubierta por Freymy hacia el año 1861, cuando experimentaba la acción del amoníaco sobre piezas de acero calentadas a elevadas temperaturas.

A pesar del gran interés que parecía tener el proceso, pasaron muchos años sin que este método se pudiera aplicar industrialmente con éxito, debido a la fragilidad con que quedaba la capa superficial dura de los aceros nitrurados.

En 1905, El francés Hjalmar Braune anunció que en sus trabajos había descubierto la existencia de un eutectoide formado por hierro y nitruro de hierro Fe_4N , en las capas frágiles de los aceros nitrurados, que era parecido a la perlita. A este eutectoide se le llamó braunita en recuerdo de su descubridor.

Después de terminada la primera guerra europea, en el año 1923, el Doctor Fry, de la casa Krupp, descubrió que el problema de fragilidad de la capa exterior de las piezas nitruradas podía ser resuelto con el empleo de una temperatura de nitruración relativamente baja (unos 500°C aproximadamente) y con el uso de aceros aleados con aluminio, cromo y molibdeno en lugar de aceros ordinarios al carbono.

Si se realiza el proceso a temperaturas muy próximas a 500°C no aparece braunita en la capa superficial, como ocurre cuando el tratamiento se realiza a temperaturas elevadas y como ocurre cuando el tratamiento se realiza a temperaturas elevadas y como normalmente se venía haciendo hasta que Fry realizó sus investigaciones. Estudiando con ayuda del microscopio la capa periférica de las piezas nitruradas, se ve que, en general, está formada por dos capas de aspecto diferente: una exterior blanca, muy delgada y muy frágil, cuyo espesor suele variar de 0,05 a 0,005 mm, y otra interior de mayor espesor, oscura, que es la verdaderamente importante. Se ha comprobado que esta última capa está formada por nitruros de elementos aleados, y en cambio en la exterior blanca, además de los nitruros de elementos aleados, aparece también el nitruro de hierro. La capa exterior blanca, generalmente de muy poco espesor, es muy perjudicial y su aparición debe evitarse en cuanto sea posible, siendo en cambio la capa interna de mayor espesor formada por los nitruros de aluminio, cromo y molibdeno la de mayor interés en el proceso y la



verdaderamente fundamental. Generalmente, la capa exterior blanca queda eliminada, cuando a las piezas se les da un ligero rectificado.

En los procesos industriales esas capas periféricas duras se forman cuando a la temperatura de nitruración (que como hemos dicho antes es de unos 500°C aproximadamente), se pone el nitrógeno atómico en contacto con la superficie del acero. Entonces el nitrógeno se difunde desde la superficie hacia el interior de las piezas de acero y se forman nitruros submicroscópicos en su zona periférica que, como veremos más adelante, son los causantes del aumento de dureza.

El nitrógeno que se emplea en el proceso proviene del amoníaco que, al ponerse a elevada temperatura en contacto con el acero caliente que actúa como verdadero agente catalizador, se disocia en nitrógeno e hidrógeno atómicos produciéndose las siguientes:



siendo el nitrógeno atómico el agente fundamental en la nitruración. Únicamente una pequeña proporción del nitrógeno reacciona con el acero, transformándose rápidamente el resto en nitrógeno molecular inerte. El hidrógeno también se encuentra en los primeros momentos en estado atómico, pero pasa luego rápidamente al estado molecular.

Diagrama hierro-nitrógeno

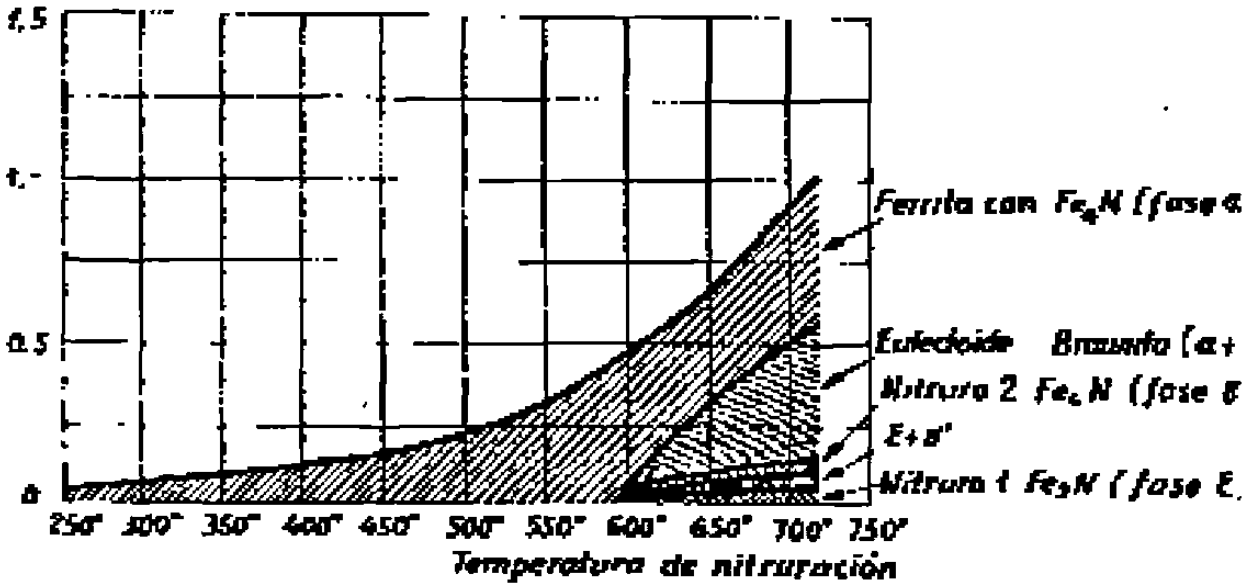
En general, es muy difícil el estudio metalográfico de las piezas de aceros aleados nitrurados a temperatura corriente (unos 500°C aproximadamente), por ser generalmente de tamaño submicroscópico los nitruros que se forman en ese proceso. En el diagrama hierro-nitrógeno se señalan los principales constituyentes que pueden aparecer, determinados en su mayor parte nitrurando los aceros a temperaturas mucho más elevadas que la normal, porque de esa forma se facilita mucho su estudio.

En el diagrama hierro-nitrógeno preparado inicialmente por Fry y corregido luego, algunos años más tarde, por Eisenhut, Kaupp y Cohrer (figura 3.5.4), se señalan las zonas de equilibrio de los constituyentes formados por el hierro y el nitrógeno.

Al estudiar con ayuda del microscopio los aceros al carbono nitrurados a temperatura elevada (muy superior a las corrientes y recomendables), se observa la existencia de dos nitruros: uno Fe_2N (nitruro 1), que contiene 11.3% de nitrógeno, y otro Fe_4N , que contiene 5.8% (nitruro 2). También se observa la presencia de un eutectoide, con 2.35 % de nitrógeno, constituido por hierro alfa y nitruro 2 (fase γ'), al que se le dio el nombre de braunita.

A temperaturas inferiores a la eutectoide (590°C), el porcentaje de nitrógeno que puede formar solución sólida con el hierro alfa es muy pequeño, variando desde 0.42% a 590°C hasta 0.001 % a la temperatura ambiente. En cambio a temperaturas más elevadas, hierro disuelve mayores cantidades de nitrógeno y se forman otros constituyentes.

Profundidad de penetración en mm

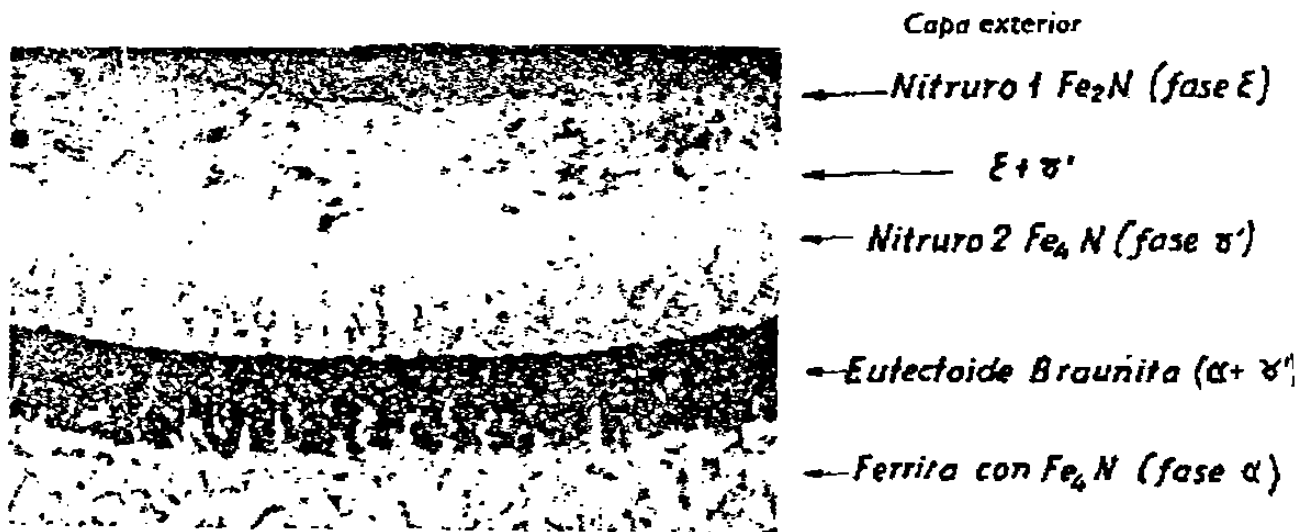


Composición de las capas nitruradas en función de la temperatura de nitruración

El mecanismo de la nitruración difiere bastante del de la cementación. En este último tratamiento se emplean temperaturas elevadas para facilitar la solubilidad del carbono en la austenita y, en cambio, la nitruración se efectúa a temperaturas de unos 500°C aproximadamente, inferiores a la eutectoide (590°C) en las que el porcentaje de nitrógeno que se puede disolver en el acero, es muy pequeño. No se emplean temperaturas más elevadas, porque aunque de esa forma la penetración del nitrógeno sería más fácil, se obtendrían capas nitruradas muy frágiles sin utilidad práctica industrial.

En los aceros ordinarios al carbono, la difusión del nitrógeno hacia el interior se efectúa con más facilidad que en los aceros aleados. A pesar de ello, solo en estos últimos se producen capas superficiales de gran dureza y bien adheridas, debido a que los elementos aleados favorecen la formación de nitruros de aluminio, cromo, molibdeno, etc., en las capas periféricas.

En la figura 3.5.5 se puede ver la microestructura de un hierro nitrurado a 650°C (temperatura demasiado elevada que no se emplea en la práctica industrial). La capa periférica blanca está constituida principalmente por Fe_2N (fase ϵ) luego inmediatamente se observa otra capa formada por los constituyentes ϵ y β a la que



Microestructura de la capa periferica de hierro electrolitico Niturado durante 8 horas a 650 grados

Figura 3.5.5

sigue otra capa constituida por la fase y en la que predomina el Fe_4N . Avanzando hacia el centro, aparece luego una capa oscura de braunita, constituida por la fase y + a que tiene una estructura laminar parecida a la de la perlita y junto a ella, mas hacia el centro, se encuentra la zona de hierro alfa, y junto a ella, mas hacia el centro, se encuentra la zona de hierro alfa, con agujetas de nitruro Fe_4N , que se han separado de la solución sólida en el enfriamiento. Finalmente aparece la zona central sin alterar.

En cambio, cuando la nitruración se hace a temperatura conveniente, 500 °C aprox. los microconstituyentes de la capa exterior son, como ya hemos señalado antes, muy difíciles de observar. La penetración del nitrógeno es lenta y con 60 horas de nitruración solo se suele conseguir una capa de dura de 0,6 mm de profundidad aproximadamente, y además el contenido máximo del nitrógeno en el acero es muy inferior al que corresponde a los aceros nitrurados a temperatura elevada.

Mecanismo del endurecimiento por nitruración.

Aunque en la actualidad no hay unanimidad absoluta en la interpretación de los fenómenos de endurecimiento que se producen en la nitruración, la teoría mas admitida es la desarrollada por Fry y sus colaboradores, que señalan que la gran dureza de la capa nitrurada es debida a que el nitrógeno o los nitruros que se forman en el proceso originan una fuerte deformación de la red cristalina del acero situado en la zona periférica de las piezas, que es la causa directa del aumento de dureza.



Figura 3.5.6
x100



figura 3.5.7
x500

Microestructura de una capa nitridada de un acero cromo-aluminio-molibdeno obtenido por nitruración durante 48 horas a 525 con una disociación de amoniaco de 30%. En la microfotografía de 100 aumentos se puede observar las huellas hechas para determinar la dureza

Fry sugirió que el endurecimiento de los aceros cromo-aluminio es debido a la formación de nitruros de aleación, los cuales por ser insolubles en la matriz de ferrita son precipitados inmediatamente después de su formación en un estado de gran dispersión y la deformación que ocasionan en la red cristalina es la que ocasiona el endurecimiento.

Es probable que el hierro actúe de portador, formándose primero el nitruro de hierro que es soluble en el hierro alfa (ferrita), el cual en estado de solución reacciona con los elementos aleados que también se encuentran disueltos en el hierro alfa.



Figura 3.5.8 x100



figura 3.5.9 x100

Microestructuras obtenidas con el mismo acero de las figuras 371 y 372 obtenidas por el procedimiento Floe. Nitrurando durante 8 horas a 525 con 20% de disociación seguido de nitruraciones a 560 durante 42 horas con 85% de disociación

De esa manera se forma los nitruros aleados que, por ser insolubles en el hierro alfa, se precipitan inmediatamente, quedando en forma de partículas submicroscópicas muy dispersas que deforman la red y aumentan la dureza del acero.

El éxito de Fry al nitrurar a 500 aceros aleados se debe a que en las condiciones que el eligió para la operación, existía en el acero en solución sólida elementos aleados capaces de formar nitruros. Al difundirse hacia el interior el nitrógeno, cuando reacciona con esos elementos, se forman y precipitan nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y vanadio que endurecen extraordinariamente la capa exterior.

La continua precipitación de nitruros aleados muy dispersos en la superficie de las piezas, llega a saturar el acero formándose una barrera de nitruros que se opone a la penetración del nitrógeno hacia el interior.

Una vez saturada la capa periférica, la velocidad de penetración depende de la posibilidad de que ésta capa transmita el nitrógeno hacia el interior, siendo esa velocidad de penetración lenta en especial en los aceros aleados. Este proceso de penetración del nitrógeno es muy diferente del de la cementación, donde el carbono a la temperatura del



Figura 3.5.10
x 100
Microestructura de un acero de
nitruración descarburado



Figura 3.5.11
x 100
Rotura y separación de la capa exterior
de una pieza ocurrida por haber nitrurado
un acero de nitruración descarburado

proceso se disuelve en el hierro gamma (austenita), y al encontrarse en solución en el acero es fácil su difusión hacia el interior. En la nitruración de aceros aleados la penetración a través de la red cristalina deformada por la presencia de los nitruros es difícil. En cambio, en los aceros al carbono, la penetración es más fácil. En la cementación, la penetración del carbono en la austenita no hay tampoco deformación de la red y el carbono se introduce sin gran dificultad hacia el interior.

Descarburación

La presencia de ferrita en la superficie de las piezas nitruradas impide de que la nitruración se haga en buenas condiciones, ya que las capas nitruradas de los aceros con ferrita saltan y quedan frágiles. La descarburación o presencia de ferrita puede ser debido a diferentes causas.

La más frecuente es la descarburación de las piezas o barras durante la forja o laminación o durante los tratamientos o recocidos preliminares.

Otra causa de la presencia de ferrita puede ser el temple imperfecto del material antes de la nitruración, en el que no se ha llegado a la austenización completa o también puede ser debida a la descarburación en el calentamiento del temple. Los mejores resultados se obtienen cuando la nitruración se hace sobre martensita revenida.

Capítulo IV

Endurecimiento convencional

Resumen

Se analiza la información que afecta el endurecimiento convencional del acero como es la composición tamaño de grano, tamaño de las piezas y medio de enfriamiento así como los factores que intervienen en el temple del acero. Las curvas $\langle S \rangle$ como son afectadas por la variación en su composición principalmente el contenido de carbono, manganeso y cromo, así como la influencia del tamaño de grano que modifica la situación y la forma de la curva $\langle S \rangle$, modificándose por tanto como es natural la velocidad crítica de temple, en aceros de la misma composición. las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino.

Se analiza también la influencia del medio de enfriamiento junto con el tamaño y forma de las piezas son los factores que deciden la velocidad de enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos, también se dan tablas de velocidad relativas de enfriamiento en una bola de 4 milímetros templada desde 850° C.

Se estudia características de los procesos de enfriamiento en el temple de los aceros para conocer la influencia que sobre el temple ejercen los diferentes medios de enfriamiento, es interesantes estudiar las etapas que se presentan en estos procesos. La elección del medio de temple para obtener en el temple de los aceros los mejores resultados conviene utilizar el medio de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica, también se especifica algunos medios de enfriamiento más empleados en el temple de los aceros como son el agua, aceite, plomo, mercurio y sales fundidas.

También contemplamos la templabilidad o penetración de temple que se obtiene de los aceros, así como diversos métodos para estudiar el comportamiento de los aceros en el temple como son: examen de fracturas, examen de dureza, de redondos de diferentes diámetros templados, determinación de las curvas de dureza empleando discos de aceros, curvas de resistencia y ataque químico de las secciones templadas.

Revenido. Su objeto no es eliminar los efectos del temple si no modificarlos disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando tensiones internas también se analiza la teoría del revenido estudiando sus etapas que suceden durante el proceso.

Capítulo IV

Endurecimiento convencional

4.1 teoría de temple

Composición, tamaño de grano, tamaño de las piezas y medio de enfriamiento Si se calienta una pieza de acero a una temperatura más elevada que la temperatura crítica superior y luego se enfría más o menos rápidamente, la velocidad de enfriamiento de cada uno de sus puntos es la que regula el fenómeno de temple.

En las zonas de la pieza en que la velocidad de enfriamiento es mayor que la velocidad crítica de temple, el acero templea, y no templará o el temple será imperfecto en las zonas en que el enfriamiento se verifica a velocidad inferior a la crítica de temple.

Los factores que intervienen en el temple del acero, pueden clasificarse en dos grupos:

En el primero se encuentran los que son inherentes a la *calidad del material* y determinan su velocidad crítica de temple. Los más importantes son: la composición y el tamaño del grano. El estado de la estructura microscópica en el momento anterior al temple y el grado de heterogeneidad de la austenita, ejercen también cierta influencia en los procesos de temple.

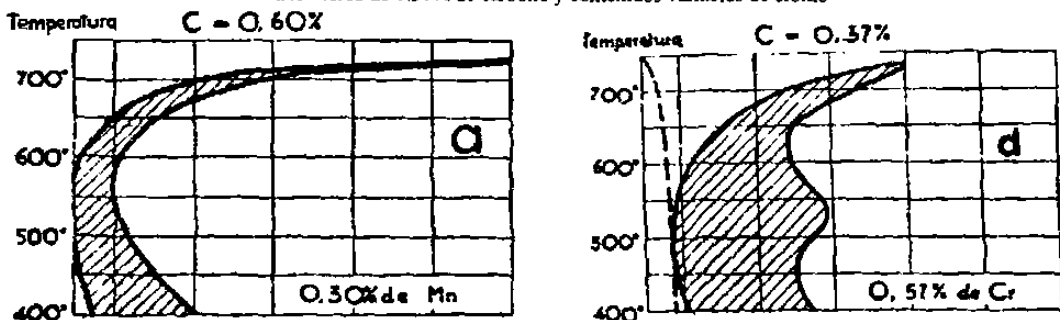
Al segundo grupo pertenecen los factores que determinan la velocidad de enfriamiento de los diferentes puntos de las piezas, siendo los más importantes: la forma y dimensiones de las piezas, su estado superficial, la conductibilidad térmica del acero y el medio empleado para el enfriamiento. También debe tenerse en cuenta la temperatura empleada para el temple, porque si hay variaciones importantes, en ocasiones se acusa la diferencia de temperatura empleadas en el tratamiento.

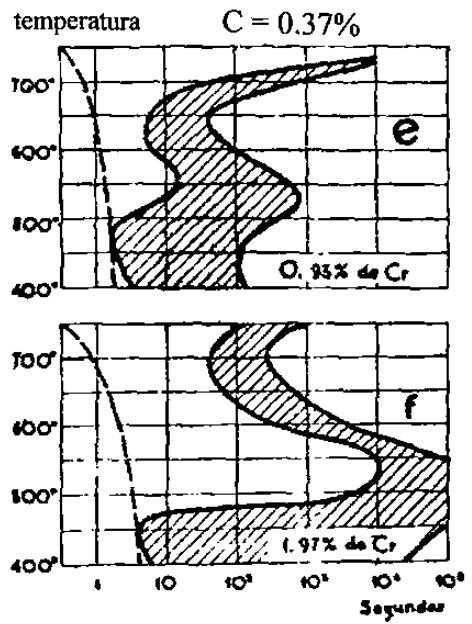
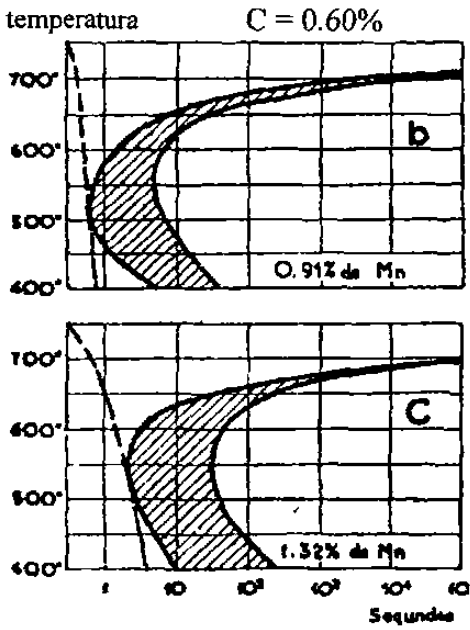
Influencia de la composición

Conociendo la curva de la <S> de enfriamiento continuo de un acero, se puede determinar su velocidad crítica de temple, ya que es precisamente la correspondiente a la línea de enfriamiento tangente a la nariz de la curva de la <S>. Cuando dicha curva presenta más de un bucle o nariz, la velocidad crítica de temple queda determinada por la curva tangente, de enfriamiento más rápido

Para conseguir un temple perfecto y una estructura totalmente martensítica, la velocidad de enfriamiento del acero deberá ser superior a la de la tangente citada anteriormente.

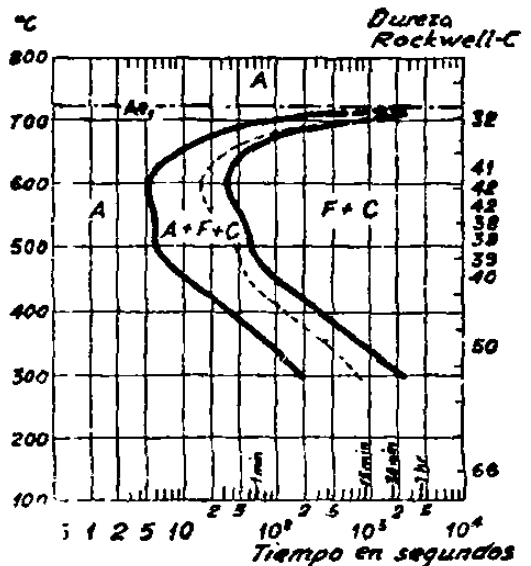
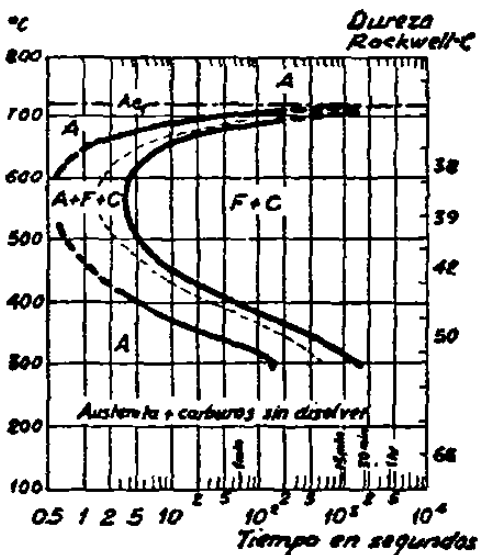
Curvas de la S de tres aceros de 0.60% de carbono, y contenidos variables de manganeso y tres aceros de 0.37% de carbono y contenidos variables de cromo





Aunque el estudio de las velocidades críticas de temple debe hacerse con ayuda de las curvas de la $\langle S \rangle$ de enfriamiento continuo, también las curvas de transformación isotérmica permiten prever con bastante aproximación lo que ocurre en cada caso. Además, como en la actualidad se conocen las curvas de transformación isotérmica de la mayoría de los aceros y en cambio se han determinado muy pocas curvas de transformación continua, en adelante, a pesar de no ser los razonamientos rigurosamente exactos, utilizaremos casi siempre curvas de transformación isotérmica para estudiar ciertos tratamientos y establecer algunas comparaciones de interés.

Las curvas de la $\langle S \rangle$ de la figura, por ejemplo, reflejan claramente la influencia que tiene la composición y el porcentaje de elementos de aleación sobre la velocidad crítica de temple. En esa figura se observa que las curvas de la $\langle S \rangle$ se desplazan hacia la derecha al aumentar el porcentaje de manganeso y cromo y, por tanto, las velocidades críticas de temple disminuyen al aumentar el contenido de elementos de aleación.

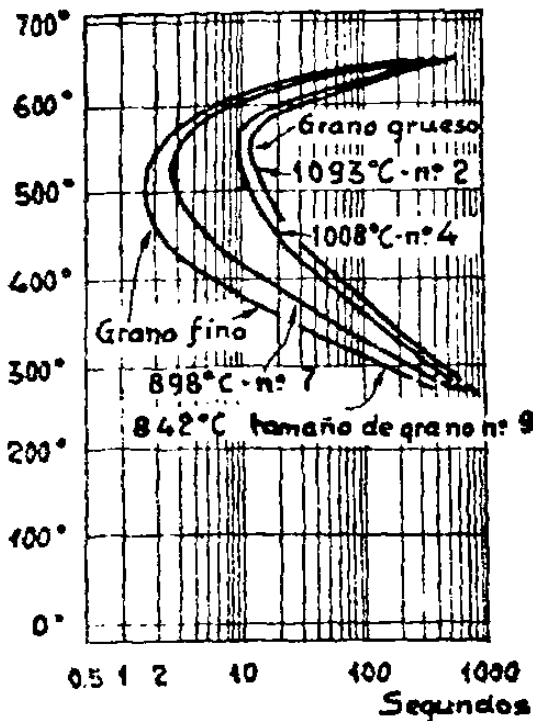


La influencia que los diversos elementos de aleación ejercen en el temple, es muy compleja y difícil de explicar en unas pocas líneas. Sin embargo, en general, todos ellos disminuyen la velocidad crítica de temple, siendo el manganeso y el molibdeno los que actúan con mayor intensidad, siguiendo luego, por orden decreciente de eficacia, el cromo, el silicio y el níquel

Influencia del tamaño de grano

El tamaño de grano modifica, la situación y forma de la curva de la $\langle S \rangle$, modificándose, por tanto, como es natural, la velocidad crítica de temple. En aceros de la misma composición, las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son menores que las velocidades críticas de temple de los aceros de grano fino.

En las figuras se pueden ver las curvas de la $\langle S \rangle$ de los aceros al carbono-vanadio, de la misma composición y de diferente tamaño de grano.



En la figura se puede observar también la influencia que tiene el tamaño de grano en un acero de 0.63% de carbono. En este caso, la diferencia del tamaño de grano es debida a que las muestras fueron calentadas a temperaturas variables desde 842° a 1.093°C. Las probetas calentadas a baja temperatura (842° y 898°C) quedaron con grano fino (núm. 9 y núm. 7), y las calentadas a alta temperatura, con grano grueso (número 2 y 4). Las curvas de la $\langle S \rangle$ correspondiente a cada muestra también son distintas y, como consecuencia, también lo serán las velocidades críticas de temple de cada uno de ellos. Las curvas de la $\langle S \rangle$ de la figura 4.1.1 corresponden a la transformación del 50% de austenita.

Figura. 4.1.1 Curvas de la $\langle S \rangle$ correspondientes a la transformación del 50% de austenita de un acero de .63% de carbono

Influencia del tamaño de las piezas

El volumen y espesor de las piezas tiene gran importancia en el temple de los aceros. Si estudiamos el enfriamiento es agua de un cilindro que ha sido calentado a alta temperatura, fácilmente se comprende que la capa exterior de acero, que está en contacto con el líquido, es la que se enfría primero y más rápidamente. La capa siguiente no se enfría con tanta rapidez, porque el calor no se transmite directamente al líquido sino que debe atravesar antes la capa superficial del acero, y esta capa tiene una conductibilidad bastante limitada. Una tercera capa del acero, situada más al interior se encuentra, la transmisión del calor, se hace cada vez con más dificultad, ya que tiene que atravesar mayor capa de metal. Fácilmente se comprende, también, que las velocidades de enfriamiento en el interior de los perfiles delgados serán mucho mayores que en

los gruesos y que las velocidades en la superficie y en el interior de los redondos de acero de diversos diámetros variarán mucho de unos casos a otros.

Velocidades de enfriamiento que aproximadamente se consiguen a 704°C, en redondos de acero de diversos diámetros templados desde 850°C en agua ligeramente agitada

ENFRIAMIENTO EN AGUA LIGERAMENTE AGITADA							
Diámetro en milímetros	Distancia a la periferia en milímetros						
	0	10	20	30	40	50	60
200	18	10	6	5	4	3	2.8
150	48	22	12	8	5	4	3
100	120	30	15	9	6	5	
50	240	55	28				
25	361	115					
Velocidad de enfriamiento en grados por segundo							

Velocidades de enfriamiento que aproximadamente se obtienen a 704°C en redondos de acero de diversos diámetros templados desde 850°C en aceite ligeramente agitado

ENFRIAMIENTO EN ACEITE LIGERAMENTE AGITADO							
Diámetro en milímetros	Distancia a la periferia en milímetros						
	0	10	20	30	40	50	60
200	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7
150	3.6	3.3	3.1	2.9	2.6	2.4	2.2
100	8.2	7.6	5	4.6	3.7	2.9	
50	45	20	12				
25	125	50					
Velocidad de enfriamiento en grados por segundo							

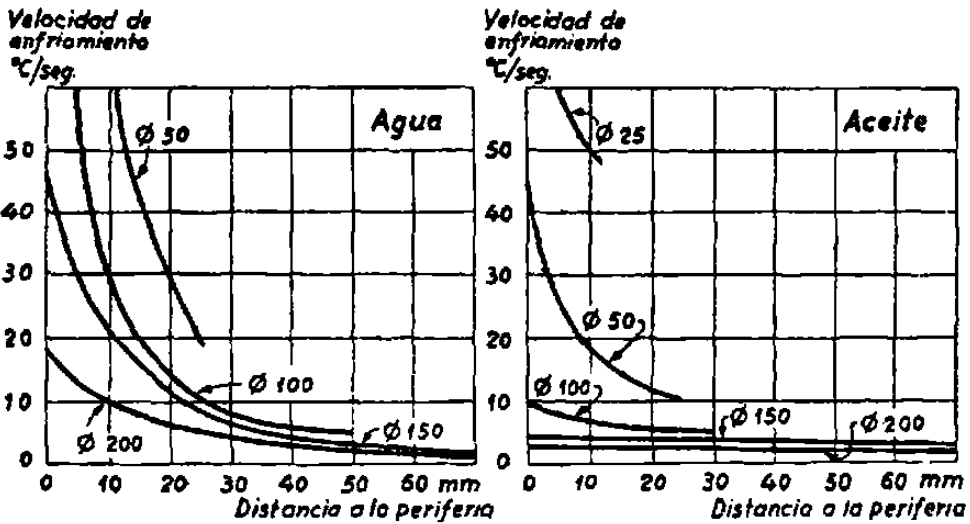


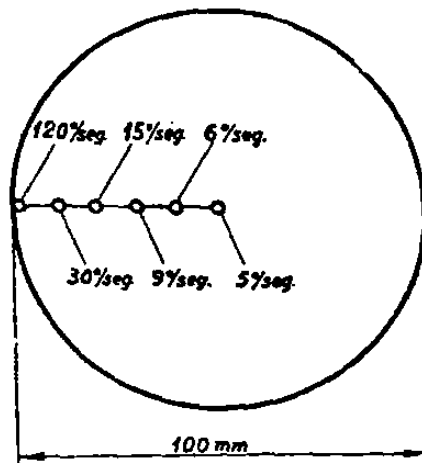
Figura 4.1.2 Velocidades de enfriamiento de diversos redondos templados desde 850°C

en agua y en aceite

La influencia de la masa en la velocidad de enfriamiento se puede ver en las figuras 4.1.2, en las que se señalan las velocidades de enfriamiento a 704°C, que se consiguen aproximadamente en diversos puntos de los redondos de acero de varios diámetros, templados en agua o en aceite ligeramente agitados.

En la figura se señalan las velocidades de enfriamiento en diversos puntos de la sección de un redondo de 100 mm. templado en agua ligeramente agitada.

Velocidades de enfriamiento que se consiguen a 704°C en diversos puntos de un redondo de acero de 100 mm de diámetro templado en agua ligeramente agitada.



Observando todas estas cifras, se comprende claramente por qué en algunos casos las capas superficiales de una pieza se endurecen perfectamente y, en cambio, otras zonas del interior, por enfriarse a velocidades menores, no templan.

Influencia del medio de enfriamiento

El medio de enfriamiento junto con el tamaño y forma de las piezas son, como hemos señalado antes, los factores que deciden la velocidad de enfriamiento de las piezas de acero en los tratamientos térmicos.

Con el enfriamiento en agua salada muy agitada, se consiguen las mayores velocidades, y enfriando las piezas dentro del horno, se obtienen las menores.

Con enfriamientos en aceite, al aire, en sales, etc., se consiguen velocidades intermedias, pudiendo elegirse entre todos ellos el medio que mejor cumpla las condiciones de enfriamiento deseadas en cada caso.

En las figuras siguientes se ve el proceso de enfriamiento de varios puntos de dos redondos de 50 mm. templados en agua y aceite y en la figura las velocidades instantáneas que se obtienen en el centro de redondos de diversos diámetros templados en agua y aceite muy agitados. En esta última figura se observa que desde el comienzo del proceso va aumentando la velocidad de enfriamiento hasta la zona 730°-680°C aproximadamente, donde alcanza un máximo, disminuyendo luego progresivamente hasta la temperatura del baño, existiendo una zona entre 600° y 800°C en la que las variaciones de las velocidades son relativamente muy pequeñas.

En esta tabla se dan las velocidades de enfriamiento que se consiguen en el centro de los redondos de 25, 50 y 75 mm. enfriados en diversos medios de enfriamiento.

Velocidades de enfriamiento que aproximadamente se consiguen a 570°C en el centro de redondos de acero de 25, 50 y 75 mm de diámetro, templados en diversos medios.

ENFRIAMIENTO	DIAMETROS		
	25 mm	50 mm	75 mm
Agua agitada	56	15	7
Aceite agitado	27	10	5
Corriente de aire	1.8	0.9	0.6
Aire tranquilo	0.85	0.4	0.3
Velocidades en grados por segundo			

También la tabla que sigue da una idea de la influencia de los diversos medios que se emplean para el temple de los aceros.

En esa tabla en el intervalo 720°-550°C y en la zona de temperaturas próxima a 200°C se ha tomado como unidad de velocidad de enfriamiento la correspondiente al agua a 18°C.

Conviene recordar que en los tratamientos térmicos la velocidad de enfriamiento varía bastante de unos momentos a otros y, por tanto, siempre que se cite una velocidad debe señalarse a qué momento corresponde.

Velocidades relativas de enfriamiento de una bola de 4 mm
templada desde 850°C en diferentes medios.

MEDIO DE ENFRIAMIENTO	Velocidades relativas de enfriamiento en el intervalo	
	702°-550°	220°
Solución acuosa con 10% de CaCl ₂	2.07	1.04
Solución acuosa con 10% de Na OH	2.06	1.36
Solución acuosa con 10% de CaNa	1.96	0.98
Solución acuosa con 10% de CO ₃ Na ₂	1.38	1.09
Solución acuosa con 10% de SO ₄ H ₂	1.22	1.49
Agua a 0°	1.06	1.02
Agua a 18°	1.00	1.00
Mercurio	0.78	1.09
Agua a 25°	0.72	1.11
Aceites	0.25-0.15	0.05-0.15
Agua con jabón	0.07	1.16
Agua a 75°	0.047	1.01
Agua a 100°	0.044	0.71
Aire	0.028	0.007
Vacio	0.011	0.004

Estudio de las estructuras microscópicas que se obtienen en los tratamientos de los aceros al variar la velocidad de enfriamiento.

La influencia de la velocidad de enfriamiento, que se consigue en los tratamientos de las piezas de acero, como consecuencia del empleo de diferentes medios de enfriamiento, se puede estudiar con bastante claridad con ayuda del diagrama de transformaciones en el enfriamiento continuo. En la figura se señala el correspondiente a un acero cromo-níquel-molibdeno, que nos servirá como ejemplo.

En las operaciones de recocido se emplean, generalmente, en los talleres velocidades de enfriamiento inferiores a 20° por hora, y las curvas de enfriamiento del acero representativas de esos tratamientos llevados sobre el diagrama de la figura 4.1.2, quedarán por encima y a la derecha de la curva núm. 1, obteniéndose al final del tratamiento ferrita y perlita, quedando el material con poca dureza.

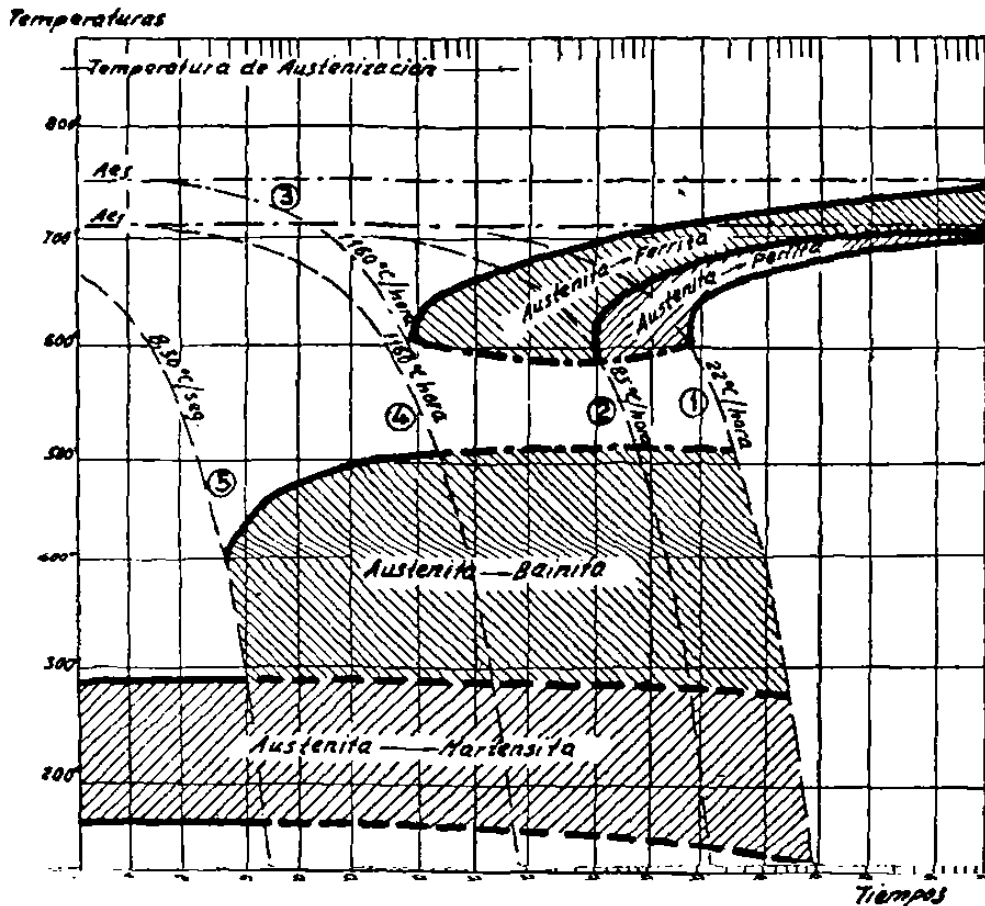


Figura 4.1.2 Curvas de la <S> de enfriamiento continuo de un acero de:
 C = 0.40%, Mn = 0.67%, Cr = 0.71%, Ni = 1.82%, Mo = 0.33%

Con velocidades de 22° a 83°C por hora, que corresponden a enfriamientos un poco rápidos dentro del horno, las curvas de enfriamiento, atraviesan los campos de la ferrita, perlita, bainita y martensita (zonas comprendidas entre las curvas núm. 1 y 2).

En los procesos de enfriamiento correspondientes a esas velocidades, la austenita comenzará a transformarse primero en ferrita; luego, al cortar la línea representativa del enfriamiento del acero, a la zona de perlita, se inicia la formación de este constituyente.

Al continuar el enfriamiento, como antes de terminarse la transformación total de la austenita en perlita, la curva del acero sale del campo de la perlita, una parte de la austenita se transformará en bainita y al alcanzar el acero la temperatura de nacimiento de la martensita, todavía quedará algo de austenita, que se transformará en martensita. Como resultado final de la transformación, obtendremos en la estructura del acero: ferrita, perlita, bainita y martensita.

En los normalizados se obtienen generalmente velocidades variables desde 100° a 30,000°C por hora y las curvas de enfriamiento de estos procesos se hallan comprendidas entre las curvas 2 y 5.

Para velocidades de 83° a $1,160^\circ\text{C}$ por hora (zona comprendida entre las curvas núm. 2, 3 y 4), ya no se atraviesa el campo de la perlita, y la microestructura estará compuesta por ferrita, bainita y martensita. Estas velocidades se obtienen en piezas de bastante espesor, normalizadas.

Con velocidades comprendidas entre $1,150^\circ$ y $30,000^\circ\text{C}$ por hora (8.3° por segundo), que son las que aproximadamente se obtienen en el interior de las piezas de 200 a 70 mm. de espesor enfriadas en aceite y en perfiles muy delgados enfriados al aire, las curvas de enfriamiento quedan en el espacio comprendido entre las curvas núm. 4 y 5, ya no se obtiene ferrita y la estructura final está formada por bainita y martensita. Con velocidades superiores a $30,000^\circ\text{C}$ grados por hora (8.3° por segundo), la estructura que se obtiene es totalmente martensítica, siendo esta velocidad de 8.3° por segundo la velocidad crítica de temple de este acero.

Por tanto, si el acero se enfría con velocidades de 10° , 20° , 100° ó 200°C por segundo, que son velocidades superiores a la crítica, el acero templea, y en cambio, si las velocidades son de 5° , 3° ó 1°C por segundo, el temple será imperfecto y además de martensita aparecen en la estructura otros constituyentes más blandos.

Características de los procesos de enfriamiento en el temple de los aceros

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

Pilling y Lynch al determinar las curvas de enfriamiento del acero empleando diversos medios refrigerantes, estudiaron las variaciones que experimentan los poderes de enfriamiento de los líquidos en los procesos de temple en función de la temperatura del acero. Sus observaciones, que son muy interesantes, revelan la existencia de tres mecanismos muy diferentes de disipación de calor, que también han sido comprobados por Sperth y Lange, y que se explican a continuación.

En la figura 4.1.3 puede verse una curva muy típica de enfriamiento, que corresponde a un cilindro de acero de poco diámetro, templado en agua a 76°C . Se puede observar que la velocidad de enfriamiento, que al principio es lenta, va aumentando, alcanza un máximo y luego disminuye, llegando por fin a igualarse la temperatura del acero y la del líquido, advirtiéndose tres fases muy señaladas, cuyas características explicaremos a continuación.

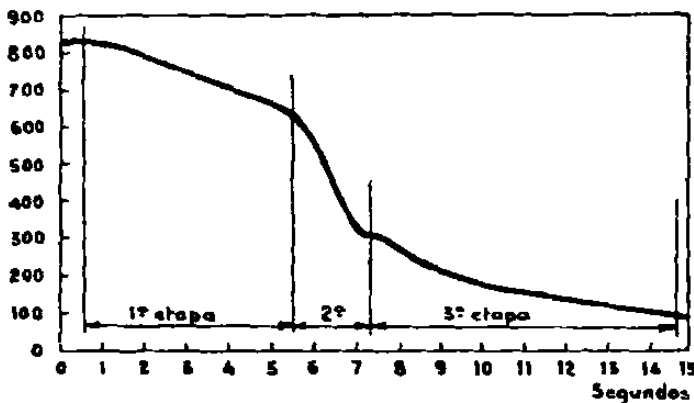


Figura 4.1.3 Curva de enfriamiento de un cilindro templado en agua caliente a 76°C

Primera etapa.

Cuando el acero es introducido en el líquido, como su temperatura es muy alta, se forma una capa de vapor que rodea el metal y el enfriamiento se hace por conducción y radiación a través de la capa gaseosa. El enfriamiento en el comienzo de esta fase es relativamente lento, influyendo en ello principalmente la temperatura de ebullición del líquido y también la conductibilidad del vapor.

Segunda etapa.

Cuando desciende la temperatura de la superficie del metal, la película de vapor va desapareciendo. Sin embargo, el líquido hierve todavía alrededor de las piezas y se forman muchas burbujas que rodean el acero. Estas burbujas son transportadas principalmente por corrientes de convección. El vapor se va separando de la superficie de la pieza y va siendo reemplazado por líquido. Esta es la etapa de más rápido enfriamiento y es llamada de enfriamiento por transporte de vapor.

Tercera etapa

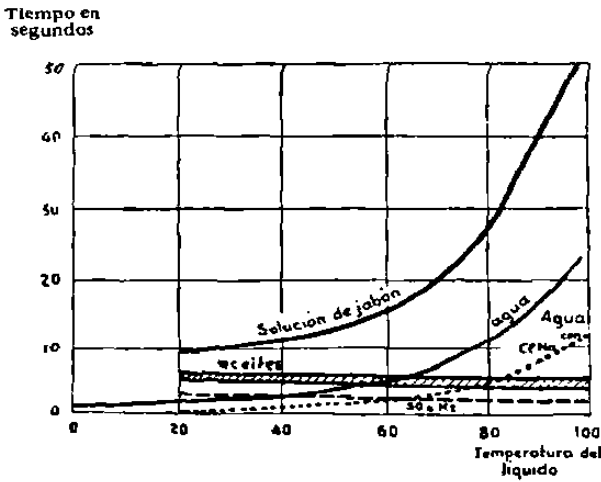
Esta etapa se presenta generalmente por debajo de 300°C. El enfriamiento lo hace el líquido por conducción y convección, cuando la diferencia de temperatura, entre la superficie y el medio refrigerante es ya pequeña. Esta etapa se llama de enfriamiento por líquido y es más lenta que las anteriores, dependiendo su importancia de la conductibilidad térmica del líquido y de su agitación.

Resumiendo, se puede decir que en esas diversas etapas el enfriamiento se realiza en las siguientes formas:

- 1a. etapa.* Conducción y radiación a través de la capa gaseosa.
- 2a. etapa.* Transporte de vapor.
- 3a. etapa.* Conducción y convección del líquido.

Por tanto, las propiedades que más influyen en el poder templante de los líquidos son: su temperatura de ebullición, su conductibilidad térmica, su viscosidad, su calor específico y su calor de vaporización.

La temperatura de ebullición es muy importante en la primera etapa, el calor de vaporización en la segunda y la conductibilidad térmica en la tercera. La viscosidad también influye en la velocidad de enfriamiento en la segunda y tercera etapa.



En las siguientes figuras 4.1.4 y 4.1.5 se ve que en las soluciones acuosas, la duración de la primera fase depende de la temperatura del líquido, y como para conseguir que los aceros templen, esta fase debe ser lo más corta posible para evitar que en la zona de los 650° a 500°C (correspondiente a la nariz de la <S>) se formen estructuras blandas, se comprende la necesidad de que el agua no se caliente ni pase de los 30°C. Cuando el agua está caliente, se

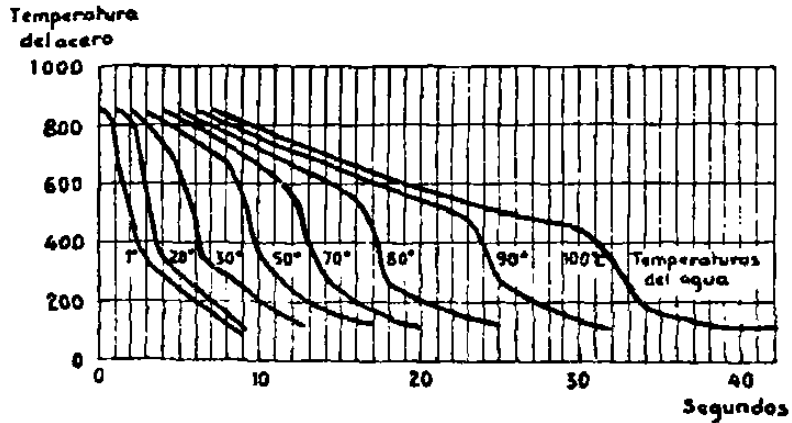
Figura 4.1.4

prolonga demasiado el enfriamiento por vapor y aparecen puntos blandos. En la

misma figura se ve también la influencia tan perjudicial que ejerce el jabón en solución en el agua.

Se puede apreciar también la ventaja de la adición del NaCl al agua y el excelente comportamiento de los aceites y del ácido sulfúrico. Este relativamente corta, por lo que teóricamente es el mejor de todos, pero su gran poder corrosivo impide su utilización.

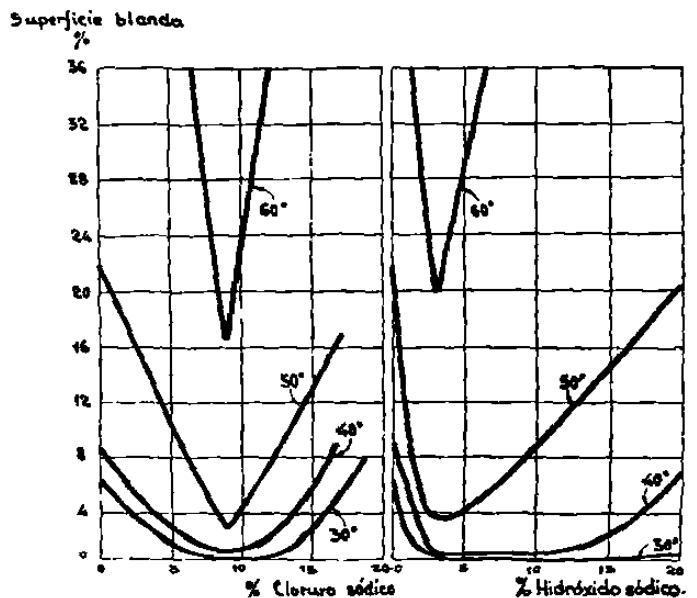
Figura 4.1.5



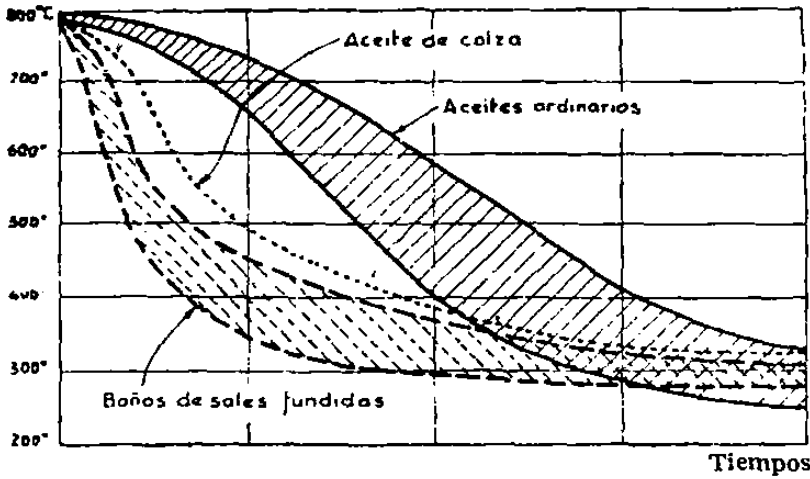
En la figura 4.1.6 se ve la conveniencia de usar agua con cloruro sódico (sosa cáustica) en solución, cuando se quiere evitar la aparición de puntos blandos en la superficie de los aceros de herramientas o aceros de cementación templados. Se observa que el porcentaje de puntos blandos, disminuye al descender la temperatura del baño de 60° a 30°C y que también, las superficies blandas son mínimas para concentraciones de 9% de cloruro sódico y de 3 a 15% de hidróxido sódico.

Figura 4.1.6 Influencia del contenido de Cloruro sódico y de hidroxido sódico en el agua sobre el porcentaje de puntos blandos en superficie de aceros templado

Empleando aceite, la primera fase



de vapor es menos decisiva que en el agua, ya que el aceite se suele utilizar siempre para aceros que tienen velocidades críticas de temple relativamente bajas. La segunda etapa tiene en aceite bastante importancia. Es interesante destacar que el enfriamiento es más rápido en aceite caliente que en aceite frío, debido a que al elevarse la temperatura, el aceite se vuelve más fluido y la transmisión del calor se efectúa mucho mejor.



Observando en la figura 4.1.7 las curvas de enfriamiento de una esfera de acero calentada a 800°C y enfriada luego en diferentes medios, se comprende la ventaja de emplear aceite de colza y los baños de sales fundidas, en lugar de los aceites ordinarios, por conseguirse con ellos las condiciones ideales del

temple que son:

de una esfera enfriada en diferentes líquidos de temple

enfriamiento rápido en las primeras etapas y lento en la última.

Elección del medio de temple

Para obtener en el temple de los aceros los mejores resultados, conviene utilizar el medio de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica. De esta forma, se consigue una estructura totalmente martensítica, la máxima dureza compatible con su composición y se evitan en lo posible las grietas y deformaciones. En los enfriamientos rápidos siempre existe el peligro (independientemente de la composición del acero) de que se creen tensiones, debido al desigual enfriamiento de las piezas, ya que la periferia se enfría rápidamente, mientras en el corazón el acero está todavía a elevada temperatura. En los enfriamientos lentos, en cambio, la temperatura es mas uniforme en toda la masa de las piezas, y son menos frecuentes las grietas y deformaciones.

Antiguamente el temple se efectuaba siempre por enfriamiento rápido de los aceros en agua; entonces se empleaban exclusivamente los aceros al carbono, con el inconveniente de que cuando las piezas eran complicadas aprecian con frecuencia deformaciones y grietas. Cuando los perfiles eran delgados e irregulares, tampoco se podían enfriar bruscamente porque se agrietaban. Entonces se enfriaban en aceite o por otros procedimientos, pero a veces no se conseguía la dureza deseada.

A mediados del siglo XIX se inventaron los aceros especiales, en los que debido a la presencia de ciertos elementos, como el cromo, níquel, wolframio, etc., las velocidades críticas de temple son muy bajas y se pueden obtener con ellos gran dureza, aunque el enfriamiento no se

haga muy rápidamente. Estos aceros aleados se templen generalmente en aceite o en baños de sales.

Como la gran diversidad de aceros que existe en la actualidad, crea con frecuencia dudas, sobre el medio de enfriamiento más conveniente, hay que guiarse siempre por las recomendaciones de las acererías o por el análisis y dimensiones de las piezas.

Las velocidades críticas de temple varían bastante de unos aceros a otros. Los aceros al carbono exigen las mayores velocidades, que son, aproximadamente, para 0,50% de C, 350°C por segundo; para 0,80% de C, 200°C por segundo. En cambio, los aceros especiales tienen velocidades de temple más pequeñas. Así, por ejemplo, la de un acero para brocas de bajo contenido en wolframio, es aproximadamente, de 35°C por segundo.

En general, se templen en agua todos los aceros al carbono en piezas de más de 5 ó 10 mm. de espesor y también los aceros de poca aleación en espesores superiores a 25 mm. Debe utilizarse agua a 15° o 20°C, no debiendo sobrepasar la temperatura de 30°C. En aceite se pueden templear los perfiles inferiores a 5 ó 10 mm. aproximadamente de los aceros antes citados y todos los de alta aleación. Con aceite caliente entre 30° y 60°C se obtienen los mejores resultados. Al aire, por fin, se templen los aceros de muy alta aleación.

Aunque siempre los fabricantes señalan en sus catálogos el medio de enfriamiento que debe emplearse para el temple de cada acero, conviene recordar que muchas veces hay que templear una herramienta de menos de 3 mm. de espesor fabricada con ese acero, conviene enfriarla en aceite, porque se alcanzará la dureza deseada y el peligro de que aparezcan grietas es menor que templado en agua. Un acero cromo-vanadio de 1% de carbono, 1,50% de cromo y 0,20% de vanadio, que es de temple en aceite, se templeará en agua cuando se utilice para herramientas de 100 y 200 mm. de espesor, que deban quedar con una dureza superior a 60 Rockwell-C. Todo esto ocurre por la necesidad de rebasar la velocidad crítica de temple y porque en estos casos extremos de piezas muy delgadas o muy gruesas, las velocidades de enfriamiento que se consiguen son bastante diferentes de las que generalmente se suelen considerar como normales y que corresponden casi siempre a piezas de 25 a 50 mm. de diámetro, que son a las que se suelen referir los catálogos.

Medios de enfriamiento mas empleados en el temple de los aceros

Agua.

Debe evitarse que el agua se caliente durante el temple. Conviene que la temperatura del agua oscile entre 15° y 20°C, pues si la temperatura es superior a 30°C, se prolonga exageradamente la primera etapa del enfriamiento, lo que es un gran inconveniente, porque con ello disminuye la velocidad de enfriamiento en la zona 750°-600° y se favorece, sobre todo en los aceros de poco poder templante, la formación de estructuras blandas.

Aceite.

Se suelen emplear aceites animales, vegetales y minerales. Antiguamente se usaban sólo aceite de los dos primeros grupos y entre ellos los aceites vegetales, y sobre todos el aceite de colza era el preferido.

También se empleaban los aceites de pescado, ballena, etc., pero sólo en circunstancias excepcionales de escasez. Los aceites animales y vegetales con el uso continuo a temperaturas de 50° a 125°C se descomponen, espesan y se vuelven gomosos dando temple bastantes irregulares. Además suelen resultar caros y de olor desagradable.

Los mejores aceites para el temple son los aceites minerales obtenidos en la destilación fraccionada del petróleo, preparando ya en la actualidad muchas destilerías algunos tipos, especialmente fabricados para el temple de los aceros.

Un buen aceite de temple debe poseer las siguientes propiedades:

1. Su viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites. Si el aceite es demasiado viscoso, la película de aceite próxima a la superficie del metal tiende a carbonizarse, porque las corrientes de convección son muy lentas. Esa carbonización disminuye el poder refrigerante del aceite y limita su utilización. Si la viscosidad es baja, el aceite se adhiere menos a las piezas, pero se volatiliza rápidamente con la consiguiente pérdida de líquido. Por tanto, la viscosidad debe estar comprendida entre ciertos límites, que a la temperatura ambiente son de 5° a 9° Engler, y a 50° son de 2° a 4° grados Engler.

Con el uso, la viscosidad del aceite aumenta, llegando algunas veces después de varios meses de empleo a 15° ó 30° Engler a la temperatura ambiente, siendo necesario evitar el uso de aceites de estas características.

2. La volatilidad no debe ser demasiado elevada porque se pierde aceite con el uso y se espesa el baño, con la consiguiente pérdida en la velocidad de enfriamiento.

Además, un aceite volátil, al ponerse en contacto con el metal caliente, desprende numerosas burbujas y se forma mucho vapor alrededor de las piezas, disminuyendo la velocidad de enfriamiento y prolongándose la fase de enfriamiento con vapor, que suele dar lugar a la aparición de puntos blandos.

3. Las temperaturas de inflamación y combustión deben ser lo más elevadas posible, para evitar excesivo humo en el taller y también el peligro de que se inflame el baño.

En los aceites corrientes la temperatura de inflamación suele oscilar entre 180° y 275°C y la de combustión entre 200° y 325°C, considerándose las de 215° y 275°C como satisfactorias.

4. Deben tener gran resistencia a la oxidación. En los últimos años las refinerías de petróleo han logrado producir aceites que, con relativa baja viscosidad, tienen gran resistencia a la oxidación. Por selección del aceite crudo se pueden fabricar aceites con una cantidad muy pequeña de hidrocarburos poco estables, que resisten en caliente mucho mejor que los demás la oxidación por el oxígeno del aire. Los ensayos de pérdida por evaporación y de aumento de la viscosidad son los que mejor califican la calidad de los aceites de temple. H

Plomo.

Desde hace bastantes años se emplea este metal fundido para el temple. Las aplicaciones más generales son el temple de herramientas de aceros especiales y el temple de muelles. También se utiliza para el temple del alambre < cuerda de piano >. En esos casos se introduce el acero caliente en plomo fundido y allí se enfriará hasta la temperatura que tenga el baño, que suele oscilar entre 350° y 600°C.

El plomo posee una gran conductibilidad, por lo cual el calentamiento del baño se hace bastante rápidamente y también enfría con relativa rapidez las piezas que se templean.

Su elevado peso específico es un inconveniente, pues las piezas flotan y hay que preparar dispositivos especiales para que se introduzcan en el baño. Como el plomo se oxida fácilmente, hay que evitar que la superficie del baño esté en contacto con la atmósfera, cubriéndolo con pequeños trozos de carbón vegetal.

Mercurio.

Para el temple de piezas muy delicadas, como instrumentos de cirugía, etc., o para piezas de gran dureza, se empleaba algunas veces el mercurio, pero su elevado peso específico y precio limitan sus aplicaciones, por lo que en la actualidad casi no se emplea.

Sales fundidas

Para el tratamiento térmico de los aceros, son cada día más empleados baños de sales fundidas. Están constituidos principalmente por cantidades variables de cloruros, carbonatos, nitritos, nitratos y cianuros de sodio, potasio y bario, y se utilizan para temperatura variables desde 150° a 1.300°C. Unas veces, se usan como medio de enfriamiento y sustituyen con ventaja al aceite y al plomo fundido, y otras veces, en cambio, se utilizan para calentar las piezas y también para cementarlas o nitrurarlas.

Aunque aquí nos estamos refiriendo a *medios de enfriamiento*, y como veremos a continuación, las salen en la mayoría de los casos se usan para el calentamiento, las citamos aquí por utilizarse también algunas de ellas para enfriar.

De acuerdo con su utilización *se pueden clasificar en seis grupos:*

1. Sales que se emplean en un intervalo de temperaturas comprendido entre 150° y 400°C.

Se suelen emplear con dos fines principales: A) Para enfriar las piezas que han sido calentadas (en horno de mufla) a la temperatura de temple y que al ser enfriadas en las sales sufrirán un temple, martempering, austempering, etc., y B) para calentar durante el revenido piezas o herramientas templadas.

Para ambos usos se suelen emplear sales L-1, L-2 y L-3 de la Tabla I preparados principalmente a base de nitritos y nitratos. Son muy utilizadas: la mezcla de 56% de nitrato potásico (NO₃K) y 44% de nitrito sódico (NO₂Na), que funde a 147° y puede utilizarse desde 150°C y la mezcla de 51,3% de nitrato potásico y 48,7% de nitrato sódico (NO₃Na), que funde a 217° y puede usarse desde 245°C.

Temperatura de fusión de diversas sales

2. Para calentar durante el revenido de herramientas y piezas a temperaturas comprendidas entre 400° y 600° ó para el enfriamiento, en tratamientos isotérmicos, se suelen emplear sales L-4 y L-5, constituidas generalmente a base de cloruro sódico, cloruro cálcico, cloruro bórico, carbonato sódico, etc.

3. Sales que se emplean para el calentamiento en el temple de herramientas en el intervalo 700°-950°. Para ese tratamiento se utilizan sales del tipo I de la Tabla XIII, constituidas principalmente a base de cloruro bórico, cloruro potásico, cloruro sódico y cloruro cálcico, cuyo fin principal es evitar la descarburación de las herramientas durante el tiempo que dura el calentamiento.

Como durante el proceso de trabajo se suele modificar la composición del baño, de vez en cuando se añaden pequeñas cantidades de una sal rectificadora, utilizándose para ese fin el bórax, cianuro sódico o carburo de silicio.

Estas sales son parecidas a las del grupo 2., pero el contenido en cloruro bórico (50 a 80%) es más elevado. A veces también se suelen preparar estas sales con pequeños contenidos de fluoruro sódico y carburo de silicio, inferiores siempre a 5%.

4. Sales que se emplean para cementar. Constituidas principalmente a base de cianuros y cuyas características se estudian en el siguiente Capítulo (Cementación).

5. Sales para nitrurar herramientas. Constituidas principalmente por cianuro sódico y potásico.

6. Sales para el calentamiento en el temple de acero rápido y de alta aleación del tipo H. Estas sales que se utilizan a temperaturas muy elevadas de 1,000° a 1,3000°, suelen estar constituidas principalmente por cloruro bórico (95% aproximadamente) y pequeños porcentajes de cloruro sódico.

Para evitar que con el uso se vuelvan descarburantes, se les añade periódicamente pequeñas cantidades de sílice, SiO₂ en polvo.

A veces estas sales se preparan también con pequeñas cantidades de fluoruro cálcico, sílice y bióxido de titanio, en cantidades inferiores siempre a 5%.

Templabilidad o penetración de temple

La dureza que se obtiene en el temple de los aceros y la templabilidad o penetración de temple, son dos características que se confunden con mucha frecuencia y que, sin embargo, conviene diferenciar con claridad.

Si templamos varias clases de aceros, podemos ver que unos se endurecen más y otros menos. También vemos que la penetración de la dureza hacia el interior es también unas veces mayor que otras. La dureza es la resistencia que opone el material a la penetración, y la templabilidad viene determinada por la profundidad y distribución de la dureza en el interior de las piezas.

Para aclarar estos conceptos, estudiaremos lo que sucede al ensayar dos aceros, uno ordinario sin aleación con 0,45% de carbono y otro aleado con cromo y vanadio de 0,40% de C, 1% de Cr y 0,18% de Va.

Si templamos en agua una varilla de 10 mm. de diámetro de cada uno de esos dos aceros, obtendremos en una sección transversal del exterior al interior las siguientes durezas: acero al carbono 57-57-56 y 55 Rockwell-C; acero cromo-vanadio 52-52-52 y 52 Rockwell C (figura).

Si templamos redondos de 100 mm. de diámetro de los mismos aceros, obtendremos resultados muy diferentes (figura). Ahora, la dureza disminuye muy rápidamente del exterior al interior en el acero al carbono y, en cambio, se conserva más uniforme en el acero cromo-vanadio. Los resultados obtenidos son los siguientes: acero al carbono, 48-26-20 y 15 Rockwell-C; acero cromo-vanadio, 50-44-38 y 36 Rockwell-C

Estas diferencias de penetración de la dureza se presentan por ser diferente la templabilidad de estos aceros.

Vemos, pues, que la dureza y templabilidad son cosas distintas. Las varillas de acero ordinario al carbono de 10 mm. de diámetro adquieren el temple más dureza (57 Rockwell-C) que las del acero cromo-vanadio (52 Rockwell-C), lo cual es natural por ser el contenido en carbono ligeramente más elevado. En cambio, la penetración de esa dureza en el redondo de 100 mm. de diámetro, o sea, la templabilidad, es mucho menor en el acero al carbono que en el aleado.

Esto tiene mucha importancia al fabricar piezas para motores y maquinaria, como se puede ver en el siguiente ejemplo:

Si se quiere fabricar una pieza de 10 mm. de diámetro con 90 Kg. de resistencia, se pueden elegir muchos tipos de aceros. Si se emplean por ejemplo un acero ordinario al carbono de 0,45% de C, y un acero cromo-níquel-molibdeno de $C=0,32\%$, $Cr = 0,75\%$, $Ni=2,5\%$ y $Mo=0,50\%$, después del temple y revenido, se obtienen los siguientes resultados: acero al carbono, $R=90 \text{ Kg./mm}^2$, $A=15\%$. Acero cromo-níquel-molibdeno, $R=90 \text{ Kg./mm}^2$; $A=16\%$

En cambio, si se necesita fabricar una pieza que tenga 100 mm de diámetro con aquella resistencia, se ve que al templar la pieza de acero al carbono no se puede conseguir en su interior más de 75 Kg./mm² por muy rápidamente que se enfríe el acero en el temple, y no se puede, por tanto, fabricar de ninguna manera con esa clase de acero la pieza que necesitamos.

En cambio, con el acero especial cromo-níquel-molibdeno, se alcanza en el núcleo central, después del temple en aceite, 145 Kg./mm², y después del revenido quedará con 90 Kg./mm² y 16% de alargamiento.

Hemos visto que la templabilidad influye notablemente en los resultados cuando se ensayan piezas de bastante espesor y, en cambio, influye muy poco cuando se templan perfiles delgados, es decir, que con aceros de diferente aleación y del mismo contenido en carbono se obtienen características casi idénticas cuando se trata de pequeños diámetros y muy diferentes cuando se trata de piezas de gran espesor.

Nosotros hemos obtenido con un acero corriente al carbono de 0,42% de C, en gran cantidad de varillas de 4 mm., una resistencia de 90 Kg/mm² y un alargamiento de 16%, que son características excepcionales propias de los mejores aceros especiales de alta aleación.

Esto ocurre porque las características mecánicas de los aceros dependen principalmente de la microestructura del material. Como en los perfiles muy delgados, cualquiera que sea la templabilidad del acero, el temple penetra hasta el corazón, la microestructura y, por tanto, las características son casi idénticas en todos los aceros del mismo contenido en carbono.

La dureza máxima, que se puede obtener en los aceros después del temple, viene señalada en la figura y depende principalmente del contenido en carbono del acero. La penetración de temple o templabilidad, depende en cambio de los elementos de aleación y del tamaño de grano del acero. Los elementos que más favorecen la penetración de temple son el manganeso,

molibdeno y cromo. En los aceros aleados, especialmente en los de bajo contenido en carbono, se ha comprobado, sin embargo, que los elementos de aleación aumentan (aunque sólo ligeramente) la dureza correspondiente al acero ordinario.

Diversos métodos para estudiar el comportamientos de los aceros en el temple

Como el comportamientos de los aceros en el temple es de gran interés para decidir su utilización, se han desarrollado numerosos procedimientos para ponerlo de manifiesto. Entre ellos los más utilizados son: 1. El examen de la fractura de barras templadas. 2. El estudio de las curvas de dureza o de resistencia en el interior de barras templadas. 3. El ataque químico de las secciones transversales templadas. 4. La determinación de las zonas de 50% de martensita, y 5. el ensayo Jominy.

Los factores que hay que conocer y tener en cuenta para determinar la penetración de temple de un acero son dos: la dureza y la distribución de la dureza en el interior de las piezas.

Examen de las fracturas

Uno de los procedimientos más antiguos para determinar la templabilidad es el ensayo de fractura de los aceros templados. Es muy práctico y simple, aunque sólo se suele utilizar en los aceros de herramientas al carbono y carbono-vanadio u otros de baja aleación.

Consiste en preparar una serie de barretas cilíndricas, entalladas, de 3/4 de pulgada (19,05 milímetros) de diámetro y 125 mm. de longitud, que son templadas en agua a temperaturas de 790°, 815°, 850° y 875°. Después se rompen por choque y se examinan las fracturas.

Por la diferencia entre el grano de fractura, generalmente grosero en la zona central (sin templar), y fino el de la exterior (templado), se conoce fácilmente la profundidas de temple alcanzada en cada caso.

Curvas de dureza de redondos de diferentes diámetros templados

Otro de los procesos empleados para conocer la templabilidad de los aceros, consiste en determinar después del temple la dureza en el interior de redondos de acero.

Se comienza preparando por forja o laminación una serie de barras de diversos diámetro, que después de un ligero torneado se dejan a medidas escalonadas, por ejemplo de 25, 50, 75, 100, 150 y 250 mm. de diámetro. Luego se temple esos redondos y a continuación se cortan las barras y se determinan las durezas en la sección transversal, desde la periferia al centro. Con los resultados obtenidos se puede, finalmente, construir las curvas de dureza, llamadas generalmente <curvas U> que caracterizan a cada tipo de acero.

Ensayando tres aceros del mismo contenido en carbono y diferentes elementos de aleación cuya composición se da continuación, en perfiles de 100, 75, 50 y 25 mm. de diámetro templados en agua, hemos obtenido los resultados señalados en la figura.

4.2 REVENIDO

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para el uso destinado. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a temperaturas debajo de la línea crítica inferior, enfriándolo luego en aceite o al aire según la composición química. El objeto del revenido no es eliminar los efectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando tensiones internas.

Teoría de revenido

El proceso de revenido se puede estudiar desglosando las etapas que ocurren durante el proceso (figura 4.2.1)

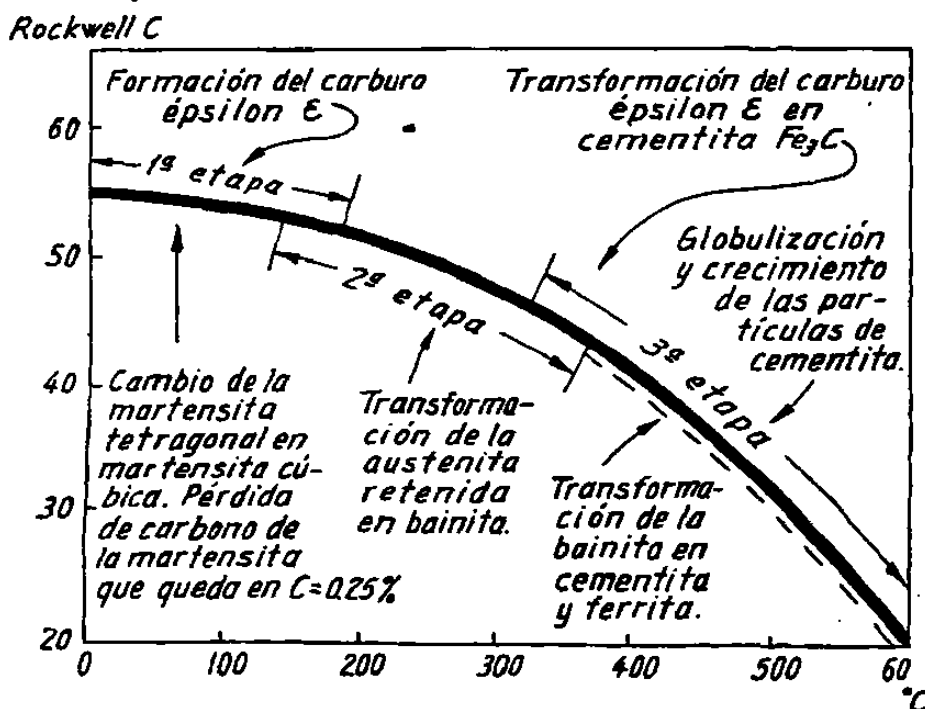


Figura 4.2.1 Etapas de revenido

primer etapa.-

Esta se realiza a bajas temperaturas inferiores a $300^{\circ}C$, y en ellas se precipita un carburo de hierro, llamado épsilon y el contenido de carbono de la martensita baja a 0.25% el carburo épsilon cristaliza en sistema hexagonal su fórmula es $Fe_{2.4}C$ y es un carburo diferente a la cementita. La precipitación de dicho carburo se realiza en el límite de grano y este ocasiona la pérdida de carbono en la martensita la cual cambia de red tetragonal a red cubica.

Segunda etapa.-

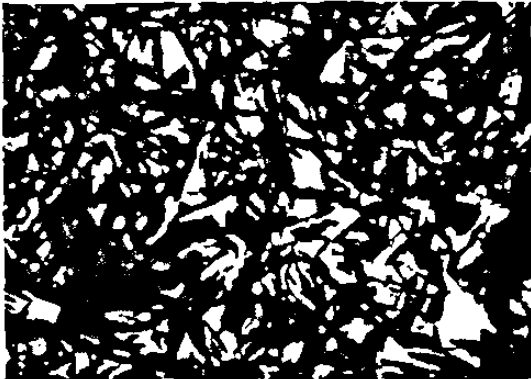
Esta solo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero templado, y en esta etapa la austenita retenida se transforma en bainita, el rango de temperatura es de 150° a 350°C, (figura 4.2.2)



Templado sin revenir.



Templado y revenido a 175°



Templado y revenido a 200°C



Templado y revenido a 225°C

Figura 4.2.2 Microestructura de un acero de 1% de carbono y 5% de Níquel templado y revenido a diversas temperaturas ataque Nital 750 aumentos

Tercera etapa.-

En esta el carburo épsilon que apareció en la primer etapa se transforma en cementita. Al aumentar progresivamente la temperatura del acero, se forma primero un precipitado de cementita en los limites de las agujas de martensita y también en su interior. Luego al aumentar la temperatura se redisuelve la cementita del interior de las agujas, mientras se engruesan en cambio la cementita que envuelve a la martensita al continuar elevándose todavía mas la temperaturas se rompe el envolvente de la cementita haciéndose mas discontinuo llegando a la globulización de esta a 600°C aproximadamente (figura 4.2.3)

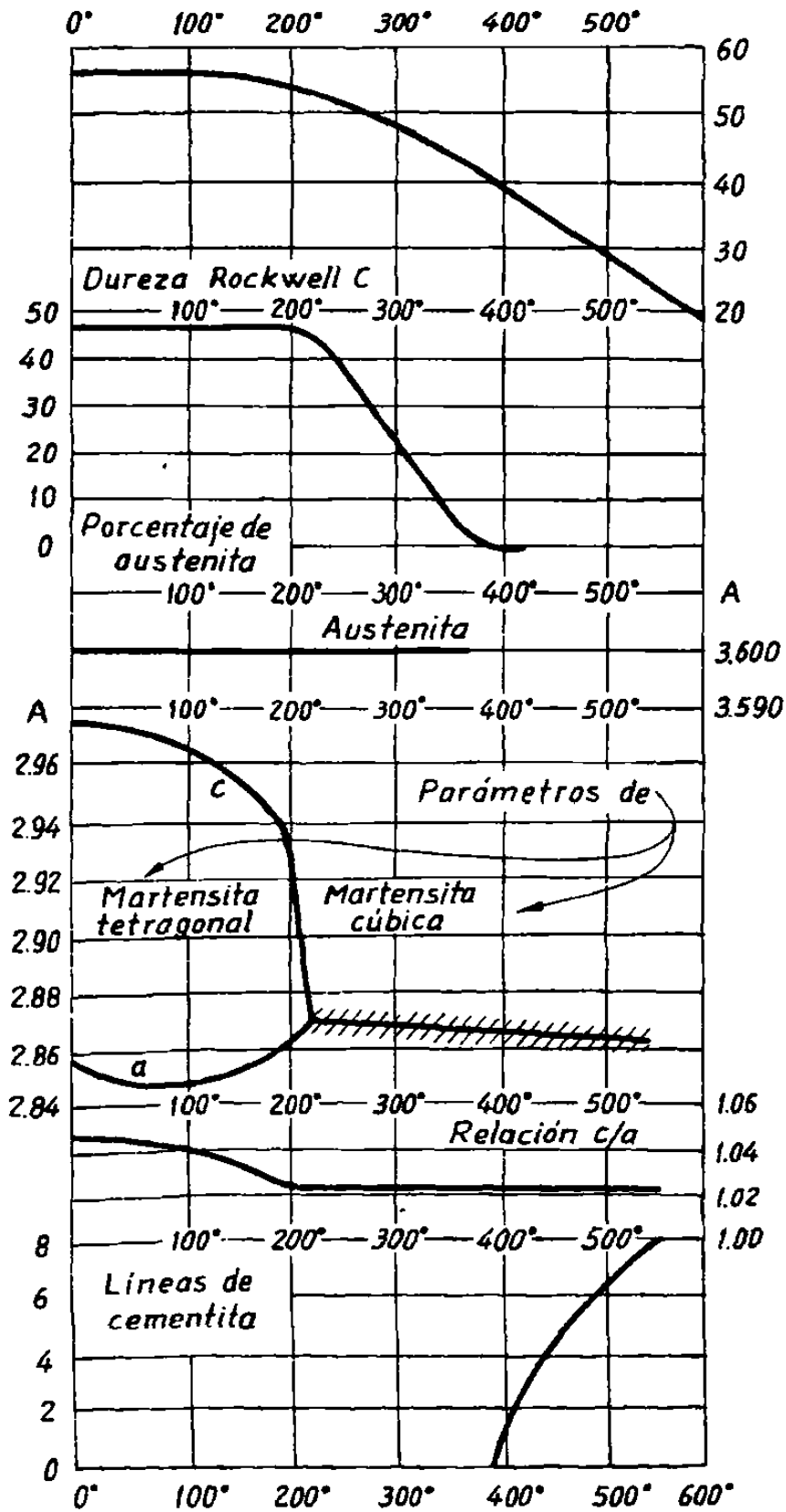


Figura 4.2.3 Variaciones que sufre con en revenido las propiedades y características de un acero de 1% de carbono y 5% de Níquel