



158
71.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DE LOS ACEROS
POR MEDIO DE CEMENTACION SOLIDA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

GERMAN JESUS SEGOVIA VAZQUEZ

ASESOR: ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:
"Endurecimiento Superficial de los Aceros por Medio de Cementación Sólida".

que presenta el pasante: Germán Jesús Segovia Vazquez
con número de cuenta: 8536002-4 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 14 de Noviembre de 1996

PRESIDENTE	<u>Ing. Soledad Alvarado Martínez</u>	
VOCAL	<u>Ing. Armando Aguilar Márquez</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Enrique Cortés González</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Ma. del Pilar Zepeda Moreno</u>	

A mis padres:

Enrique Segovia H.

Natividad Vazquez P...

... Por forjar un ser de provecho, en la incertidumbre y rebeldía de la juventud. Gracias a sus consejos y aliento he logrado realizar una más de mis metas:

A mi hermano:

Ricardo Segovia V...

... Gracias por tus impulsos y apoyo. No olvidaré tu contribución a mi formación profesional.

A todos mis hermanos...

... Gracias por sus grandes muestras de cariño y apoyo incondicional.

Al Ing. Felipe Díaz del Castillo R...

... Gracias por su confianza y orientación para la elaboración de esta tesis.

A la U.N.A.M....

... "Los logros del hombre no se miden por los bienes materiales que acumula, sino por las satisfacciones personales que tiene durante su vida".

INTRODUCCION.	
CAPITULO 1. ALEACIONES HIERRO - CARBONO.	1
Diagrama de fases hierro-carbono - Microestructuras en aceros - Elementos de aleación.	
CAPITULO 2. FENOMENO DE DIFUSION.	14
Fenómeno de difusión.	
CAPITULO 3. TRATAMIENTOS TERMICOS.	20
Procesos de recocido - Procesos de temple - Proceso de normalizado - Proceso de revenido.	
CAPITULO 4. ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL.	23
Endurecimiento superficial a la flama - Endurecimiento superficial por inducción - Carbonitruración - Cementación líquida - Cementación con gases - Cianurado - Nitruración.	
CAPITULO 5. CEMENTADO SOLIDO.	32
Cementación con materias sólidas - Mezclas carburantes - Empaquetado - Control del proceso - Capa cementada - Tratamientos térmicos posteriores a la cementación - Aceros para cementado - Influencia de los elementos de aleación en los aceros de cementación - Ventajas y desventajas - Aplicaciones.	
CAPITULO 6. CEMENTADO SOLIDO DE UN ACERO 1018.	44
Preparación de equipo y material - Preparación de probetas iniciales - Pruebas iniciales - Proceso de cementado - Ciclo térmico complementario - Preparación de probetas finales - Pruebas finales - Análisis de resultados.	
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA.	

INTRODUCCION

En numerosas aplicaciones industriales, una de las propiedades que desempeña un papel crítico en muchos problemas de ingeniería, es la resistencia al desgaste. El desgaste de los metales produce desprendimientos de metal, penetraciones, deformaciones, corrosión y calentamiento excesivo.

El grado de desgaste se puede reducir a un valor aceptable, utilizando superficies de una dureza elevada. Por medio de un temple sencillo, se puede conseguir una mayor dureza superficial en comparación con la de su núcleo. Sin embargo, por esta vía sería difícil cumplir satisfactoriamente la exigencia de una superficie dura y resistente al desgaste, a la par de una gran tenacidad en el núcleo. Por esta razón, lo corriente es dar a la superficie del acero, una composición distinta a la del núcleo, creando en dicha superficie una concentración de elementos de aleación tales como el carbono o el nitrógeno, que solo después de un tratamiento térmico posterior, pueda experimentar el necesario aumento de dureza.

El proceso de cementado o carburizado sólido, es uno de los métodos de endurecimiento superficial, que si actualmente no es uno de los más usados, si es el más económico, y en algunas ocasiones el más aconsejable.

El presente trabajo, abordará un proceso de cementado sólido como tema central, sustentado lógicamente en consideraciones teóricas y prácticas. Así mismo, una serie de cuatro capítulos, son dedicados al sustento teórico básico, entre los cuales se tocan temas relevantes, tales como el diagrama de fases Fe-Fe₃C, microestructuras, fenómeno de difusión, tratamientos térmicos y procesos de endurecimiento superficial.

Por último, contará con una serie de conclusiones respaldadas por aspectos teóricos consultados de una amplia bibliografía, y reafirmadas por el trabajo experimental del tema en cuestión.

Cabe destacar, que dicho endurecimiento se aplicó a un acero 1018 por las siguientes razones:

- Cualquier tipo de endurecimiento superficial, exige aceros de bajo contenido de carbono (0.10 a 0.20%; máximo 0.25%).
- El acero 1018 o "cold rolled", es uno de los más comerciales.

 CAPITULO 1

 ALEACIONES HIERRO - CARBONO

Las aleaciones hierro-carbono -aceros y fundiciones-,son tal vez las aleaciones metálicas más importantes de la técnica moderna.

Por su volumen, la producción de acero y fundición supera en mucho la producción de todos los demás metales juntos.

Todos los aceros y fundiciones tienen como elemento básico el hierro con cantidades variables de carbono. La mayoría de los aceros están aleados con una variedad de elementos para obtener un incremento en ciertas propiedades o para producir propiedades especiales.

Refiriéndonos al diagrama hierro-carbono, la porción comprendida entre el hierro puro y el compuesto intermetálico carburo de hierro (Fe_3C) con 6.67 %C se llama "sistema de aleación hierro-carburo de hierro" y la temperatura a que se tienen lugar los cambios alotrópicos de las diversas fases presentes, está influenciada por el elemento de aleación carbono.

1.1 DIAGRAMA DE FASES HIERRO - CARBONO.

SISTEMA DE ALEACION HIERRO - CARBURO DE HIERRO EN BASE A PORCENTAJE DE CARBONO.

De acuerdo a su composición, las aleaciones hierro-carbono se dividen en tres categorías:

1. Hierros. Tienen un contenido de carbono muy bajo, y en consecuencia su efecto sobre las propiedades ordinarias es despreciable. Su uso se limita a propósitos especiales como la investigación.

2. Aceros. Su contenido de carbono es fundamental. Se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Aceros hipoeutectoides : Contienen menos de 0.8 %C.
- Aceros eutectoides : Contienen 0.8 %C.
- Aceros hipereutectoides: Contienen más de 0.8 %C (máximo 2.0%).

Tambien pueden clasificarse adicionalmente en aquellos que contienen entre 0.08 y 0.35 %C, los que contienen entre 0.35 y 0.60 %C y los que contienen más de 0.60 %C (máximo 2.0%). Estos se conocen como aceros de bajo, mediano y alto contenido de carbono respectivamente.

Los aceros con bajo contenido de carbono son relativamente suaves y dúctiles. Algunos de sus usos comunes son: forjados como carrocerías, bastidores, alambradas y vigas tipo I.

Los aceros con mediano contenido de carbono son más resistentes mecánicamente que los de bajo contenido de carbono y aun más, pueden doblar su resistencia mediante tratamientos térmicos adecuados, conservando aun una ductilidad adecuada.

Los aceros con alto contenido de carbono reducen mucho su ductilidad y en consecuencia son utilizados para piezas en las que la resistencia y la dureza son vitales. Por consiguiente, estos aceros siempre se someten a un tratamiento térmico de endurecimiento. Se utilizan para fabricar forjados como llaves y ruedas de uso ferroviario, varillas para reforzar concretos, cables para puentes en suspensión, herramientas de corte, punzones, dados, etc.

3. Hierros fundidos. Tienen un contenido mínimo de carbono de 2.0% y un máximo práctico de 4.5%. Los hierros fundidos son aleaciones hierro-carbono-silicio.

Un aspecto fundamental de los hierros fundidos, es la inestabilidad de los carburos de hierro, por la influencia de diversos factores como el tipo de reacción eutéctica, la forma del grafito que se precipita como consecuencia de otros aleantes y el tratamiento térmico adecuado.

Controlando estos factores, pueden producirse los siguientes tipos de hierros fundidos: fundiciones blancas, fundiciones de grafito compactas, fundiciones dúctiles, fundiciones grises y fundiciones maleables.

La figura 1-1 nos ilustra una clasificación tradicional de los aceros.

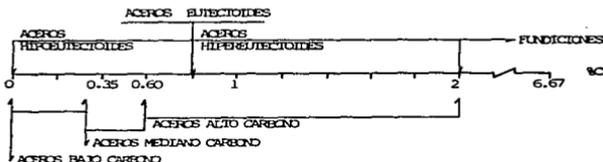


Figura 1-1. Clasificación de los aceros de acuerdo a contenido de carbono.

SISTEMA DE ALEACION HIERRO-CARBURO DE HIERRO EN BASE A TEMPERATURA.

Dentro de este sistema existen tres líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. Así, tenemos las siguientes:

Línea horizontal isotérmica a 1492 °C.

Nos indica una reacción "Peritética" (línea MPB): $L + \delta \rightleftharpoons \gamma$.

A lo largo de esta línea, se puede observar que la solubilidad máxima de carbono en hierro delta b.c.c es de 0.10% y para el hierro gamma f.c.c es de 0.18%.

En la periferia de esta línea también se puede observar lo siguiente:

- La porción NM al enfriarse, representa el principio del cambio instantáneo de estructura hierro delta b.c.c a hierro gamma f.c.c para aleaciones con menos de 0.10% C.
- La porción MP representa el principio de cambio de estructura vía peritética del hierro delta b.c.c a hierro gamma f.c.c para aleaciones entre 0.10% y 0.18% C.
- La porción NP representa el principio de un cambio directo de hierro delta a hierro gamma para aleaciones con menos de 0.18% C al enfriarse.
- La porción PB para aleaciones entre 0.18% y 0.50% C, nos indica que el cambio alotrópico vía peritética de hierro delta a hierro gamma o viceversa, termina o comienza justamente por debajo de los 1492 °C o inmediatamente después de los 1492 °C.
- Para aleaciones con más de 0.50% C, el cambio cristalino lo marca la línea BE. Sin embargo, esta reacción ya no se considera peritética.

La figura 1-2 ilustra la ampliación de esta zona peritética.

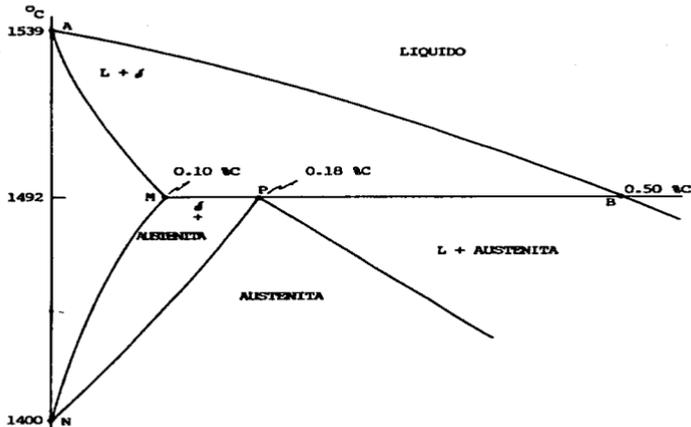


Figura 1-2. Ampliación de la zona peritética localizada en el diagrama hierro-carburo de hierro.

Línea horizontal isotérmica a 1130 °C.

Nos indica una reacción "Eutectica" (línea CED). A lo largo de esta línea, se puede observar que el punto eutectico se localiza a 1130 °C y 4.3 %C.

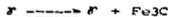


Para aleaciones con menor (hasta 2.0 %C) o mayor (hasta 6.67 %C) contenido de carbono a 4.3%, la mezcla hierro gamma + Fe₃C se transforma en L + hierro gamma o L + Fe₃C respectivamente, inmediatamente después de los 1130 °C.

Es importante notar que para estas reacciones, no se presentó un cambio alotrópico si no un cambio de solubilidad de carbono.

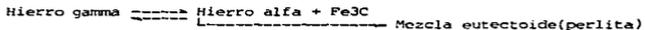
Normalmente, la mezcla eutectica no se ve en la microestructura, ya que el hierro no es estable a temperatura ambiente.

Por otra parte, la línea JC (para aceros de 0.8 a 2.0 %C) representa el principio de cambio de solubilidad del carbono; es decir, conforme la temperatura disminuye, el carbono contenido en la austenita se precipita como cementita sin presentarse cambio alotrópico.



Línea horizontal isotérmica a 723 °C.

Nos indica una reacción "Eutectoide" (línea HJK). A lo largo de esta línea se puede observar que el punto eutectoide se localiza a 723 °C y a 0.8 %C.



Para aleaciones comprendidas entre 0.025 y 0.79 %C se cumple el siguiente cambio alotrópico:



El porcentaje de hierro alfa y el porcentaje de perlita, varían de acuerdo al porcentaje de carbono.

Para los aceros hipereutectoides se cumple el siguiente cambio alotrópico:



Por otra parte, al principio de la línea eutectoide se pueden observar dos zonas: la GHI que representa la solución sólida hierro alfa con un porcentaje de carbono de 0.025% como máximo y que termina a los 910 °C y la zona HJ que con un porcentaje máximo de carbono de 0.79% y límites de temperatura 910 - 723 °C. Esta zona representa un cambio alotrópico:



inmediatamente antes y después de la temperatura eutectoide.

En la figura 1-3 se ilustra un diagrama de fases hierro-carburo de hierro en el que se podrán ubicar las tres zonas de transformación anteriores.

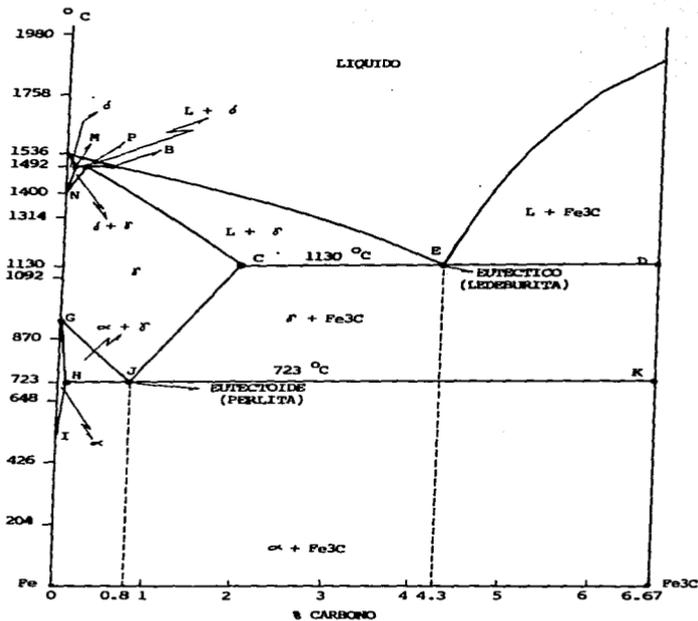


Figura 1-3. Diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro.

1.2 MICROESTRUCTURAS EN ACEROS.

La estructura de los aceros determina las características y propiedades de los mismos. Si consideramos el hierro puro, podremos distinguir tres fases sólidas: la fase alfa, la fase gamma y la fase delta. Estas tres fases se conservan para las aleaciones hierro-carburo de hierro. Dentro de éste sistema, también encontramos las fases perlita y cementita (Fe_3C).

Cabe mencionar que las fases anteriores están presentes en un acero al carbono, cuando las condiciones de enfriamiento del acero, desde el estado líquido, se llevan a cabo en condiciones de equilibrio.

Existen otras microestructuras importantes en el sistema hierro-carburo de hierro, pero de carácter inestable, pues en condiciones normales, no es posible mantenerlas a temperatura ambiente. Una de las más importantes es la martensita.

En el presente tema se mencionarán las características de las microestructuras más importantes del sistema hierro-carburo de hierro.

FERRITA (Hierro alfa).

Sus transformaciones alotrópicas durante un proceso de calentamiento o enfriamiento son las siguientes:

- Ferrita alfa. Es una estructura obtenida a bajas temperaturas, con una estructura reticular b.c.c y una solubilidad de carbono máxima de 0.0218% a 727 °C.

Se le considera como la estructura más blanda y dúctil de todos los constituyentes del acero. No es un hierro puro porque contiene pequeños porcentajes de impurezas tales como el silicio, fósforo, azufre, etc.

Esta microestructura suele aparecer en los aceros como: ferrita proeutectoide con perlita o como ferrita eutectoide de la perlita y como una matriz.

La figura 1-4 ilustra algunas de éstas microestructuras.



Figura 1-4. a) Cristales de ferrita y perlita mezclados al azar.

b) Granos de perlita limitados por una malla de ferrita.

c) Matriz de ferrita con globulos de cementita diseminados.

CEMENTITA (Fe₃C).

Es un compuesto intermetálico de estructura ortorrómbica. Contiene 6.67 %C y 93.33 %Fe. Es la microestructura más dura y frágil de los aceros. Presenta baja resistencia tensil, alta resistencia a la compresión y mucha dureza.

Aparece prácticamente en todos los aceros comerciales; ya sea como cementita proeutectoide, como cementita eutectoide o como cementita globular. Algunas de estas microestructuras se ilustran en la figura 1-5.



Figura 1-5. a) Cementita en forma de malla que limita los granos de perlita.
b) Láminas alternadas de ferrita y cementita.

PERLITA.

La perlita, es la mezcla eutectoide ferrita y cementita que se forma a los 723 °C y un porcentaje de carbono de 0.8%. La microestructura esta constituida por una serie de placas de carburo de hierro alternadas con placas de ferrita en cada grano, en una proporción de 1 a 6 respectivamente.

El control de la velocidad de enfriamiento de la perlita, determina la distancia interlaminar y en consecuencia, la dureza de la misma.

Perlita gruesa. Su ritmo de enfriamiento es muy muy lento en el interior del horno y en consecuencia, observa una marcada separación interlaminar y una dureza relativamente baja.

Perlita normal. Su ritmo de enfriamiento se considera lento en el interior del horno. Su estructura observa una separación interlaminar más estrecha y un ligero incremento en la dureza.

Perlita fina. Su velocidad de enfriamiento es mucho más rápida. Normalmente se enfria al aire libre. Su estructura observa una separación interlaminar estrecha y una dureza elevada.

AUSTENITA (HIERRO GAMMA).

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Tiene una estructura reticular f.c.c. La solubilidad máxima del carbono en esta estructura es de 2.11%. Todos los aceros encuentran austenita a temperaturas superiores

a la crítica Ac_{cm} o Ac₃, pero de forma inestable en condiciones normales; es decir, dicha estructura sólo es estable a altas temperaturas y no es posible mantenerla a temperatura ambiente en condiciones normales. Sin embargo, es posible obtener austenita estable bajo otras condiciones; por ejemplo, enfriando rápidamente un acero con alto contenido de carbono, se obtienen cristales de austenita mezclados con agujas de martensita; enfriando al aire libre aceros de alta aleación como el Cr-Ni o los aceros de manganeso.

En general, la austenita es dúctil y tenaz pero a la vez, de gran resistencia al desgaste. La figura 1-6 ilustra algunas de estas microestructuras.



Figura 1-6. a) Agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita.
b) Cristales de austenita en un acero alta aleación.

MARTENSITA.

Es una solución sólida supersaturada de carbono o carburo de hierro en hierro alfa. Se pueden obtener dos tipos de martensita: la martensita alfa, con estructura reticular FCC y la martensita revenida o beta, con estructura reticular BCC.

Su contenido de carbono varía desde pequeñas cantidades hasta un 1% y es la estructura más dura después de los carburos y la cementita.

Su estructura es inestable y se obtiene por un enfriamiento muy rápido desde altas temperaturas. Algunas de sus formas de aparecer en los aceros son las siguientes: en forma de agujas en zig zag con ángulos de 60° sobre un fondo de austenita o como martensita muy fina y difusa. La primera forma de aparecer, es típica en un acero con alto contenido de carbono o de alta aleación; mientras que la segunda, es una estructura común de un acero con bajo contenido de carbono.

La martensita en esencia es muy dura y frágil, pero el bajo o alto contenido de carbono la hace menos dura o más dura respectivamente. Por otra parte, la martensita revenida mejora su ductilidad y propiedades de impacto, reduciendo su resistencia y dureza.

BAINITA.

Es una estructura bifásica de perlita y martensita que se forma a temperaturas intermedias de 600 °C a 250 °C como resultado de una transformación isotérmica de la austenita.

Se distinguen dos tipos de bainita: bainita superior y bainita inferior.

Bainita superior o gruesa. Se forma de 500 °C a 550 °C. Esta constituida por una serie de agujas de ferrita y cementita paralelas, de contornos arborescentes con fondos de martensita.

Bainita inferior o fina. Se forma a temperaturas de 400 °C a 250 °C. Sus formas son de tipo acicular y sus agujas alargadas de ferrita, forman ángulos de 60° con algunas agujas paralelas de cementita.

La figura 1-7 ilustra estos dos tipos de microestructuras bainíticas.



Figura 1-7. a) Bainita superior obtenida a 540 °C de un acero 0.90 %C.

b) Bainita inferior obtenida de un acero 0.90 %C a 290 °C.

CARBUROS.

Su estructura aparece en forma de glóbulos blancos brillantes. Son muy duros y se forman de la combinación de elementos especiales con el carbono. Por su constitución tenemos las siguientes clases:

- Carburos simples. Se forman de un elemento especial con carbono.
- Carburos dobles. Formados por un elemento especial y el hierro.
- Carburos constituidos por mezclas isomorfas de un carburo simple con un carburo de hierro.

A altas temperaturas pueden disolverse parcialmente en austenita y formar solución sólida.

Se presentan principalmente en los aceros rápidos o aceros indeformables con altos contenidos en cromo, molibdeno y vanadio. Poseen la propiedad de conservar su gran dureza calentados a altas temperaturas (al rojo), de aquí su importancia para los aceros herramienta y de corte. La figura 1-8 ilustra una microestructura de este tipo.



Figura 1-8. Carburo de un acero rápido.

1.3 ELEMENTOS DE ALEACION.

Hoy en día, la mayoría de los aceros están aleados con una variedad de elementos que afectan la estabilidad de las microestructuras, sus cantidades relativas y la manera de como están distribuidas entre sí.

Los elementos de aleación tienen así, el control de las propiedades de las aleaciones ferrosas.

Los elementos de aleación en los aceros, se pueden usar de dos maneras según el propósito que se persiga:

- En pequeñas cantidades (menos de 5%) para incrementar resistencia, dureza, maquinabilidad o prevenir fragilidad.

- En cantidades mayores (de 5% a 30%) para producir propiedades especiales como la alta resistencia a la corrosión o propiedades a altas temperaturas. Entre los elementos de aleación más importantes tenemos los siguientes:

ELEMENTO	CANTIDAD(%)	EFEECTO
Aluminio(Al)	Pequeño	- Incrementa capacidad de endurecimiento por nitruración.
Azufre(S)	0.08-0.15	- Incrementa la maquinabilidad.
Boro(B)	0.001-0.003	- Incrementa considerablemente la capacidad de endurecimiento.
Cobre(Cu)	0.10-0.40	- Incrementa resistencia a la corrosión.
Cromo(Cr)	0.5-2.0	- Previene el crecimiento de grano en combinación con vanadio.

ELEMENTO	CANTIDAD	EFEECTO
	4.0-18.0	- Incrementa la resistencia a la corrosión, ya que crea una película tenaz de cromo en la superficie del acero. Nota: Se considera como el segundo elemento - en importancia, después del carbono.
Manganeso(Mn)	0.20-0.40	- Como elemento de aleación único, se usa como desoxidante. - Previene la fragilidad en combinación con azufre. Así mismo, con el molibdeno, que elimina el fragilizado por revenido.
	>1.0	- Aumenta la capacidad de endurecimiento.
Molibdeno(Mo)	0.2-5.0	- Incrementa la capacidad de endurecimiento puesto que es el elemento que más favorece el tratamiento térmico del temple. - Forma carburos estables y actúa como estimulante de otros elementos. - Facilita el mecanizado en aceros Cr-Ni. - Mejora los márgenes de forja, y permite alta temperatura de revenido.
Niquel(Ni)	2.0-5.0	- Incrementa la ductibilidad porque actúa como refinador de grano.
	12.0-20.0	- Incrementa y da resistencia a la corrosión en aceros para moldes. - Se considera estabilizante de austenita.
Silicio(Si)	0.20-0.70	- Es ampliamente usado como desoxidante en la aceración.

ELEMENTO	CANTIDAD(%)	EFFECTO
		- Incrementa la resistencia y tenacidad en los aceros.
	-2.0	- Incrementa la dureza y la resistencia.
	>2.0	- Mejora propiedades magnéticas.
Tungsteno(W)	1.5-10.0	- Incrementa la dureza a altas temperaturas formando carburos muy estables.
		- Su presencia es común en los aceros herramienta de baja aleación.
Vanadio(V)	0.15	- Su presencia es común en los aceros herramienta, porque forma carburos estables a altas temperaturas y su estructura de grano es fina.
		- Observa un marcado efecto en la estabilización de la martensita al reducir el ablandamiento en el revenido.

Los elementos como el fósforo, estaño, zinc y plomo se consideran como impurezas constantes, puesto que es imposible eliminarlas por completo de los aceros. Su presencia en aceros, es de un porcentaje muy pequeño.

CAPITULO 2

FENOMENO DE DIFUSION

El fenómeno de difusión o movimiento de los átomos, es esencial en muchos de los procesos que se aplican a los aceros; entre ellos, los tratamientos térmicos y termoquímicos usados para controlar la estructura y propiedades de estos materiales.

2.1 FENOMENO DE DIFUSION.

La difusión, es el movimiento de los átomos, iones o moléculas en un material. El movimiento se desarrolla de forma ordenada y tendiendo a eliminar diferencias de concentración.

La autodifusión o intercambio de átomos de un mismo material, es un fenómeno en el que sólo existe un intercambio de posiciones entre átomos normales y átomos radiactivos, tendiendo a producir una distribución uniforme de ambos en toda la estructura. Cabe destacar, que este proceso no requiere de la acción de algún estimulante externo para llevarse a cabo.

En cualquier proceso de difusión entre sólido-sólido, los átomos pueden difundir de varias formas contribuyendo al mismo proceso. Entre las formas más destacadas de difundir, están las siguientes:

- Difusión de volumen. Los átomos difunden a través de la estructura a una velocidad relativamente baja. Su contribución al proceso de difusión es casi total.
- Difusión en borde de grano. Los átomos difunden en los límites de grano, aprovechando que son zonas de imperfección muy marcadas en la estructura. Su velocidad de difusión, es muy superior a la de volumen y su contribución al proceso total es muy bajo.
- Difusión superficial. Los átomos difunden inmediatamente en la superficie.

En esta zona, los lazos atómicos son muy débiles y su contribución al proceso total es mínimo.

Mecanismos de difusión.

- Difusión intersticial desajustada. En este mecanismo, los átomos de tipo sustitucional, se trasladan a intersticios muy reducidos.

Estos movimientos son los que requieren de mayor energía para llevarse a cabo, motivo por el cual, son poco comunes.

- Difusión intersticial. En este mecanismo de difusión, están implicados átomos pequeños, tales como los de hidrógeno, nitrógeno o carbono.

Los átomos difundidos ocupan las posiciones intersticiales, siempre vacías de las estructuras reticulares del metal. Por esta razón, es el mecanismo más rápido y más común de difusión.

- Difusión sustitucional o por vacancias. Para que este proceso de difusión suceda, los átomos deben ceder continuamente sus lugares en la red, para ocupar vacantes cercanas, creando así, sitios vacíos de sus posiciones originales en la red. De esta forma, el proceso continúa, observando un reflujo de átomos y una creación y destrucción continua de vacancias.

La figura 2-1 ilustra estos mecanismos.

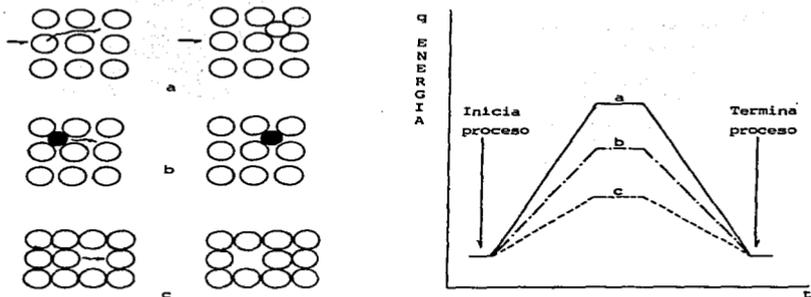


Figura 2-1. Mecanismos de difusión y su energía de activación.

- a) La difusión intersticial desajustada, es el mecanismo que requiere de mayor energía de activación por el grado de deformación que sufren los átomos.
- b) La difusión intersticial, requiere de menor energía de activación pues los átomos a difundir son mucho más pequeños.
- c) La difusión por vacantes, es el que requiere de la menor energía de activación.

ECUACIONES QUE RIGEN EL FENOMENO DE DIFUSION.

- Primera Ley de Fick. Expresa la relación cuantitativa entre la gradiente de concentración y la cantidad de materia transportada por difusión; esto bajo condiciones de estado estable.

Matemáticamente se expresa con la siguiente ecuación:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} A dt$$

donde: dm - Velocidad de difusión (g/s o átomos/s)

D - Coeficiente de difusión (cm^2/s). Su valor depende del metal en cuestión y se obtiene de tablas.

dc/dx - Gradiente de concentración (átomos/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}$).

A - Area de la superficie involucrada (cm^2).

- Segunda Ley de Fick. Esta ecuación, nos permite calcular la concentración del elemento que se va a difundir a determinada distancia del material disolvente bajo condiciones de estado no estables; es decir, considerando un gradiente de concentración variable a través de las diferentes secciones del material disolvente, como función del tiempo y la temperatura; siempre y cuando D , C_s y C_o permanescan constantes. La expresión matemática es la siguiente:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{ERF}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

donde: C_s - Concentración del elemento a difundir, que es cte (%).
 C_o - Concentración inicial en el material disolvente, es constante (%).
 C_x - Concentración del elemento a difundir a una distancia x (%).
 x - Distancia por debajo de la superficie (cm).
 D - Coeficiente de difusión; que es constante (cm^2/s).
 t - Tiempo (s).
 ERF - Función de error, cuyo valor numérico puede obtenerse por medio de tablas normalizadas o en gráfica. La figura 2-2 ilustra una tabla y una gráfica, en la cual se pueden obtener los valores de la función de error.

- El Coeficiente de Difusión D . Aunque en la mayoría de los problemas, el coeficiente de difusión D se considera constante, en realidad no es así. Normalmente, el valor de D depende de numerosos factores, tales como la temperatura, la concentración, la estructura cristalina, el tamaño de grano y las impurezas. Sin embargo, por el gran efecto que observa la temperatura sobre el coeficiente de difusión (empíricamente, el coeficiente de difusión duplica su valor por cada 20°C de aumento en la temperatura), este factor es el único que se toma en cuenta en la ecuación. Matemáticamente se tiene la siguiente ecuación:

$$D = D_o \exp\left(-Q/RT\right)$$

donde: Q - Energía de activación (calorías/mol.gramo).
 R - Constante universal del gas ideal (1.987 calorías/molécula.gramo. K).

T - Temperatura absoluta (K).

Do - Factor de frecuencia de vibración de los átomos que se difunden (cm^2/s).

La figura 2-3 ilustra una tabla en la que se dan algunos valores para Do y Q.

TABLA DE FUNCION DE ERROR							
Z	ERF(Z)	Z	ERF(Z)	Z	ERF(Z)	Z	ERF(Z)
0	0	0.40	0.4284	0.85	0.7707	1.60	0.9763
0.025	0.0282	0.45	0.4755	0.90	0.7970	1.70	0.9837
0.050	0.0564	0.50	0.5205	0.95	0.8209	1.80	0.9891
0.100	0.1125	0.55	0.6533	1.00	0.8427	1.90	0.9928
0.150	0.1680	0.60	0.6039	1.10	0.8802	2.00	0.9953
0.200	0.2227	0.65	0.6420	1.20	0.9103	2.20	0.9981
0.250	0.2763	0.70	0.6778	1.30	0.9340	2.40	0.9993
0.300	0.3286	0.75	0.7112	1.40	0.9523	2.60	0.9998
0.350	0.3794	0.80	0.7421	1.50	0.9661	2.80	0.9999

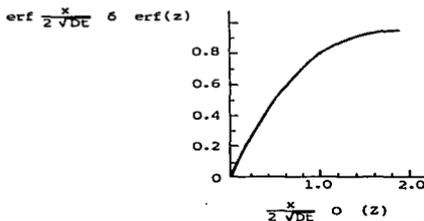


Figura 2-2. En los valores tabulados o en la gráfica que se ilustra, se pueden obtener valores de la función de error ERF.

Metal Difundido	Metal Matriz	D_0 cm ² /s	Q Calorías·mol·gramo
Carbono	Hierro gamma	0.21	33.800
Carbono	Hierro alfa	0.0079	18.100
Hierro	Hierro alfa	5.8	59.700
Hierro	Hierro gamma	0.58	67.900
Niquel	Hierro gamma	0.50	66.000
Manganeso	Hierro gamma	0.35	67.500
Cobre	Aluminio	2.00	33.900
Cinc	Cobre	0.033	38.000
Plata	Plata	0.720	45.000
	(Difusión en volumen)		
Plata	Plata (Difusión en límite de grano)	0.140	21.500

Figura 2-3. Valores aproximados de D_0 y Q para varios sistemas de difusión.

CAPITULO 3

TRATAMIENTOS TERMICOS

Un tratamiento térmico se define como una serie de operaciones de calentamientos y enfriamientos cuidadosamente controlados que se aplican a un metal en estado sólido.

Comunmente, los aceros y herramientas son tratados térmicamente para obtener estructuras y propiedades adecuadas. Las estructuras pueden variar desde la perlita gruesa o fina hasta la bainita o martensita revenida, produciendo mezclas adecuadas de ferrita y cementita.

Con los tratamientos térmicos, se modifica la constitución del acero, la estructura y el estado mecánico.

Por otra parte el tiempo, la temperatura y la velocidad crítica de temple ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) son los factores que rigen todo tratamiento térmico.

3.1 PROCESOS DE RECOCIDO.

Un proceso de recocido implica el calentamiento de un metal, a una temperatura adecuada y de duración determinada, seguido de un enfriamiento lento.

Los objetivos de un recocido son según el caso, regenerar la estructura del metal, eliminar tensiones internas, eliminar gases acumulados y principalmente ablandar el acero para mejorar su maquinabilidad.

Existen varias clases de recocidos, que lógicamente observan sus diferencias pero que en esencia, siguen la misma mecánica: un ciclo de calentamiento, otro de permanencia a temperatura de recocido y uno más de enfriamiento.

3.2 PROCESOS DE TEMPLE.

El temple se define como un proceso de calentamiento y enfriamiento; este último, desarrollado a una velocidad muy rápida. El objetivo, es transformar la totalidad de la austenita a martensita, para así lograr un incremento de dureza y resistencia mecánica.

Calentamiento del acero. También se conoce como "Temperatura Límite de Temple" y se define como la mínima temperatura que debe alcanzar un acero para transformar toda su masa a cristales de austenita.

Debe procurarse que la temperatura no exceda este límite, pues esto implicaría un excesivo crecimiento de grano, la oxidación del metal que causaría pérdida de material o una descarbonación que degeneraría en la pérdida de dureza superficial; características que perjudicarían el proceso.

Se recomienda que la austenización se lleve a cabo a razón de 1 hora/pulgada de espesor.

Enfriamiento del acero. Tiene por objeto transformar la totalidad de la austenita a martensita o a bainita. El factor que caracteriza esta fase se llama "Velocidad Crítica de Temple" y se define como la velocidad de enfriamiento mínima para obtener una total transformación a martensita.

La velocidad crítica de temple, varía para los aceros hasta los 600 °C/s y se representa en los diagramas TTT como la tangente a la nariz de la curva.

Para conseguir un buen temple, es imperativo que la velocidad de enfriamiento sea superior a la velocidad crítica de temple, pues esto aseguraría la no existencia de austenita retenida.

3.3 PROCESO DE NORMALIZADO.

El normalizado, es un tratamiento térmico variante del recocido y consiste en calentar el acero a una temperatura $A_{c3} + 50$ °C o $A_{cmm} + 50$ °C y, posteriormente continuar con un enfriamiento al aire calmo o ligeramente agitado.

El proceso de normalizado se aplica a los aceros para afinar su estructura granular, mejorar la maquinabilidad y eliminar las tensiones internas que suelen aparecer. También se utiliza para devolver a estos aceros sus características normales después de haber sufrido algún tratamiento térmico defectuoso.

Se aplica en piezas fundidas, forjadas o mecanizadas en frío o en caliente y en general, en los aceros al carbono de construcción de 0.15 a 0.40 %C.

Las microestructuras obtenidas serán de perlita con zonas de ferrita o cementita.

3.4 PROCESO DE REVENIDO.

El revenido es un proceso en el cual, el acero previamente templado o normalizado, es calentado a una temperatura por debajo del rango de transformación inferior Acl y enfriado posteriormente a una velocidad adecuada.

El objetivo de aplicar un tratamiento de revenido a los aceros previamente templados, es modificar las siguientes características:

- Mecánicas y de volumen. Se incrementa ductilidad y tenacidad, disminuyendo resistencia y dureza. Así mismo, se modifica el volumen, pues el acero tiende a contraerse o expandirse; lo que lo libera de esfuerzos y a su vez asegura su estabilidad dimensional.
- Microestructurales. El proceso de revenido transforma la martensita a otros constituyentes más estables.

Factores ligados al proceso de revenido.

- Estado inicial del acero. En la transformación de la austenita residual, influyen notablemente los contenidos de carbono y los elementos de aleación que contenga dicha austenita. Los aceros que contienen austenita residual baja en carbono y en elementos de aleación, requieren de varias horas para su transformación a temperatura de revenido. En cambio, la austenita residual de los aceros con alto contenido de carbono y de elementos de aleación, suele ser más refractaria y su transformación exige mucho más tiempo a temperatura de revenido.
- Dimensiones del acero. El proceso de revenido, ayuda a suavizar las desigualdades de dureza que producen los temple en piezas grandes.
- Temperatura. Los efectos del revenido se aceleran a temperaturas de calentamiento más elevadas. Sin embargo, las temperaturas de revenido más empleadas para los aceros de construcción, varían entre los 400 °C y la temperatura crítica Acl. Para los aceros herramienta, varían entre los 200 y 300 °C.
- Tiempo. En general, no es necesario prolongar la duración del revenido más de 1 hora. Normalmente el tiempo de revenido, está en el rango de 15 minutos a una hora.

CAPITULO 4

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

Una razón importante para el endurecimiento superficial de los aceros, es retardar el desgaste sobre las superficies expuestas a un continuo rozamiento.

El endurecimiento superficial, es usado para extender la versatilidad de ciertos aceros, produciendo combinaciones de propiedades que no se obtienen tan fácilmente por otras técnicas.

En muchas aplicaciones -por ejemplo, los elementos de máquinas-, el desgaste y las fuerzas más severas se concentran sobre la superficie de la pieza.

Por tanto, es conveniente endurecer las superficies exteriores de las piezas para que resistan este desgaste; manteniendo núcleos tenaces y dúctiles capaces de absorber fuerzas de impacto.

Las propiedades obtenidas por el endurecimiento superficial, normalmente son refinadas por medio de un tratamiento térmico final.

El presente capítulo, describe dos de los tipos de endurecimiento superficial mayormente aprovechados. Uno que no produce cambios de composición química sobre la superficie del acero, que son: el endurecimiento superficial a la flama y el endurecimiento superficial por inducción.

El otro tipo, sí implica cambios de composición química sobre la superficie del acero e incluye la aplicación de técnicas tales como el carbonitrurado, cementado, cianurado y nitrurado.

4.1 TECNICAS DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL QUE NO ALTERAN LA COMPOSICION QUIMICA.**Endurecimiento superficial a la flama.**

El proceso consiste en calentar la superficie del acero por medio de una llama oxiacetilénica, hasta la zona de austenización, para después enfriarla a una velocidad superior a la crítica de temple. En general, el medio de enfriamiento suele ser agua.

Se aplica a cualquier acero al carbono; ya sea simple o aleado pero, preferentemente a aceros de 0.30 a 0.60%.

El endurecimiento a la flama, es muy utilizado para endurecer capas superficiales de piezas pequeñas y grandes pero, presenta considerables ventajas en piezas grandes por su versatilidad. La profundidad de capa dura suele variar de 1 a 6 mm con durezas de 40 a 63 HRC.

Una desventaja importante de este proceso, es el escaso control que se tiene de la superficie a endurecer.

Es muy utilizado para endurecer elementos de máquinas, estructuras, carriles, etc.

Endurecimiento superficial por inducción.

El proceso consiste en calentar la superficie del acero por encima de la temperatura de transformación A_{c3} o A_{cm} mediante corrientes de alta frecuencia, para posteriormente aplicarle un enfriamiento brusco.

Se emplea preferentemente en aceros de 0.35 a 0.55 %C. Las profundidades de capa dura varían hasta los 6 mm con durezas de 50 a 63 HRC. El proceso es apropiado para piezas de pequeñas dimensiones de capas duras poco profundas.

4.2 TÉCNICAS DE ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL QUE ALTERAN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Carbonitruración.

La carbonitruración, es un proceso que consigue endurecer superficialmente los aceros, por difusión simultánea de carbono y nitrógeno; esto, calentándolos a temperaturas cercanas a los 850 °C y bajo atmósferas gaseosas que cedan carbono y nitrógeno constantemente. A los aceros carbonitrurados suelen darse procesos complementarios de temple y revenido.

La composición normal del gas portador de carbono y nitrógeno es la siguiente:

Oxido de carbono (CO)	- 21%
Hidrógeno (H ₂)	- 40%
Nitrógeno (N ₂)	- 35%
Metano (CH ₄)	- 1%
Dióxido de carbono (CO ₂)	- Pequeñas cantidades
Oxígeno (O ₂)	- Pequeñas cantidades
Vapor de agua (H ₂ O)	- Pequeñas cantidades
Amoniaco (NH ₃)	- Proporción mínima de 10% como gas activador.

La carbonitruración se hace en baños de sales fundidas, empleando temperaturas de 600 a 700 °C.

Características del proceso:

- El nitrógeno retenido por el acero, disminuye su velocidad crítica de temple; lo que implica un temple mucho más fácil de la capa periférica de dicho acero. Esta propiedad es muy importante ya que permite sustituir aceros de alta aleación por aceros más económicos.
- La templeabilidad del acero se favorece con la presencia del nitrógeno. Esta propiedad, permite usar medios de temple menos severos como el aceite; lo que asegura la ausencia de deformaciones. De lo anterior se desprende que, la austenita con carbono y nitrógeno es más estable a temperaturas más bajas que la austenita que sólo contiene carbono. Por lo tanto, la austenita con carbono y nitrógeno se transforma en martensita a temperaturas más bajas.
- Después del temple, no aparecen puntos blandos en la capa dura.
- La composición de la capa exterior depende de la temperatura y tiempo del proceso, de la composición de la atmósfera y del tipo de acero. Antes del temple, la capa superficial esta compuesta por cementita, nitruros, carbonitruros y una zona de transición de austenita con gran cantidad de carbono y nitrógeno.
- La temperatura es el factor que más afecta a un proceso de carbonitrurado; por lo tanto, cuanto más alta sea, mayor será la profundidad de la capa dura pues se incrementa la velocidad de difusión de carbono y nitrógeno.

Cementación líquida.

Se emplean como cementantes líquidos únicamente sales fundidas que en general, contienen cianuro sódico (NaCN) o cianuro potásico (KCN). La cementación se efectúa por una descomposición del cianuro sódico debida a la alta temperatura y a la presencia del hierro. De esta forma, el carbono atómico que se libera, penetra en el hierro. La influencia del pequeño contenido de nitrógeno desprendido, es despreciable.

Los baños de sales se preparan generalmente a base de cianuro sódico, con contenidos variables de cloruro y carbonato sódico; a los que se añade uno o más cloruros o fluoruros de bario, potasio, calcio o estroncio como agentes catalíticos.

Con la composición anterior se asegura una excelente penetración del carbono y por tanto, una buena profundidad de capa dura que puede variar de 0.2 a 3.0 mm.

Mecánica del proceso.

Antes de iniciar el proceso, es indispensable limpiar perfectamente las piezas y sujetarlas con alambre o colocarlas dentro de cestas para su fácil manipulación. Comúnmente, es preciso hacer un precalentamiento de las piezas entre los 300 y 600 °C a fin de evitar tensiones innecesarias y eliminar la posible humedad que pudieran contener.

El proceso se inicia introduciendo las piezas en las sales fundidas a temperaturas que normalmente oscilan entre los 850 y 930 °C; durante tiempos que varían de 1 a 6 horas. Finalmente, se retiran del baño de sales y se procede inmediatamente después al temple. Al retirar las piezas del baño de sales y siempre que no tengan que templarse directamente, lo mejor es enfriarlas en un baño caliente a unos 200 °C; puesto que el enfriamiento al aire, daría lugar a corrosiones en la superficie del acero.

En general, el espesor de la capa cementada depende de la composición y proporciones correctas de las sales, de la temperatura y del tiempo del tratamiento.

Un proceso de cementación líquida ofrece varias ventajas, entre las cuales se cuentan las siguientes: se reduce el tiempo total de tratamiento, la temperatura de operación se homogeneiza rápidamente, la superficie de las piezas queda prácticamente limpia, las deformaciones de las piezas son mínimas, etc.

La principal desventaja que guarda este proceso, es lo tóxicos que son los cianuros. La figura 4-1 detalla la composición de las diferentes sales usadas comercialmente para la cementación líquida.

Composición de las sales	% *	% **
Cianuro sódico	17 - 23	7.5 - 12
Cloruro de bario	14 - 40	45 - 55
Otras sales alcalinas	0 - 3.5	2 - 10
Cloruro de potasio	-	5.5 - 20
Cloruro sódico	20 - 30	0 - 15
Carbonato sódico	30	30
Cianato sódico	1	0.30

* Capa cementada de 0.2 a 1.5 mm - Temperatura: 850 a 900 °C
 **Capa cementada de 1.0 a 3.0 mm - Temperatura: 875 a 950 °C

Figura 4-1. Composición de las sales empleadas para la cementación líquida.

Cementación con gases.

Aunque las instalaciones son muy complicadas y costosas, la cementación de este tipo es sencilla, rápida, de resultados muy regulares y capaz de cementar grandes cantidades.

Manteniendo las piezas de 1 a 8 horas, en una atmósfera carburante y a temperaturas de 850 a 950 °C, se obtienen capas cementadas de 0.2 a 1.5 mm.

La atmósfera carburante esta formada por la mezcla de un gas activo y un gas portador. El gas activo es generalmente metano, propano o butano. El gas portador es una mezcla de óxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno con pequeños contenidos de vapor de agua y dióxido de carbono.

El gas portador se prepara quemando incompletamente un gas combustible como el gas de alumbrado, con lo que se forma CO, CO₂, H₂O y cantidades variables de hidrocarburos. Esta mezcla gaseosa se hace pasar por carbón vegetal a alta temperatura, óxido de bario o algún otro catalizador, con lo que se transforma el dióxido de carbono en óxido de carbono y se disocia el vapor de agua, logrando con esto el indispensable control del dióxido de carbono. Después de incorporar el el gas activo al gas portador, se conducen los gases al horno de cementación.

El proceso de cementación gaseosa se efectúa normalmente en dos fases:

- 1* La carburación a elevada temperatura bajo atmósferas muy carburantes.
- 2* La difusión del carbono a temperatura más baja (aproximadamente 800 °C) bajo atmósferas neutras o ligeramente carburadas. Esto para conseguir una buena distribución del carbono en la capa cementada.

Cianurado.

La cianuración, es un proceso que imparte al acero una corteza dura y resistente al desgaste. Para esto, se introduce el acero en un baño de sales fundidas de cianuro, se mantiene en el mismo durante algún tiempo y posteriormente se enfria rápidamente. El endurecimiento de la capa superficial se lleva a cabo por la acción combinada del carbono y del nitrógeno.

Se emplean temperaturas de 760 a 950 °C y tiempos cortos que oscilan entre los 30 y 50 minutos. Con respecto al contenido de las sales fundidas, las concentraciones más comerciales se ilustran en la figura 4-2. Sin embargo, el contenido de sales más común es el siguiente:

- Cianuro de sodio (NaCN) - Varfa de 20 a 50 % y forma parte del compuesto.
 Carbonato de sodio (Na₂CO₃) - Varfa de 30 a 40 % y se forma por descomposición del cianuro con el oxígeno.
 Cianato de sodio (NaCNO) - No excede de 3 %. Se forma por la descomposición del cianuro.
 Cloruro de sodio (NaCl) - Varfa de 20 a 30 %. Se agrega como catalizador.

La mecánica del proceso de descomposición es la siguiente:

- El cianuro sódico se oxida al reaccionar con el oxígeno del aire, produciendo cianato sódico:



- El cianato sódico a temperatura de proceso, se descompone en cianuro sódico, carbonato sódico, óxido de carbono y nitrógeno naciente:



- El óxido de carbono que se libera en la descomposición del cianato sódico, reacciona como carbono naciente y dióxido de carbono:



- De las reacciones anteriores, el carbono y nitrógeno nacentes, son los elementos que se difunden en el hierro gamma del acero. El carbono forma carburos de hierro y el nitrógeno forma nitruros.
- El cianuro de sodio formado vuelve nuevamente a comenzar el mismo ciclo.

Características del proceso:

- Para que un proceso de cianuración sea exitoso, es fundamental la formación de cianato de sodio que en la práctica no es problema, pues su formación es automática.
- Los nitruros dificultan la penetración del carbono, motivo por el cual, no se pueden utilizar baños de cianuro sin la presencia de catalizadores.
- La profundidad de capa dura lograda por un proceso de cianuración, depende de la duración del tratamiento y en general, no excede de 0.30 mm.

En general, los contenidos de nitrógeno son más elevados que los contenidos de carbono en la zona periférica del acero. Contrariamente, en la zona interior, el contenido de carbono es mayor al contenido de nitrógeno.

La cianuración se emplea para endurecer superficialmente aceros de bajo y mediano contenido de carbono, aleados o no aleados.

Cabe destacar que durante un proceso de cianurado, deben extremarse las precauciones, ya que los cianuros son muy tóxicos y venenosos.

Concentración (%)	Cianuro de sodio (%)	Carbonato de sodio (%)	Cloruro de sodio (%)	Temperatura de fusión (°C)
95 a 98	97	2.3	Trazas	560
75	75.3	3.5	21.2	590
45	45.3	37.0	17.7	570
30	30.0	40.0	30.0	625

Figura 4-2. Composición de diferentes calidades de cianuro de sodio comerciales.

Nitruración.

La nitruración, es una técnica de endurecimiento superficial basada en la acción endurecedora que el nitrógeno ejerce sobre los aceros.

Durante el proceso, las capas periféricas duras se forman a temperaturas de unos 500 °C por acción directa del nitrógeno en contacto con la superficie del acero. El nitrógeno difundido hacia el interior del acero, causa una continua precipitación de nitruros aleados que, por ser insolubles en la matriz de ferrita llegan a saturar la capa superficial del acero, ocasionando el endurecimiento de la misma.

El nitrógeno generado durante el proceso, proviene del amoníaco que circula constantemente sobre las piezas a nitrurar. La reacción es la siguiente:



En general, la capa periférica de los aceros nitrurados, esta formada por dos capas de espesor diferente:

- Una exterior, muy delgada y frágil cuyo espesor varía de 0.005 a 0.05 mm . Esta formada en su mayor parte por una estructura llamada Braunita (ferrita + Fe₄N) y nitruros Fe₂N y Fe₄N. Esta capa es muy perjudicial por su excesiva fragilidad y debe ser eliminada por medio de un ligero rectificado al final del proceso.

- Una interior, que es la de mayor espesor y mayor importancia. Esta formada por nitruros de aluminio, cromo, molibdeno y vanadio.

Por todo lo anterior, para evitar la fragilidad de la capa dura causada por la formación de braunita, es indispensable emplear temperaturas de nitruración no mayores a 560°C ; así como aceros aleados con aluminio, cromo, molibdeno y vanadio.

En todo proceso de nitrurado se obtienen, ya sea una u otra de las siguientes estructuras, dependiendo de la temperatura como se muestra en la figura 4-3.

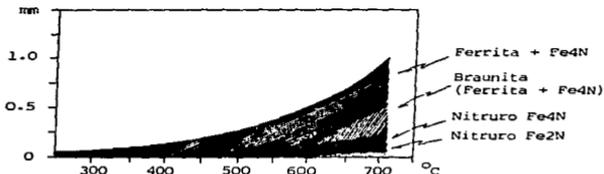


Figura 4-3 Composición de las capas nitruradas en función de la temperatura de nitruración.

Los procesos normales de nitrurado, tienen una duración de 20 a 80 horas, obteniéndose profundidades de capa variables de 0.20 a 0.70 mm.

Los aceros que van a someterse a un proceso de nitrurado, deben pasar por un tratamiento térmico de temple y revenido antes de iniciar el proceso, esto para dar las características al núcleo.

Ventajas del proceso de nitrurado.

- Durezas obtenidas. Se consiguen durezas muy elevadas del orden de los 650 a 1100 Vickers, según la composición del acero.

- No se modifican las propiedades del núcleo. Las propiedades obtenidas en el núcleo con el temple y revenido, no se modifican después del proceso de nitrurado.

- No requiere de ningún tratamiento térmico posterior. Siendo que el proceso se practica a temperaturas relativamente bajas, no se observa un crecimiento de grano considerable.
- Gran resistencia a la corrosión. Los aceros nitrurados resisten mejor la acción corrosiva de agentes oxidantes, por la excesiva presencia de nitruros.
- Ausencia de deformaciones. Esto porque los aceros, no necesitan ser enfriados rápidamente desde altas temperaturas.
- Retención de dureza a temperaturas elevadas. Las capas nitruradas conservan gran dureza superficial hasta los 500 °C, siempre y cuando, el tiempo a esta temperatura no sea muy prolongado.

CAPITULO 5

CEMENTADO SOLIDO

En la cementación de una pieza, desempeñan papeles igualmente importantes el material y el proceso de cementación; incluido el tratamiento térmico posterior de temple y revenido.

Un proceso de cementación o carburación tiene como objetivo, obtener una pieza que observe dos zonas de composición química diferente: un núcleo con la composición inicial del acero y alta tenacidad; y una cubierta martensítica con alto contenido de carbono. Sin embargo, la idea de obtener un núcleo "tenaz" y una capa externa "dura" resulta ser más complicada si se analiza en detalle. El núcleo, no basta que sea tenaz; tendrá que ser resistente para soportar la carga total y para no deformarse con facilidad. Por tanto, para que en cada caso particular de pieza reúnan capa superficial y núcleo las características convenientes hay que imponer condiciones al material base, al acero y al ciclo térmico.

La capa externa, tiene que ser algo más que dura; tiene que estar bien adherida al núcleo que la soporta, tiene que resistir a la fricción y a fuerzas de choque y, por muy dura que sea, ha de poseer suficiente tenacidad para evitar agrietarse.

5.1 CEMENTACION CON MATERIAS SOLIDAS.

Recibe el nombre de cementación, el enriquecimiento superficial en carbono de un acero adecuado.

En el cementado sólido, se emplea principalmente el carbón vegetal con adición de un agente de activación. Como agentes de activación interesan principalmente los carbonatos, siendo el más utilizado el carbonato de bario.

El carbón vegetal se mezcla con el carbonato de bario en una proporción que corrientemente oscila entre 60:40 (60 partes de carbón vegetal) y 80:20; siendo el criterio de elección, una mayor proporción de carbonato de bario para mayores profundidades de capa dura.

Durante el empaquetado, las piezas a tratar se rodean completamente de mezcla carburante y se procede al sellado del contenedor. Solo hasta entonces, se inicia el proceso, llevando las piezas a un "estado activo" durante el tiempo necesario, manteniendo la temperatura adecuada.

Durante el "estado activo", la difusión del carbono hacia el interior del acero, se lleva a cabo por medio de los gases que se desprenden de la mezcla carburante; siendo el principal portador de éste carbono el monóxido de carbono (CO).

El mecanismo de la operación se sintetiza en las siguientes etapas:

1ª. Producción de carbono naciente.

El carbón vegetal a elevada temperatura, en contacto con el oxígeno del aire del interior del contenedor, produce monóxido de carbono:



Posteriormente, el monóxido de carbono se descompone a elevada temperatura en carbono naciente y dióxido de carbono:



El carbono naciente, es el que produce la carburación. Al entrar en contacto con el hierro gamma, se combina formando carburo de hierro:



2ª. Absorción y disolución del carbono en el acero.

Para que se desarrolle con facilidad la difusión del carbono, es indispensable que el acero se encuentre en estado austenítico. A temperatura de cementado, la austenita podrá disolver de 0.035 a 1.40 %C.

3ª. Difusión del carbono hacia el núcleo.

De acuerdo a las leyes de difusión: al existir en la superficie del acero una sobreconcentración, el carbono tiende a penetrar hacia el interior. La función del carbonato de bario es acelerar la penetración del carbono, facilitando la formación de monóxido de carbono:



5.2 MEZCLAS CARBURANTES.

Los compuestos comerciales que suministran el carbono que ha de absorber el acero durante la carburación, suelen contener, como elemento carburante, carbón vegetal, carbón mineral, alquitrán o melaza; y como activadores el carbonato de bario (BaCO₃), carbonato de calcio (CaCO₃) o carbonato de sodio (Na₂CO₃).

Las mezclas carburantes más usadas actualmente, tienen como base al carbón vegetal y al carbonato de bario en las siguientes proporciones:

- Mezcla 1

Elemento carburante : Carbón vegetal al 60 o 80%
Elemento activador : Carbonato de bario al 40 o 20%.

- Mezcla 2

Elemento carburante : Carbón vegetal al 60%
Elemento activador : Carbonato de bario al 10 o 15%
Elemento diluyente : Coque al 25 o 30%.

Observaciones de mezcla carburante.

- El carbón vegetal tiene que estar bien seco y triturado en trozos de 3 a 6 mm.
- El carbonato de bario siempre debe estar presente en una proporción no menor al 10% en toda mezcla.
- El elemento diluyente se agrega para favorecer la penetración del calor al carburante y obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de los contenedores.

5.3 EMPAQUETADO.

El empaquetado de las piezas a cementar tiene que hacerse de manera que, por una parte, todas las piezas queden bien rodeadas de mezcla carburante y, por otra, que entre ellas exista suficiente mezcla carburante para que al consumirse, su descenso sea uniforme.

Cuando se practica un buen empaquetado, las piezas cementadas no observan deformaciones, pues la mezcla carburante actúa como el mejor de los soportes.

Durante el empaquetado, primero se distribuye uniformemente una capa de mezcla carburante en el fondo del contenedor. Se aconseja que ésta primera capa sea de una profundidad de 13 a 50 mm.

Posteriormente, se apilan las piezas en el contenedor; cuando sea posible, las piezas deberán ser empaquetadas con su dimensión más larga verticalmente a la base del contenedor.

Finalmente, se coloca una segunda capa de mezcla carburante sobre las piezas a carburar, hasta hacer tope con la tapa superior del contenedor -se aconseja nuevamente que ésta capa no sea menor a 50 mm-, para posteriormente sellar el mismo con barro o arcilla.

5.4 CONTROL DEL PROCESO.

En un proceso de carburizado, el gradiente de concentración; dependiente del potencial de carbono, la temperatura y el tiempo son los factores más importantes a tomar en cuenta.

- Potencial de carbono-gradiente de concentración.

Para todo proceso de cementado, es importante tanto la velocidad a la que el carbono es suministrado por el agente generador, como la velocidad a la que el carbono difunde sobre la superficie del acero.

Los principales gases que produce la mezcla carburante son: el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂). El CO y el CO₂ actúan de la siguiente manera: el CO cede carbono al acero "carburándolo"; mientras que el CO₂ cede oxígeno que se combina con el carbono del acero, por lo que tiende a "descarburar" la superficie. Los resultados que pueden arrojar determinadas relaciones de CO y CO₂ son las siguientes:

- a) Una carburación. Se difunde un determinado porcentaje de carbono hacia la superficie del acero bajo una atmósfera que favorece la formación de CO.
- b) Un comportamiento neutro. Se presenta cuando en determinadas condiciones se establece un equilibrio entre la atmósfera gaseosa CO-CO₂ y el contenido de carbono del acero. Por tanto, no existe difusión de carbono durante el proceso.
- c) Una descarburación. Puede llegar a suceder, cuando el contenido de carbono del acero, es mayor al contenido de carbono que le puede aportar la atmósfera carburante. En este caso, el CO₂ actúa como un fuerte descarburante.

- Temperatura.

Las temperaturas aplicadas oscilan entre los 815 y los 955 °C. Sin embargo, actualmente, se manejan temperaturas más elevadas del orden de los 1095 °C sin perderse un tamaño de grano fino a periodos de tiempo no muy prolongados.

La temperatura, el tiempo y la profundidad de capa están íntimamente relacionadas. Así, la profundidad de capa y la velocidad de carburizado se incrementan rápidamente con la temperatura.

Por otra parte, a temperaturas de carburación elevadas, se requieren tiempos cortos y viceversa, obteniendo los mismos resultados.

- Tiempo.

La velocidad de carburizado para una temperatura en particular, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. La velocidad de carburizado es así, la más alta al principio del ciclo y, gradualmente disminuye a medida que avanza el ciclo.

La figura 5-1 ilustra un ejemplo práctico de lo anterior.

Los tiempos para un proceso de cementado sólido, normalmente oscilan entre las 4 y 14 horas.

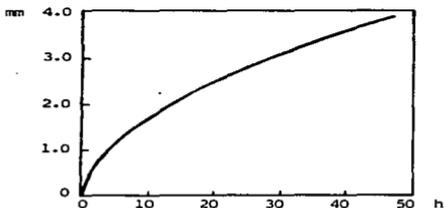


Figura 5-1. Efecto del tiempo sobre la profundidad de capa a 925 °C.

5.5 CAPA CEMENTADA.

La capa cementada, es la zona que después de la carburación queda con un contenido de carbono superior a la del acero. Por otra parte, la capa dura es la zona superficial del acero que después del último tratamiento térmico queda con una dureza superior a 58-60 HRC y un contenido de carbono superior a 0.50-0.80 por ciento. El espesor de la capa dura varía de la cuarta parte a la mitad de la profundidad de la capa carburada.

Espesores de capa cementada.

- Capas delgadas. Observan menos de 0.50 mm de espesor. Se utilizan en piezas pequeñas de acero al carbono; templadas normalmente desde la temperatura de cementación.

- Capas medias. Observan espesores de 0.50 a 1.50 mm. Son las más comunes para la mayoría de las piezas carburadas.
- Capas gruesas. Abarcan espesores superiores a 1.50 mm y sólo se obtienen por cementado sólido o gaseoso. Se recomienda que el contenido de carbono de la capa cementada no exceda del 1%. Así mismo, deben resultar durezas de 62 a 65 HRC.

Características mecánicas de la capa cementada.

En general, interesa lograr durezas superficiales superiores a los 60 HRC. Se tiene el siguiente criterio respecto a la dureza lograda:

- Mayores a 63 HRC. Se consideran como durezas muy buenas.
- Entre los 62 y 63 HRC. Se consideran como buenas.
- Entre los 60 y 62 HRC. Dentro de éste rango, se consideran como aceptables.

La dureza de la capa cementada se puede verificar de las siguientes formas:

- Utilizando durómetros, ya sea Rockwell o Vickers.
- Utilizando una lima fina, las zonas con durezas inferiores a 60 HRC serán rayadas por la lima.

Determinación de la profundidad de capa cementada.

Los procedimientos más empleados para determinar la penetración del carbono en la superficie del acero son los siguientes:

1º. Por comparación de tamaño de grano entre núcleo y periferia.

La capa periférica observa grano más fino que los granos que avanzan hacia el núcleo. Para esto, se corta la pieza transversalmente y se observa al microscopio.

2º. Por medición directa de la zona cementada.

Las zonas cementadas tienden a ennegrecer al ser pulidas y atacadas por ácido nítrico al 2%. La medición de la capa cementada se hace directamente con el auxilio de algún instrumento de medición adecuado.

3º. Por avance de la cementación.

Las piezas se cortan transversalmente después del cementado, se pulen y se atacan con nital al 2%. Posteriormente, con ayuda de un microscopio con retícula graduada, se mide el espesor del anillo periférico de color negro.

4º. For ensayos de microdureza.

Despues del proceso de cementado, se corta la pieza transversalmente y se lleva a cabo el temple y revenido. Posteriormente, se pule ligeramente la superficie y se hacen ensayos de dureza en dirección radial. Finalmente, se observa a partir de que punto la dureza del material deja de ser constante.

5.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS POSTERIORES A LA CEMENTACION.

Según la clase de acero y su destino de aplicación, el tratamiento térmico posterior a la cementación podrá ser elegido de forma adecuada. La elección dependerá del tamaño de grano que tiende a adquirir el acero y de las características que se deseen conseguir en núcleo y periferia de las piezas.

Los ciclos térmicos más utilizados son los siguientes:

- Cementación, temple directo a temperatura de cementación y revenido final.

Se aplica cuando se cementa en baños de sales y atmósferas carburantes. Se recomienda para piezas en las que la tenacidad del núcleo no tiene mucha importancia, y requieren capas duras ligeras de 0.2 a 0.6 mm. Para este ciclo térmico se recomiendan aceros al carbono o de baja aleación de grano fino.

- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura intermedia entre Ac1 y Ac3 y revenido final.

La capa cementada quedará con buenas características y el núcleo obtendrá máxima tenacidad. Por tanto, habrá poco peligro de deformaciones.

Se utilizan aceros alta aleación de grano fino.

- Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a Ac3 y revenido final.

La tenacidad del núcleo será buena y la resistencia máxima. La capa cementada podrá ser frágil o de dureza un poco baja.

Se deben emplear aceros de baja aleación y grano fino.

- Cementación, enfriamiento lento, primer temple a temperatura ligeramente superior a Ac3, segundo temple a temperatura ligeramente superior a Ac1 y revenido final.

La capa cementada quedará dura y tenaz, y el núcleo, con muy buena tenacidad y una resistencia máxima.

Conviene emplear aceros al carbono y de baja aleación de grano grueso.

5.7 ACEROS PARA CEMENTADO.

Dentro de la tecnología de materiales, los aceros de cementación han destacado como una de las más geniales uniones de materiales, un núcleo tenaz y una capa superficial dura y resistente.

Cualquiera de las normas conocidas para aceros de cementación (ISO 683/XI, AISI, SAE, DIN, etc) deja bien claro que éstos aceros deben cumplir siempre exigencias de composición química, de templabilidad, de características mecánicas, de tamaño de grano y, en menor medida, defectos superficiales y tolerancias dimensionales.

La composición química, es la base de las características fundamentales de todos los aceros. En general, se emplean aceros de bajo contenido de carbono -0.08 a 0.25%- aleados o sin aleación.

Así mismo, se prefieren los aceros con tamaño de grano fino 6 a 9. Los aceros de grano grueso, no suelen recomendarse, salvo aplicaciones especiales.

De acuerdo al contenido de aleación, los aceros de cementación se clasifican de la siguiente forma:

1. Aceros al carbono.

Los aceros al carbono observan tres elementos fundamentales: el carbono, el silicio y el manganeso. El contenido de carbono suele variar de 0.08 a 0.25%; el de silicio suele ser inferior a 0.35% y el de manganeso suele variar de 0.50 a 0.70%.

Para conseguir después de la cementación, durezas superiores a 60 HRC, es necesario que el temple se practique en agua.

Durante el proceso, estos aceros observan un elevado crecimiento de grano y por tanto, una elevada fragilidad. Para salvar éste problema y conseguir tenacidades aceptables, es necesario un tratamiento térmico de regeneración después del cementado.

Para piezas pequeñas, suelen emplearse aceros con menos de 0.12%C.

Para piezas de tamaño medio, se emplean aceros de 0.12 a 0.17 %C.

Para piezas grandes, se emplean aceros de 0.20 a 0.25%C.

2. Aceros de media aleación.

En estos aceros, la suma de los contenidos de elementos aleados cromo, níquel, molibdeno y manganeso es inferior a 3%.

Entre éstos aceros, se cuentan los cromo-níquel-molibdeno-manganeso y cromo-níquel-molibdeno con contenidos variables de carbono de 0.08 a 0.25%.

Los aceros de aleación más elevada, se suelen templar en aceite y los de menor aleación en agua.

3. Aceros de alta aleación.

Estos aceros contienen elementos de aleación con valores superiores a 3%. Los contenidos de carbono siempre son inferiores a 0.20%.

Los aceros clásicos de éste grupo son los aceros al níquel, los aceros al níquel-cromo y los aceros al cromo-níquel-molibdeno. Estos aceros se utilizan para fabricar piezas que requieran evitar deformaciones y obtener elevadas resistencias en núcleo, sin afectar demasiado su tenacidad.

5.8 INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS DE ALEACION EN LOS ACEROS DE CEMENTACION.

Entre los factores o características modificables por la influencia de los elementos de aleación, la templabilidad y los puntos críticos son los de mayor importancia, considerando que el grado de templabilidad determina el medio de temple a utilizar y los puntos críticos, las temperaturas a utilizar durante el cementado y el temple; tomando como referencia las temperaturas Ac3, Accm y Ac32.

A continuación indicaremos la influencia que ejercen el manganeso, cromo, níquel y molibdeno en los aceros de cementación.

Cromo (Cr).

- Incrementa en núcleo de la pieza cementada la resistencia y dureza después del temple, así como la dureza y resistencia al desgaste en la capa cementada.
- Acelera la velocidad de penetración del carbono.
- Eleva las temperaturas críticas.

Manganeso (Mn).

- En general, da lugar a aceros de grano grueso.
- Acelera la velocidad de penetración del carbono y ayuda a su distribución.
- Baja los puntos críticos.
- Mejora notablemente la templabilidad.

Molibdeno (Mo).

- Mejora la templabilidad y resistencia al desgaste.
- Ayuda a mantener dura la capa periférica.
- Acelera la velocidad de penetración del carbono.
- Eleva las temperaturas críticas.

Niquel (Ni).

- Mejora la tenacidad y la resistencia.
- Baja los puntos críticos.
- Retarda la penetración del carbono.
- Tiende a retardar la transformación de la austenita en martensita.

5.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Las principales ventajas de un cementado sólido son las siguientes: no requiere de atmósferas muy elaboradas, es eficiente y económico para el procesamiento de pequeñas cantidades de piezas o de piezas grandes y, es un proceso fácil de llevar a cabo.

Las principales desventajas son las siguientes: a la larga resultan ser caros por el consumo de combustible y por sus menesteres de preparación, no pueden ser templados directamente, se observa desigualdad de temperaturas en cajas de dimensiones grandes, el gradiente de concentración y la velocidad de difusión no pueden ser controlados estrechamente, no es apropiado para cementar piezas que requieran capas duras de estricta tolerancia.

5.10 APLICACIONES.

Se puede asegurar que en cualquier conjunto mecánico, destinado a la transformación o transmisión de energía, existen una serie de elementos del mismo, que debido a las condiciones de trabajo a que van a estar sometidos, es necesario que observen las características mecánicas propias de un endurecimiento superficial. Sin embargo, para que las piezas cementadas no lleguen a sufrir posibles deterioros como desgaste prematuro, roturas o fracturas; es necesario considerar las condiciones de trabajo a que van a estar sometidas, tales como esfuerzos de compresión, tracción, torsión o flexión. Así mismo, habrá que considerar algunos factores mecánicos como: montajes correctos, lubricación constante, ausencia de agentes erosivos al sistema, sobrecargas, etc.

Controlando las condiciones de trabajo y los factores mecánicos anteriores, se asegura un buen desempeño de las piezas cementadas.

Algunas de las aplicaciones típicas de un proceso de cementado se detallan en la figura 5-2. Sin embargo, en la construcción de engranajes de transmisión para vehículos es ampliamente usado. También se utiliza para endurecer rodillos, trinquetes, anclajes, autoperforantes para hormigón, piezas de martillos neumáticos, ejes reductores de velocidad, flechas, cigueñales, dedos de dirección, discos de embrague, etc.

Parte	Dimensiones		Carburizado		
	DE*	LA**	CAPA DURA		
	mm	mm	A 50 HRC	TEMPERATURA °C	
Engranaje para extracción minera	102	76	2317	0.6	925
Engranos de regulación para cizallado rápido	216	92	2317	0.9	900
Cilindros para cable de grúa	603	2565	1000	1.2	955
Engranos de embrague de alta desalineación	305	152	4617	1.2	925
Piñón rector para uso minero	127	127	2317	1.8	925
Engranos industriales de uso pesado	618	102	1022	1.8	940
Rueda para freno de motor	457	225	1020	3.0	925
Roles para gruas de alto rendimiento	660	152	1035	3.8	940
Engranos de giro tipo calandria	2159	610	1025	4.0	955
Horno-rufoños de giro de rodillo	762	405	1030	4.0	940
Restras laminadoras	95	794	3115	4.0	925
Laminador primario de tornillo	381	3327	3115	5.0	925
Engranos para laminadoras de alto rendimiento	914	4039	2325	5.6	955

* Diámetro exterior

** Longitud axial

Figura 5-2 Aplicaciones típicas para un proceso de cementado sólido.

 CAPITULO 6

 CEMENTADO SOLIDO DE UN ACERO 1018

El presente capítulo resume el objetivo perseguido por este trabajo, demostrar en la práctica las propiedades y características que confiere a los aceros de bajo contenido de carbono un proceso de cementado sólido.

El desarrollo experimental, se sustenta en aspectos teóricos asentados en los capítulos anteriores. La secuencia de trabajo fue la siguiente:

- Preparación de equipo y material.
- Preparación de probetas iniciales.
- Pruebas iniciales.
- Proceso de cementado.
- Ciclo térmico complementario.
- Preparación de probetas finales.
- Pruebas finales.
- Análisis de resultados.

Ya que cada etapa es importante para lograr un proceso exitoso, a continuación se explicará en detalle cada una.

6.1 PREPARACION DE EQUIPO Y MATERIAL.

Equipo.

1. Aparatos para análisis microestructural.

Aparato	Características
- Cortador de probetas	- Cortador de disco abrasivo. - Cuenta con equipo de recirculación de refrigerante.
- Pulidor de probetas	- Cuenta con plato giratorio y paño para pulir. - Cuenta con sistema de goteo de agua, cuya función es lubricar y refrigerar al sistema paño-probeta-alúmina.

- Horno de Mufla.
 - Temperatura máxima 1200 °C.
 - Dimensiones de cámara: 101 x 101 x 240 mm .
 - Microscópio metalográfico.
 - Cuenta con un sistema de adaptación para cámara fotográfica de 35 mm.
 - Su poder de aumento es hasta de 400X.
 - Dureómetro Rockwell.
 - Proporciona valores HRB y HRC.
2. Pinzas de sujeción y guantes de asbesto.

Material.

1. Barra redonda de acero 1018 de fabricación nacional.
 - Composición: Carbono : 0.15 - 0.20 %
 - Manganeso: 0.60 - 0.90 %
 - Fósforo : 0.040 % máximo
 - Azufre : 0.050 % máximo.
 - Diámetro : 12.7 mm (1/2 ").
2. Lima fina.
3. Papel de carburo de silicio números 220,320,500 y 600.
4. Solución diluida de alúmina Alpha No2. : 250 ml.
5. Reactivo químico nital al 2%.
 - Composición: 2.0 ml de ácido nítrico (HNO3).
 - 98.0 ml de alcohol etílico (C5H5OH).
6. Carbón vegetal.
 - 500 g.
7. Carbonato de bario (BaCO3).
 - 500 g.

8. Arcilla.

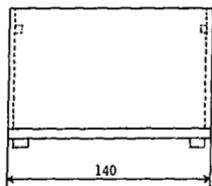
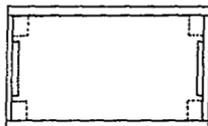
- 500 g.

9. Filmes de 35 mm.

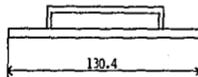
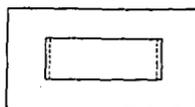
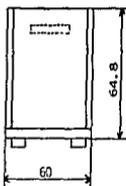
- Rollo de 12 exposiciones e impresiones a color.

10. Contenedor.

- Material : Acero inoxidable calidad 304 de 4.76 mm de espesor (3/16").
- El contenedor se diseñó de acuerdo a recomendaciones del Heat Treating, ASM, Hand Book Volumen 4.
- Las dimensiones fueron acordes a las de la cámara de trabajo del horno y de las probetas a cementar.
- Las placas fueron cortadas a la medida, y se unieron con soldadura eléctrica y electrodos para acero inoxidable marca Infra UTPE 306L-16 ,Ø 3/32. Los cordones de soldadura fueron continuos del tipo V sobre ángulos exteriores.
- Los detalles dimensionales de dicho contenedor se ilustran en la figura 6-1.

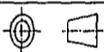


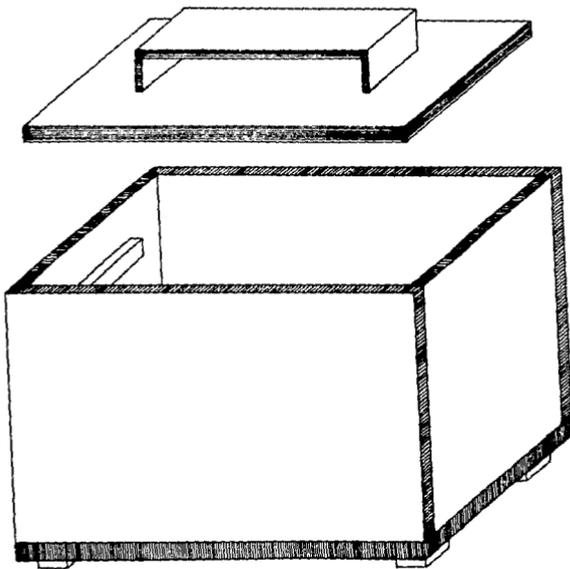
VISTA ORTOGNAL DE CONTENEDOR



VISTA ORTOGNAL DE TAPA DE CONTENEDOR



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - CUAUTITLAN		U.N.A.M.	
ESCALA: 1:2	ACOTACION: mm	FECHA: Oct.,96	REV.: DIAZ
	PROYECCIONES ORTOGNALES		DIB.: SEGOVIA
			Figura: 6-1



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES - CUAUTITLAN			U.N.A.M
ESCALA: 1:100	ACOTACION: mm	FECHA: Oct., 96	REV.: DIAZ
 	PERSPECTIVA DEL CONTENEDOR		DIB.: SEGONIA
			FIGURA: 6-1

6.2. PREPARACION DE PROBETAS INICIALES.

Dado que la preparación de probetas es un paso importante para una correcta observación de las microestructuras, esta trató de realizarse lo más apegada posible a las recomendaciones de corte, desbaste y pulido establecidas por la ASME.

Corte de probetas.

Las dimensiones de las probetas se rigieron por cuestiones de espacio y manipulación.

1. Dimensiones : Diámetro: 12.7 mm (1/2").
Longitud: 19.05 mm (3/4").
2. Número de probetas cortadas: Un total de 8.
3. Mecánica de corte:
 - La barra previamente marcada con la longitud de cada una de las probetas a cortar, se colocó en posición de corte para la primera muestra, procurando que la posición de la barra en relación al disco de corte fuese de 90° .
 - Se procedió al corte de la probeta, cuidando que el suministro de refrigerante fuese adecuado y continuo. La presión de la barra contra el disco de corte, fue moderado e interrumpido a intervalos que permitiesen un enfriamiento constante de las caras de la barra, esto para evitar un calentamiento excesivo de la zona de corte que pudiese ocasionar una modificación drástica de la microestructura.
 - El resto de las probetas se cortó de la misma forma.

Desbaste de probetas.

Antes de iniciar la operación de desbaste, se procedió a retirar las rebabas del contorno de las probetas cortadas por medio de la lima; la operación de desbaste se practicó en las 8 probetas, y en ambas caras de la siguiente manera:

- El papel de carburo de silicio previamente humedecido con agua, se colocó, sobre una superficie plana y lisa.
- Se procedió a deslizar la cara de la probeta contra el papel de carburo de silicio con relativa fuerza, y en dirección perpendicular a las rayas dejadas por el disco de corte.

- La operación se repite hasta eliminar por completo el rayado dejado por el disco de corte.
- La secuencia de desbaste principió con grado 220 y siguió con los grados 320 y 500 para finalizar con el grado 600. Para cada operación de desbaste, la dirección cambio 90° respecto al rayado anterior.

Pulido de probetas.

La práctica de un buen pulido, es la culminación de un buen trabajo de preparación de muestras y en consecuencia, la obtención de buenas imágenes en el microscópio.

En esta etapa, únicamente se pulió una de las probetas que se denominó "Probeta sin tratar", esta probeta fué la base de comparación entre una pieza tratada y una sin tratar.

Operación de pulido:

- Se reguló el sistema de goteo y se colocó el paño para pulir; previamente humedecido con agua.
- Se inició la operación diseminando alúmina sobre la superficie del paño ya en movimiento y se procedió a presionar la superficie de la probeta contra el paño.
- Los desplazamientos de la probeta se realizaron en forma radial de centro a periferia.
- La operación anterior se llevo a cabo tantas veces fue necesario hasta obtener una superficie libre de rayaduras (acabado espejo). Durante esta operación, el suministro de alúmina fue constante.
- El proceso terminó con el lavado de la probeta en agua y alcohol.

6.3 PRUEBAS INICIALES.

Las pruebas iniciales abarcan el ataque químico, el análisis metalográfico y la prueba de dureza. La "Probeta sin tratar" fue la única que se tomó en cuenta para esta etapa.

Ataque químico.

Un ataque químico, tiene como objetivo revelar la microestructura de un material y para poder practicarlo, es necesario preparar en primer termino el reactivo a utilizar dentro de los rangos recomendados.

Los reactivos químicos, normalmente se aplican por inmersión de la muestra. La muestra debe ser ligeramente agitada dentro del reactivo para lograr un ataque homogéneo y sin sobrepasar el tiempo de ataque recomendado.

Después del ataque, la probeta debe lavarse inmediatamente con agua y posteriormente con alcohol. Finalmente, se limpia con algodón quedando lista para su observación al microscopio.

Características del ataque.

Muestra: "Probeta sin tratar"

Características: Previamente desbastada y pulida a espejo.

Tipo de reactivo químico: Nital al 2% ----- 2.0 ml de ácido nítrico

98.0 ml de alcohol etílico.

Tiempo de ataque: 15 segundos.

Análisis metalográfico.

La observación de la microestructura, no solo nos ayuda a reconocer los constituyentes del acero que estamos manejando, si no que también nos da una idea del último tratamiento que recibió dicho material.

El objetivo de este reconocimiento, fue el poder contar con una base de comparación antes y después del proceso, para de esta forma constatar las transformaciones de microestructura y los cambios de propiedades que experimentó el acero.

Procedimiento:

- Se colocó al microscopio la probeta previamente atacada.
- Se enfocó la mejor imagen (esta fue a 400X).
- La imagen de la microestructura se capturó por medio de una fotomicrografía que nos reveló una estructura ferrítica entremezclada con perlita, a una proporción de aproximadamente 20% de perlita. La fotomicrografía-1 nos ilustra esta microestructura.

Prueba de dureza.

Las pruebas de dureza son muy importantes en ingeniería, ya que no solo nos ayudan a deducir la composición de un material, si no también nos pueden proporcionar datos de los que se pueden derivar muchas propiedades mecánicas, pero sobre todo son indispensables para valorar el éxito o fracaso de la mayoría de los tratamientos térmicos, incluyendo el endurecimiento superficial.

Procedimiento:

- Se eligió la escala HRb que implica la utilización de una carga de 100 Kg y un penetrador tipo bola de 1/16".
- Se colocó el yunque de apoyo apropiado y la probeta en posición.
- Se efectuaron tres pruebas de dureza y se registraron sus lecturas. La primera lectura se practicó al centro de la probeta; las otras dos a la izquierda y derecha de la primera impresión, a una distancia de tres diámetros. Las lecturas de superficie se distribuyeron a lo largo del cilindro.

"Probeta sin tratar"		
Lectura #	Dureza HRb NGcleo	Dureza HRb Superficie
1	65.0	62.0
2	65.5	62.5
3	66.0	61.0
Promedio :	65.5	61.8

6.4 PROCESO DE CEMENTADO.

Puesto que el proceso de cementado es la base del presente trabajo, todo lo establecido en el capítulo 5 se tomó muy en cuenta, a fin de obtener un cementado exitoso.

Procedimiento:

- a) Elección de parámetros de carburación.

Dado que las condiciones de operación del horno utilizado, no permitieron la práctica del proceso más allá de las 5 horas a temperaturas del orden de los 900 °C, se optó por elegir los siguientes parámetros, regidos fundamentalmente por el tiempo:

Tiempo de cementado : 4 horas.

Temperatura de cementado : 900 °C.

Profundidad de capa dura estimada : Capa media de 0.50 a 1.00 mm.

Dureza de capa esperada : Aceptable de 60 a 62 HRC.

b) Preparación de mezcla carburante.

Puesto que el tiempo de cementación se considera relativamente corto, se eligió la mezcla carburante que ofreciera mayor profundidad de capa.

Los elementos de carburación utilizados fueron carbón vegetal y carbonato de bario en una proporción 60:40 respectivamente.

Puesto que el carbón vegetal se consigue en trozos demasiado grandes, en primer lugar se procedió a triturar el carbón en pequeños trozos, no mayores a 3 mm; según recomendaciones. Posteriormente, para determinar la relación proporción-peso, tanto del carbón vegetal como del carbonato de bario, se procedió a rellenar el contenedor con carbón vegetal, para después retirarlo y pesarlo. Finalmente, con una sencilla regla de tres, se determinó el peso del carbonato de bario para después mezclarlo perfectamente con el carbón vegetal.

Mezcla carburante 60:40		
Elemento Carburante :	Carbón vegetal al 60%	--- 150 g.
Elemento Activador :	Carbonato de bario al 40%	--- 100 g.
Mezcla Carburante al 100%		--- 250 g.

c) Empaquetado.

Procedimiento:

- Se colocó en el interior del contenedor, una primera cama de mezcla carburante de aproximadamente 20 mm ligeramente compactada.
- Se apilaron 7 probetas con su longitud más larga, paralela a la base del contenedor. La distribución de las probetas se hizo de tal forma que, entre ellas existieran por lo menos 5 mm de mezcla carburante. De igual forma, se cuidó que, entre las paredes del contenedor y las probetas existiera suficiente mezcla carburante.
- Se rellenó de mezcla carburante la totalidad del contenedor y se compactó ligeramente con la tapa del mismo.
- La tapa del contenedor se selló con arcilla a fin de lograr el mayor hermetismo posible. Esto para evitar la filtración de aire y con ello, la calcinación de la mezcla carburante.

d) Desarrollo del proceso.

Puesto que las dimensiones de las probetas utilizadas, no superaron en mucho los 200 mm de espesor, no se consideró necesaria una etapa de precalentamiento. Sin embargo, dado que la temperatura fue un tanto elevada y no se utilizó un elemento diluyente en la mezcla carburante para favorecer la rápida penetración del calor, se optó por dar al conjunto contenedor-probetas-mezcla carburante, una ligera etapa de precalentamiento.

Procedimiento:

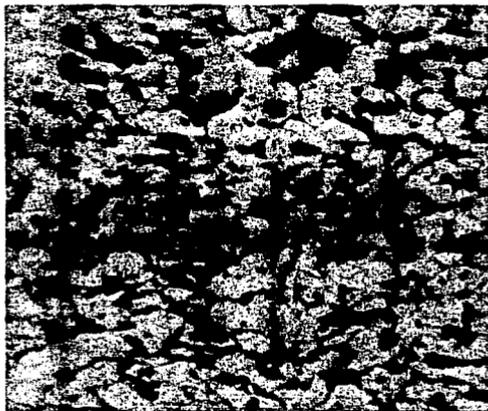
- Se calentó el horno a una temperatura de 600 °C.
- Con el debido cuidado y el auxilio de guantes de asbesto, se introdujo el contenedor en el horno.
- La etapa de precalentamiento fue de 20 minutos; tiempo que duró el horno en alcanzar una temperatura de 900 °C partiendo de los 600 °C.
- Se mantuvo el contenedor 4 horas a 900 °C.
- El contenedor se enfrió muy lentamente hasta la temperatura ambiente (en el interior del horno).
- Las probetas se retiraron del contenedor, se limpiaron y se prepararon de la siguiente manera:

1º. De las 7 probetas cementadas, 6 de ellas se cortaron transversalmente y se desbastaron por sus caras recién cortadas de acuerdo a lo asentado en la sección 6.2 para su posterior ciclo térmico.

2º. La probeta restante se desbastó, se pulió y se atacó químicamente con nital al 2% durante 10 segundos. Dicha probeta se denominó "Probeta cementada" y se observó al microscopio. La imagen obtenida en microscopio fue positiva, ya que se confirmó la difusión de carbono, observando la zona de transición característica o zona cementada; es decir, una superficie con alto contenido de carbono llamada "zona hipereutectoide", una "zona eutectoide" con 100% perlita y una "zona hipoeutectoide" de perlita y ferrita en su mayoría. Como un complemento a dicha observación, se tomó una fotomicrografía de la "zona eutectoide", la cual se denominó fotomicrografía-2.

Para constatar que la "Probeta cementada" no sufrió cambios drásticos de dureza, se le practicaron los siguientes ensayos:

"Probeta cementada"		
Lectura #	Dureza HRb Núcleo	Dureza HRb Superficie
1	62.0	63.5
2	62.0	60.0
3	62.0	62.0
Promedio:	62.0	61.8



Fotomicrografía -1. "Probeta sin tratar".
Acero al 0.18% de carbono, atacado químicamente
en nital al 2% durante 15 segundos, 400X.
Las áreas claras son ferrita y las oscuras
perlita.



Fotomicrografía -2. "Probeta cementada".
Acero 1018 cementado 4 horas a 900 °C. Atacado
químicamente en nital al 2% durante 10 segundos,
400X. Superficie completamente porfílica (zona
eutectoide).

6.5 CICLO TERMICO COMPLEMENTARIO.

Una pieza cementada, sólo adquiere sus propiedades características si se complementa con los tratamientos térmicos adecuados.

Ya que los parámetros de carburación establecidos, estiman un espesor de capa dura de clasificación media y durezas calificadas como aceptables, se eligió un ciclo térmico acorde a estas características. De tal forma, el proceso de endurecimiento superficial por cementado sólido fue el siguiente: Cementado-Temple directo a temperatura de cementado-Revenido final.

Las 6 probetas preparadas en la sección anterior (carburadas, cortadas transversalmente y desbastadas de sus caras recién cortadas) se sometieron a temple y revenido, dentro de las características asentadas en el capítulo 3 para cada tratamiento.

Temple.

Calentamiento de probetas. Para evitar los inconvenientes de un excesivo crecimiento de grano, oxidación o descarburación que implica un sobrecalentamiento; se eligió la temperatura de calentamiento establecida para un temple normal de austenización completa $Ac3 + 50^{\circ}C$; así mismo, el tiempo de austenización se fijó de acuerdo a lo establecido; una hora por pulgada de espesor. Por tanto, los parámetros de calentamiento y austenización fueron los siguientes:

Temperatura de temple : $920^{\circ}C$

Tiempo de austenización : 30 minutos.

Enfriamiento de probetas. Ya que el temple es directo a temperatura de cementación, se eligió un medio de temple que permitiese una velocidad de enfriamiento superior a la velocidad crítica de temple. En este caso, el medio de enfriamiento adecuado fue salmuera al 10%; es decir, agua más un 10% de cloruro de sodio ($NaCl$).

Procedimiento:

- Se calentó el horno a una temperatura de $920^{\circ}C$ y posteriormente fueron depositadas en la cámara de trabajo, usando las pinzas de sujeción y los guantes de asbesto.
- Se preparó el medio de enfriamiento.
- Las probetas se mantuvieron a $920^{\circ}C$ durante 30 minutos.
- Listas las probetas para el temple, se retiraron del horno rápidamente, una a una con las pinzas de sujeción y se enfriaron en la salmuera, agitando en forma de "ocho".

- Finalmente, se desbastaron ligeramente con papel de carburo de silicio número 600, se lavaron con agua y se limpiaron con algodón.

Revenido.

Puesto que las probetas templadas, no fueron de dimensiones muy grandes y el acero utilizado fue de bajo contenido de carbono, las temperaturas y tiempos de revenido recomendadas son de 200 a 300 °C y rangos de hasta 15 minutos respectivamente. De tal forma, los parámetros elegidos fueron los siguientes:

Temperatura de revenido : 300 °C
 Tiempo de revenido : 5 minutos
 Enfriamiento : Aire calmo.

Procedimiento:

- Se calentó el horno a 300 °C.
- Se introdujeron a la cámara de trabajo las 12 probetas.
- Se mantuvieron a 300 °C durante 5 minutos.
- Se retiraron del horno y se dejaron enfriar al aire calmo.

6.6 PREPARACION DE PROBETAS FINALES.

El desbaste y el pulido de las 12 probetas previamente cementadas, templadas y revenidas se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido en la sección 6.2.

"Probetas Cementadas - Templadas - Revenidas"		
Operación : Desbaste de 12 probetas		
Orden de desbaste	Papel de carburo de silicio #	Dirección de desbaste
Primero	220	Cada desbaste
Segundo	320	guardó 90°
Tercero	500	en relación
Cuarto	600	al rayado anterior.

Probetas Cementadas - Templadas - Revenidas
Operación : Pulido de 12 probetas
Todas las probetas observaron acabado espejo,utilizando para esto alúmina alpha,agua,alcohol y algodón.

6.7 PRUEBAS FINALES.

El ataque químico,análisis metalográfico y prueba de dureza se realizaron siguiendo los pasos asentados en la sección 6.3 .

Probetas Cementadas - Templadas - Revenidas		
Operación : Ataque químico de 12 probetas		
Número de probeta	Tipo de reactivo químico	Tiempo de ataque
Las 12 probetas utilizaron el mismo reactivo y se atacaron el mismo tiempo.	Nital al 2 %	15 segundos

El análisis metalográfico se práctico en 10 de las 12 probetas atacadas químicamente. Sin embargo,todas observaron estructuras semejantes;motivo por el cual,solo se eligieron las descritas a continuación:

Muestra : Probeta cementada - templada - revenida # 1 .

Operación : Análisis metalográfico.

Aumentos : 400X .

Zona de observación : Zona carburada o periferia.

Microestructura observada : Se observó la zona hipereutectoide (banda oscura) seguida de una banda muy delgada de ferrita sin transformar (banda clara) y una zona martensítica. Esta estructura se ilustra en la fotomicrografía número 3.

Muestra : Probeta cementada - templada - revenida # 2 .

Operación : Análisis metalográfico.

Aumentos : 400X .

Zona de observación : Zona martensítica.

Microestructura observada : Martensita acicular entremezclada con fondos claros de ferrita. La microestructura se ilustra en la fotomicrografía -4 .

Muestra : Probeta cementada - templada - revenida # 3 .

Operación : Análisis metalográfico.

Aumentos : 400X .

Zona de observación : Zona periférica con martensita.

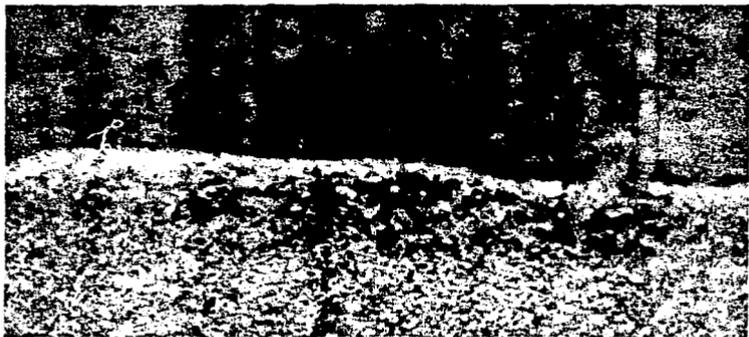
Microestructura observada : Se observa la zona hipereutectoide(zona oscura) seguida de martensita entremezclada con algo de ferrita sin transformar. La fotomicrografía -5 ilustra esta microestructura.

Probetas Cementadas - Templadas - Revenidas				
Operación : Prueba de dureza a 10 probetas.				
Probeta #	Lectura #	Dureza HRC núcleo	Dureza HRC superficie	Dureza HRC superficie (promedio)
1	1	41.0	59.0	59.3
	2	-	61.0	
	3	-	58.0	
2	1	40.0	50.0	51.5
	2	-	53.0	
	3	-	51.5	
3	1	40.5	60.5	60.6
	2	-	61.5	
	3	-	60.0	
4	1	40.0	47.0	49.2
	2	-	50.0	
	3	-	50.5	
5	1	40.0	56.0	57.2
	2	-	57.0	
	3	-	58.5	
6	1	40.5	57.0	57.5
	2	-	57.5	
	3	-	58.0	
7	1	40.0	56.5	57.0
	2	-	57.0	
	3	-	58.0	

Probeta #	Lectura #	Dureza HRc núcleo	Dureza HRc superficie	Dureza HRc superficie (promedio)
8	1	39.5	56.0	52.7
	2	-	50.0	
	3	-	52.0	
9	1	41.5	58.5	57.66
	2	-	56.0	
	3	-	58.5	
10	1	38.5	56.5	56.8
	2	-	56.5	
	3	-	57.5	

Observaciones:

- La dureza en núcleo solo se registró una vez ya que esta resultó ser muy homogénea.
- La dureza en superficie se practicó solo tres veces por cuestiones de tamaño de las probetas.

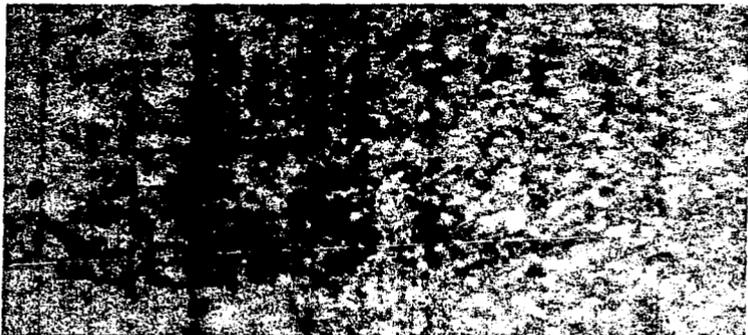


Fotomicrografía - 3. "Próbeta cementada - Templada - Revenida".
Acero 1018 cementado, templado en salmuera y revenido a 300°C durante 5 minutos. Atacado químicamente en nital al 2% durante 15 segundos y amplificado a 400X.
La zona oscura, es la zona hipereutectoide, seguida de una delgada capa de ferrita (zona clara) sin transformar. La martensita de forma pastosa, se observa inmediatamente después.



Fotomicrografía -4. "Probeta Cementada - Tem - plada - Revenida".

Acero 1018 cementado, templado en naturaleza y revenido a 300°C durante 5 minutos. Atacado químicamente en nital al 2%,100X. La microestructura observa martensita acicular entremezclada con fondos claros de ferrita sin transformarse.



Fotomicrografía - 5. "Probeta cementada - Templada - Revenida".
Acero 1018 cementado, templado en salmuera y revenido a 300°C .
Atacado en nital al 2%, 400X. Se observa la zona oscura de alto contenido de carbono sobre una zona de martensita entremezclada con algo de ferrita sin transformar.

6-8 ANALISIS DE RESULTADOS.

Las pruebas iniciales que se dedicaron al estudio de una "Probeta sin tratar", arrojaron los siguientes resultados:

- La preparación y ataque químico de la "Probeta sin tratar" fue satisfactoria, ya que se obtuvieron imágenes muy nítidas de la microestructura.
- La microestructura compuesta en un 80% de ferrita y un 20% de perlita aproximadamente, nos hace suponer que el acero estaba presumiblemente recocido o normalizado originalmente. Así mismo, esta idea se confirma con los bajos valores de dureza obtenidos.

Probeta sin tratar.

Dureza promedio : En núcleo 65.5 HRB.
En superficie 61.8 HRB.

Microestructura : Ferrita proeutectoide (80% aprox.) entremezclada con perlita (20% aprox.).

Conclusión : Posiblemente sometida a un normalizado, o un recocido total.

El proceso de cementación sólida incluyendo el ciclo térmico complementario, resultó ser exitoso, ya que se obtuvieron los valores esperados de acuerdo a la teoría. El ciclo térmico completo se ilustra en la figura 6 -2.

Probeta Cementada.

Dureza promedio : En núcleo 62.0 HRB.
En superficie 61.8 HRB.

Microestructura : Completamente perlítica.

Conclusión : La microestructura observada de la zona carburada, no revela cambios drásticos, ya que no se sometió a ciclo térmico complementario; sin embargo, aseguró un proceso exitoso ya que la estructura observada representa la zona eutectoide en un proceso de cementado y por lo tanto, una inminente difusión de carbono en superficie.

Probetas cementadas - Templadas - revenidas.

Dureza promedio : En núcleo 41.50 HRC máxima.

En superficie 60.60 HRC máxima.

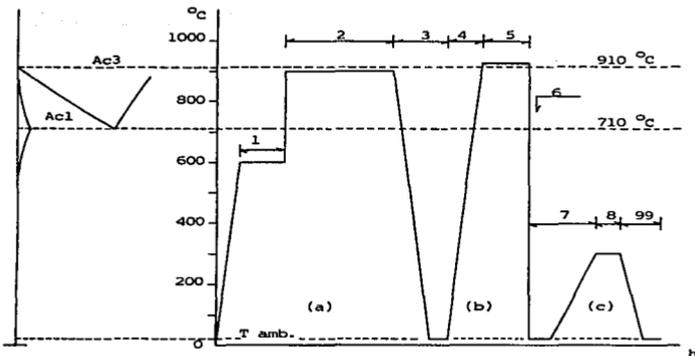
Profundidad de capa cementada obtenida : 0.62 mm aproximada -
mente.

Microestructura : Zona cementada o hipereutectoide.

Martensita acicular entremezclada con ferrita retenida.

Conclusión : - La profundidad de capa y la dureza obtenida en núcleo y periferia fueron las esperadas; ya que se observó una profundidad de capa media y una dureza calificada como aceptable, sin tomar en cuenta que a este valor de dureza, no se le agregó el valor de corrección derivado de las dimensiones.

- Dichos resultados se confirmaron con las microestructuras observadas.
- Algunos valores de dureza resultaron bajos. La causa fue la presencia de algo de ferrita sin transformar.
- La zona carburada se observa a simple vista en todas las probetas. Esto se ilustra en las fotografías 6 y 7 que corresponden a dos probetas diferentes.
- En general, se puede concluir que el proceso de endurecimiento superficial por cementado sólido practicado, fue satisfactorio en todos los casos.

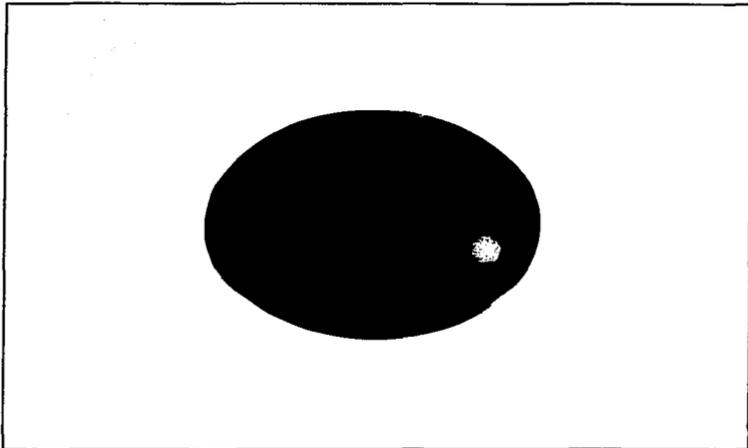


- a) Proceso de cementado : 1 - Precalentamiento de 20 minutos (600-900 $^{\circ}\text{C}$).
 2 - Tiempo de cementado a 900 $^{\circ}\text{C}$: 240 minutos.
 3 - Enfriamiento: Muy lento dentro del horno.
- b) Temple : 4 - Temperatura de temple: 920 $^{\circ}\text{C}$.
 5 - Tiempo de austenización: 30 minutos.
 6 - Enfriamiento: Muy brusco en salmuera al 10%.
- c) Revenido : 7 - Temperatura de revenido: 300 $^{\circ}\text{C}$.
 8 - Tiempo de revenido: 5 minutos.
 9 - Enfriamiento: Muy lento al aire calmo.

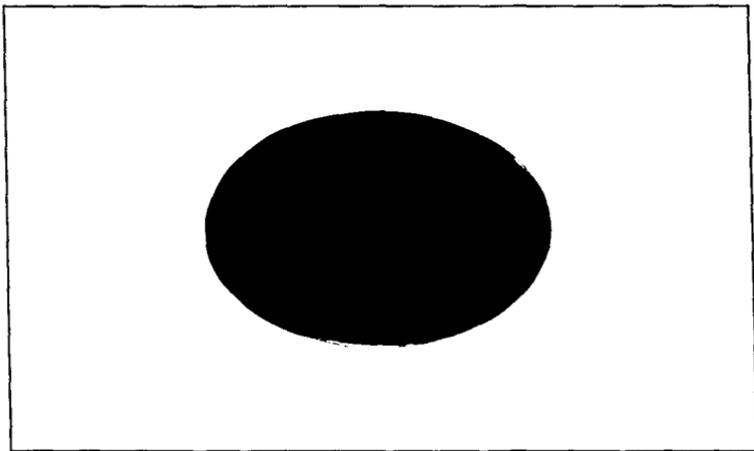
Figura 6 -2. Ciclo térmico de un endurecimiento superficial por cementado sólido. Se utilizó un acero 1018.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

69



Fotografía -6. "Probeta cementada - templada - revenida".
Acero 1018 cementado 4 horas a 900°C , templado en salmuera al 10%, y
revenido a 300°C durante 5 minutos. Atacada en nital al 2%, imagen ampli-
ficada a 5X. La probeta observa claramente una corona oscura de aproxi-
madamente 0.62 mm, que en conclusión representa la capa carburada.



Fotografía -7. "Probeta cementada - templada - revenida".

Acero 1018 cementado 4 horas a 900°C , templado en salmuera al 10%, y revenido a 300°C durante 5 minutos. Atacado en nital al 2%, imagen ampliada a 5X. Esta probeta observa claramente una corona oscura aproximadamente de 0.62 mm, que de igual forma representa la capa carburada. Esta probeta es diferente a la anterior.

CONCLUSIONES

El presente trabajo, comprende el desarrollo experimental de un endurecimiento superficial por cementado sólido, aplicado a un acero bajo carbono (1018 - 1020).

Puesto que un cementado sólido no tiene control alguno del gradiente de concentración de carbono, y consecuentemente no lo tiene sobre la presencia del monóxido de carbono (CO) ni de dióxido de carbono (CO₂) que son los gases carburantes o descarbonantes durante el proceso, se tomó como referencia un proceso ya aplicado, así como un total apego a lo establecido teóricamente.

En primer lugar, se puede concluir que el equipo con el que se contó fué el necesario y el apropiado (cumplió con los rangos de operación exigidos).

Así mismo, se confirmó que el material utilizado esta disponible comercialmente para futuras prácticas escolares, que fué específicamente una de las razones para la elección de este tema.

Respecto a los resultados obtenidos, se puede concluir que en términos generales, el endurecimiento superficial fué exitoso, ya que alcanzaron rangos de dureza y de profundidad de capa, comparables a los obtenidos con equipo más confiable e incluso comparables a los teóricos (ejem: hornos de atmósfera controlada).

Por otra parte, el análisis microestructural nos reveló la presencia de ferrita sin transformar en la capa endurecida, que fué la causa de la disminución de dureza, y por otra parte nos reveló estructuras características de un buen proceso de cementado; la difusión de carbono se pudo observar a simple vista por medio del ataque químico.

Finalmente, espero que este trabajo sirva de apoyo a las personas que lo requieran, tanto teórica o prácticamente, pues el contenedor como elemento principal, se fabricó de acero inoxidable calidad 304 resistente al calor, lo que lo hace más duradero en relación al acero comercial, y se encuentra disponible en el laboratorio de tecnología de materiales de esta facultad.

BIBLIOGRAFIA

- **Aceros de Cementación.**
Aceros de Llodio S.A
URMO S.A de Ediciones.

- **Tratamientos Térmicos de los Aceros.**
José Apraiz Barreiro
Dossat S.A .

- **Tratamientos Térmicos de los Aceros.**
H. Studemann
URMO S.A de Ediciones .

- **Steels. Heat Treatment and Processing Principles.**
George Krauss
ASM International .

- **Heat Treating.**
ASM Hand Book, Volume 4
ASM International .

- **Tecnología del Acero.**
José María Lasheras y Esteban
Ediciones Cedel .

- **La Ciencia e Ingeniería de los Materiales.**
Donald R. Askeland
Grupo Editorial Iberoamérica .

- **Metalurgia Física para Ingenieros.**
Albert G. Guy
Fondo Educativo Iberoamericano .

- **Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.**

Richard A Flinn / Paul K Trojan
Mc Graw Hill .

- **Proceso de Manufactura y Materiales para Ingenieros.**

Lawrence E. Doyle
Diana .