



D-10911

T
672.36
3586



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingenieria

Mecánica

Caracterización del-Proceso de Cementación Liquida

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada Por:

JACKSON XAVIER SILVA TAYO

Guayaquil - Ecuador

1992

AGRADECIMIENTO

Al ING. JOSE PACHECO M.
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para la
realización de este trabajo.

Al ING. IGNACIO WIESNER F.
por sus valiosas enseñanzas
a lo largo de mi carrera
estudiantil.

Al SR. MARCO ROJANO por su
invalorable ayuda.

DEDICATORIA

A mis padres

A mis hermanos

A mi esposa

A mi hijo

DECLARACION EXPRESA


"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, le corresponden exclusivamente al autor; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la "ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



JACKSON XAVIER SILVA TAYO

RESUMEN



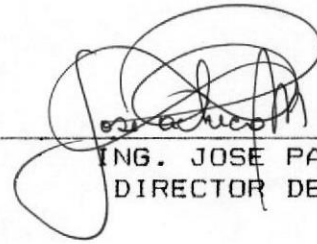
La cementación líquida es un proceso mediante el cual el acero adquiere una capa superficial dura y resistente al desgaste. El proceso se fundamenta en el aporte de carbono a la superficie del acero por parte de un baño de sales a alta temperatura, y luego un enfriamiento rápido que logre endurecerlo.

Nuestro propósito es conocer como interactúan cada una de las variables del proceso para hacer luego un uso eficiente del mismo.

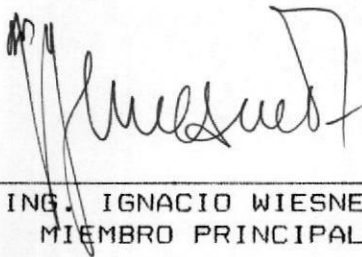
Para ello se realizó la cementación de un acero AISI 1022 variando algunos parámetros como: temperatura, tiempo, y concentración del baño de sales, con objeto de analizar la respuesta del acero al tratamiento térmico y las características generales del proceso.



ING. NELSON CEVALLOS B.
DECANO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



ING. JOSE PACHECO M.
DIRECTOR DE TESIS



ING. IGNACIO WIESNER F.
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. JAIME BARRERA V.
MIEMBRO PRINCIPAL

INDICE GENERAL



	Pág.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
CAPITULO I	
INTRODUCCION	18
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA CEMENTACION LIQUIDA .	20
2.1 MECANISMOS DE DIFUSION DE CARBONO EN EL ACERO	20
2.2 PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LA CEMENTACION LIQUIDA	24
2.2.1 INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL ACERO	24
2.2.2 BAÑOS UTILIZADOS Y EFECTO DE SU CONCENTRACION.....	33
2.2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO .	37
2.3 CAMBIOS DIMENSIONALES	39

	Pág.
2.4 APLICACIONES TIPICAS	42
CAPITULO II	
PRACTICA DE LA CEMENTACION LIQUIDA	44
3.1 MECANISMOS DE LIMPIEZA	44
3.2 CONTROL DEL PROCESO	45
3.2.1 DETERMINACION DE LA COMPOSICION Y MANTENIMIENTO DEL BAÑO	48
3.3 TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A LA CEMENTACION	49
3.4 HORNOS Y EQUIPO ADICIONAL	62
3.5 SEGURIDAD	69
CAPITULO IV	
EXPERIMENTACION	73
4.1 OBJETIVOS Y PLANEAMIENTO DE LA EXPERIMENTACION	73
4.2 EQUIPO EXPERIMENTAL UTILIZADO	75
4.3 DESCRIPCION DE LA TECNICA EXPERIEMENTAL	75
4.4 RESULTADOS	79
CAPITULO V	
ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	100
APENDICE	108
BIBLIOGRAFIA	111

INDICE DE FIGURAS

Núm.	Pág.
2.1 Mecanismo intersticial de difusión	22
2.2 Límites de solubilidad de carbono en austenita aproximados para varios aceros usados en cementación	28
4.1 Diagrama de flujo del proceso	80
4.2 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño con 10% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C	86
4.3 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño con 12% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C	87
4.4 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño	

Núm.	Pág.
con 14% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C	88
4.5 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 10% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2 Hr, (c) 3 Hr, y (d) 4 Hr	89
4.6 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 12% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2Hr, (c) 3 Hr, y (d) 4 Hr	90
4.7 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 14% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2 Hr, (c) 3 Hr, y (d) 4 Hr	91
4.8 Efecto de la temperatura en la profundidad de capa a 45 HRC en un acero AISI 1022 cementado con (a) 10, (b) 12, y (c) 12% CNNa	92
4.9 Efecto de la temperatura en la profundidad de capa efectiva (a 50 RHC) en un acero AISI	

Núm.

Pág.

1022 cementado con (a) 10, (b) 12, y (c)
14 % CNNa

93



4.10 Efecto de la temperatura en la profundidad
de capa a 55 HRC en un acero AISI 1022
cementado con (a) 10, (b) 12, y (c) 12%
CNNa

94

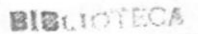
4.11 Acero AISI 1022 recocido, atacado
quimicamente en nital al 5%, ferrita zonas
blancas, perlita zonas oscuras. 150 X

95



4.12 Acero AISI 1022 cementado, 14% CNNa 925°C 1
Hr, enfriado al aire, atacado quimicamente
en nital al 5%, ferrita zonas blancas,
perlita zonas oscuras. 150X

96



4.13 Acero AISI 1022 cementado, 10% CNNa 900°C 2
Hr, enfriado al aire atacado quimicamente
en nital al 5%, ferrita zonas blancas,
perlita zonas oscuras. 150 X

97

4.14 Acero AISI 1022 cementado, 10% CNNa 875°C 2
Hr, enfriado al aire, atacado quimicamente
en nital al 5%, ferrita zonas blancas,

Núm.	Pág.
perlita zonas oscuras. 150 X	98
4.15 Acero AISI 1022 cementado, 14% CNNa 925°C 2 Hr, templado en agua, atacado químicamente en nital al 5%, se muestra una estructura martensítica. 150 X	99

INDICE DE TABLAS

Núm		Pág.
I	Rangos de composición de las sales de cementación líquida	36
II	Valores de profundidad de capa calculados por la ecuación 2.5	39
III	Aplicaciones típicas de la cementación líquida en sales de cianuro	43
IV	Duración de los crisoles	64
V	Rangos de composición de los baños de baja temperatura y composición del baño seleccionada	74
VI	Variación de la dureza con la distancia 10% CNNa 875°C	81
VII	Variación de la dureza con la distancia 10% CNNa 900°C	81

Núm.		Pág.
VIII	Variación de la dureza con la distancia	
	10% CNNa 925°C	82
IX	Variación de la dureza con la distancia	
	12% CNNa 875°C	82
X	Variación de la dureza con la distancia	
	12% CNNa 900°C	83
XI	Variación de la dureza con la distancia	
	12% CNNa 925°C	83
XII	Variación de la dureza con la distancia	
	14% CNNa 875°C	84
XIII	Variación de la dureza con la distancia	
	14% CNNa 900°C	84
XIV	Variación de la dureza con la distancia	
	14% CNNa 925°C	85
XV	Composición alcanzada por la superficie en un proceso de cementación de un acero AISI 1022 de acuerdo a la temperatura y porcentaje de cianuro de sodio utilizado ..	104

LISTA DE ABREVIATURAS

Ac ₁	Temperatura de calentamiento crítica inferior
Ac ₃	Temperatura de calentamiento crítica superior
Ac _m	Límite de solubilidad de carbono en austenita
AISI	American Iron and Steel Institute
A/cm ²	Amperios sobre centímetros cuadrados
°C	Grados centígrados
cm	Centímetros
CO ₂	Dióxido de carbono
CNNa	Cianuro de sodio
Cr	Cromo
CuSO ₄	Sulfato de cobre
d	Profundidad de capa cementada en milímetros
dc/dx	Variación de la concentración con la distancia
D	Coefficiente de difusión
D ₀	Coefficiente de difusión independiente de la temperatura
e	Base de los logaritmos naturales
Fe	Hierro
Fe-C	Hierro-Carbono
Fe-Cr	Hierro-Cromo
Fe-Cr-Ni	Hierro-Cromo-Níquel
Fe-Ni-Cr	Hierro-Níquel-Cromo

gr	Gramos
Hr	Horas
HK	Dureza Knoop
HRC	Dureza Rockwell C
J	Cantidad de sustancia que se difunde
k	Profundidad de difusión en una hora a una temperatura dada
KCl	Cloruro de potasio
Kg	Kilogramo
L	Litros
m	Metros
máx	Máximo
ml	Mililitros
mm	Milímetros
Mf	Temperatura de finalización de la transformación martensítica
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
Ms	Temperatura de inicio de la transformación martensítica
N	Nitrógeno
NaCl	Cloruro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
Ni	Niquel
P	Fósforo
Pie ³	Pie cúbico

Pulg	Pulgada
Q	Energía de activación de la difusión
R	Constante de los gases ideales
S	Azufre
t	Tiempo en horas
T	Temperatura en grados centígrados
Tq	Temperatura del medio de temple en grados centígrados
V	Porcentaje de austenita retenida
V.AC	Voltaje alterno

CAPITULO I

INTRODUCCION



BIBLIOTECA

La necesidad de que ciertos componentes de máquinas y equipos posean características superficiales de dureza y resistencia al desgaste, y a la vez una buena tenacidad y resistencia al impacto en el núcleo ha motivado la utilización de procesos metalúrgicos como lo es la cementación líquida del acero, el cual modifica la composición química de la superficie de componentes de acero.

En la cementación líquida se introduce carbono por difusión en el acero para lograr concentraciones de carbono en finas capas superficiales que permiten luego de un apropiado tratamiento térmico de temple alcanzar una elevada dureza en la superficie. El proceso tiene lugar a altas temperaturas, (850-925°C) cuando el metal se encuentra formado por la fase de austenita. La temperatura y el tiempo son los parámetros que controlan el proceso.

La fuente o agente suministrador de carbono es un baño de

sales fundidas conteniendo cianuros, aunque existen otros baños que no los contienen. En el baño de sales a elevada temperatura se producen reacciones químicas que generan carbono libre y monóxido de carbono que al contacto con el acero provocan una difusión de los átomos de carbono hacia el interior si el potencial de carbono del baño es suficiente. Esto genera un gradiente de concentración de carbono entre el baño y el metal el cual impulsa el proceso de difusión.

El proceso en sí reviste una serie de variables y características que deben ser consideradas en detalle para el éxito de una operación. El presente trabajo enfoca sus aspectos más relevantes con el objetivo de proveer información de tecnología apropiada al sector manufacturero que redunde en mejoramiento de la calidad de los productos.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA CEMENTACION LIQUIDA

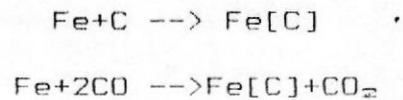
2.1. MECANISMOS DE DIFUSION DE CARBONO EN EL ACERO

En el proceso de cementación líquida, el carbono libre es introducido a través de la superficie del acero que inicialmente tiene un relativamente bajo contenido de carbono. El carbono libre proviene del baño de sales fundidas a alta temperatura que se encuentra en íntimo contacto con la superficie del acero.

Dependiendo de su composición, en el baño tienen lugar múltiples reacciones químicas que no envuelven de manera directa al metal pero que tienen lugar en su presencia y que producen compuestos intermedios y finales como: carbono (C), carbonatos alcalinos (Na_2CO_3 o K_2CO_3), nitrógeno (N_2 o 2N), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), cianamidas (Na_2CN_2 o BaCN_2), y cianatos (NaNCO).

Las más importantes reacciones que se producen son

las finales:



Teóricamente, la cantidad de carbono que el metal puede contener en la superficie está determinada por el potencial de carbono del baño de sales, y por la temperatura de cementación. Pero generalmente el potencial de carbono del baño es controlado para proporcionar el contenido de carbono deseado a la superficie del metal. Así, la absorción de carbono se realiza debido a un gradiente de concentración de carbono existente entre el baño y el metal.

DIFUSION DE CARBONO

El transporte de carbono desde la superficie del acero hacia el interior se realiza por difusión en estado sólido.

Difusión es un proceso por el cual átomos (de carbono en el caso de la cementación) se mueven a través de una estructura cristalina.

Un átomo de carbono es pequeño y puede colocarse intersticialmente entre un número de átomos de hierro, como se muestra en la figura 2.1. A medida

que la temperatura aumenta, los átomos vibran con mayor energía. Si la energía es suficiente, un átomo de carbono puede abrirse paso entre los átomos de hierro hasta el siguiente intersticio. Este mecanismo de difusión se conoce como difusión por intersticios, y es como se produce la difusión de carbono en la cementación.

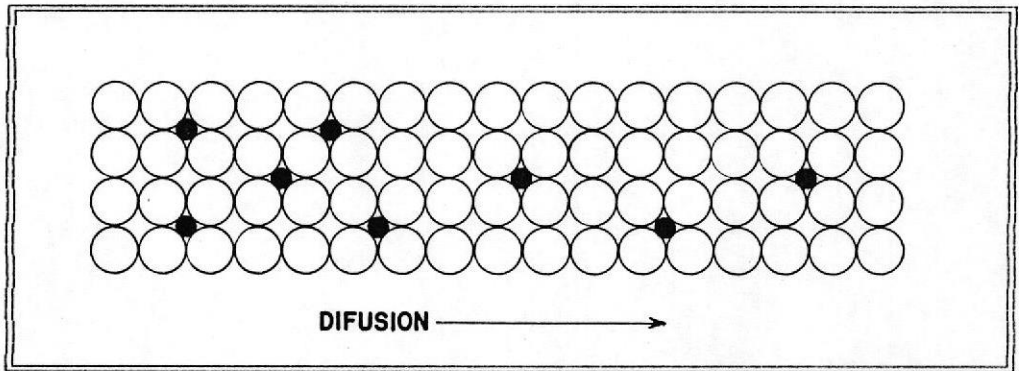


Figura 2.1 Mecanismo intersticial de difusión

A la energía necesaria para que un átomo salte de un intersticio a otro se le llama energía de activación. La energía de activación está íntimamente ligada con los tamaños relativos que guardan los átomos. A medida que el tamaño del átomo intersticial aumenta se incrementa la distorsión de la red asociada con su salto hacia el siguiente intersticio y en consecuencia aumenta la energía necesaria para que tenga lugar el salto.

En general, los procesos de difusión en sólidos siguen las leyes de Fick (8). La primera ley de Fick establece que el flujo de sustancia que se difunde a través de una sección transversal unitaria es proporcional al gradiente de concentración de la sustancia que se difunde:

$$J = -D(dc/dx) \quad (2.1)$$

La segunda ley de Fick expresa que la razón de cambio de concentración con respecto al tiempo es proporcional a la razón de cambio del gradiente de concentración:

$$dc/dt = D(d^2c/dx^2) \quad (2.2)$$

La constante D se conoce como coeficiente de difusión y depende de varios factores como la naturaleza del soluto y de los átomos solventes, la resistencia de enlace, la estructura del cristal, y la temperatura.

Se puede expresar el coeficiente de difusión como una función de la temperatura como:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2.3)$$

En base a las ecuaciones expuestas anteriormente F.E. Harrys desarrolló una fórmula que relaciona el efecto del tiempo y la temperatura con la profundidad de la capa cementada, es decir, la distancia desde la superficie del metal hasta donde se han difundido los átomos de carbono (1):

$$d=802.6(t/10^{(3720/T)})^{1/2} \quad (2.4)$$

Para una temperatura específica de cementación, la relación llega a ser simplemente:

$$d=k(t)^{1/2} \quad (2.5)$$

Valores de (k) a tres diferentes temperaturas usadas en cementación son: 0.45 mm/(h)^{1/2} para 875°C, 0.54 mm/(h)^{1/2} para 900°C, 0.63 mm/(h)^{1/2} para 925°C.

2.2 PARAMETROS QUE INFLUYEN EN LA CEMENTACION LIQUIDA

La cementación líquida es afectada por una serie de parámetros que pueden ser controlados para obtener resultados específicos.

2.2.1 INFLUENCIA DE LA COMPOSICION QUIMICA DEL ACERO

La composición química del acero tiene gran

influencia sobre los resultados finales en un proceso de cementación, aunque ejerce influencia en cada una de las etapas del proceso de manera diferente. Los tópicos más importantes que se ven influenciados por su efecto son los siguientes:

TEMPLABILIDAD

La templabilidad se define como la característica del acero de desarrollar máxima dureza y está afectada por el contenido de carbono y elementos aleantes del acero, el tamaño de grano, la homogeneidad química.

Puede decirse que todos los elementos aleantes incrementan la templabilidad del acero, con excepción del cobalto, pero el grado de influencia de cada uno de ellos es bastante diferente, pequeños porcentajes de algunos elementos resultan más efectivos que grandes porcentajes de otros (4)

La templabilidad depende también del tamaño de grano de la austenita. El crecimiento de grano ocurre por el re-arreglo de los átomos en la región de los límites de grano cuando el acero

se encuentra en estado austenítico a altas temperaturas. Los granos grandes tienen menor energía libre que los pequeños. Esto se asocia con la menor cantidad de área de frontera de grano por unidad de volumen al que tienden las estructuras cristalinas para alcanzar equilibrio termodinámico, por tanto, en condiciones ideales el menor estado de energía para un metal sería aquel que tendría si estuviera formado por un solo cristal.

Esta es la fuerza que impulsa el crecimiento de grano. Oponiéndose a esta fuerza se encuentra la rigidez de la red. Conforme la temperatura aumenta la rigidez de la red disminuye y la rapidez de crecimiento de grano es mayor. A cualquier temperatura dada hay un tamaño de grano máximo, punto donde estos dos efectos están en equilibrio. Así, pequeños granos eventualmente desaparecen y pasan a formar parte de otros mayores ocasionando un crecimiento del grano.

La presencia de partículas insolubles inhibe el crecimiento de grano, estas partículas distribuidas aleatoriamente en el acero forman centros de nucleación que producen grano fino.

Por esta razón, muchos aceros son manufacturados conteniendo estas partículas para lograr un grano fino.

El crecimiento de grano reduce la tasa a la cual la difusión controla la transformación de la austenita y de ese modo hace que la formación de martensita ocurra más fácilmente a una velocidad de enfriamiento dada (7).

FORMACION DE CARBUROS

Carburos globulares pueden formarse en la capa cementada por un calentamiento lento a través del rango de temperatura de transformación de la ferrita en austenita, y a la temperatura de cementación cuando el contenido de carbono excede el límite de solubilidad (A_{cm}) en el diagrama hierro carbono a dicha temperatura.

La composición química del acero influenciará la tendencia a la formación de carburos, los aceros que contienen elementos aleantes los cuales bajan el contenido de carbono del punto eutectoide pueden desarrollar más fácilmente carburos globulares durante la cementación (7). Todos los elementos de aleación tienden a

reducir el contenido de carbono del punto eutectoide y mueven la línea de solubilidad Acm hacia la izquierda.

En consecuencia, a medida que se incrementa el contenido de elementos de aleación, el límite de solubilidad de carbono (Acm) se moverá más hacia la izquierda favoreciendo la formación de carburos.

La figura 2.2 muestra los límites de solubilidad para algunos aceros utilizados en cementación.

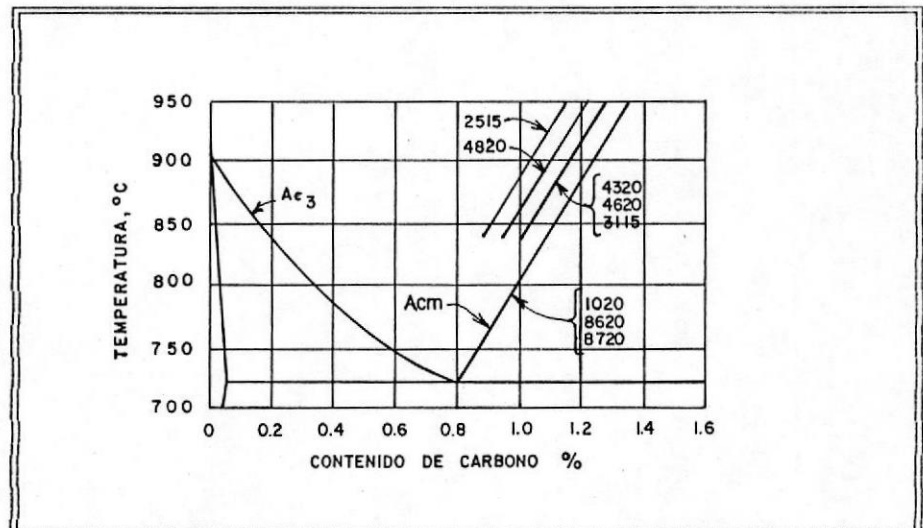


Figura 2.2 Límites de solubilidad de carbono en austenita aproximados para varios aceros usados en cementación

Los carburos por sí mismos son duros, sin embargo, en los aceros aleados los elementos de aleación contenidos en la matriz formarán parte de los carburos libres afectando así la templabilidad del acero, y dando como resultado estructuras no martensíticas en el temple. La presencia de estructuras no martensíticas o austenita retenida compensará cualquier incremento en la dureza debido a la presencia de carburos.

Si durante la cementación la austenita es sobresaturada de carbono, esto es, contiene más carbono que la composición eutectoide, los carburos se precipitarán en los límites de grano durante el enfriamiento lento desde la temperatura de cementación. Por otra parte si la misma austenita es enfriada rápidamente; mucho, si no todo el exceso de carbono será retenido por la estructura resultante (martensita-austenita). En otras palabras la velocidad de enfriamiento determinará cuanto el exceso de carbono será precipitado como carburo (7).

La formación de carburos precipitados es un indicativo de que el potencial de carbono

utilizado en el baño ha sido muy alto.

AUSTENITA RETENIDA

En los aceros, la austenita es estable a temperaturas sobre Ac_3 y Ac_m en un diagrama Fe-C. En el enfriamiento desde esas temperaturas llega a ser inestable y se descompone en muchos nuevos constituyentes dependiendo de la composición química del acero y la velocidad de enfriamiento. Cuando la transformación envuelve procesos de difusión, (por ejemplo, para formar ferrita, perlita, o bainita) la transformación será total y la austenita no subsistirá. Si, de otra manera, el enfriamiento produce martensita es posible que algo de austenita permanezca en la microestructura final (7).

La formación de martensita tiene lugar en un rango de temperaturas relativamente bajas y existe una temperatura de inicio de la transformación (M_s), y una temperatura de finalización (M_f). En muchas ocasiones la temperatura M_f se sitúa a temperaturas muy bajas y el enfriamiento hasta la temperatura ambiente solamente, dará lugar a la presencia

de austenita no transformada. Sin embargo, pequeñas cantidades de austenita retenida han sido detectadas al templar aceros en donde la temperatura M_f estuvo sobre la temperatura ambiente. Esto sugiere que la austenita puede llegar a ser estable durante el curso de un temple convencional.

Entonces, existen dos factores que deben ser considerados, uno es la posición del rango M_s - M_f relativo a la temperatura ambiente y el segundo envuelve la estabilidad de la austenita.

Una consecuencia de desarrollar un gradiente de carbono en la superficie del acero es que la temperatura de inicio de transformación martensítica cae como el contenido de carbono se incrementa. De la misma manera sucede con los elementos aleantes como se muestra en la ecuación empírica de Steven y Haynes (7).

$$M_s (^{\circ}C) = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr - 21Mo \quad (2.6)$$

Esta fórmula es razonablemente válida para aceros que contienen sobre 0.5% de carbono. La temperatura M_f define la temperatura a la cual

la transformación martensítica cesa y se sitúa aproximadamente 215°C bajo Ms.. Entonces, a altos niveles de carbono y asumiendo que la diferencia entre Ms y Mf se mantiene constante, la transformación resultará incompleta.

La cantidad de austenita no transformada (V) es entonces dependiente de la temperatura Ms y de la temperatura del medio de temple (Tq) como lo muestra la ecuación empírica de Koistinen y Marburger (7).

$$V = e^{-0.011(Ms - Tq)} \quad (2.7)$$

La austenita retenida es relativamente suave a pesar de ser una solución sólida saturada de carbono y su presencia en coexistencia con martensita dura reducirá la dureza de toda la estructura. La dureza de una estructura que contiene austenita retenida dependerá de la cantidad en que se hallare presente en la misma.

Por otra parte, la expansión volumétrica que acompaña a la transformación martensítica no tiene lugar en la austenita retenida y los esfuerzos residuales que se producen en la capa

cementada disminuyen al incrementarse la cantidad de austenita no transformada.

En general, el contenido de austenita retenida en una capa cementada es influenciado por el contenido de elementos aleantes del acero, el contenido de carbono de la superficie, y la temperatura de temple. Todos estos parámetros deben considerarse cuidadosamente al hacer el diseño del tratamiento térmico de una parte cementada.

2.2.2 BAÑOS UTILIZADOS Y EFECTO DE SU CONCENTRACION

En el proceso de cementación líquida el acero está en contacto directo con un baño de sales fundidas que actúa como agente proporcionador de carbono. Muchos baños contienen cianuros, los cuales introducen conjuntamente carbono y nitrógeno.

El proceso de cementación líquida puede ser distinguido de la cianuración (que también utiliza baños que contienen cianuros) por el carácter y composición de la capa producida. Las capas producidas por cementación son más bajas en nitrógeno y más altas en carbono que

las producidas por cianuración. Además, la profundidad de las capas cementadas es también mucho mayor que la de las capas cianuradas.

El contenido de cianuro del baño determinará su potencial de carbono. Así, baños con altas concentraciones de cianuro producirán capas más ricas en carbono.

Los baños de cementación pueden ser utilizados para producir capas finas o profundas y para ello se utilizan dos diferentes clases de baños. En general los dos tipos son denominados más por la temperatura de operación que por su composición misma. Así, se los conoce como baños de baja temperatura y baños de alta temperatura. Ambos pueden contener diferentes cantidades de cianuro de sodio para satisfacer requerimientos particulares.

BAÑOS DE CIANURO DE BAJA TEMPERATURA

Operan usualmente en el rango de 845 a 900°C, sin embargo para ciertos efectos específicos este rango es muchas veces extendido de 790 a 925°C. Estos baños se utilizan para producir capas finas ricas en carbono.

La operación de estos baños exige el uso de una capa protectora de carbono de, cierto espesor sobre el baño, cuando esta capa es muy fina el nitrógeno contenido en la capa cementada será relativamente alto debido a la captación del nitrógeno atmosférico por parte del baño.

Los baños de cianuro de baja temperatura son también operados con altos contenidos de cianuro y a mayores temperaturas.

BAÑOS DE CIANURO DE ALTA TEMPERATURA

Operan usualmente en el rango de temperaturas de 900 a 955°C, aunque este rango puede extenderse. A más bajas temperaturas la velocidad de cementación disminuye, y a más altas temperaturas la velocidad de cementación aumenta aunque el deterioro del equipo se incrementa marcadamente. Estos baños se utilizan para producir capas de 0.5 a 3.0 mm de profundidad pudiendo llegarse incluso hasta 6 mm, pero el uso más importante es el rápido desarrollo de capas de 1 a 2 mm.

Las capas producidas consisten esencialmente de carbono disuelto en hierro aunque una pequeña

cantidad de nitrógeno se añade, el mismo que proporciona mayor resistencia al desgaste y resistencia a la pérdida de dureza durante el revenido posterior al temple.

Es una práctica común iniciar un ciclo de cementación a alta temperatura y luego de cierto tiempo disminuirla. Esto no solamente provee una máxima velocidad de cementación sino que también el temple desde una temperatura más baja reducirá la distorsión y la cantidad de austenita retenida. La tabla I indica las composiciones de los baños de cementación (1).

CONSTITUYENTE %	BAJA TEMP	ALTA TEMP
CIANURO DE SODIO	10-23	6-16
CLORURO DE BARIO		30-55
SALES ALCALINAS	0-10	0-10
CLORURO DE POTASIO	0-25	0-20
CLORURO DE SODIO	20-40	0-20
CARBONATO DE SODIO	30 max	30 max
ACELERADORES	0-5	0-2
CIANATO DE SODIO	1.0max	0.5 max
DENSIDAD DE LA SAL FUNDIDA	1.76 Kg/dm ³ a 900°C	2.0 Kg/dm ³ a 925°C
(a) Cloruro de calcio ó estroncio		
(b) Dióxido de manganeso, óxido bórico, fluoruro de sodio, pirofosfato de sodio		

TABLA I Rangos de composición de las sales de cementación líquida

2.2.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO

De la ecuación 2.4 puede deducirse que al aumentar la temperatura de cementación disminuye el tiempo necesario para conseguir un espesor de capa dado. Por consiguiente, el incremento de la temperatura incrementa también la velocidad de difusión de carbono.

El rango de temperaturas utilizado en el proceso de cementación es de 850 a 950°C aunque temperaturas más bajas o más altas también pueden utilizarse.

A temperaturas superiores a 950°C la vida útil del equipo disminuye drásticamente, por eso se ha limitado la temperatura de cementación a un máximo de 1010°C para aplicaciones especiales.

La temperatura más comúnmente utilizada para cementación es 925°C. Esta temperatura permite una razonable rapidez de cementación sin un deterioro excesivo del equipo (3).

Para lograr capas poco profundas ajustadas dentro de un estrecho rango frecuentemente se usan bajas temperaturas. Esto proporciona

mayor control que si se utilizara mayor temperatura y un menor tiempo de cementación.

El proceso de cementación líquida en sales que contienen cianuros introducen conjuntamente carbono y nitrógeno en el acero. Mientras más alta es la temperatura, la velocidad de difusión tanto del carbono como del nitrógeno aumenta, pero la proporción de aumento en la difusión de carbono frente a la difusión de nitrógeno es muy significativa. De manera que para propósitos prácticos puede asumirse que la cantidad de nitrógeno presente en la capa cementada en tales circunstancias es despreciable.

A bajas temperaturas la tasa de difusión disminuye, pero la reducción en la difusión de carbono llega a ser considerable frente a la reducción en la difusión de nitrógeno y la cantidad de nitrógeno presente en la capa cementada puede llegar a ser significativa. Por esta razón temperaturas menores a 850°C no son utilizadas en la generalidad de los casos.

El efecto del tiempo en la profundidad que alcanza una capa cementada se evidencia en la

ecuación de Harris (ec. 2.5), de la cual se ha derivado la siguiente tabla que muestra los valores de profundidad de capa para tiempos de 2 a 12 horas a tres temperaturas comunes de cementación (1).

PROFUNDIDAD DE CAPA (mm)			
TIEMPO (H)	875°C	900°C	925°C
2	0.63	0.76	0.89
3	0.78	0.94	1.09
4	0.90	1.08	1.26
8	1.27	1.53	1.78
12	1.56	1.87	2.18

TABLA II Valores de profundidad de capa calculados por la ecuación 2.5

2.3 CAMBIOS DIMENSIONALES

Antes de ser cementadas las partes deben ser en lo posible maquinadas a dimensiones finales, pues un maquinado ulterior excesivo reducirá la capa cementada.

Sin embargo, generalmente es necesario rectificar las piezas antes de ponerlas en servicio debido a los

cambios en las dimensiones que se producen por la distorsión de las partes por efecto del tratamiento térmico.

La distorsión es influenciada mayormente por la forma de las partes, aunque existen otros factores que también son importantes:

- Esfuerzos residuales previos
- Esfuerzos inducidos a causa de un calentamiento no uniforme
- Métodos de distribución y fijación de partes durante el calentamiento y temple
- Crecimiento de la superficie durante la cementación
- Temperatura de temple
- Severidad de temple
- Composición química del acero

Algunos medios están disponibles con objeto de reducir la distorsión de partes específicas. Cada una de las diferentes partes debe ser analizada por

separado manipulando las diferentes variables antes mencionadas. Varios de los métodos, más utilizados para minimizar la distorsión son los siguientes:

MARTEMPERING

Es el más económico método para disminuir la distorsión. Usualmente el mayor costo se relaciona con la amortización del capital requerido para el equipo.

ACCESORIOS DE FIJACION

El uso de accesorios de fijación para partes de forma compleja durante el calentamiento y temple reducen de manera efectiva la distorsión pero incrementan marcadamente el costo del tratamiento térmico. El costo de los elementos de fijación llega a ser muy alto debido a los diseños especiales que se requieren para ajustarse a la forma de una parte en particular. Además, frecuentemente más de la mitad de la capacidad del equipo es ocupada por estos elementos.

TEMPLE A PRESION

Es el más efectivo método para reducir la distorsión. Sin embargo, los costos del tratamiento térmico se

incrementan de manera drástica, muchas veces hasta en un 100% o más.

2.4 APLICACIONES TÍPICAS

El proceso de cementación líquida es ampliamente utilizado para partes pequeñas y medianas. Partes muy grandes son procesadas en sales con dificultad.

Por los problemas asociados con la remoción de las sales, la cementación líquida no es recomendada para partes que contienen pequeños agujeros, roscas, o áreas que sean difíciles de limpiar.

La aplicabilidad del proceso se evidencia en la tabla III, donde se proveen detalles de los tratamientos térmicos para partes construidas con aceros al carbono, aceros resulfurizados, y aceros aleados.

PARTE	PESO Kg	TIEMPO ACERO Hr	TEMP °C	TEMPLE	TT SUBS	HRC
ACEROS AL CARBONO						
Adaptador .	0.9	CR	4	938	A	(a) 63
Anillo	0.009	1020	6.5	938	A	(a) 63
Buje	0.7	CR	6.5	938	A	(a) 63
Clavija ...	0.7	CR	6.5	938	A	(a) 63
Disco	1.4	1020	5	938	(b)	(b) 56
Eslabón ...	0.007	1018	1	845	A	
Matriz	3.5	1020	5	938	A	(a) 62
Matriz	1.1	CR	5	938	A	(a) 60
Palanca ...	0.05	1020	1	845	O	(c)
Placa	0.007	1010	2	845	O	(c)
ACEROS RESULFURIZADOS						
Arbol	3.6	1117	7	913	A	(e) 60
Arbol	0.08	1118	2	845	O	(c)
Buje	0.04	1118	2	845	O	(c)
Buje guía .	0.2	1117	5	913	(f)	60
Cilindro ..	3.6	1117	7	913	A	(d)
Disco	0.0009	1118	1	845	B	(c)
Espiga	0.003	1119	1	845	O	(c)
Tuerca	0.04	1113	1	845	O	(c)
Válvula ...	0.45	1117	7	913	(f)	60
ACEROS ALEADOS						
Acople	0.03	8620	2	845	O	(c)
Arbol	0.9	8620	5	913	(f)	
Bolas rod .	0.2	8620	14	925	A	(d) 64
Cigüeñal ..	0.9	8620	6.5	913	A	(e) 62
Engranaje .	0.35	8620	6	913	A	(d) 63
Engranaje .	0.03	8620	0.5	845	O	
Pista rod .	0.9	8620	14	925	A	(d) 64
Pistón	0.2	8620	8	913	A	(d) 63
Retenedor .	0.0009	9317	0.33	845	O	(g)
Válvula ...	0.01	8620	4	845	O	(g) 60
CR Laminado en frío, A Aire, B Salmuera, O Aceite, C Solución cáustica.						
(a) Recalentado 790°C, templado en solución cáustica						
(b) Transferido a una sal neutra a 790°C, templado en solución cáustica, revenido a 175°C						
(c) Revenido a 163°C						
(d) Recalentado a 845°C, templado en sales a 175°C						
(e) Recalentado a 775°C, templado en sales a 193°C						
(f) Templado directamente en sales a 175°C						
(g) Revenido a 163°C y tratado a -85°C						

TABLA III Aplicaciones Típicas de la cementación líquida

CAPITULO III

PRACTICA DE LA CEMENTACION LIQUIDA

3.1. MECANISMOS DE LIMPIEZA

Todas las partes deben ser completamente limpiadas y secadas antes de ser cementadas. Muchas sustancias son contaminantes de los baños y deben ser removidas, algunas de las más significativas son:

- Aceites conteniendo sulfuros

- óxidos

- soluciones alcalinas usadas para prevenir la corrosión

- Sales de temple contenidas en los accesorios de sujeción

La limpieza puede realizarse por varios mecanismos, algunos de los más utilizados son: saponificación y emulsificación. Estos mecanismos pueden operar de

manera independiente o en combinación entre ellos.

Los residuos de grasa siempre existentes en las partes luego de maquinadas pueden ser removidos mediante saponificación. La saponificación consiste en convertir en jabón las grasas por la reacción de esta con sales alcalinas en agua.

Por emulsificación se pueden juntar dos líquidos inmiscibles como aceite y agua. Esto se hace posible por la acción de un detergente.

Finalmente un buen enjuague en agua limpia es esencial para una buena limpieza.

3.2 CONTROL DEL PROCESO

CONTROL DE LA TEMPERATURA

Los baños de sales externamente calentados pueden ser mantenidos dentro de un rango de temperaturas de $\pm 8^{\circ}\text{C}$ cuando un sistema de control proporcional electrónico es utilizado. Controles on-off son menos exactos, sin embargo para la mayoría de aplicaciones resultan adecuados.

Los baños internamente calentados pueden ser

controlados a $\pm 5^{\circ}\text{C}$ por medio de controles on-off mecánicos o electrónicos y un contactor que conecta y desconecta la fuente de poder.

CUBIERTA DE GRAFITO

Una capa de grafito debe mantenerse en la superficie del baño de sales para que la operación del mismo sea eficiente. Puede utilizarse grafito natural o polvo de grafito artificial. El primero, provee una cubierta más fluida con menos tendencia a adherirse a las partes cuando éstas se sacan del baño. Sin embargo, el grafito natural a veces introduce muchas impurezas que pueden causar problemas. Además, para evitar la corrosión de las partes, grafito natural que contenga azufre no debe utilizarse (5).

La cubierta de grafito actúa como aislante del baño y del medio ambiente, e impide que se pierda carbono y se introduzca nitrógeno en el mismo.

CICLOS DE TRABAJO

Para paradas de 2 días o más, los hornos externamente calentados pueden ser apagados. Durante el recalentamiento, sin embargo, el crisol debe ser cubierto para prevenir una violenta expulsión de las

sales. En los hornos internamente calentados, es perfectamente recomendable mantener el baño de sales en un rango de temperaturas de 705 a 730°C hasta por períodos de 1 a 2 semanas.

A temperaturas entre 705 y 730°C los baños pueden ser mantenidos perfectamente sin que emanen gases si se los protege con una gruesa capa de grafito. La ventilación excesiva deberá ser evitada porque acelera el consumo del grafito.

RUTINAS DE MANTENIMIENTO DIARIO

Los siguientes ítems abarcan típicas operaciones de mantenimiento para todos los equipos de baño de sales (5)

- Chequear el sistema de control de temperatura usando un pirómetro auxiliar y una termocupla
- Chequear el color del humo de combustión. Un humo blanco o blanco-azulado indica escape de sales.
- Añadir sales nuevas para compensar las pérdidas por arrastre que ocurren al sacar las partes del baño
- Para ayudar a mantener la composición del baño y

reducir las pérdidas de calor, añadir grafito al baño para formar una cubierta fina pero continua

- Chequear la actividad del baño mediante un análisis del contenido de cianuro

- Si es posible, hacer rotar el crisol en los hornos calentados por combustibles, al menos una vez por semana para minimizar los efectos de la flama y extender la vida del crisol

- Si el crisol está dejando escapar sales que todavía están activas remueva las sales y póngalas en otro recipiente de acero. Estas sales pueden volver a ser utilizadas en otro crisol (sin embargo no es recomendable que estas sales sean utilizadas después para reposición)

- Consulte el manual de operación y mantenimiento provisto por el fabricante del horno y el proveedor de las sales

3.2.1 DETERMINACION DE LA COMPOSICION Y MANTENIMIENTO DEL BAÑO

Inevitablemente el baño de sales pierde carbono ya sea por la cementación misma, o por pérdidas

desde la superficie del baño. El control del cianuro de sodio es el más importante factor en el mantenimiento de la efectividad en un baño de cementación líquida.

El método del sulfato de cobre para determinar el contenido de cianuro de sodio del baño es el más utilizado. En el apéndice se presenta una descripción detallada del método de muestreo y de este procedimiento químico.

Otros procedimientos también están disponibles para determinar el contenido de cianuro y otros compuestos del baño (2).

3.3 TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A LA CEMENTACION

TEMPLE

Las partes luego de cementadas deberán ser templadas, pues el temple es necesario para desarrollar dureza en la superficie. La selección de un apropiado medio de temple es muy importante porque idealmente, la rapidez de enfriamiento debe ser tal que produzca una estructura dura sin que ésta sufra agrietamiento o se desarrolle una cantidad excesiva de austenita retenida. En la práctica, las condiciones de temple

son siempre seleccionadas unicamente sobre la base de desarrollar las propiedades requeridas en la capa cementada.

Muchos diferentes medios se utilizan para templar partes cementadas dependiendo de la forma y el tamaño y de las características de transformación del acero, los más utilizados son:

- Agua
- Salmuera
- Soluciones cáusticas
- Soluciones a base de polímeros
- Aceites
- Baños de sales

El agua proporciona el medio más rápido de enfriamiento, económico, facilmente disponible, puede ser desechado sin problemas de contaminación o peligros para la salud. Consecuentemente, el agua se usa como medio de temple cuando es práctico, esto es, cuando un drástico temple no resulta en una gran

distorsión o agrietamiento.

Una desventaja es el hecho de que la rápida tasa de enfriamiento continúa a través del rango de bajas temperaturas en el cual la distorsión y agrietamiento fácilmente pueden ocurrir. Por esa razón el temple en agua usualmente está restringido a partes simples hechas de aceros de no muy alta templabilidad (aceros al carbono y aceros de baja aleación). Además, es poco apropiado para altas densidades de carga porque el desarrollo de capas de vapor alrededor de las partes inhiben la transferencia de calor al inicio del temple.

Pueden utilizarse también **soluciones de salmuera**. Estas soluciones ofrecen las siguientes ventajas comparadas con el agua o aceite utilizados como medios del temple:

- La velocidad de enfriamiento es más rápida que la del agua
- La distorsión es menos severa que la producida en el temple en agua
- La posibilidad de que se generen puntos suaves por efecto de la capa de vapor es menor que el temple

en agua

- Al utilizar agua o aceite como medio de temple siempre es necesario promover agitación al medio, al usar salmuera esto no siempre se hace necesario, pero puede requerirse para aceros con muy baja templabilidad

Generalmente las desventajas de las soluciones de salmuera como medio de temple no evitarán su uso, porque estas son utilizadas solo cuando aceite o agua no proporcionan los resultados deseados. Algunas de estas desventajas son:

- La naturaleza corrosiva de las sales hace que se requiera una protección contra la corrosión para asegurar una razonable vida de servicio del equipo
- Las soluciones de salmuera emanan gases corrosivos que pueden causar daño a maquinaria y equipo delicado que se halle próximo, por lo que se hace necesario un sistema para evacuar estos gases.

Las soluciones cáusticas son soluciones acuosas que contienen de 5 a 10% de hidróxido de sodio (NaOH), las características de dichas soluciones como medio de temple son semejantes a las de las soluciones de

salmuera, con la ventaja de que no son corrosivas a los aceros al carbono y aceros aleados. Una desventaja es que si no se manejan con cuidado pueden causar quemaduras.

La necesidad de contar con un agente de temple que proporcione mayor velocidad de enfriamiento que los aceites pero menor que el agua o salmuera ha promovido el desarrollo de cierta cantidad de polímeros que pueden ser utilizados en soluciones de temple.

Las soluciones de polímeros poseen ciertas ventajas sobre el agua incluyendo una corta etapa de capa de vapor y menos sensibilidad a la temperatura, y además, son menos corrosivas que las soluciones de salmuera.

Si se comparan con los aceites de temple las soluciones de polímeros usualmente tienen mayor poder de enfriamiento, son más económicas, y minimizan el riesgo de que ocurran incendios.

Los aceites de temple son de dos tipos: convencional y de tipo rápido. Los aceites convencionales no tienen aditivos que alteren sus características de enfriamiento, a diferencia de los aceites de tipo

rápido que poseen baja viscosidad y contienen aditivos especiales que afectan sus características otorgándoles mayor poder de enfriamiento.

El medio ideal de temple debe poseer una alta velocidad de enfriamiento a través de la etapa de capa de vapor y de transporte de vapor, y una baja velocidad a través de la etapa de enfriamiento por líquido que está en el rango de baja temperatura, pues justamente en este rango tiene lugar la transformación martensítica y la distorsión.

Con el uso de aceites de temple convencionales la duración de la etapa de capa de vapor es más larga de la que es con agua y la velocidad de enfriamiento en la etapa de transporte de vapor es considerablemente lenta, por ello el poder de enfriamiento de dichos aceites es menor que el del agua. Esto normalmente es inadecuado, sin embargo, la transición entre el transporte de vapor y enfriamiento por líquido es más gradual y por eso causan menos problemas de distorsión.

Aceites de tipo rápido presentan una alta velocidad inicial de enfriamiento, cercana a la del agua sin sacrificar las ventajas que poseen los aceites convencionales.

Con estos aceites la duración de la etapa de capa de vapor es considerablemente menor que con los aceites convencionales, el enfriamiento en la etapa de transporte de vapor empieza más pronto y la velocidad en la etapa de enfriamiento por líquido es la misma que con los aceites convencionales.

El temple en aceite es muy utilizado, este es el más conveniente para la mayoría de aceros de cementación especialmente en secciones delgadas. Secciones gruesas requerirán un medio de temple más severo aunque en esas circunstancias son más susceptibles de sufrir agrietamiento, por eso, medios de temple muy drásticos deben evitarse en lo posible.

Las sales de temple gozan de gran popularidad para templar aceros incluyendo partes cementadas.

Los baños de sales de temple están compuestos de nitratos o nitritos, de álcalis, (como son nitrato de sodio, nitrito de sodio, y nitrato de potasio). Estos baños operan en un rango de temperaturas de 150 a 550°C y son mayormente utilizados para el temple de aceros al carbono y aceros de baja aleación. Debe ejercerse cuidado para prevenir la contaminación del baño con aceites, otras sales, hollín, etc., de otra manera el baño perderá eficiencia. Particular

ciudadado debe observarse para prevenir la mezcla de nitritos con cianuros por que estos compuestos reaccionan violentamente en caliente, resultando en serias explosiones. Por esa razón las partes nunca deben ser transferidas directamente desde un baño de cementación conteniendo más del 5% de cianuro a un baño de temple nitrato-nitrito.

Para prevenir que ocurran dichas reacciones, debe realizarse una inmersión total de las partes en un baño de sales neutras (45 a 55% NaCl, 45 a 55% KCl) a la temperatura deseada antes de proceder al temple.

Los baños de sales son muy utilizados en tratamientos especiales como austempering y martempering (5).

Muchas veces las propiedades deseadas pueden conseguirse sin utilizar un medio líquido. Por ejemplo, enfriamiento en aire puede utilizarse si la composición química del acero proporciona una templabilidad adecuada.

El enfriamiento en el horno es el más apropiado cuando las partes van a ser recalentadas para ser posteriormente templadas. No obstante, se debe utilizar una atmósfera protectora para prevenir la oxidación y descarbonización.

RECALENTAMIENTO Y TEMPLE DIRECTO

Aunque es posible templar directamente las partes desde el baño de sales existen razones para recalentarlas y luego templarlas.

Algunas partes requieren zonas libres de cementación por lo que deben ser primero cementadas, enfriadas, y maquinadas para remover ciertas áreas cementadas.

Siempre que se desee producir microestructuras con carburos de forma y distribución controladas se hace necesario el recalentamiento, y siempre debe utilizarse después de una cementación a alta temperatura, a menos que el crecimiento de grano en el material no sea significativo.

El recalentamiento es frecuentemente utilizado para refinamiento de grano. Sin embargo, por su uso también puede conseguirse una microestructura con más baja cantidad de austenita retenida, a pesar de que siempre induce mayor peligro de distorsión.

Muchas partes por el contrario son templadas directamente del baño de sales. La temperatura generalmente debe reducirse a la temperatura normal de austenización aunque el temple desde la

temperatura de cementación muchas veces puede resultar aceptable.

El temple directo ha ganado gran aceptación principalmente por su economía y simplicidad de procedimiento, pues se reduce la cantidad de energía usada para el calentamiento y elimina el uso de equipo y operaciones que encarecen el tratamiento térmico.

El uso de aceros de grano fino, los cuales poseen una relativamente uniforme respuesta al tratamiento térmico y el desarrollo de equipo y técnicas para un mejor control de la capa cementada hacen que el temple directo sea una buena alternativa para el endurecimiento de una gran variedad de partes.

Los ciclos de calentamiento y enfriamiento inducen cambios de fase. Cada cambio de fase produce un cambio en el volumen y esfuerzos internos que causan cambios dimensionales. En el temple directo se realiza solamente un ciclo de calentamiento y enfriamiento y así la distorsión se minimiza.

REVENIDO

Algunas partes cementadas y templadas son puestas en

servicio sin revenir. Sin embargo, muchas partes son revenidas en el rango de 150 a 190°C: Esta operación no reduce grandemente la dureza y puede incrementar la tenacidad y disminuir la susceptibilidad al fisuramiento en el rectificado ulterior.

Existe mucha controversia con respecto al valor del revenido en el rango de 150 a 190°C. En muchas partes como piñones y engranajes para aplicaciones críticas, la experiencia ha probado que el revenido es beneficioso. Sin embargo, en muchas aplicaciones menos críticas ha sido muy difícil evaluar la necesidad de revenir las partes.

Aunque muchas veces se hacen excepciones para satisfacer requerimientos especiales, las partes cementadas raramente son revenidas a temperaturas mayores a 190°C porque la necesidad de una combinación de una extremada dureza superficial y un núcleo dúctil es la razón usual de la cementación.

TRATAMIENTO SUB-CERO

La presencia de austenita retenida es motivo de inestabilidad dimensional y esfuerzos residuales que pueden causar problemas en las partes cementadas en servicio. La presencia de austenita retenida se

acentúa en las capas cementadas con alto contenido de carbono y elementos aleantes, y en partes que han sido templadas desde alta temperatura directamente del baño de cementación.

Alto contenido de carbono y elementos aleantes hace que disminuya la temperatura a la cual empieza (M_s) y finaliza (M_f) la transformación martensítica. En esas circunstancias, la temperatura M_f puede llegar a ser menor que la temperatura ambiente lo que favorece la retención de una gran cantidad de austenita.

Una forma de reducir la cantidad de austenita retenida es por medio de un tratamiento a temperaturas bajo 0°C . Este tratamiento es básicamente una continuación del temple durante el cual la austenita retenida es transformada en martensita. El porcentaje de transformación se relaciona con la temperatura; así, bajas temperaturas producen altos niveles de transformación. Múltiples tratamientos producen muy pequeñas mejoras, pues casi toda la transformación tiene lugar durante el primer tratamiento.

La cantidad específica de transformación producida en el tratamiento sub-cero es extremadamente difícil de predecir. El grado de oposición a la transformación a

una temperatura dada es influenciado por:

- La cantidad de austenita retenida al inicio del tratamiento sub-cero
- El tiempo transcurrido entre temple y tratamiento sub-cero
- Efecto de tratamientos térmicos intermedios como es el revenido
- El nivel general de esfuerzos de compresión residuales en el material
- Grado de trabajado en frío

Revenir las partes en el rango de 150 a 175°C es una práctica común antes del tratamiento sub-cero porque el revenido estabiliza la austenita retenida y disminuye la tendencia a que se produzcan microfisuras.

Un largo período a temperatura ambiente probablemente tenga un más fuerte efecto estabilizador que el revenido inmediatamente después del temple.

Esto es importante porque altos niveles de esfuerzos

residuales de compresión tienden a retardar la transformación en el tratamiento sub-cero hasta que se alcancen bajas temperaturas.

El rango de temperaturas generalmente utilizado está entre -75 a -100°C . Estas temperaturas se consiguen generalmente por mezcla de hielo seco con kerosene, tricloroetileno, o alcohol. Nitrógeno líquido se puede utilizar para alcanzar temperaturas por debajo de -195°C .

3.4 HORNOS Y EQUIPO ADICIONAL

HORNOS

El proceso de cementación líquida puede realizarse en varios tipos de hornos para sales, los cuales pueden calentarse internamente o de manera externa. En los hornos calentados externamente el calor se introduce por un espacio anular entre el crisól y el aislante el cual es hecho normalmente con ladrillo refractario.

En los hornos calentados internamente el calor es introducido directamente a las sales. Ambos tipos de hornos poseen tapas aislantes que pueden deslizarse a un lado. Esto permite manipular las partes y sujetadores, usualmente con ayuda de una grúa o

equipo similar.

HORNOS EXTERNAMENTE CALENTADOS

Los hornos que utilizan combustibles gaseosos y líquidos son de diseño similar. Este tipo de hornos tienen un costo inicial más bajo que los hornos calentados por electrodos o resistencias y son simples de instalar y operar. Para contener las sales se utilizan crisoles de acero o aleaciones los cuales pueden ser redondos o rectangulares. El calentamiento es aplicado por dos o más quemadores tangencialmente localizados entre la pared exterior del crisol y la superficie interior del aislante. Los gases calientes son conducidos a través de un escape a una chimenea de 1 a 2 metros de alto para mantener una presión negativa en la cámara de combustión.

La cámara de combustión está construida con ladrillo refractario y con un aislante adicional si se requiere. Una cubierta de acero rodea completamente todos los lados del horno proveyendo seguridad en caso de que el crisol falle.

Los hornos con resistencias eléctricas son menos utilizados que los hornos calentados por combustibles

gaseosos o líquidos. Una serie de resistencias eléctricas alrededor del crisol, provee el calentamiento, por lo que una falla del crisol puede resultar en la destrucción total de las resistencias. Para prevenir que esto ocurra se prefiere no utilizar temperaturas sobre 900°C en este tipo de hornos.

El tamaño de los crisoles está limitado por la resistencia mecánica del material a la temperatura de operación. Crisoles redondos se construyen normalmente en diámetros de 25 a 90 cm y de 20 a 75 cm de profundidad con un espesor de 10 mm. Tamaños mas grandes también se construyen para aplicaciones especiales. Los crisoles pueden ser conformados de una sola pieza de acero de bajo carbono o de aleaciones hierro-níquel-cromo. Una composición de Fe-35Ni-15Cr generalmente es la más utilizada. Crisoles soldados mas económicos pueden fabricarse con los mismos materiales. La vida del crisol varía con la temperatura de operación como se muestra (1).

TEMP (°C)	DURACION (meses)
845	9 a 12
870	6 a 9
900	3 a 6
925	1 a 3

TABLA IV Duración de los crisoles

El uso de una termocupla adicional en la cámara de combustión para prevenir que la temperatura de la cámara sobrepase de 1095°C puede extender la vida del crisol (Fe-Ni-Cr) hasta cerca de 2 años.

Por la facilidad con la cual pueden entrar en funcionamiento los hornos externamente calentados se adaptan bien a la operaciones intermitentes. Otra ventaja de los hornos de este tipo es que una sola unidad puede ser usada para una variedad de aplicaciones simplemente cambiando el crisol por uno que contenga las sales apropiadas.

No obstante, los hornos externamente calentados tienen ciertas características que limitan su uso en ciertas operaciones de cementación.

No existe una muy buena uniformidad de la temperatura porque hay disipación de calor por convección, creando gradientes de temperatura en el baño.

El sobrecalentamiento que se produce en el fondo del crisol en el recalentamiento crea una expansión de las sales que puede causar una explosión.

Finalmente, son pocos prácticos para altos volúmenes de producción.

HORNOS INTERNAMENTE CALENTADOS

En los hornos con electrodos parcialmente sumergidos las sales fundidas están contenidas en un crisol de acero o cerámica rodeado por un buen aislante.

Los electrodos conducen una corriente a través de las sales, y como resultado de la resistencia que se crea, se genera calor en las mismas sales. Están unidos a un transformador que convierte el voltaje de línea a un bajo voltaje (5 a 15 V.AC) entre los electrodos.

La profundidad de los crisoles utilizados es usualmente limitada a 2 m, sin embargo diseños especiales han creado crisoles de hasta 4.5 m de profundidad. En contraste, pequeñas unidades poseen crisoles con un espacio de trabajo de 1 pie³.

Los electrodos pueden ser construidos de aceros aleados y su operación debe enmarcarse en una densidad de corriente no mayor a 12 A/cm². Su posición dentro del crisol es muy importante para mantener un buen control de temperatura del baño de sales.

Este tipo de hornos es mayormente utilizado en grandes producciones, pues el tamaño máximo del

crisol no tiene restricciones, y múltiples pares de electrodos pueden ser instalados para satisfacer la capacidad necesaria de calentamiento. Además, algunos lotes pueden ser cementados simultáneamente y removidos del horno después de diferentes períodos de tiempo para producir una variedad de capas cementadas. Debido a que las sales se funden desde arriba hacia abajo este tipo de hornos no presentan peligros de explosión.

Por las características antes señaladas no son muy adecuados para operaciones intermitentes. En dependencia del tamaño del horno el calentamiento de las sales puede requerir un día o más. Así mismo, los crisoles no pueden ser intercambiados con objeto de realizar otros procesos con sales diferentes, si un diferente tipo de sales va a ser utilizado es más fácil vaciar el crisol que reemplazarlo con otro.

Otro tipo de hornos calentados internamente es el de electrodos totalmente sumergidos en el baño de sales.

Los crisoles para estos hornos se construyen de ladrillo refractario de alúmina y el aislamiento exterior está hecho de ladrillo refractario común.

Cuando las sales se funden en el crisol penetran en

el refractario hasta que éstas llegan a solidificarse y pueden ser retenidas en el horno, por lo que una falla del crisol es prácticamente imposible.

Estos hornos pueden entrar en funcionamiento adicionando sales fundidas en otros hornos o fundiendo las sales que se encuentran cercanas a los electrodos para que la corriente pueda fluir.

Si el horno debe ser apagado, las sales fundidas deben ser desalojadas del crisol antes de que solidifiquen, o si las sales deben permanecer en el crisol, un calentador eléctrico cerca a los electrodos debe ser sumergido en las sales mientras estén fundidas. El calentador eléctrico debe ser conectado cuando se requiera que el horno entre en operación nuevamente (5).

Las sales conteniendo elevados porcentajes de carbonato de sodio o cianuro de sodio tienen altos efectos erosivos en los crisoles cerámicos por lo que bajos niveles de estos compuestos son recomendados para este tipo de hornos.

Una norma general es no sobrepasar de 12% de cianuro de sodio en el baño para mantener una vida de servicio del crisol de 1 a 1½ años.

ELEMENTOS DE SUJECION Y ACCESORIOS

Los elementos de sujeción de las partes a cementarse y además accesorios deben ser contruidos de aleaciones resistentes al calor. De los cinco tipos de aleaciones resistentes al calor, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, Fe-Ni-Cr, base níquel, base cobalto, en la gran mayoría de hornos para tratamientos térmicos se usan solamente las del segundo y tercer tipos. Las aleaciones Fe-Cr no tienen la suficiente resistencia a alta temperatura y las aleaciones de base níquel y cobalto son generalmente muy caras y son utilizadas únicamente en aplicaciones especiales.

Las propiedades mecánicas a temperatura ambiente tienen un limitado valor en la selección de materiales para ser utilizados a alta temperatura pero pueden servir para verificar la calidad de las aleaciones.

3.5 SEGURIDAD

Los cianuros son compuestos químicos altamente peligrosos, por esa razón nunca está por demás tomar todas las precauciones necesarias para manipularlos y trabajar con ellos de manera que exista un proceso eficiente:

- Los cianuros pueden causar violentas reacciones de envenenamiento si llegan a estar 'en contacto con rasguños o heridas (en las manos por ejemplo), y si se ingieren puede resultar fatal
- también se pueden producir gases venenosos cuando los cianuros entran en contacto con ácidos
- Se debe evitar el contacto de los cianuros con cualquier otro tipo de compuestos para evitar que se produzcan reacciones químicas imprevistas
- Los cianuros deben guardarse en recipientes con tapa, etiquetados y bien cerrados que los preserven de la humedad, pues fácilmente podrían formar ácidos altamente corrosivos
- Tanto para manipular las sales como para trabajar con ellas deben llevarse siempre delantales y guantes protectores, y se debe proteger la cara con una máscara
- Las partes que van a ser cementadas deben estar limpias y completamente secas, de otra manera se pueden producir salpicaduras
- Debe tenerse presente que en los baños externamente

calentados existe peligro de explosión cuando las sales van a ser recalentadas. Para evitar esto una barra de acero debe ser introducida en el centro del baño antes de que solidifique. Un extremo de la barra debe estar en contacto con el fondo del crisol y el otro extremo debe extenderse por lo menos 10 cm por encima de la superficie del baño. Antes de que el baño sea nuevamente fundido la barra debe ser golpeada con un martillo, aflojada, y removida. El espacio previamente ocupado por la barra proveerá un escape para la expansión de los gases durante la fusión de las sales

DESECHOS DE CIANURO

Desechos de cianuro sea que estén disueltos en el agua usada para el temple o en forma de sales sólidas de los crisoles constituyen un serio problema. El cianuro contenido en estos desechos puede ser alterado químicamente para conseguir un material inerte antes de ser arrojado.

El más simple tratamiento químico consiste en oxidar el cianuro en una solución alcalina, para lo cual se añade un gas clorado e hidróxido de sodio, o su equivalente en forma de hipoclorito (hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio).

Los desechos de cianuro sólido deben ser disueltos en agua antes de ser tratados. Cuando los desechos de cianuro son tratados con gases clorados el contenido de cianuro debe ser primeramente determinado. De acuerdo a la experiencia práctica debe añadirse 2 Kg de gas clorado y 1.6 Kg de hidróxido de sodio por cada Kg de cianuro.

Si se utiliza hipoclorito de sodio, éste debe añadirse hasta que el pH esté sobre 8.5 (1).

CAPITULO IV

EXPERIMENTACION

4.1. OBJETIVOS Y PLANEAMIENTO DE LA EXPERIMENTACION

Nuestro objetivo es realizar una evaluación general del proceso de cementación líquida. Determinar la manera en que factores como la temperatura, el tiempo, el porcentaje de cianuro de sodio del baño, inciden en la penetración de carbono y dureza alcanzada por el acero. Además, hacer un registro del comportamiento de las sales de cementación y aprender su manejo.

Para cumplir con estos objetivos se ha trazado un plan de trabajo que incluye procesos de cementación en un acero AISI 1022 a diferentes temperaturas y tiempos y también con diferentes niveles de concentración de cianuro.

Utilizando como base las proporciones anotadas en la tabla I se ha conformado una composición como se anota.

CONSTITUYENTE %	RANGO	COMPOSICION
CIANURO DE SODIO	10-23	14
CLORURO DE BARIO		
SALES ALCALINAS (a)	0-10	
CLORURO DE POTASIO	0-25	18
CLORURO DE SODIO	20-40	40
CARBONATO DE SODIO	30 max	28
ACELERADORES (b)	0-5	
CIANATO DE SODIO	1.0max	
DENSIDAD DE LA SAL	1.76 Kg/dm ³	
FUNDIDA	a 900°C	
(a) Cloruro de calcio ó estroncio		
(b) Dióxido de manganeso, óxido bórico, fluoruro de sodio, pirofosfato de sodio		

TABLA V Rangos de composición de los baños de baja temperatura y composición del baño seleccionada

Esta composición inicial será ajustada en la operación del baño para tener otros dos niveles de cianuro de sodio como 12 y 10%.

Se han seleccionado tres temperaturas de trabajo: 875, 900, y 925°C, temperaturas muy utilizadas en este tipo de procesos.

Los diferentes procesos tendrán una duración de 1, 2, 3, y 4 horas con lo que se aspira conseguir varios espesores de capa cementada.

Con objeto de poder realizar una evaluación de la profundidad de cementación, un control de

microdureza deberá ser realizado a través de la capa cementada de muestras templadas en agua.

Adicionalmente un control metalográfico debe realizarse en probetas enfriadas al aire.

El contenido de cianuro de sodio del baño deberá ser determinado antes y después de cada operación para determinar su tasa de reposición.

4.2 EQUIPO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Para realizar el proceso de cementación se utilizó un horno de sales Lindberg 46-HC-814-16 de 5 Kw externamente calentado por resistencias eléctricas con un crisol soldado de inconel (73% Ni, 15% Cr), con una capacidad de unos 15 litros. El control de la temperatura se realiza utilizando un controlador on-off y una termocupla tipo K.

Además, se utilizó equipo corriente de un laboratorio metalográfico y un microdurómetro Riehle-kentron Ak8.

4.3 DESCRIPCION DE LA TECNICA EXPERIMENTAL

La técnica experimental utilizada puede resumirse en los siguientes pasos:

SELECCION Y PREPARACION DE ESPECIMENES

Las muestras de acero fueron seleccionadas de una barra laminada, de 1 pulg de diámetro de un acero AISI 1022. Su composición química es la siguiente:

C	Mn	P	S
0.17-0 23	0.70-1.00	0.040 max	0.050 max

Las muestras fueron cortadas transversalmente a un espesor de 5 mm. Luego fueron aseguradas con alambre para que puedan ser introducidas y sacadas con facilidad del baño de sales.

Se lavaron las muestras con detergente y luego fueron secadas.

CEMENTACION

Para realizar la cementación, en el crisol del horno se introdujeron 7 Kg de la mezcla de sales. Las proporciones de la mezcla inicialmente fueron las antes anotadas en la tabla V. Posteriormente el contenido de cianuro de sodio debe ajustarse a 12, y

10% respectivamente.

El proceso de fusión de las sales tardó aproximadamente 90 minutos. Y la temperatura de operación fue alcanzada luego de 3 horas.

Se realizó un análisis del contenido de cianuro de sodio previo a la introducción de las muestras como verificación. Un análisis similar también se realizó antes y después de cada operación.

Una gruesa capa de grafito fue añadida al baño para aislarlo del exterior y disminuir las pérdidas de cianuro.

Luego se introdujeron ocho muestras en el baño de sales. Esta es una operación que debe realizarse con sumo cuidado porque la humedad existente en el aire se impregna en las partes que van a ser cementadas y pueden producirse salpicaduras de las sales. Para evitar esto las muestras fueron primeramente precalentadas. En esta fase, las probetas han entrado en la etapa de cementación.

ENFRIAMIENTO DE PROBETAS

Luego de cumplido su ciclo de cementación, es decir,

1, 2, 3, y 4 horas, las muestras fueron sacadas del baño para ser enfriadas directamente desde la temperatura del baño. Para cada tiempo especificado fueron sacadas un par de probetas. Una fue enfriada en agua a 26°C. La otra muestra fue enfriada al aire.

REMOCIÓN DE SALES

Las muestras fueron lavadas muy bien luego de la cementación para eliminar residuos de sales que en contacto con la humedad resultan sumamente corrosivas. También fue necesario etiquetar las muestras indicando temperatura del proceso, concentración de cianuro de sodio, tiempo de cementación, y medio de enfriamiento.

OPERACIONES DE MONTAJE Y PULIDO

A todas las muestras cementadas se les practicó un corte transversal con objeto de poder observar la profundidad de cementación. Es importante que durante el corte de las muestras no haya calentamiento que pueda alterar su microestructura.

Se montaron las probetas en resina utilizando una resina dura (Struers #4) con buenas características

de retención de borde y se realizaron operaciones de pulido. Luego las probetas fueron atacadas químicamente con nital al 5%.

OBSERVACION MICROSCOPICA Y MEDICIONES DE DUREZA

Las probetas tanto enfriadas en agua como en aire fueron observadas microscópicamente. En las probetas enfriadas al agua se realizaron mediciones de microdureza utilizando un indentador Knoop en localizaciones pre-establecidas empezando a (0.001 pulg) 0.025 mm y a intervalos de (0.005 pulg) 0.127 mm como se sugiere.

ELABORACION DE RESULTADOS

Los valores de las mediciones de dureza obtenidas, los ensayos y controles de las sales y los parámetros utilizados (temperatura, tiempo, % CNNA), han permitido elaborar tablas y gráficos ilustrativos con objeto de poder hacer un análisis del proceso.

4.4 RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas de datos y gráficos obtenidos como resultados de la experimentación.

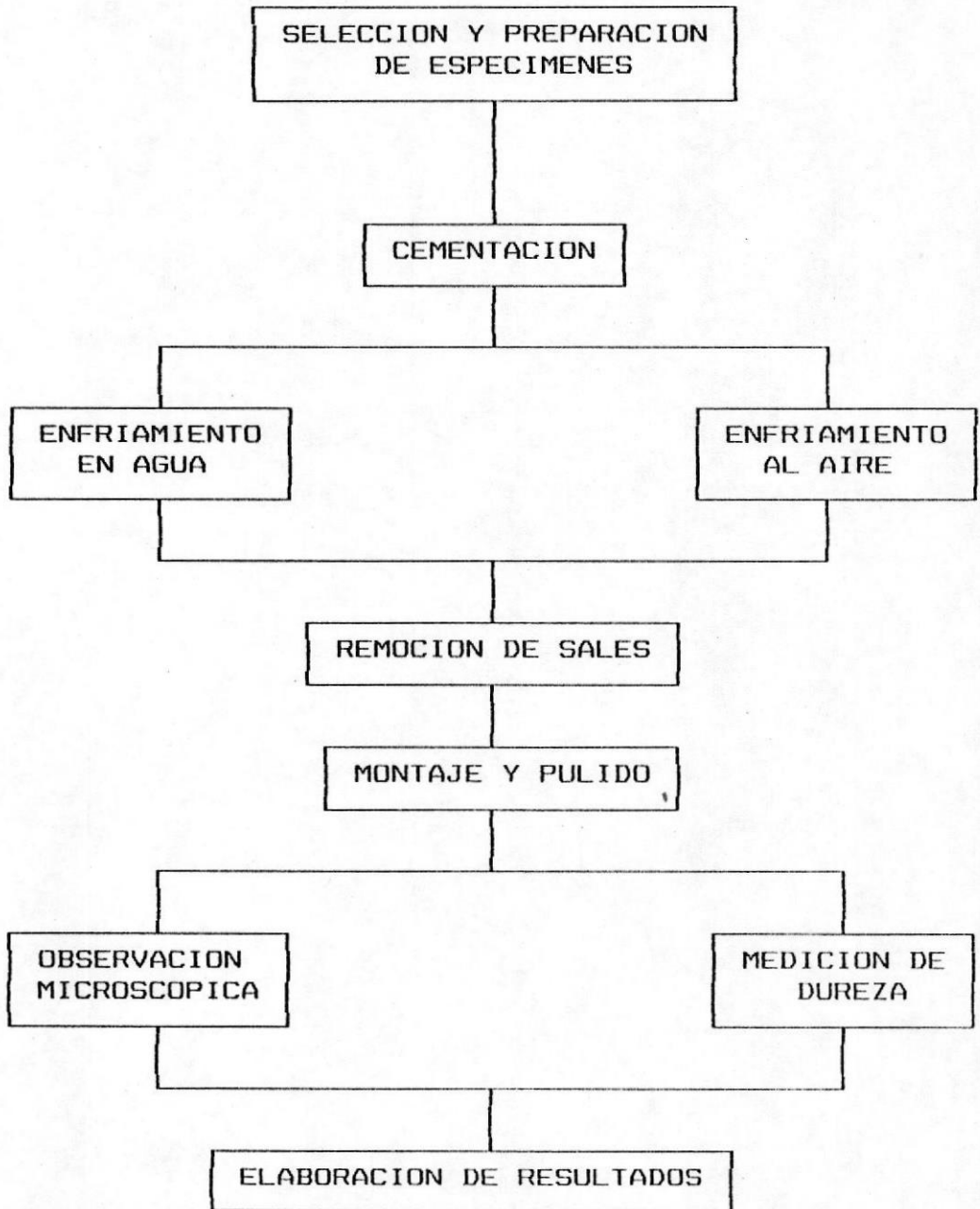


Figura 4.1 Diagrama de flujo del Proceso

DIST (mm)	TEMPERATURA: 875°C 10% CNNa							
	1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025	748	61	756	61	754	61	760	61
0.152	686	58	710	59	730	60	732	60
0.279	575	52	648	56	671	57	690	58
0.406	460	45	578	52	612	54	655	56
0.533	360	36	480	46	558	51	596	53
0.660	358	36	368	37	479	46	539	50
0.787			362	36	384	38	463	45
0.914					363	36	373	37
1.041							358	36
1.168								
1.295								

TABLA VI Variación de la dureza con la distancia
10% CNNa 875°C

DIST (mm)	TEMPERATURA: 900°C 10% CNNa							
	1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025	800	63	795	63	810	63	808	63
0.152	732	60	749	61	751	61	775	62
0.279	674	57	713	59	735	60	755	61
0.406	551	51	647	56	696	58	712	59
0.533	401	40	597	53	658	56	667	57
0.660	370	37	484	46	589	53	638	55
0.787	363	36	383	38	523	49	567	52
0.914			354	35	427	42	502	47
1.041					374	37	421	42
1.168					357	36	361	36
1.295							359	36

TABLA VII Variación de la dureza con la distancia
10% CNNa 900°C

		TEMPERATURA: 925°C				10% CNNa			
DIST		1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
(mm)		HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025		830	64	821	64	804	63	827	64
0.152		807	63	799	63	800	63	809	63
0.279		739	60	753	61	773	62	808	63
0.406		657	56	732	60	751	61	756	61
0.533		519	49	670	57	704	59	728	60
0.660		378	38	590	53	668	57	693	58
0.787		364	36	496	47	614	54	654	56
0.914		358	36	393	39	527	49	591	53
1.041				372	37	417	41	539	50
1.168						360	36	417	41
1.295								358	36

TABLA VIII Variación de la dureza con la distancia
10% CNNa 925°C

		TEMPERATURA: 875°C				12% CNNa			
DIST		1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
(mm)		HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025		795	63	805	63	807	63	794	63
0.152		733	60	760	61	757	61	748	61
0.279		638	55	690	58	737	60	725	60
0.406		468	45	615	54	671	57	687	58
0.533		358	36	516	48	589	53	623	55
0.660		358	36	373	37	488	47	579	52
0.787				360	36	515	38	485	46
0.914						364	36	383	38
1.041								363	36
1.168								360	36
1.295									

TABLA IX Variación de la dureza con la distancia
12% CNNa 875°C

DIST (mm)	TEMPERATURA: 900°C							
	1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025	826	64	827	64	830	64	834	64
0.152	778	62	800	63	798	63	806	63
0.279	695	58	756	61	777	62	774	62
0.406	573	52	694	58	730	60	748	61
0.533	402	40	615	54	694	58	708	59
0.660	390	39	514	48	616	54	674	57
0.787	345	34	383	38	547	50	596	53
0.914			372	37	455	44	528	49
1.041					374	37	416	41
1.168					353	35	391	39
1.295							362	36

TABLA X Variación de la dureza con la distancia
12% CNNa 900°C

DIST (mm)	TEMPERATURA: 925°C							
	1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025	797	63	806	63	806	63	810	63
0.152	800	63	836	64	820	64	818	64
0.279	750	61	804	63	800	63	804	63
0.406	673	57	756	61	772	62	804	63
0.533	542	50	694	58	730	60	750	61
0.660	383	38	616	54	693	58	727	60
0.787	342	34	514	48	634	55	694	58
0.914			354	35	560	51	625	55
1.041			336	33	454	44	560	51
1.168					363	36	466	45
1.295							362	36

TABLA XI Variación de la dureza con la distancia
12% CNNa 925°C

		TEMPERATURA: 875°C				14% CNNa			
DIST		1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
(mm)		HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025		824	64	826	64	820	64	824	64
0.152		754	61	778	62	804	63	800	63
0.279		632	55	733	60	752	61	756	61
0.406		478	46	653	56	694	58	730	60
0.533		373	37	545	50	627	55	673	57
0.660		358	36	428	42	523	49	594	53
0.787				368	37	394	39	498	47
0.914						367	37	395	39
1.041								374	37
1.168								354	35
1.295									

TABLA XII Variación de la dureza con la distancia
14% CNNa 875°C

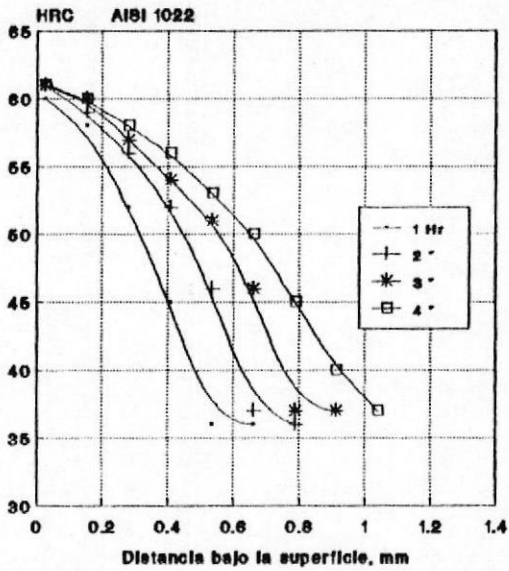
		TEMPERATURA: 900°C				14% CNNa			
DIST		1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
(mm)		HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025		804	63	806	63	805	63	802	63
0.152		800	63	804	63	822	64	820	64
0.279		735	60	772	62	808	63	796	63
0.406		616	54	732	60	758	61	773	62
0.533		405	40	654	56	720	59	726	60
0.660		355	35	528	49	658	56	685	58
0.787				357	36	665	51	617	54
0.914				360	36	417	41	548	50
1.041						368	37	429	42
1.168								373	37
1.295								360	36

TABLA XIII Variación de la dureza con la distancia
14% CNNa 900°C

DIST (mm)	TEMPERATURA: 925°C							
	14% CNNa							
	1 HORA		2 HORAS		3 HORAS		4 HORAS	
	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC	HK	HRC
0.025	782	62	780	62	778	62	780	62
0.152	810	63	793	63	803	63	792	63
0.279	782	62	790	63	824	64	816	64
0.406	718	59	772	62	798	63	802	63
0.533	564	51	712	59	751	61	800	63
0.660	358	36	626	55	728	60	752	61
0.787	346	34	529	49	644	56	707	59
0.914			360	36	568	52	646	56
1.041			354	35	449	44	595	53
1.168					364	36	487	46
1.295							354	35

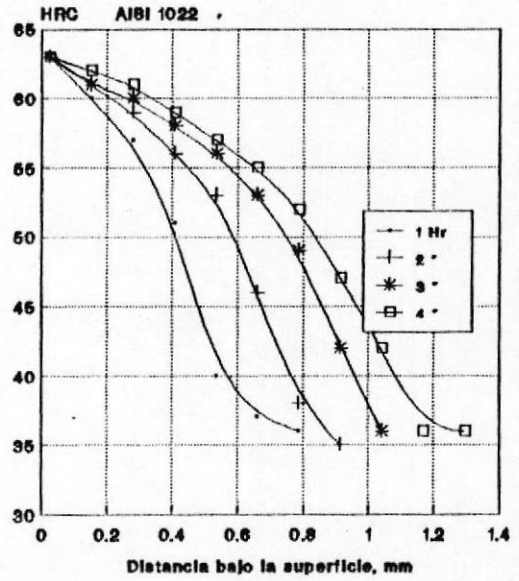
TABLA XIV Variación de la dureza con la distancia
14% CNNa 925°C

875°C 10% CNNa



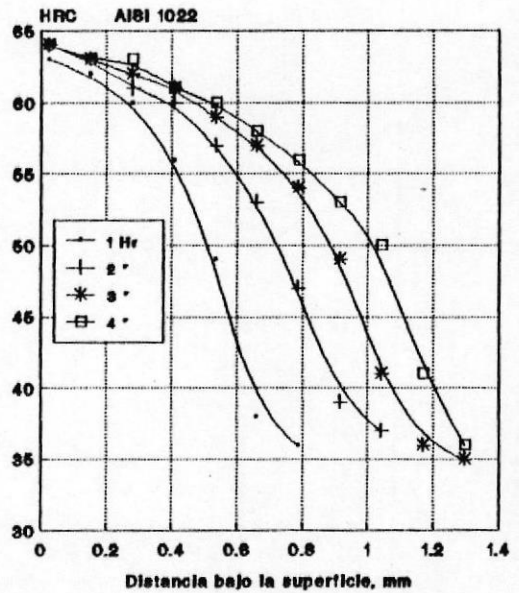
(a)

900°C 10% CNNa



(b)

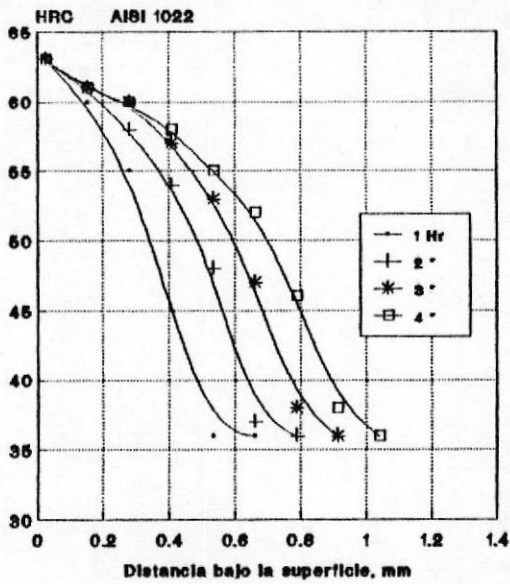
925°C 10% CNNa



(c)

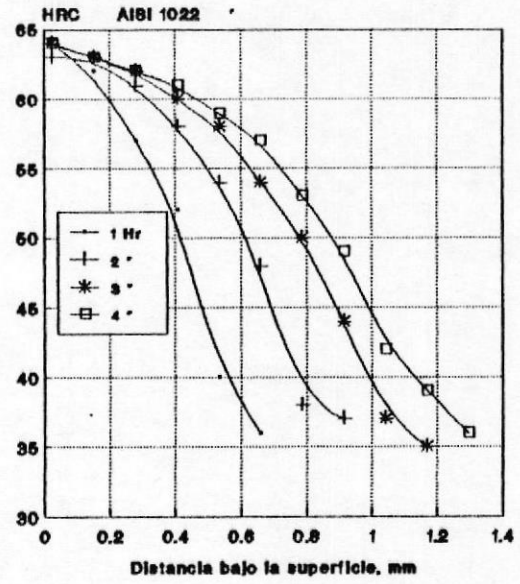
Figura 4.2 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño con 10% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C.

875°C 12% CNNa



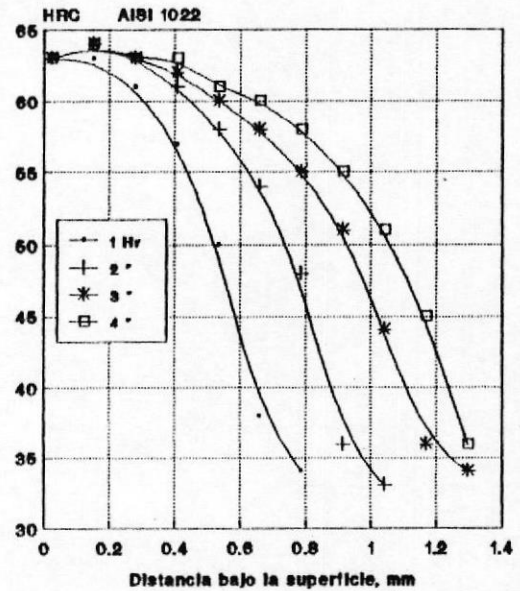
(a)

900°C 12% CNNa



(b)

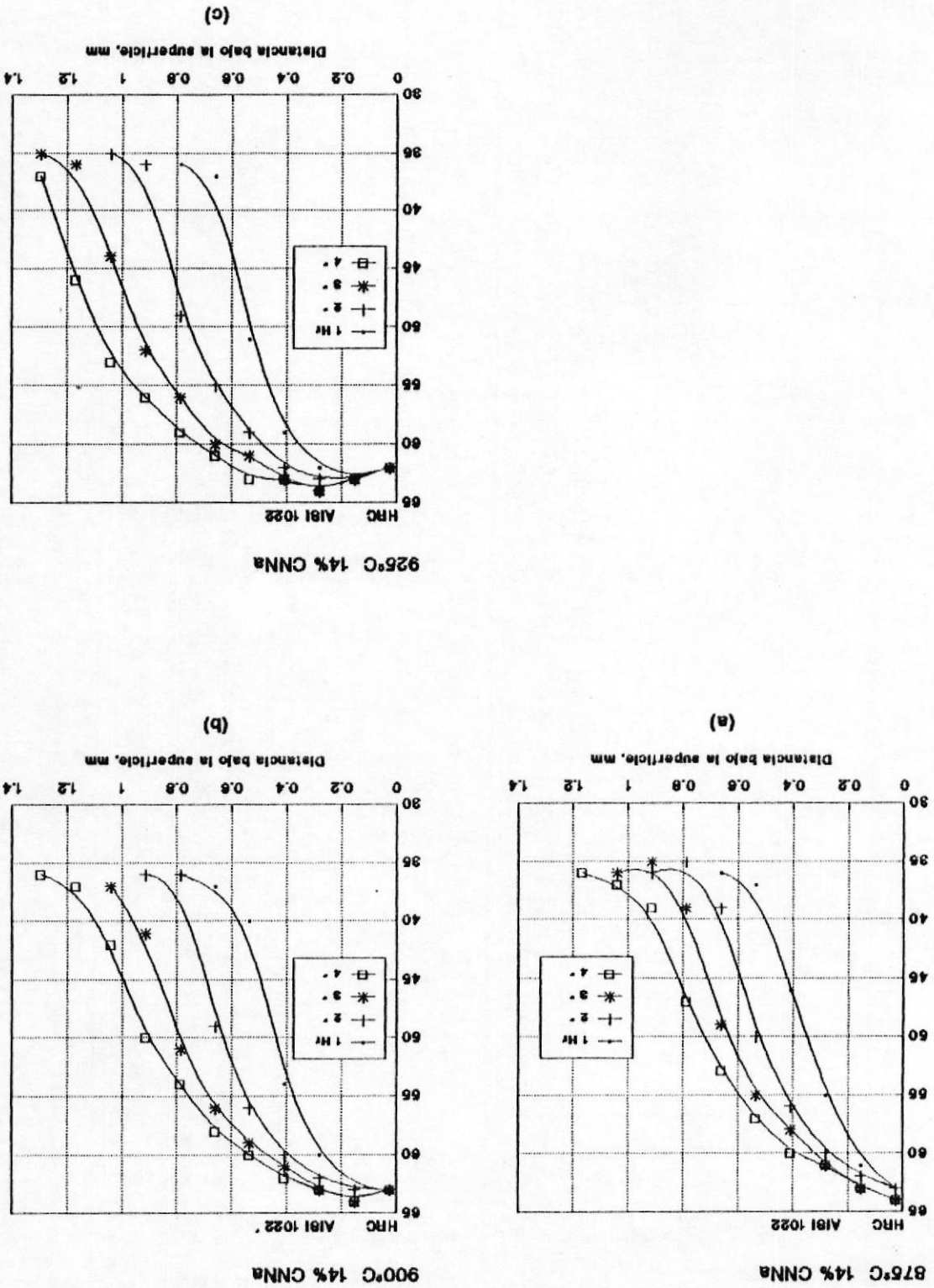
925°C 12% CNNa



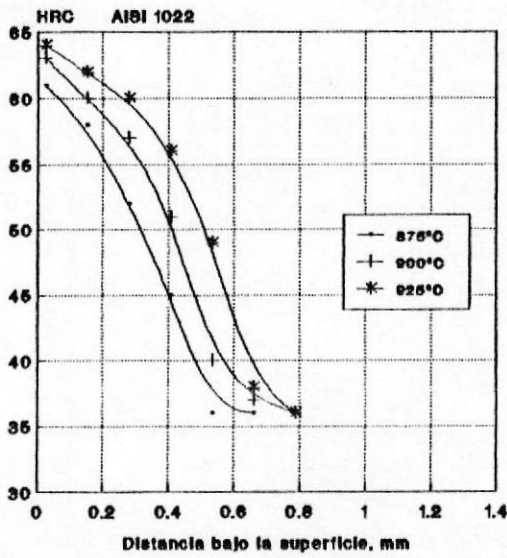
(c)

Figura 4.3 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño con 12% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C.

Figura 4.4 Efecto del tiempo en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado en un baño con 14% CNNa (a) 875°C, (b) 900°C, y (c) 925°C.

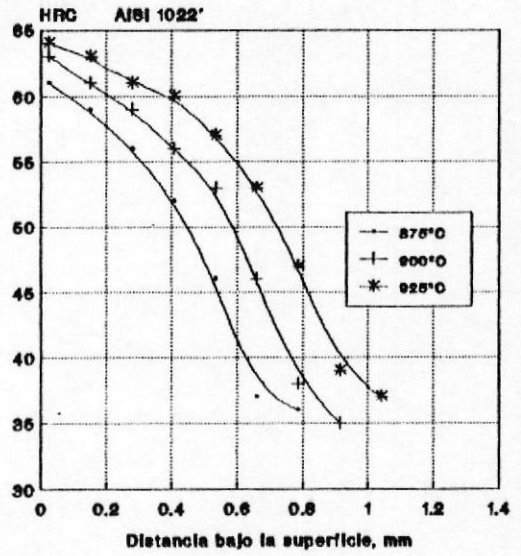


1 Hora 10% CNNa



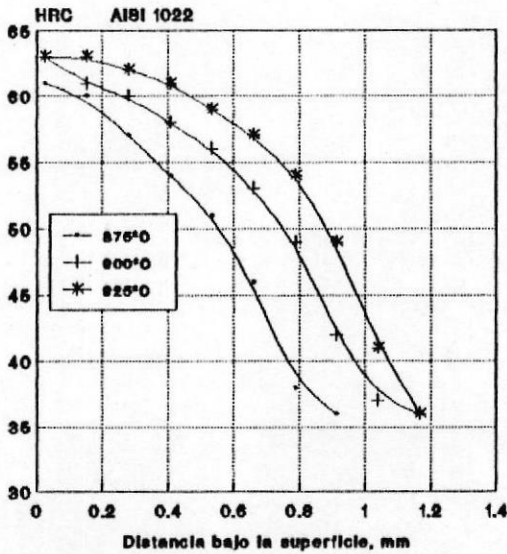
(a)

2 Horas 10% CNNa



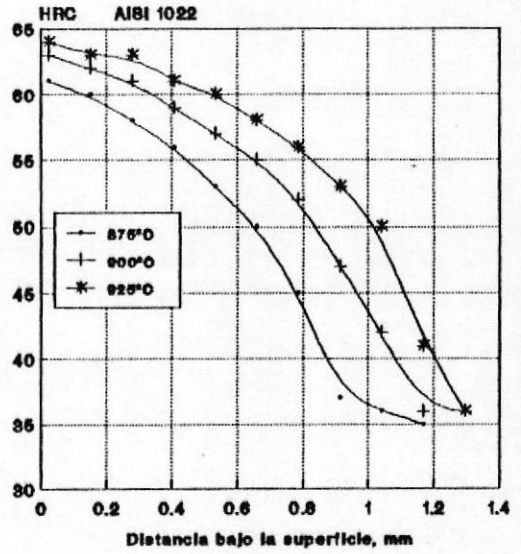
(b)

3 Horas 10% CNNa



(c)

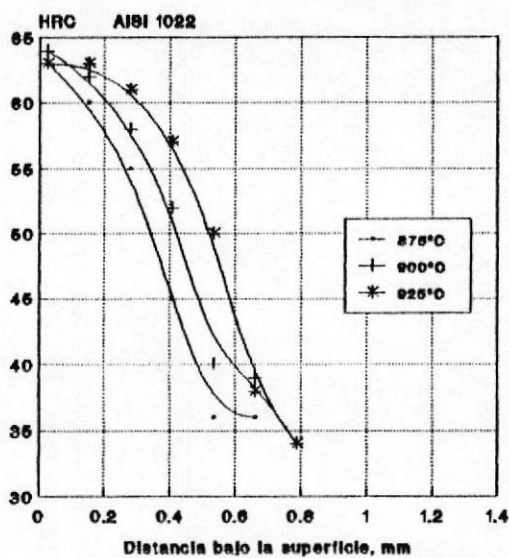
4 Horas 10% CNNa



(d)

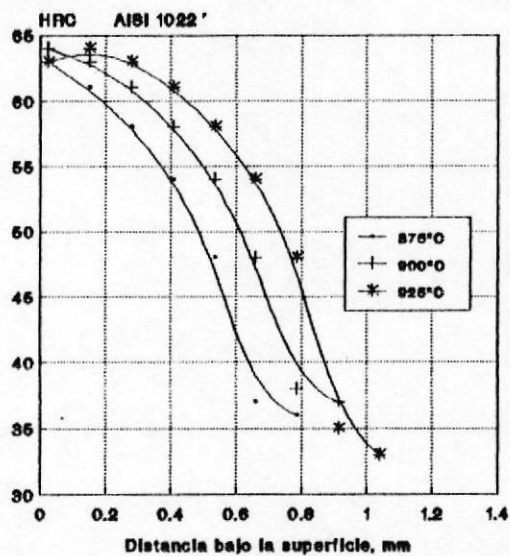
Figura 4.5 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 10% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2 Hr, (c) 3 Hr, (d) 4 Hr.

1 Hora 12% CNNa



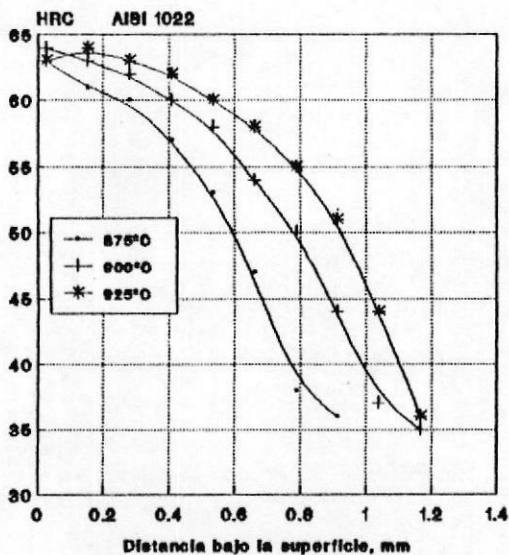
(a)

2 Horas 12% CNNa



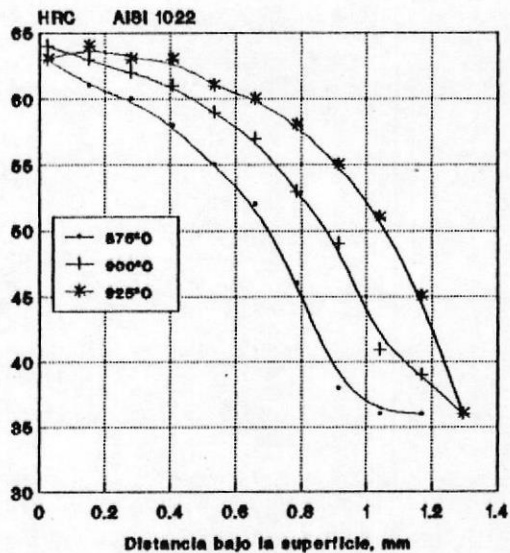
(b)

3 Horas 12% CNNa



(c)

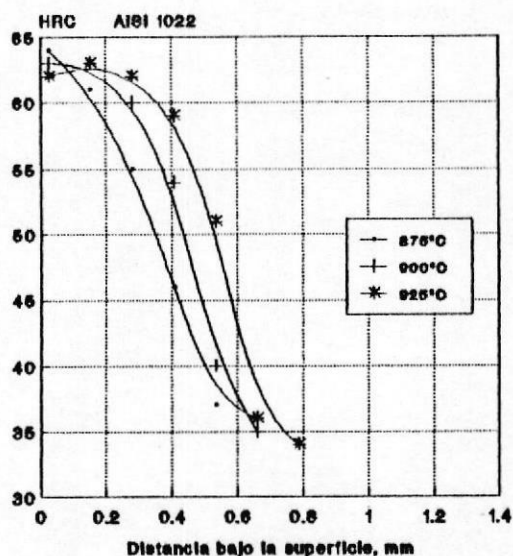
4 Horas 12% CNNa



(d)

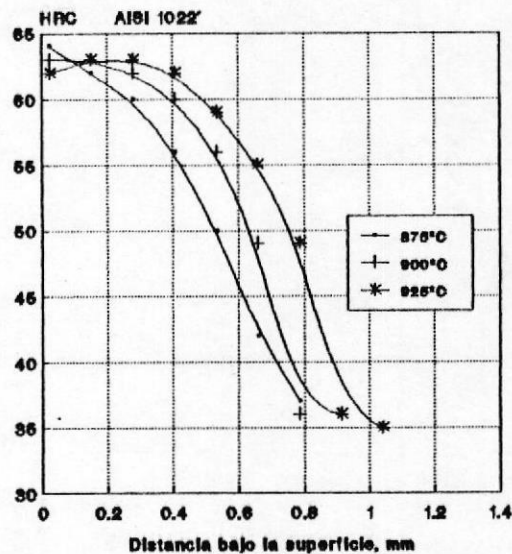
Figura 4.6 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 12% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2 Hr, (c) 3 Hr, (d) 4 Hr.

1 Hora 14% CNNa



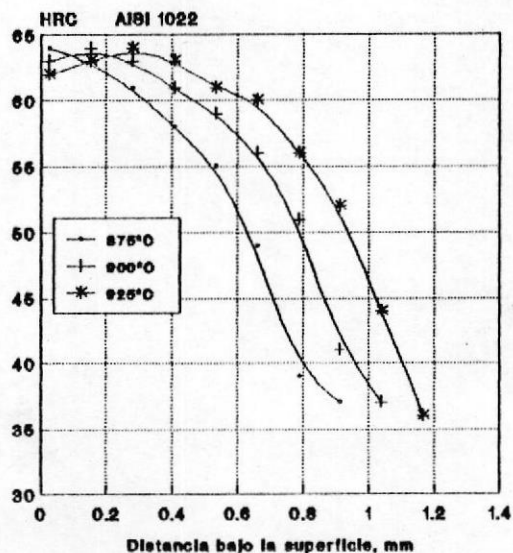
(a)

2 Horas 14% CNNa



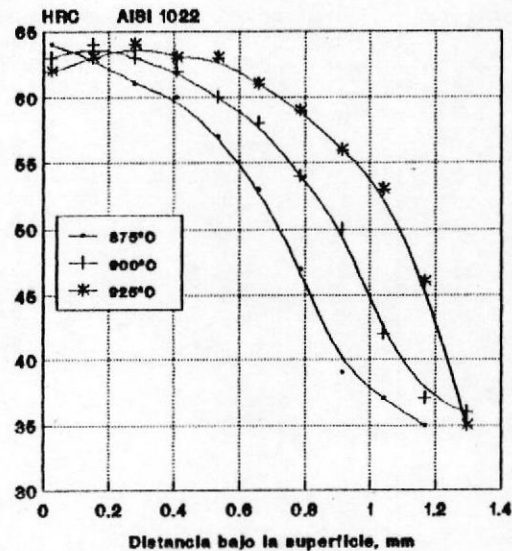
(b)

3 Horas 14% CNNa



(c)

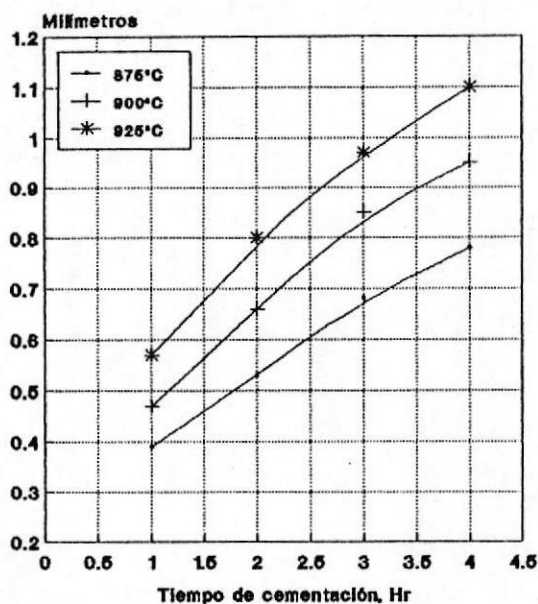
4 Horas 14% CNNa



(d)

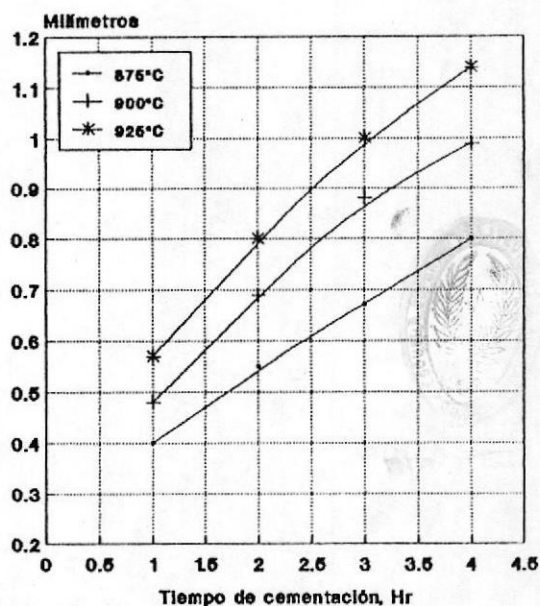
Figura 4.7 Efecto de la temperatura en el gradiente de dureza en un acero AISI 1022 cementado con 14% CNNa (a) 1 Hr, (b) 2 Hr, (c) 3 Hr, (d) 4 Hr.

10% CNNa AISI 1022



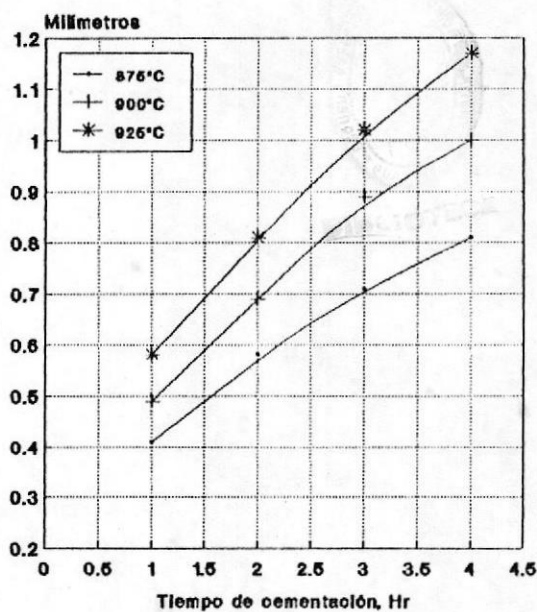
(a)

12% CNNa AISI 1022



(a)

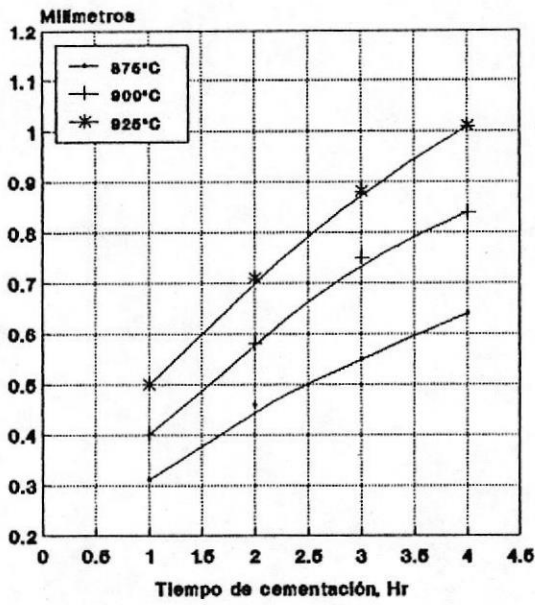
14% CNNa AISI 1022



(a)

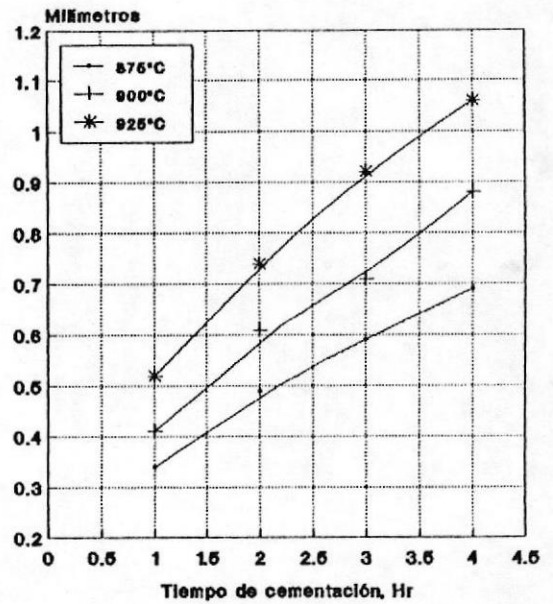
Figura 4.8 Efecto de la temperatura en la profundidad de capa a 45 HRC en un acero AISI 1022 cementado con (a) 10, (b) 12, y (c) 14% CNNa.

10% CNNa AISI 1022



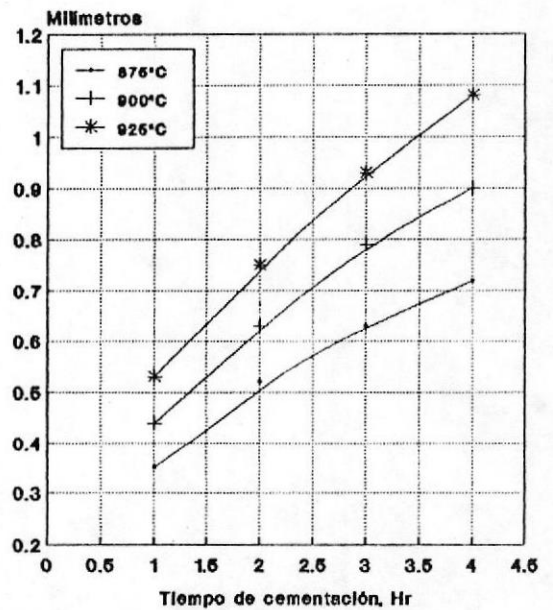
(a)

12% CNNa AISI 1022



(b)

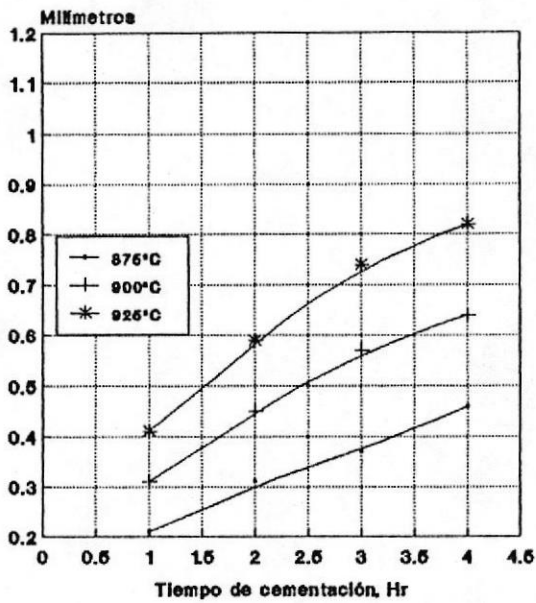
14% CNNa AISI 1022



(c)

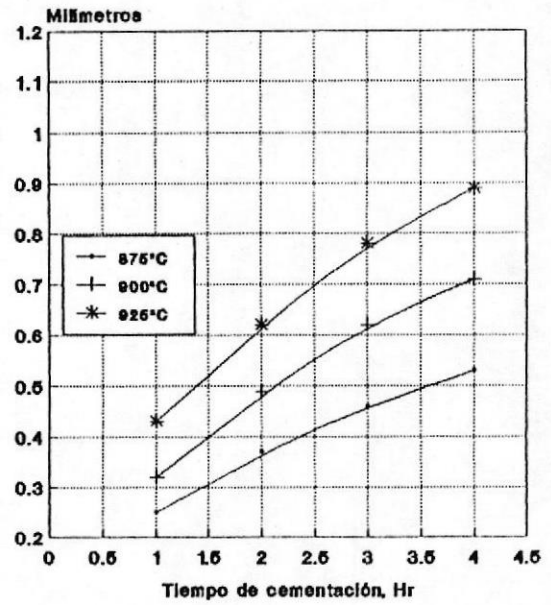
Figura 4.9 Efecto de la temperatura en la profundidad de capa efectiva (a 50 HRC) en un acero AISI 1022 cementado con (a) 10, (b) 12, y (c) 14% CNNa.

10% CNNa AISI 1022



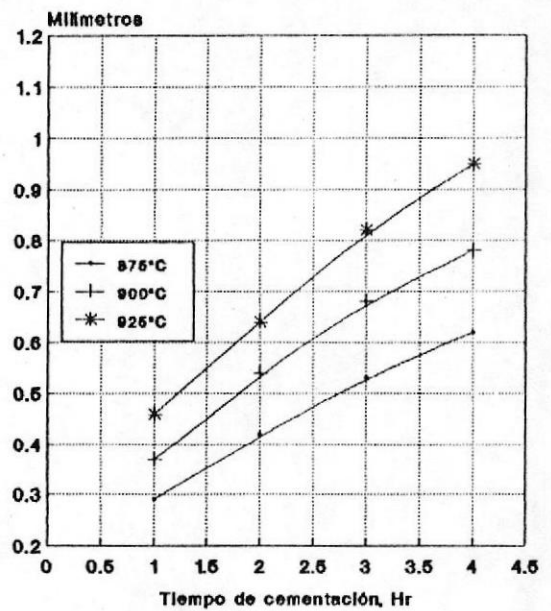
(a)

12% CNNa AISI 1022



(a)

14% CNNa AISI 1022



(a)

Figura 4.10 Efecto de la temperatura en la profundidad de capa a 55 HRC en un acero AISI 1022 cementado con (a) 10, (b) 12, y (c) 14% CNNa.

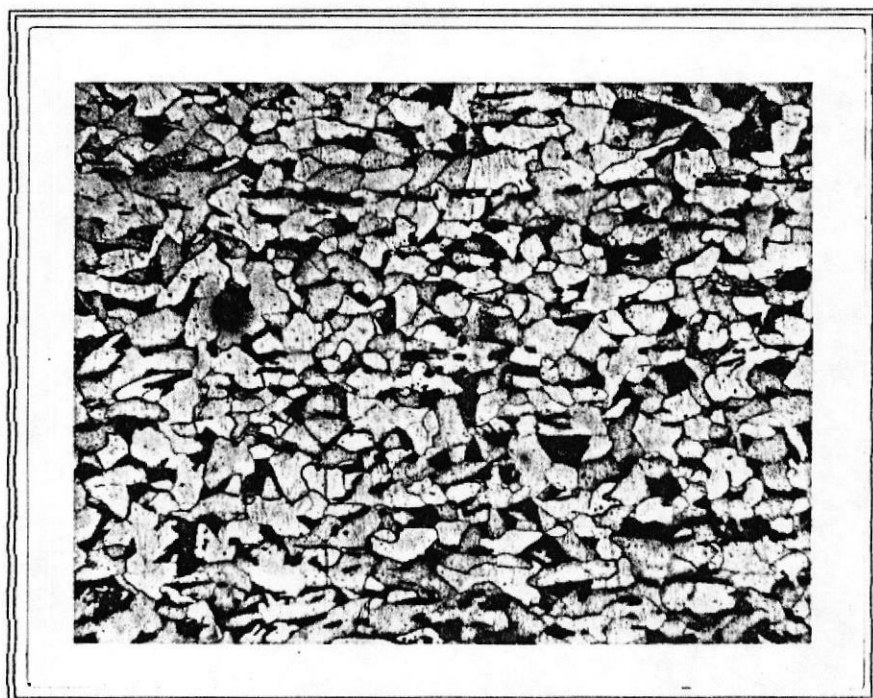


Figura 4.11 Acero AISI 1022 recocido, atacado quimicamente en nital al 5%, ferrita zonas blancas, perlita zonas oscuras. 150X

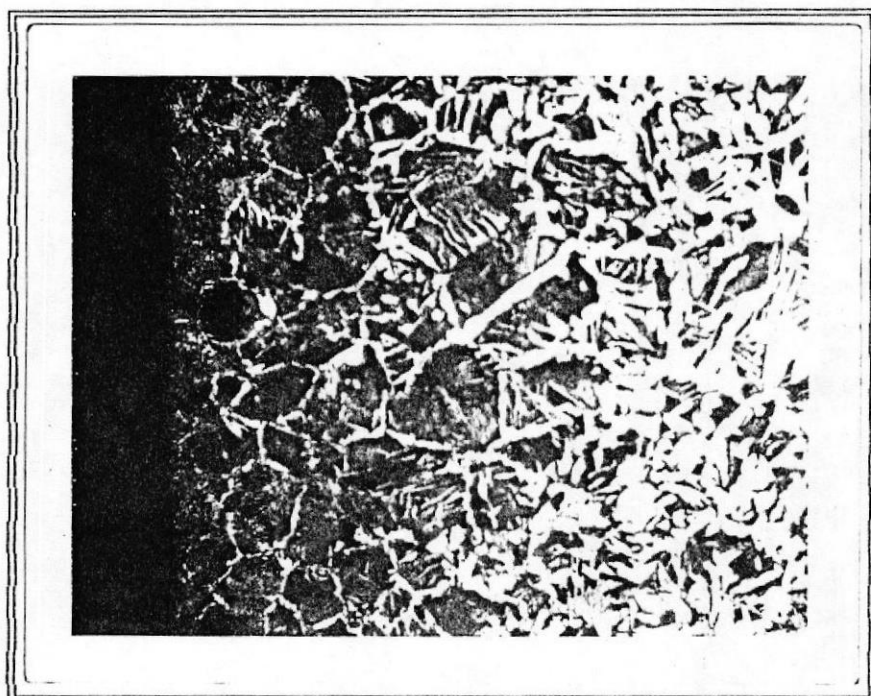


Figura 4.12 Acero AISI 1022 cementado, 14% CNNa 925°C 1 Hr, enfriado al aire, atacado químicamente en nital al 5%, ferrita zonas blancas, perlita zonas oscuras. 150X

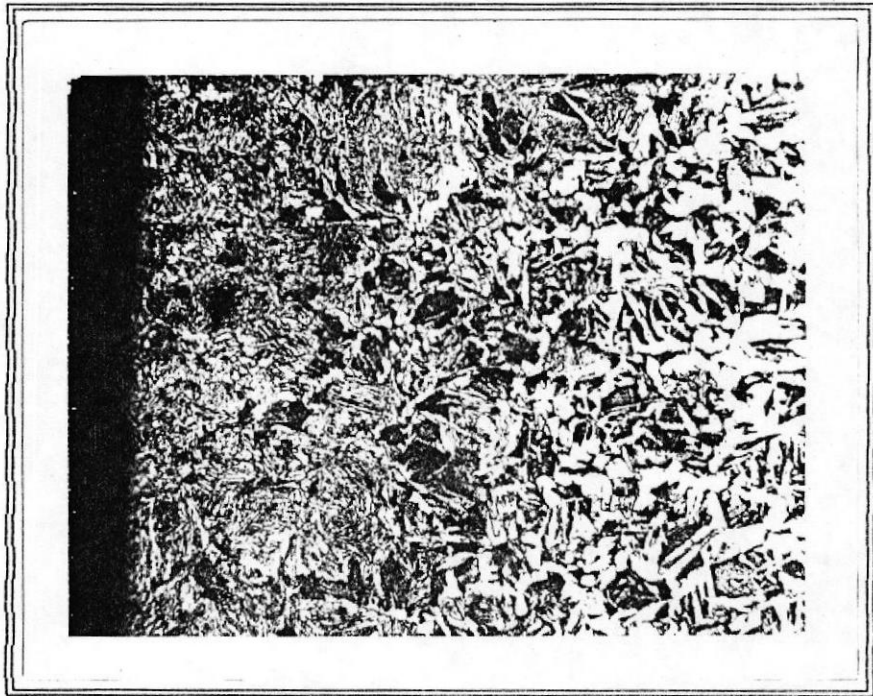


Figura 4.13 Acero AISI 1022 cementado, 10% CNNa 900°C 2 Hr, enfriado al aire, atacado químicamente en nital al 5%, ferrita zonas blancas, perlita zonas oscuras. 150X

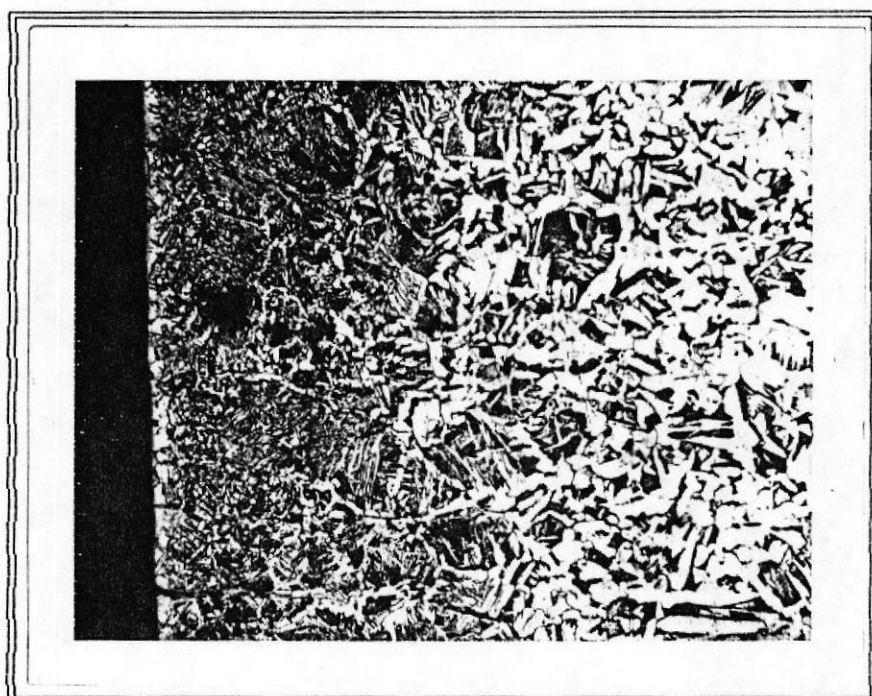


Figura 4.14 Acero AISI 1022 cementado, 10% CNNa 875°C 2 Hr, enfriado al aire, atacado químicamente en nital al 5%, ferrita zonas blancas, perlita zonas oscuras. 150X

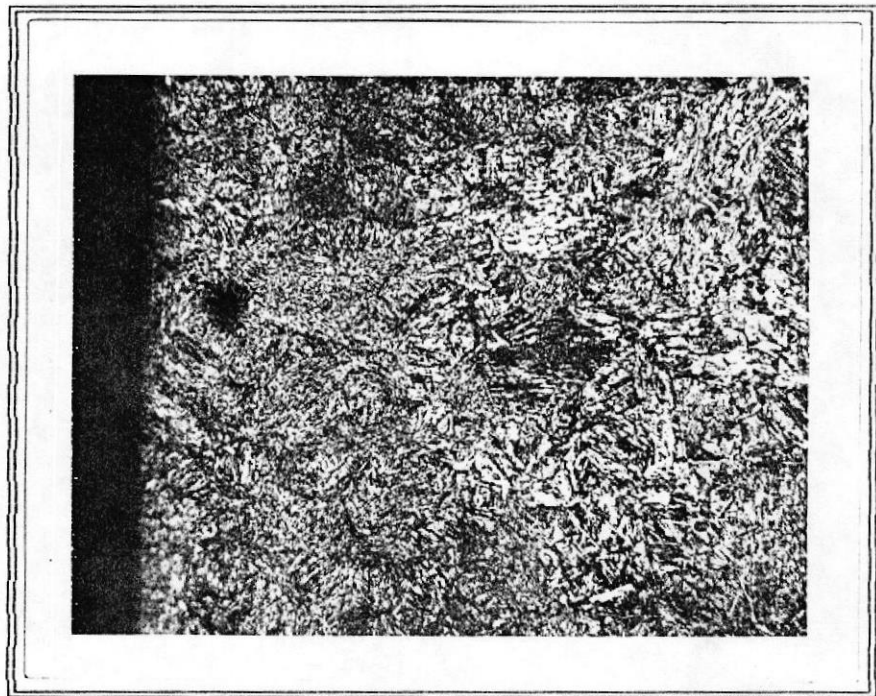


Figura 4.15 Acero AISI 1022 cementado, 14% CNNa 925°C 2 Hr, templado en agua, atacado químicamente en nital al 5%, se muestra una estructura martensítica. 150X

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados han permitido elaborar los gráficos contenidos en las figuras precedentes que servirán para hacer un enfoque más objetivo del proceso.

Las figuras 4.2, 4.3, y 4.4 muestran el efecto del tiempo en el gradiente de dureza. Como sabemos, el proceso de difusión genera un gradiente de carbono y la dureza máxima que el acero puede alcanzar está en función de su contenido de carbono; esto hace que la dureza obtenida después del temple disminuya desde la superficie hacia el núcleo hasta alcanzar un valor constante.

Un mayor tiempo de cementación favorece el enriquecimiento de carbono y el espesor de la capa cementada; pero el contenido de carbono de la superficie es como máximo igual al potencial del baño independientemente del tiempo de cementación.

En los gráficos de la figura 4.5 podemos observar el

efecto de la temperatura en el gradiente de dureza. La tendencia general de las curvas es desplazarse hacia la derecha al aumentar la temperatura del baño para las concentraciones de cianuro ensayadas. Por ejemplo, para una cementación de 2 horas a una profundidad de 0.6 mm los valores de dureza son 42, 49, y 55 HRC; para 875, 900, y 925°C respectivamente. De manera que el incrementar la temperatura dará lugar a mayores valores de dureza a una profundidad dada. En consecuencia, la velocidad de difusión de carbono se incrementa con la temperatura.

De las figuras 4.2, 4.3, y 4.4 se han derivado los gráficos de las figuras 4.5, 4.6, y 4.7 donde con más claridad puede observarse el efecto de la temperatura de cementación en el gradiente de dureza.

El análisis microscópico revela importantes resultados que deben ser considerados también, para la aplicación comercial del proceso.

La figura 4.11 muestra la microestructura del acero AISI 1022 recocido, formada por ferrita y perlita de grano fino. Al observar las microestructuras de especímenes cementados y enfriados al aire puede notarse con facilidad el mayor contenido de carbono de las zonas cercanas a los bordes. La microestructura cambia

gradualmente de una correspondiente a alto porcentaje de carbono, en la superficie, hasta la estructura del metal base. Si observamos la figura 4.10 por ejemplo, la microestructura en las cercanías del borde está formada por perlita, y cementita en los bordes de grano; de esta manera el potencial de carbono del baño conteniendo 14% CNNa a 925°C origina una microestructura hipereutectoide. Los resultados del monitoreo de la curva de dureza presentan una pendiente positiva para valores cercanos a la superficie, lo que presupone la existencia de una cierta cantidad de austenita retenida. Este fenómeno es también observado en tratamientos para 12% CNNa 925°C, y 14% CNNa 900°C.

En general puede decirse que al incrementarse la temperatura se pueden conseguir capas cementadas más ricas en carbono y en consecuencia de mayor dureza. No obstante debe tenerse en cuenta que si el contenido de carbono de la superficie es muy alto probablemente la dureza caiga en dicha región como consecuencia de la presencia de austenita retenida.

Especial cuidado sobre este asunto debe tenerse cuando se cementan aceros aleados en los que el contenido de carbono del punto eutectoide es menor a 0.8% C. La experiencia ha demostrado que la alta temperatura y el tiempo tienen un efecto muy grande en el crecimiento de

grano, de manera que ese es un aspecto que debe tenerse en cuenta cuando la cementación se realiza a altas temperaturas.

En la figura 4.12 se observa la estructura producida por un tratamiento de cementación 14% CNNa 925°C por una hora. Es evidente el aumento del tamaño de grano si se compara con la figura 4.11 que presenta la estructura antes del tratamiento. Tratamientos a temperaturas más bajas como los mostrados en las figuras 4.13 y 4.14 han tenido menor efecto en el crecimiento de grano. Para el uso de aceros ordinarios en el proceso de cementación se hace imprescindible el uso de ciclos de recalentamiento posteriores a la cementación que permitan refinar el grano y mejorar la tenacidad y resistencia a la atracción del núcleo.

El gráfico (c) de la figura 4.3 (12% CNNa 925°C) muestra una caída de la dureza en la zona cercana a la superficie. Por otra parte un tratamiento con la misma concentración de cianuro a una temperatura menor (12% CNNa 900°C) muestra un valor siempre decreciente de la dureza con la distancia como se observa en el gráfico (b) de la misma figura. Esto hace pensar que para esta concentración y temperatura el potencial de carbono del baño es cercano a la composición eutéctica para el acero utilizado ya que en aceros al carbono un porcentaje mayor

dará lugar a la presencia de austenita retenida, que causa disminución en la dureza (6).

En consecuencia, para propósitos prácticos puede asumirse que el potencial de carbono del baño con 12% CNNa a 900°C es cercano a la composición del punto eutectoide. Obviamente el tratamiento 12% CNNa 925°C tendrá un potencial mayor. Puede hacerse un análisis similar de los gráficos (a) y (b) de la figura 4.4.

Para resumir lo antes mencionado podemos aseverar que tanto el contenido de cianuro como la temperatura determinarán el contenido de carbono en la superficie del material. De acuerdo a esto se ha construido la siguiente tabla:

% CNNa	TEMPERATURA (°C)		
	875°C	900°C	925°C
10	Hipoeutec	Hipoeutec	Eutec
12	Hipoeutec	Eutec	Hipereutec
14	Eutec	Hipereutec	Hipereutec

Tabla XV Composición alcanzada por la superficie en un proceso de cementación de un acero AISI 1022 de acuerdo a la temperatura y porcentaje de cianuro de sodio utilizado

La figura 4.9 muestra el efecto de la temperatura en la profundidad de capa efectiva; es decir, aquella profundidad que corresponde a una dureza de 50 HRC. Se puede observar una relación más o menos lineal entre el tiempo de cementación y la profundidad de capa efectiva. La temperatura de cementación contribuye al aumento de la capa efectiva y ese efecto se acentúa a medida que se incrementa el tiempo. El contenido de cianuro de sodio del baño también contribuye al aumento de la profundidad de capa efectiva aunque en menor forma que lo hace la temperatura del baño. Las figuras 4.8 y 4.10 muestran el efecto de la temperatura en la profundidad de capa a 45 y 55 HRC respectivamente.

Finalmente, podemos anotar que el comportamiento del baño depende en gran manera de la existencia de la capa protectora de grafito. Pruebas preliminares realizadas dieron como resultado una disminución de hasta 8% en 4 horas del contenido de cianuro de sodio para baños sin cubierta de grafito a temperaturas de cementación dentro de los rangos usuales y una disminución de 1 a 2% con el uso de grafito.

De la presente investigación se pueden señalar las siguientes conclusiones:

a) El tratamiento térmico de cementación líquida en baño

de sales es un proceso viable para conseguir alta dureza superficial.

- b) La velocidad de cementación se relaciona directamente con la temperatura de operación y el espesor de capa cementada con la temperatura y el tiempo de cementación.
- c) La dureza disminuye con la distancia en las capas cementadas hasta llegar a la dureza del núcleo.
- d) El contenido de cianuro de sodio del baño y la temperatura de operación determinarán el potencial de carbono del baño y la máxima concentración de carbono en la capa cementada.
- e) La máxima concentración de carbono en la superficie es independiente del tiempo si el potencial de carbono del baño permanece constante.
- f) Si el porcentaje de carbono de la superficie es mayor que la composición eutectoide, es probable que se encuentre cierta cantidad de austenita retenida en la microestructura, causando un ablandamiento de la superficie cementada.
- g) Altas temperaturas de cementación aceleran el proceso

pero causan un desfavorable crecimiento del tamaño de grano en aceros ordinarios al carbono. En este caso es necesario hacer un recalentamiento de las partes cementadas a una temperatura de austenización menor que la usada en la cementación para refinar el grano.

- h) Es absolutamente necesario proteger el baño de la acción atmosférica por medio de una capa de grafito continua que reducirá las pérdidas de cianuro.
- i) Es necesario ejercer cuidadoso control del contenido de cianuro del baño para mantener constante su concentración y así obtener resultados satisfactorios.
- j) Deben observarse siempre precauciones en el almacenamiento y manejo de sales que contienen cianuros para evitar accidentes.

APENDICE



BIBLIOTECA

ANALISIS DE LOS BAÑOS DE SALES DE CIANURO

MUESTREO

Rápidamente introduzca una barra limpia y seca de acero bien pulida (de aproximadamente 5/8 pulg de diámetro) en el baño de sales fundidas y sáquelo inmediatamente. La fina capa de sales adherida a la barra se desprenderá con facilidad. Repita el procedimiento hasta obtener suficiente cantidad de sales. Si la barra se calienta mucho habrá dificultad para que las sales se desprendan y la barra debe ser enfriada antes de volver a introducirla en el baño. Triture la muestra de sales en un mortero y protégalas de la humedad hasta que sean usadas para realizar los análisis.

DETERMINACION DEL CIANURO DE SODIO

- Prepare una solución de sulfato de cobre disolviendo 74 gr en 1 L de agua.
- Disuelva 5 gr de la muestra libre de carbón en 100 ml de agua, y a esto añada 25 ml de amoníaco casero o 5 ml de hidróxido de amonio grado reactivo.

- Agite la solución preparada anteriormente hasta que toda la muestra se haya diluido y lentamente añada la solución de sulfato de cobre solo hasta que la solución que contiene la muestra se torne azul.
- Cada centímetro cúbico de la solución de sulfato de cobre usado equivale a 1% de cianuro de sodio en el baño.

BIBLIOGRAFIA

1. ASM COMMITTEE ON GAS CARBURIZING, **Carburizing and Carbonitriding**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1977, 148-157 p.
2. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook 8TH Edition vol.2 Heat Treating Cleaning and Finishing**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1961.
3. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook 9TH Edition vol.4 Heat Treating**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1961.
4. BAIN E. PAXTON H., **Alloying Elements in Steel**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1966, 123-180 p.
5. BOYER HOWARD E., **Case Hardening of Steel**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1987.
6. KRAUSS GEORGE., **Principles of Heat Treatment of Steel**, American Society for Metals, Metals Park Ohio, 1980.

7. PARRISH G., Influence of Microstructure on the Properties of Case-Carburised Components, Heat Treatment of Metals, USA, 1976.

8. SHEWMON P., Diffusion in Solids, J. Williams Book Company, Jenks OK, 1983.