



D-4863

T
672.36
H425
c.3

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"NITRURACION EN MEDIO GASEOSO DEL ACERO SAE 4140"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

KLEBER JAVIER MATAMOROS MORLA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1982

A G R A D E C I M I E N T O

A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral

A los profesores del Departamento
de Ingeniería Mecánica.

Al Ing. Ignacio Wiesner F. Director
de Tesis, por su ayuda a la realizaa
ción del presente trabajo.

A la Sra. Alexandra V. de Mora, por
el mecanografiado del presente tra-
bajo.

DEDICATORIA

A mis queridos padres:

Segundo y Gloria

A mis hermanos:

Alejandro

Wilfrido

Gloria

A mi esposa:

Jenny

A mis hijas:

Jenny

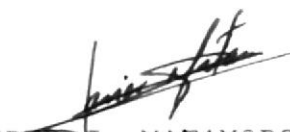
Paola

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Ignacio Wiesner F.', is positioned above a horizontal dotted line. The signature is fluid and cursive, with a prominent initial 'I'.

ING. IGNACIO WIESNER F.

DECLARACION EXPRESA

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



KLEBER J. MATAMOROS MORLA

R E S U M E N

La presente investigación está encaminada a introducir una nueva técnica de endurecimiento superficial, dándoles además buena resistencia a la abrasión, a la corrosión y al mismo tiempo que puedan soportar elevadas temperaturas de trabajo sin perder dichas propiedades, este tratamiento es la Nitruración Gaseosa.

Para lo cual el acero deberá ser bonificado antes de ser colocado en el horno de tratamiento, por el que se hace circular una corriente de Nitrógeno proveniente de la disociación del amoníaco. El tratamiento tiene una duración que oscila entre las 24 y 90 horas. El enfriamiento se lo realiza en el horno no necesitando ningún tratamiento posterior. El acero deberá contener alrededor de 0.42% de arbono y determinados elementos aleantes dependiendo esto de las propiedades que se quieran obtener.

La capa nitrurada posee zonas bien definidas, su parte exterior formada por nitruros de Fe, seguida por una capa de nitruros de los elementos y finalmente el metal base.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN.	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS.	IX
INDICE DE TABLAS	XII
ABREVIATURAS	XIII
INTRODUCCION	15
I FUNDAMENTOS TEORICOS.	18
1.1 Generalidades.	18
1.2 Principios Físicos-Químicos del Proceso.	20
1.3 Medios gaseos utilizados	37
1.4 Procesos de nitruración.	38
1.4.1 Aceros utilizados.	39
1.4.2 Influencia de los elementos aleantes en los aceros de nitruración	41
1.4.3 Tratamientos preliminares.	44
1.4.4 Elementos que influyen en la velo- cidad de nitruración	46
1.4.5 Espesor de la capa nitrurada	48
1.4.6 Aplicaciones del proceso	50
1.4.7 Ventajas y desventajas del proceso	52
II TRABAJO EXPERIMENTAL.	54

VIII

	<u>Pág.</u>
2.1 Técnica Operativa.	55
2.1.1 Horno de Tratamiento.	57
2.1.2 Generador de Atmósfera con NH_3	60
2.1.3 Puesta en marcha del equipo.	63
2.2 Control de Atmósfera	64
2.2.1 Porcentaje de disociación.	67
2.2.2 Control de Temperatura	69
2.2.3 Control de Presión	72
2.3 Pruebas preliminares con aceros ordinarios .	74
2.4 Pruebas con acero bonificado SAE 4140 en amo niaco.	75
2.5 Ensayos de Laboratorio	77
2.5.1 Espesor de capa nitrurada vs. tiempo a diferentes temperaturas.	86
2.5.2 Dureza vs. tiempo.	88
2.5.3 Metalografía	89
2.5.4 Ensayo de resistencia al desgaste. . .	89
IV DISCUSION DE RESULTADOS.	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
APENDICE.	117
DIAGRAMAS TABLAS Y ANEXOS.	117
BIBLIOGRAFIA.	133

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.1	Energía de activación para difusión.	23
1.2	Esquematización del gradiente de concentración y autodifusión a) $t = t_0$; b) $t_0 < t < t_\infty$; c) $t = t_\infty$	24
1.3	Difusión a lo largo de una dislocación de cuña .	26
1.4	Difusión en los límites de grano.	27
1.5	Esquemas de los mecanismos de difusión	29
2.1	Horno de tratamiento marca LINDBERG Modelo TREETALL, rango de temperatura 0-1100°C.	58
2.2	Control automático de temperatura marca Honeywell	59
2.3	Generador de atmósfera Atmo-C Modelo LAM 100, marca LINDBERG.	61
2.4	Instalación de los equipos utilizados en el proceso de nitruración	68
2.5	Controles de presión del sistema	75
2.6	Probetas antes de la nitruración	78
2.7	Probetas luego de la nitruración	79
2.8	Zona exterior de un acero SAE 3315 sin tratamiento térmico de nitruración. Se aprecia la estructura uniforme de bandas de ferrita y perlita característico de los aceros laminados en caliente	80

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
2.9 Zona exterior de un acero SAE 3315 nitrurado.	81
Se observa la zona afectada por el tratamiento.	
2.10 Espesor de capa vs. tiempo. Material SAE 3315.	83
2.11 Dureza vs. tiempo. Material SAE 3315	85
2.12 Espesor de capa vs. tiempo a diferentes tempera- turas. Material acero SAE 41.40.	92
2.13 Dureza vs tiempo a diferentes temperaturas. Ma- terial SAE 4140	95
2.14 Dureza vs espesor de capa. Material acero SAE 4140. Temperatura 560°C.	97
2.15 Dureza vs espesor de capa. Material acero SAE 4140. Temperatura 620°C.	99
2.16 Probeta correspondiente a un acero bonificado SAE 4140, sin tratamiento	100
2.17 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 560°C. Tiempo de tratamiento 18 h.	101
2.18 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 560°C. Tiempo de tratamiento 24 h.	102
2.19 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 560°C. Tiempo de tratamiento 36 h.	103
2.20 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 560°C. Tiempo de tratamiento 60 h.	104
2.21 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 620°C. Tiempo de tratamiento 18 h.	105

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
2.22 Zona exterior de un acero SAE 4140 tratado a 620°C. Tiempo de tratamiento 24 h.	106
2.23 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 620°C. Tiempo de tratamiento 45 h.	107
2.24 Zona exterior de un acero SAE 4140, tratado a 620°C. Tiempo de tratamiento 70h	108

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>	<u>Pág.</u>
1.1 Coeficientes de Difusión.	31
1.2 Constantes de Difusión.	34
1.3 Tipos de aceros utilizados en la Nitruración. . .	42
2.1 Composición química del acero bonificado SAE 4140	56
2.2 Mediciones de la capa nitrurada de un acero SAE 3315 tratado a 560°C	82
2.3 Mediciones de dureza en un acero SAE 3315 nitrurado a una temperatura de 560°C	84
2.4 Mediciones del espesor de la capa nitrurada a la temperatura de 560°C y a diferentes horas	90
2.5 Mediciones del espesor de capa nitrurada de un acero SAE 4140, a la temperatura de 620°C a diferentes tiempos	91
2.6 Mediciones de dureza en un acero SAE 4140, nitrurado a una temperatura de 560°C	93
2.7 Mediciones de la dureza en un acero SAE 4140 nitrurado a la temperatura de 620°C	94
2.8 Espesor de la capa vs dureza a diferentes horas .	96
2.9 Espesor de capa vs dureza a diferentes horas. . .	98
2.10 Resultados del ensayo al desgaste	109

ABREVIATURAS

Ac	Temperatura de calentamiento crítica inferior
AISI	American Iron and steel Institute
°C	Grados Centígrados
Al	Aluminio
ccc	Cúbico de Cuerpo Centrado
ccac	Cúbico de Casa Centrada
cm	Centímetro
cm ² /seg	Centímetros cuadrados por segundos
cm ² /seg	Centímetros cuadrados-segundos
Cr	Cromo
° F	Grados Farenheit
Fe	Hierro
Fe-Cr-Ni	Hierro-cromo-níquel
Fig.	Figura
Kg/cm ²	Kilogramos por centímetros cuadrados
Kg/mm ²	Kilogramos por milímetros cuadrados
máx	Maxímo
med.	Medida
m ³ /h	Metro cúbico por hora
N	Nitrógeno

NH	Amoniaco
P	Presión
Pág.	Página
Rc	Rockwell-c
SAE	Society of Automotive Engineers
T	Temperatura

I N T R O D U C C I O N

En la actualidad los materiales metálicos, concretamente aceros ordinarios y especiales, usados en las plantas industriales para servicio de mantenimiento son importados, constituyendo un rubro importante en la economía del país. Estos aceros que son usados como herramientas o como elementos de máquinas, raras veces se los usa sin tratamiento térmico, proceso por medio del que se logran mejores condiciones de durabilidad y cumplimiento de su función a cabalidad. Es por esta razón que se requiere realizar de manera urgente la transferencia de tecnología en estos procesos especializados a fin de que se los conozcan lo suficientemente bien para que se apliquen sin necesidad de recurrir al uso de técnicos extranjeros.

Esta transferencia de tecnología también esta relacionada con los proyectos que se desean implantar en el país, específicamente en el plan automotriz dentro del marco de Pacto Andino, lo cual sirve de incentivo a realizar la siguiente experimentación dentro del campo de los Tratamientos Térmicos en lo referente a endurecimiento superficial de las piezas fabricadas de acero que bajo condiciones de opera-

ción se encuentran sometidas a elevadas temperaturas de trabajo, rozamiento continuo y deben soportar esfuerzos de fatiga constantes, debiendo permanecer sin cambiar sus propiedades, además, alta resistencia al desgaste y a la corrosión y a su vez un núcleo lo suficientemente tenaz para soportar los esfuerzos de fatiga.

El tema a tratar en la presente investigación es el estudio de la Nitruración Gaseosa, proceso que consiste en hacer circular en un horno, el cual se encuentra a una temperatura más baja que la temperatura crítica inferior (Ac_1), una corriente de Nitrógeno Naciente proveniente de la disociación del gas amoníaco. Dicha disociación se realiza en un generador de atmósfera a $850^{\circ}C$ y se mantiene hasta que el Nitrógeno se difunde en el metal y forme compuestos en una capa nitrurada de algunas décimas de milímetros de alta dureza, sin alterar las propiedades del núcleo, puesto que no es necesario efectuar ningún tratamiento posterior al mismo que altere las características del metal original fuera de los límites de la zona superficial rica en nitruros de hierro y elementos aleantes en el acero.

En el presente trabajo se ha usado un acero bonificado SAE 4140, gas amoníaco y con ellos se han logrado capas nitruradas hasta 0.80 mm de espesor y durezas de 75 Rc.

Este tratamiento térmico no se ha efectuado en el país por el equipo especial que se requiere, por el costo de operación y desconocimiento de sus técnicas y las limitadas aplicaciones que existirían, pero cobra en estos momentos una inusitada importancia en cuanto a que el Gobierno nacional ha dispuesto la restricción de importación de moldes para la fabricación de piezas de plástico, moldes en los cuales el proceso de nitruración gaseosa es casi irremplazable.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 GENERALIDADES

Mediante los más modernos métodos de tratamientos térmicos no fue posible dotar a ciertos mecanismos de las condiciones necesarias para soportar cargas específicas elevadas, resistencia al desgaste y a la fatiga.

Es necesario muchas veces llevar a las piezas a grandes temperaturas, para luego enfriarlas bruscamente, originando tensiones que dan lugar a importantes deformaciones, tales son los casos de la carbonitruración, cementación y temple.

La nitruración gaseosa es un tratamiento térmico superficial que se aplica a piezas de acero o fundición ferrosa para mejorar su propiedades mecánicas. Las piezas tratadas disuelven el nitrógeno proveniente de la disociación del gas amoníaco que se inyecta a una cámara hermética en la que están contenidas.

El nitrógeno libre formado en esta disociación es muy activo y se une con el hierro y otros elementos aleantes del material para formar nitruros, estos compuestos se difunden lentamente y originan en la periferia del material una capa dura, como consecuencia de una deformación de la red cristalina. Mediante un estudio metalográfico de las piezas nitruradas se comprueba la existencia de una capa blanca exterior, una segunda capa nitrurada efectiva y una tercera zona de gradación de dureza, desde 1000 Vhn hasta 150Vhn del núcleo no afectado en tanto que los espesores de la capa nitrurada varían entre 0.20 mm y 0.80 mm.

Con el tratamiento de la nitruración se consiguen durezas elevadas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial, alcanzándose en la capa dura de los aceros durezas superiores a 70 Rc. Los aceros que se utilizan en este tratamiento deben tener entre 0.25 a 0.50% de Carbono y Aluminio, Cromo, Molibdeno en el orden del 3%. Además, deben ser previamente templados y luego revenidos a temperaturas superiores a 600° C, para obtener el máximo de tenacidad en el núcleo.

Las temperaturas usuales en este proceso son inferiores a las temperaturas críticas del acero y es por

esta razón que las variaciones dimensionales y las deformaciones que se producen son muy pequeñas.

Los principales inconvenientes de este procedimiento son:

- Fragilidad de la capa dura
- Tiempo del tratamiento
- Costo del proceso

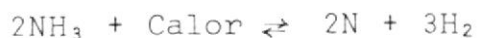
La nitruración encuentra gran aplicación en la fabricación de:

- Piezas de motores de aviación
- Camisas de cilindros
- Válvulas
- Ciguenales
- Moldes para la industria del plástico, etc.

1.2 PRINCIPIOS FISICOS-QUIMICOS DEL PROCESO

El principio físico-químico de nitruración, será enfocado al desarrollo del mecanismo químico de la formación de átomos activos de nitrógeno, sus reacciones químicas y su posterior difusión al interior del acero.

La formación del nitrógeno se genera por la disociación del amoníaco que viene representado por la siguiente ecuación:



El nitrógeno naciente es muy activo y en contacto con el material se une con el hierro y los demás elementos aleantes formando nitruros. Los nitruros se difunden lentamente en el mismo, originando en la periferia del material una capa dura como consecuencia de la deformación de la red cristalina. A continuación se explicará como el nitrógeno penetró en el material.

Difusión.— Se emplea para describir cualquier cambio en las posiciones de los átomos o moléculas en un medio que suponemos inmóvil. Puede tener lugar en los líquidos, gases y en condiciones adecuadas en los sólidos. En este trabajo interesa realizar el estudio bibliográfico de los procesos de difusión que se llevan a cabo en los sólidos, la cual puede dividirse en dos secciones para su mejor comprensión y que son: Difusión en sólidos cristalinos y difusión sobre las superficies libres.

DIFUSION EN LOS CRISTALES.- Esta difusión en los cristales, tal como se la ha definido, se manifiesta debido al movimiento de los átomos inidividuales con respecto al cristal o red cristalina, cuya posición está definida por los átomos que cambian su posición relativa. En lo que se denomina proceso unitario, cabe destacar el movimiento de un átomo desde la posición cualquiera.

Todos los átomos tienen un continuo movimiento alrededor de sus posiciones medias y el proceso unitario o salto es el suceso en que cambia la posición media del átomo, sólo puede producirse si el átomo tiene una energía suficientemente elevada y si existe una posición libre que pueda ocupar.

ENERGIA DE ACTIVACION.- Para que los átomos cambien de lugar, es necesario que su energía sea mayor a la mostrada en la Fig. 1.1.

La energía requerida para sobrepasarlos, (junto a la energía de formación del defecto), se llama energía de activación de la difusión, como se muestra en la Figura 1.1 (a), se requiere energía para empujar el átomo fuera de sus actuales vecinos.

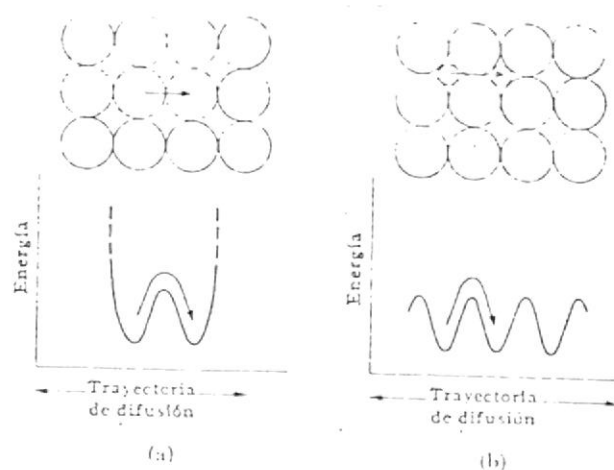


Fig. 1.1 Energía de activación para Difusión (Van Vlack).

Con difusión de intersticios se requiere energía para forzar el átomo hacia un contacto mayor con los átomos vecinos según se mueve entre ellos. La energía de activación varía con una cantidad de factores, por ejemplo: un átomo pequeño tiene menor energía de activación que un átomo grande o molécula, del mismo modo los elementos intersticiales requieren de más energía que los movimientos de hueco. Finalmente, se requiere de altas energías de activación para la difusión de materiales de alto punto de fusión fuertemente ligado con el tungsteno, el carburo, etc.

GRADIENTE DE CONCENTRACION.- El proceso de homogenización mostrado en la Fig. 1.2.

Aunque hay igual probabilidad para un átomo individual de moverse en cualquier dirección, el gradiente de concentración favorece un movimiento neto de los átomos hacia la derecha. En la parte (b) hay más átomos marcados que los que hay en el punto B. Así, incluso la misma probabilidad de átomos marcados en A, para moverse a la izquierda, la diferencia de números produce un diferencial en movimientos y aumenta la uniformidad en la estructura.

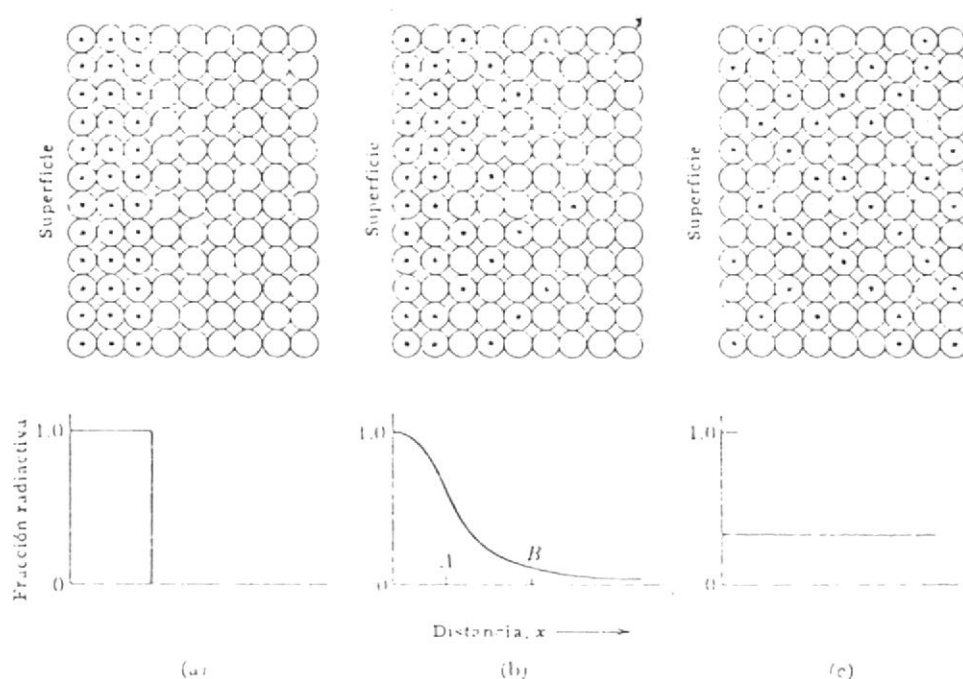


Fig. 1.2 Esquematización del Gradiente de Concentración y autodifusión a) $t = t_0$; b) $t_0 < t < t_\infty$; c) $t = t_\infty$ (Van Vlack).

LA AUTODIFUSION.- También es graficada por esta figura;

ya que normalmente no se observa ninguna difusión neta en un material de fase simple, porque los movimientos atómicos son caóticos, y los átomos son todos idénticos. Sin embargo, mediante el uso de isótopos radioactivos, es posible identificar la difusión de los átomos dentro de la propia estructura, o sea AUTODIFUSION. Por ejemplo, el níquel radiactivo (Ni) puede ser cubierto con níquel normal. Con el tiempo y dependiendo de la temperatura hay una progresiva autodifusión de los isótopos en el cuerpo del níquel (y una contra difusión de los átomos no marcados hacia la superficie).

DIFUSION EN LAS DISLOCACIONES.- El estudio que hasta ahora se ha hecho, consistía en la difusión del caso ideal de un cristal perfecto, salvo la presencia de vacantes, se ha comprobado que es necesario menos energía de activación cuando se produce la difusión a lo largo de las dislocaciones de cuña.

Este proceso puede ser importante cuando el mecanismo de vacantes se hace demasiado lento. Es posible que algunas de las transformaciones que consideremos se producen por difusión en las dislocaciones. En la Fig. 1.3 se pueden analizar con más detenimiento.

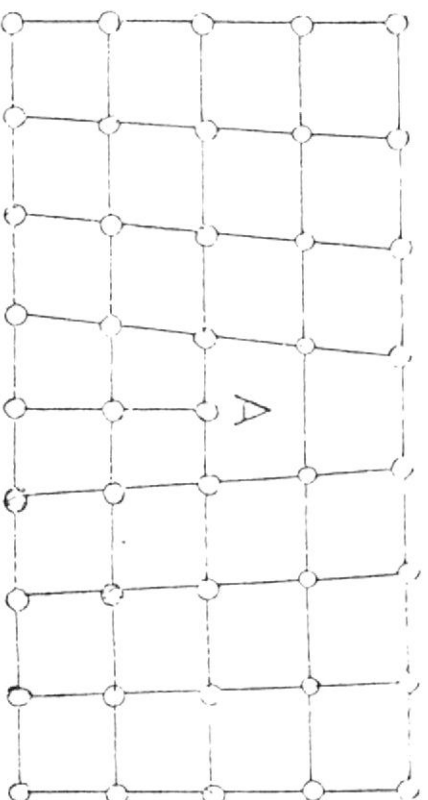


Fig. 1.3 Difusión a lo largo de una dislocación de cuña.

El movimiento de los átomos desde la posición A puede ser a su correspondiente en el plano próximo. Por lo tanto, la energía de activación es baja ya que se tiene un espacio disponible relativamente grande para el movimiento del átomo. Este movimiento se convierte en semi-intersticial debido a estas circunstancias.

DIFUSION EN LOS LIMITES DE GRANO.- Estos han sido estudiados de una manera completa por Fisher², y permiten averiguar la relación existente entre los coeficientes de difusión en el borde y en el retículo. La gráfica siguiente es tomada para dicho estudio.

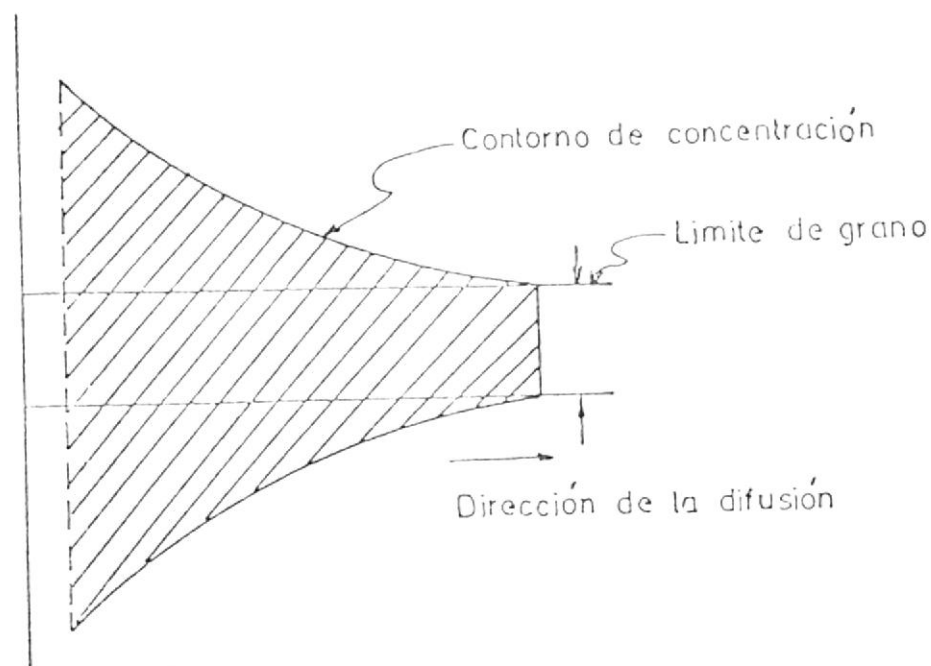


Fig. 1.4 Difusión en los límites de Grano (4).

Se considera el borde como una hoja de espesor definido (10^{-8} cm), en que el coeficiente de difusión es mucho más elevado que el retículo adyacente. Una característica de esto es que cuando aún los átomos que se difunden, recorren el borde a gran velocidad la concentración en el retículo inmediato aumenta tan de prisa como el borde mismo, siendo la razón que los átomos recorren el borde tarde o temprano anclan en el retículo cristalino. Así pues, el borde actúa como un canal de irrigación que alimenta a los que rodea como una corriente de átomos en la parte del retículo inaccesibles a la difusión directa.

Es el momento adecuado para tratar como se realiza la difusión del Nitrógeno en el hierro, se lo trata como la difusión de un sólido y es necesario comentar como la difusión es naturaleza estadística, resultando de muchos movimientos al azar de átomos individuales. La trayectoria de un átomo indica que puede ser en zig-zag e impredecible. Es así como un gran número de átomos hacen que tales movimientos puedan producirse en flujos sistemáticos, mediante tres métodos: El nitrógeno puede difundir en soluciones sólidas sustitucionales mediante el mecanismo de vacancia, el mecanismo intersticial y el mecanismo de intercambios de átomos. Este mecanismo lo presentamos esquemáticamente.

Es de destacar además, que la vacancia de los sitios intersticiales son de una característica normal de las estructuras cristalinas; estas imperfecciones facilitan grandemente la difusión del nitrógeno o el salto de los átomos adyacentes del nitrógeno ya existente. En la figura 1.5 (a) se muestra como un átomo puede moverse en un espacio atómico hacia la izquierda, mediante un salto de una vacancia. Por supuesto es igualmente probable que cualquiera de los átomos vecino existentes podrían haber hecho el salto, pero

el nitrógeno, en vista de su menor radio atómico y de su mayor difusibilidad en el hierro es que la vacancia se ha movido hacia la derecha para ocupar la posición del átomo previo, y ahora está listo para otro intercambio al azar.

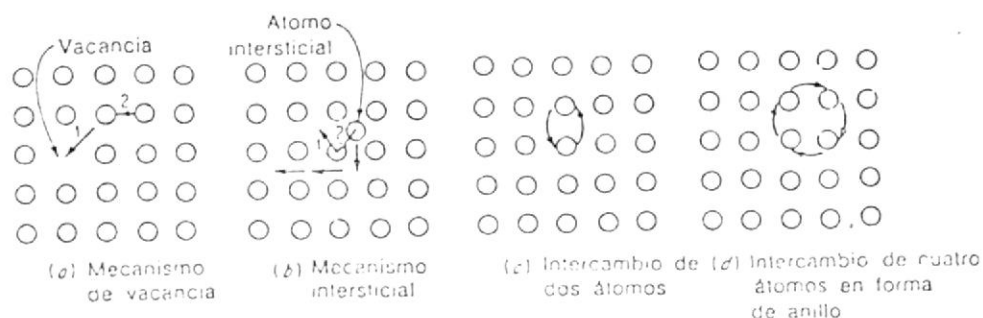


Fig. 1.5 Esquema de los Mecanismos de Difusión (6).

El mecanismo intersticial se observa en la Fig. 1.5 (b) en que un átomo en la posición normal se mueve en un espacio intersticial en un lugar desocupado, lo ocupa el átomo intersticial del nitrógeno, o éste se quede ocupando el mismo intersticio por su mayor tamaño. Como se muestra en la figura la difusión puede

ocurrir por un átomo intersticial de nitrógeno a través del hierro posiblemente, el movimiento tiene lugar por intercambio directo por dos átomos adyacentes como se muestra en la Fig. 1.5 (c), o por un intercambio de cuatro átomos como lo vemos en la Fig. 1.5 (d) sin embargo, todo ocuparía en condiciones especiales ya que el problema físico de deslizarse entre átomos vecinos incrementaría la barrera de difusión.

La evidencia experimental ha indicado que el uso de vacantes es el método fundamental de difusión en metales. (Como se especificó anteriormente, la difusión dentro de un metal depende del coeficiente de difusión, y aunque depende de muchas variables, es el más importante, la temperatura como regla general se puede establecer que el coeficiente de la difusión se duplica por cada 20 centígrados de aumento de temperatura. Esto no es sorprendente, ya que todos los átomos vibran constantemente respecto a sus posiciones de equilibrio y la vibración aumenta al elevarse la temperatura. Los valores de D los podemos encontrar en la Tabla 1.1.

Todo lo que se refiere a difusión de nitrógeno en el hierro deberá considerárselo como la difusión de un

SOLUTO	SOLVENTES (Estructura Patrón)	COEFICIENTE DE DIFUSION cm^2/seg	
		500°C (930°C)	1000°C (1830°C)
1. Carbón	ccac hierro	$(10^{-10.3})$	$(10^{-6.5})$
2. Carbón	ccc hierro	$(10^{-8.2})$	$(10^{-6.2})$
3. Hierro	ccac hierro	$(10^{-19.5})$	$(10^{-11.8})$
4. Hierro	cc hierro	$10^{-16.1}$	$(10^{-9.5})$
5. Niquel	ccac hierro	$(10^{-16.0})$	$10^{-11.6}$
6. Maganeso	ccac hierro	$(10^{-16.6})$	$10^{-12.0}$
7. Cinc	Cobre	$10^{-12.2}$	$10^{-8.0}$
8. Cobre	Aluminio	$10^{-9.3}$	Fundiciones
9. Cobre	Cobre	$10^{-15.1}$	$10^{-8.0}$
10. Plata	Plata (cristal)	$10^{-12.9}$	Fundiciones
11. Plata	Plata (lim.Grano)	$10^{-6.9}$	Fundiciones
12. Carbón	Titanio	$10^{-11.5}$	$(10^{-6.8})$
13. Nitrógeno	Hierro	7.3×10^{-7} *	3.8×10^{-3} **

TABLA 1.1 Coeficientes de difusión. (Van Vlack)

NOTA: El paréntesis indica que la fase es Metaestable

* En hierro alfa a 800°C

** En hierro Gamma a 1100°C

gas dentro de un metal. La costumbre de tratar un gas-metal como un sujeto independiente, puede algunas veces ser engañoso esto da una falsa impresión, a través de un sólido esas sustancias las cuales normalmente son gaseosas, proceden de una manera diferente de esas sustancias las cuales normalmente son sólidas. Estableciendo que la tenacidad de los gases a difundir a través de los metales están estrechamente asociados con su habilidad para corresponder con el correspondiente metal, las razones de difusión empiezan siendo altas, donde la formación del componente es posible. Este desarrollo probablemente será corregido para decir que la difusión es apreciable en esos acoplamientos en los cuales el gas es soluble en el metal en un grado significativo.

Le es permitido al nitrógeno en carácter únicamente como gas elemental, difundirse libre y seguramente, a través de los metales. Los átomos no metálicos necesitan ser desplazados de su posición reticulares para admitir la difusión del gas y la energía requerida para remover un átomo de gas de un sitio intersticial a otro, el cual no está previamente ocupado, será relativamente pequeño, además el calor de activación de la difusión del gas-metal será mucho menor que para metal a través de metal.

La estructura tendrá su influencia debido a que más rápidamente se difunden a través de las fronteras de grano que transgranularmente. La razón de difusión varía con el cambio de la estructura del cristal y con el cambio de orientación, en lo concerniente a los cristales anisotrópicos.

COEFICIENTE DE DIFUSION CONTRA TEMPERATURA.- La dependencia del coeficiente de difusión (D) con respecto a la temperatura se expresa por la ecuación:

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT}$$

Donde D_0 , es una constante que incluye varios factores. Incluidos tales factores como distancia de brinco y la frecuencia de vibración del átomo, las cuales contribuyen a la eficiencia del movimiento de tales átomos que tienen suficiente energía para difundirse por brincos. (cm^2/seg)

Q , la energía de activación

e , la base de los logaritmos naturales

R, la constante de los gases (1,987 cal/mol. °K)

T, temperatura absoluta (°K)

SOLUTO	SOLVENTE (estructura huesped)	D_0 cm ² /seg	cal/mol
1. Carbono	ccac hierro	0.21	33 800
2. Carbono	ccc hierro	0.0079	18 100
3. Hierro	ccac hierro	0.58	67 900
4. Hierro	ccc hierro	5.8	59 700
5. Níquel	ccac hierro	0.5	66 000
6. Manganeso	ccac hierro	0.35	67 500
7. Cinc	cobre	0.033	38 000
8. Cobre	aluminio	2.0	33 900
9. Cobre	cobre	11.0	57 200
10. Plata	plata cristal	0.72	45 000
11. Plata	plata (límite de grano	0.14	21 500
12. Carbón	titanio (altamente com pacto).	2.24	41 699

Tabla 1.2 Constantes de difusión.
(Van Vlack)

Extrapolando tanto en su pendiente como en la ordenada, puesto que:

$$\text{Log } D = \text{Log } D_0 - (Q/RT)$$

o también

$$Q = RT (\text{Log } D_0 - \text{Log } D)$$

MOVIMIENTOS ATOMICOS DE LA DIFUSION.- Los movimientos de la difusión se obtienen por los siguientes métodos:

a) Cuantía de H.-

Varios autores han calculado los calores de activación. El principal factor que contribuye a los valores calculados es la repulsión entre envolturas de los iones, de lo cual se sacan varias consecuencias:

1. Las mayores energías pertenecen a la intersticialidad a los mecanismos del intercambio, pues en estos casos los átomos deben ser comprimidos unos contra otros, venciendo la repulsión ion-ion.

2. La gran deformación alrededor de una intersticialidad hace posible mover este defecto a través del retículo más fácilmente que una vacante.

3. Zener², ha señalado que la energía ion-ion se reduce si gira un anillo de cuatro átomos.

b) Cuantía de D_0 .-

Zener² y Le Claire², han llevado a cabo cálculos de D_0 en los diferentes procesos mediante la variación de D , con la temperatura. Le Claire ha llegado a la conclusión de que los valores de D_0 averiguados son compatibles con la migración de vacantes en los metales cúbicos centrados. Los valores de D_0 y H , sólo pueden justificarse postulando la difusión y tiene lugar mediante la rotación de un anillo de cuatro átomos.

c) Efecto Kirkendall.-

Este efecto demostrado en aleaciones cúbicas de cara centrada, no puede producirse por mecanismos de intercambio. En la difusión por vacantes o intersticialidades se puede admitir la posibilidad

de que los defectos intercambien nudos con más facilidad, con los átomos de un componente que con otro.

1.3 MEDIOS GASEOSOS UTILIZADOS

La nitruración gaseosa se puede realizar utilizando los siguientes gases:

- Nitrógeno, en estado molecular
- Amoniáco

Al utilizar nitrógeno en el proceso, éste es inyectado en forma directa a la cámara en donde se realiza el tratamiento. Al entrar en contacto la pieza con el nitrógeno los elementos aleantes del mismo reaccionan formando los nitruros, lográndose de esta forma aumentar la dureza superficial del acero.

Este procedimiento no es aconsejable, por cuanto el nitrógeno que se inyecta se encuentra en forma molecular y la reacción con los aleantes es demasiado lenta comparada con el otro proceso.

El amoniáco al ser utilizado como medio gaseoso es necesario que dicho gas sea disociado previamente, en

este caso se utilizó un horno generador de atmósfera, en sus componentes. La disociación se rige por la siguiente ecuación:



El nitrógeno naciente de esta disociación es el que reacciona con los elementos aleantes, que contiene el acero a tratarse, formando los nitruros dándole de esta forma elevada dureza, gran resistencia al desgaste y a la corrosión.

1.4 PROCESO DE NITRURACION

La nitruración es un tratamiento termo-químico de difusión que tiene por objeto crear o formar nitruros en la superficie de la pieza, por medio de un calentamiento de la misma a una temperatura inferior a A_{C1} (temperatura crítica inferior de calentamiento) y añadiendo nitrógeno proveniente de la disociación del amoníaco.

Las piezas a nitrurar deben ser previamente templadas y luego revenidas para obtener el máximo de tenacidad en el núcleo. Una vez realizado el tratamiento no es necesario ningún tratamiento.

La temperatura del tratamiento oscila entre 480°C y 659°C y la duración del mismo va desde 20 a 90 horas. La selección de la duración del tratamiento y la temperatura de operación depende de las propiedades que se quieran obtener en la pieza tratada.

1.4.1 Aceros utilizados

Los aceros utilizados en la nitruración generalmente son aceros aleados, que contienen: Aluminio, cromo, vanadio, molibdeno, los mismos que forman nitruros muy estables a la temperatura de tratamiento.

Es necesario saber el uso que va a tener la pieza que va a ser tratada, para que la misma sea fabricada con el acero adecuado, ya que son los aleantes que contiene el acero los que determinarán las propiedades finales de la pieza. Por ejemplo: cuando se necesite que el material obtenga gran resistencia al choque y un elevado límite elástico, el porcentaje de carbono debe estar comprendido entre 0.30 a 0.35%, además debe tener cromo y molibdeno. En cambio que para lograr una elevada resistencia a la corrosión el porcentaje de carbono puede

llegar al punto de 0.60% y su principal aleante debe ser el aluminio.

Dentro de esta gama de porcentajes de carbono se puede clasificar los aceros de nitruración como sigue:

1. Aceros al Cr-Al (Cr 1-1.8%; Al 0.15-1.0%); Mn 0.50%). Suficiente resistencia al desgaste SAE 7140, AMS 6475.
2. Aceros de medio contenido de carbono y de baja aleación de cromo de la serie SAE 4100, 4300, 5100, 6100, 8600, 9300, 9800.
3. Aceros para trabajos en caliente que contienen el 5% de cromo. Tales como: H11, H12, H13.
4. Aceros inoxidable ferríticos y martensíticos de la serie 400.
5. Aceros inoxidable de las series 17 - 4PH, 17 - 7PH, y a - 286.

Los aceros de nitruración con bajo contenido de aluminio son usados para la construcción de elementos que deban resistir grandes choques, en cambio, que los aceros con alto contenido de aluminio, son destinados para la construcción de piezas donde se requieren elevadas durezas superficiales.

En la Tabla Nº 1.3, se dan los elementos que deben contener los aceros a nitrurar.

El acero 4140 es un acero al molibdeno de medio contenido de carbono y se lo usa principalmente en la fabricación de moldes para la industria del plástico, ejes de transmisión, pernos, ejes de dirección, motores navales, cigueñales, motores aviación , etc.

1.4.2 Influencia de los elementos aleantes de los aceros de nitruración.

En el proceso de nitruración los elementos aleantes, forman la parte más importante para lograr los mejores resultados. Este tratamiento se realiza generalmente en aceros aleados y pocas veces en hierro fundido.

TIPO	C	Si	Mn	Ni	Cr	Al	Mo	V
Cr-Al Mo	0.5	0.35	0.65	-	1.6	1.1	0.20	-
	0.4	0.35	0.65	-	1.6	1.1	0.20	-
	0.3	0.35	0.65	-	1.6	1.1	0.20	-
	0.2	0.35	0.65	-	1.6	1.1	0.20	-
Cr-Mo V	0.4	0.30	0.50	0.3	3.0	-	1.00	0.5
	0.3	0.30	0.45	0.5	3.0	-	0.40	-
	0.2	0.30	0.45	0.5	3.0	-	0.40	-
Cr-Mo V	0.35	0.30	0.50	-	2.0	-	0.25	0.1
	0.25	0.30	0.50	-	2.0	-	0.25	0.1
Cr-Mo	0.30	0.30	0.60	0.6	1.0	-	0.20	-

Tabla 1.3 Tipos de aceros utilizados en la Nitruración.

Los elementos aleantes más comunes son: Carbono, Aluminio, Titanio, y Vanadio; cada una de estos influye en forma directa en las características finales del tratamiento.

A continuación se detalla la forma en que algunos elementos influyen en la capa nitrurada.

- Carbono. - El carbono aumenta la dureza de la capa nitrurada y reduce el espesor de la misma, favorece la concentración de nitruros en la superficie.
- Silicio. - El silicio estabiliza los nitruros y aumenta la dureza superficial.
- Manganeso. - El manganeso absorbe fácilmente el nitrógeno formando nitruros de manganeso bajo la forma de Mn^5N_2 .
- Níquel. - El níquel en pequeños porcentajes aumenta la dureza, pero con porcentaje más elevado dificulta el espesor de la capa nitrurada. Con un porcentaje mayor del 3% dificulta totalmente la nitruración. No se debe utilizar aceros que contengan más del 0.50% de níquel.

- Cromo.- El cromo en un porcentaje del 1.0% aumenta la dureza de la capa y tiende a estabilizar los nitruros.

- Aluminio.- El aluminio es muy importante cuando se desea obtener la mayor dureza. Con el 0.40% se consigue una capa parcialmente tenaz, siendo su capa más débil cuando dicho porcentaje alcanza el 1%, obteniéndose una dureza máxima siendo su capa sumamente frágil y con tendencia al descascarillado.

- Molibdeno.- En porcentajes pequeños (0.30% - 0.40%) remedia el efecto del níquel desde el punto de vista de la fragilidad que le da a la capa nitrurada. Ciertos aceros de nitruración llegan a alcanzar el 1% de este aleante, el mismo que contribuye la formación de nitruros, reduciendo al mismo tiempo los riesgos de la fragilidad de la capa.

- Titania.- El titanio aumenta proporcionalmente con su porcentaje, la dureza de la capa y a su vez la fragilidad se hace mayor.

1.4.3 Tratamientos preliminares

Los aceros recocidos con estructura perlita=ferrita

que son sometidos al proceso de nitruración, dan como resultado una capa muy frágil y la dureza es baja, por cuanto los nitruros se alojan en la ferrita. Para evitar que suceda esto es necesario buscar una estructura más homogénea, lográndose esto, sometiendo al material a un temple seguido de revenido a temperaturas superiores a la de nitruración, obteniéndose de esta forma una estructura de tipo sorbítico donde la ferrita libres es prácticamente reducida. Los tratamientos deberán efectuarse antes de que la pieza se encuentre mecanizadas a medida con la finalidad de retirar posteriormente la capa superficial, donde el material pudiese haber sido descarburada u oxidada por el efecto de la bonificación. Normalmente, es suficiente dar un excedente de material de 0.2 - 0.3 mm de diámetro. Naturalmente la temperatura del temple será dada de acuerdo a la composición química del acero.

Para los aceros al aluminio y al cromo, los tiempos de austenización a temperatura de temple deberá ser suficiente para permitir una transformación completa y correcta. Como se ha

indicado anteriormente, la temperatura de revenido es superior a la de nitruración y su tiempo de permanencia a dicha temperatura es largo, seguido de un enfriamiento lento, evitando de esta forma la creación de tensiones internas.

Los materiales a tratar deben ser bonificados lo que comprende los siguientes tratamientos:

- a) Temple a una temperatura comprendida entre 850 °C y 950 °C, enfriado posteriormente en aceite, esta elevada temperatura es con el objeto de que los elementos aleantes entren en solución con la austenita comunicando resistencia y tenacidad al núcleo.
- b) Revenido por debajo de los 650 °C produciendo con esto una estructura sorbítica, formando una capa tenaz y eliminando la fragilidad resultante de la ferrita libre. El enfriamiento se lo realiza al aire.

1.4.4 Elementos que influyen en la velocidad de nitruración.

Entre los elementos que influyen en la velocidad de nitruración tenemos:

- a) El material a usar
 - b) Temperatura de tratamiento
 - c) Porcentaje de disociación
-
- a) El tipo de acero usado para la construcción de las piezas a nitrurar determinan el tiempo de tratamiento, por que son sus elementos aleantes los que determinan la mayor o menor velocidad del tratamiento, tenemos que la presencia del aluminio en mayor porcentaje tiende a disminuir la velocidad del tratamiento, así mismo el níquel también disminuye la velocidad al aumentar su porcentaje.
 - b) La temperatura es quizás el factor más importante en el tiempo de duración del tratamiento. La temperatura influye de la siguiente manera: al aumentar la temperatura la facilidad de penetración del nitrógeno se ve favorecida, disminuyendo de esta manera el tiempo de tratamiento. Teniendo como inconveniente que la capa a nitrurarse aumenta su fragilidad con el aumento de la temperatura.

c) El porcentaje de disociación del amoníaco influye en el tiempo de tratamiento en menor escala, teniendo importancia cuando se hace el tratamiento en doble etapa o proceso Floe⁶ en el mismo que la disociación aumenta su porcentaje, desde el 30 al 75%, reduciendo de esta forma los nitruros de hierro y a su vez la duración del tratamiento. Dicho tratamiento se lo detallará más adelante.

1.4.5 Espesor de la capa nitrurada

Una superficie endurecida por nitruración consta de dos zonas distintas, a saber: zona exterior y la zona nitrurada propiamente dicha.

La zona exterior se presenta como una capa blanca y se encuentra formada por nitruros de hierro la cual es de dureza inferior a la segunda zona, esta capa tiene un espesor de 0.05 mm como máximo, en la zona por debajo de esta capa sólo los nitruros aleados se han precipitado.

La profundidad de la región externa la determina la rapidez de difusión del nitrógeno, desde

la capa blanca hacia la zona nitrurada; por lo tanto el medio de nitruración debe contener solamente el nitrógeno suficiente para mantener la capa blanca. Cualquier incremento más allá de este punto sólo sirve para aumentar la profundidad de la capa blanca y no afecta el espesor de la capa interna.

La concentración de nitrógeno activo está determinada por el grado de disociación del amoníaco. Existen dos procesos de nitruración a saber: nitruración de una etapa y nitruración de doble etapa o proceso Floe⁶.

En el proceso de una etapa la disociación se mantiene entre el 15 y 30%, y su temperatura oscila entre 560 y 630 °C. El porcentaje de disociación del amoníaco y la temperatura es constante, mientras dure el tratamiento.

En el proceso de doble etapa, como su nombre lo indica, es realizado en dos partes. En la primera parte del proceso, la disociación del amoníaco se mantiene al 20% durante un período de 5 a 10 horas a una temperatura de 630 °C, durante el mismo se establece la capa blanca y se empiezan a formar el nitruro útil por difu-

sión fuera de dicha capa. En la segunda etapa la disociación del amoníaco se aumenta al 85%, manteniendo la misma temperatura de la etapa anterior. Con este proceso se consigue disminuir el espesor de la capa blanca, teniéndose como máximo 0.012 mm de espesor.

La capa blanca es frágil y tiende a astillarse cuando dicha capa excede el límite de espesor en el proceso de doble etapa. Las capas más gruesas producidas por el proceso de una etapa no se astillan y su resistencia al desgaste es buena y se sabe esperar que mejore su resistencia a la corrosión.

En los casos más corrientes interesa una profundidad de capa nitrurada, comprendida entre 0.2 y 0.4 mm para lo cual se necesitan tiempos de 20 y 60 horas.

1.4.6 Aplicaciones del proceso

La nitruración se usa extensamente para la fabricación de piezas que están sometidas a una gran exigencia mecánica y del medio, lo cual gravita sobre su rendimiento.

Entre las aplicaciones tenemos: la fabricación de cigueñales, motores navales y de aviación, maquinaria pesada, compresores, tornillos y camisas de máquinas inyectoras de plástico, coronas, impulsores de bombas, árboles de leva, ejes y piezas para la industria del petróleo, moletas y lo más importante desde el punto de vista de desarrollo tecnológico en nuestro medio, los moldes para fabricación de plástico por inyección.

Como se puede apreciar la nitruración es un proceso específico y sus aplicaciones son restringidas y se encuentra limitada para casos de penetración con un máximo de 0.80 mm, mientras que estas limitaciones, no son iguales para la cementación. Por otro lado, la resistencía de una superficie nitrurada al ablandamiento, es marcadamente superior al de una superficie cementada. Otras diferencias existen en término de tensiones residuales del material estructura metalúrgica, resistencia a la fatiga y al impacto, si bien resultaría difícil detallar la aplicación de la nitruración en fase gaseosa, no se podría prescindir de este

tratamiento si analizamos los rendimientos obtenidos en piezas como las que se han mencionado anteriormente.

1.4.7 Ventajas y desventajas del proceso

Entre las principales ventajas de la nitruración gaseosa tenemos:

1. Las deformaciones que sufren las piezas nitruradas son muy pequeñas, aproximadamente 0.02 mm.
2. La capa nitrurada es relativamente inoxidable, resistiendo las soluciones alcalinas.
3. La resistencia a la fatiga por corrosión en agua de mar es muy elevada.
4. La resistencia al desgaste es muy buena, pero inferior a la que produce el cromado duro.
5. La dureza persiste aún después de someter el material a calentamiento de 520°C, en

cambio que en la cementación la dureza decrece al ser sometido a temperaturas superiores a 200 °C.

Entre las desventajas del tratamiento tenemos:

1. La resistencia a la corrosión en los aceros inoxidable tratados, se reduce considerablemente.
2. El proceso requiere de largos ciclos
3. La superficie de la capa endurecida es muy frágil.
4. Se deben utilizar aceros especiales para lograr buenos resultados.
5. Los equipos y el control técnico necesario son muy costosos.
6. Antes de la nitruración es necesario someter al acero a dos tratamientos preliminares.

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

Los experimentos para la aplicación del Tratamiento Térmico de Nitruración Gaseosa, han sido llevados de acuerdo con la secuencia de operaciones que describe la técnica operativa.

2.1 TECNICA OPERATIVA

El procedimiento que se sigue para poner en marcha el equipo es el siguiente:

1. Calentar el horno de mufla hasta una temperatura de 590 °C.
2. Encender el generador de atmósfera hasta una temperatura de 850 °C.
3. Regular el control de flujo de gas amoníaco (NH_3) en 6.57 metros cúbicos por hora (m^3/h).

4. Realizar el barrido de la cámara del horno de mufla antes de colocar las probetas.
5. Limpiezas de las probetas antes del tratamiento
6. Ingresar las piezas al horno de mufla para la nitruración de acuerdo al programa de experimentación.
7. Retirar las probetas y enfriarlas al aire
8. Realizar ensayos metalográficos
9. Medir dureza y espesor de capa nitrurada

Instrumentos y equipos utilizados en el tratamiento.-

- a) Horno de mufla, marca LINDBERG, modelo TRET-ALL, cuyo rango de temperatura va desde 0 °C hasta 1100 °C
- b) Horno generador de atmósfera marca LINDBERG, modelo Atmo-Gen LAM-100.
- c) Microdurómetro marca RIEHLE-KENTRON, modelo AK-8

Material usado

El acero utilizado en la práctica es el acero SAE 4140, que se encuentra en el mercado en condiciones de temple y revenido a 34 Rc, o sea en estado de bonificado.

Su composición química es la siguiente:

Carbono	0.42%
Cromo	1.10%
Molibdeno	0.20%
Manganeso	0.80%

TABLA 2.1 Composición química
del acero bonificado
SAE 4140.

Características Mecánicas

Las características mecaánicas son suministradas por el distribuidor.

Resistencia a la tracción en estado máx. 75 kg/mm²
recocido.

Resistencia a la tracción en estado 85 - 100 kg/mm²
bonificado.

Resistencia en estado recocido máx. 20 Rc

Resistencia en estado bonificado 32 - 34 RC.

Dureza máxima en estado templado 52 Rc.

2.1.1 Horno de tratamiento

El tipo de horno usado en el presente tratamiento, es un horno de mufla marca TREET-ALL, con rango de temperatura 0-1100°C, el mismo que se muestra en la Fig. 2.1.

Dicho horno es controlada su temperatura automáticamente por un pirómetro marca Honeywell (Fig. 2.2). Además posee tres entradas por la parte posterior hacia el interior de la cámara en uno de ellos se realizó la conexión de la tubería, que viene desde el generador de atmós

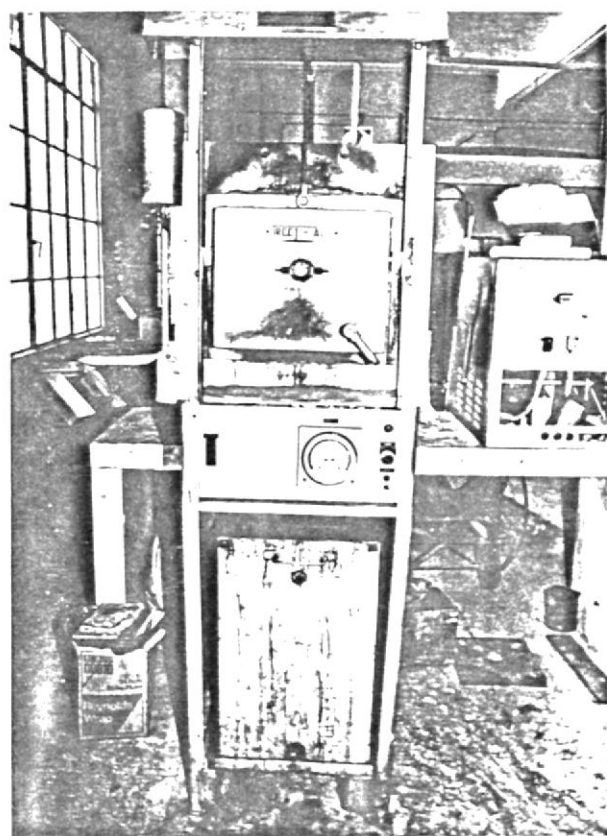


Fig. 2.1 Horno de tratamiento marca LINDBERG, modelo TREET-ALL, rango de temperatura 0-1100°C.

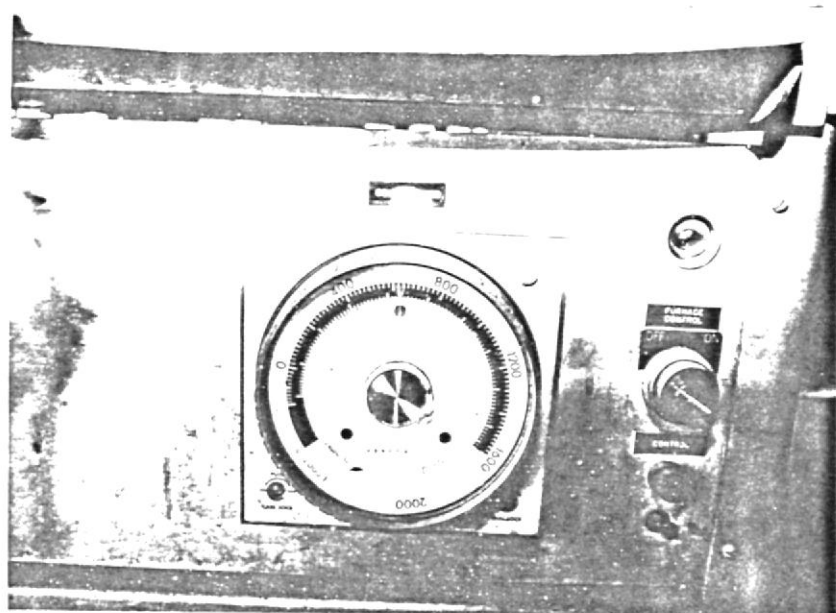


Fig. 2.2 Control automático de temperatura marca Honeywell.

fera con el amoníaco disociado, el otro tiene conectado la termocupla, quedando el último libre, permitiendo la circulación de los gases.

2.1.2 Generador de atmósfera

El equipo generador de atmósfera es el que realiza la disociación del amoníaco en sus constituyentes gaseosos que son: Nitrógeno e Hidrógeno, los mismos que son utilizados en la nitruración.

El generador de atmósfera utilizado es de marca LINDBERG, ATMO-GEN, modelo LAM-100 (Fig.2.3) el cual viene ensamblado, realizándose solamente la interconexión entre el cilindro de amoníaco y el generador, así mismo la conexión entre éste y el horno de mufla, de acuerdo al diagrama . (Anexo B)

A temperatura y presión atmosférica una libra de amoníaco ocupa aproximadamente 0.6 metros cúbicos, una vez disociado ocupa el doble del volumen, o sea, 1.2 metros cúbicos, estos datos se utilizan para calcular el flujo que se necesita para el tratamiento.

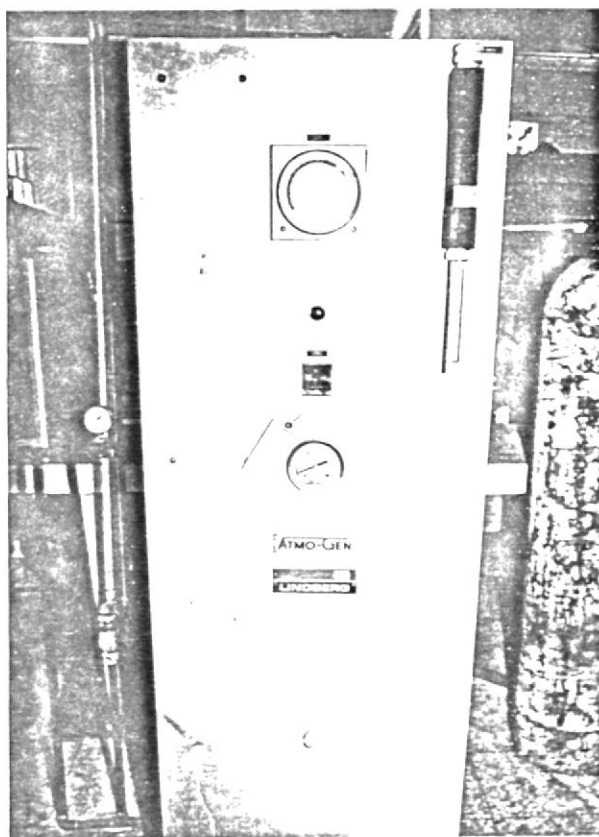


Fig. 2.3 Generador de atmósfera
Atmo-Gen, modelo Lam 100
marca LINDBERG.

El sistema opera a una presión aproximada de 0.003 kg/cm^2 , por lo cual el sistema viene con un regulador de presión, por cuanto el amoníaco entra al sistema con 0.0621 kg/cm^2 de presión.

OPERACION.- Con las válvulas del sistema, el amoníaco sufre la separación del nitrógeno e hidrógeno, en el generador de atmósfera, a una temperatura de 850°C , luego de ésto se habren las válvulas para que los gases fluyan hacia la cámara de tratamiento. El flujo debe ser controlado para tener siempre la cantidad requerida.

La mezcla del amoníaco disociado con el aire produce una explosión violenta, es por esto que no es conveniente abrir la cámara de tratamiento, mientras dure el mismo o cuando hay circulación de gases.

La instalación del sistema se la puede ver en el anexo B.

2.1.3 Puesta en marcha del equipo

La puesta en marcha del equipo representa la parte más importante del proceso. A continuación detallamos la secuencia a seguir.

- a) Encendido del horno de mufla hasta la temperatura de tratamiento, en este caso 560°C .
- b) Encender el horno generador de atmósfera hasta 850°C , las válvulas deben estar cerradas, previniendo con esto el flujo de amoníaco sin disociar.
- c) Luego de alcanzada la temperatura requerida en el generador de atmósfera, se abren las válvulas y se inyecta amoníaco disociado a la cámara de tratamiento, aproximadamente $6.57 \text{ m}^3/\text{h}$.
- d) Paralelamente con la inyección del amoníaco, el horno de tratamiento debe tener la temperatura adecuada. La primera inyección se la realiza con la puerta de la cámara de tratamiento abierta, para de esta forma

expulsar los gases existentes en su interior, previniendo la oxidación o la formación de mezclas explosivas del amoníaco con el aire.

- e) Una vez realizado esto se colocan las piezas en el horno y se dejan por el tiempo programado para el proceso, manteniendo el control sobre el flujo del amoníaco disociado.

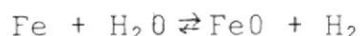
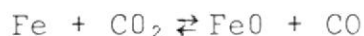
Estos pasos deben ser seguidos al poner en marcha el proceso y así evitar cualquier riesgo o accidente.

2.2 CONTROL DE ATMOSFERA

Los efectos del oxígeno para provocar la oxidación de las superficies metálicas durante el tratamiento térmico son bien conocidas. Durante el tratamiento térmico del acero, sin embargo se encuentra una dificultad adicional que es la descarburización, que inevitablemente acompaña a la formación de escamas en la superficie cuando el acero calentado se expone a una atmósfera que contenga oxígeno libre o en ciertas circuns-

tancias otros gases que contiene oxígeno combinado.

Bajo ciertas condiciones de temperatura y concentración estos gases entregan su oxígeno combinado a la superficie del acero caliente, de manera que tiene lugar la oxidación y descarbonización de éste. Así pues, el bióxido de carbono y el vapor de agua, que con frecuencia se consideran como gases inactivos químicamente, pueden reaccionar a altas temperaturas con la superficie del acero.



Así pues se encuentran presente en la atmósfera de un horno de tratamiento térmico, tanto el bióxido de carbono como el vapor de agua pueden convertirse en agentes oxidantes. El bióxido de azufre puede causar oxidación en la superficie del acero de una manera similar.

La presencia de gases reductores tales como: hidrógeno, monóxido de carbono y metano, en la atmósfera del horno, no pueden conducir a la oxidación y formación

de escamas en la superficie del acero. Sin embargo, pueden conducir a alteraciones en el contenido carbónico de la superficie, siempre que tales reacciones se encuentren estimuladas por condiciones de temperatura y concentración adecuada. El hidrógeno puede dar lugar a la descarburación por combinarse con parte del carbono presente en la superficie del acero:



El monóxido de carbono y cualesquier hidrocarburo no quemado del tipo metálico conducen más probablemente a la carburación de la superficie.



se disuelve en el
acero.



El carbono liberado, resultado de las reacciones anteriores es absorbido por la superficie del acero. En todas las reacciones anteriores, la concentración relativa de los gases de que se tratan controlan el efecto de la carburación o descarburación de un gas particular sobre el acero. La temperatura del horno afecta

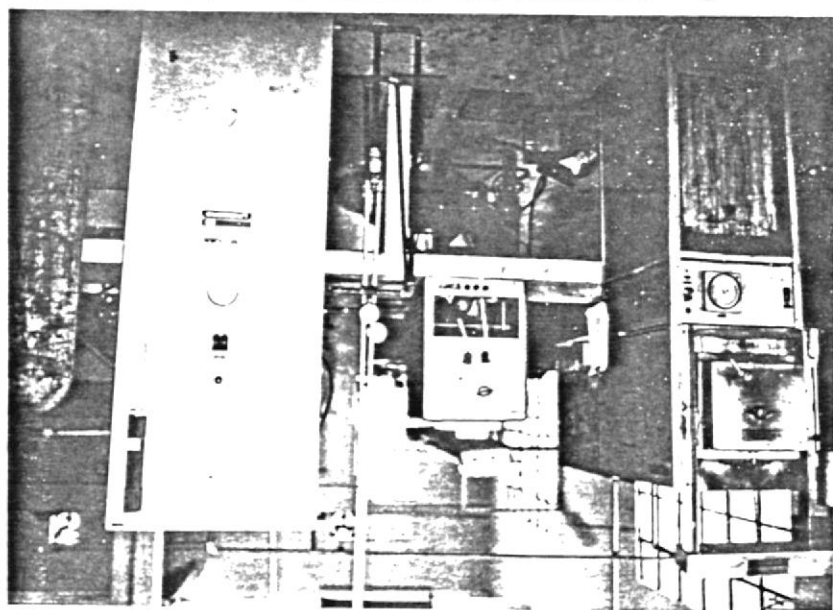
rá también el grado de disociación de los gases y en general, mientras más alta sea la temperatura, mayor será la extensión de las reacciones químicas en la superficie del acero. Es por esto que es necesario efectuar el barrido de gases del interior del horno de tratamiento antes de proceder con la nitruración.

El amoníaco disociado a la vez que reacciona con el acero a nitrurar, sirve como atmósfera protectora, para lo cual es necesario tener un flujo constante.

2.2.1 Porcentaje de disociación

Parte del control del proceso, obviamente debe analizar el grado real de disociación que se obtiene en el generador de atmósfera, aunque el fabricante del equipo garantiza el grado de disociación adecuado. En razón de tener un concepto claro de la transferencia de esta tecnología, debería haberse reportado este dato, pero la ESPOL, lamentablemente, no cuenta con un equipo que pueda realizar esta medición en el sitio de trabajo, de tal manera que con mucho pesar, el autor de este trabajo tiene que encargar dicho trabajo a otros intereza-

Fig. 2.4 Instalación de los equipos utilizados en el proceso de nitración.



dos en el tema, el mismo que se tratará también en las recomendaciones a fin de incitar a funcionarios de la Institución a que superen esta deficiencia.

2.2.2 Control de temperatura

A fin de entender que uno de los parámetros más importantes sobre los resultados finales a tal grado, que su precisión en los hornos es más o menos 1°C , regulación que sólo se logra con controles muy sofisticados de pirometría.

La pirometría se ocupa de la medición de altas temperaturas, generalmente superiores a los 510°C , y los instrumentos utilizados para estos propósitos se conocen como pirómetros.

La termometría se ocupa de la medición de temperaturas inferiores a los 510°C y los instrumentos utilizados para este propósito se llaman termómetros.

Los hornos utilizados en este tratamiento, con tienen controles de temperaturas similares, los cuales son de la marca Honeywell, rango de me-

dición de temperatura 0-1100°C, voltaje de funcionamiento 240V; grado de precisión es de +, - 1°C. Dicho control se lo puede observar en la figura 2.2.

El control de temperatura lo podríamos dividir en dos partes muy importantes:

- a) Calentamiento uniforme del acero hasta una temperatura predeterminada.
- b) Enfriamiento con una velocidad tal que produzca en el acero el tipo de estructura deseada.

Aún cuando desde tiempo antiguo, el acero se ha tratado térmicamente con éxito, por artesanos que usaban conocimientos que se basaban en una larga experiencia en la estimación visual de la temperatura, el tratamiento térmico actual, generalmente demanda el control de esta temperatura, ya que sólo en esta forma se pueden obtener propiedades en números crecidos de componentes idénticos.

Es obvio que en el endurecimiento de una pieza de acero hipo-eutectoide, a menos que el acero se caliente completamente arriba de su temperatura crítica superior, habrá una retención de algo de ferrita en la estructura, tanto antes como después del enfriamiento. Al mismo tiempo, el acero no debe calentarse demasiado arriba de su temperatura crítica, superior antes del enfriamiento para que no se presente el crecimiento de grano con todas sus desventajas. En consecuencia la gama de temperaturas en que puede ser templadas una pieza de acero, es en la práctica bastante pequeña y la adopción de un sistema de control pirométrico, resulta en consecuencia esencial. Además, de muchos procesos de tratamientos térmicos aplicados al acero se llevan a cabo a temperaturas inferiores a A_{c1} , y por lo tanto no es posible estimar estas temperaturas por el color. La necesidad de hornos controlados pirométricamente, resulta obvio.

Las fallas estructurales con el uso de temperaturas inadecuadas, no son las únicas dificultades que pueden presentarse en el tratamiento

térmico del acero. Una atmósfera químicamente inadecuada dentro del horno, puede tener efectos adversos sobre la composición química y en consecuencia, sobre las propiedades físicas de la capa de acero superficial. El oxígeno en la atmósfera del horno, causará descarburación de la superficie de la que se trata térmicamente.

En el caso de aceros de herramientas, esto producirá pérdidas de dureza, y en cualquier acero, a una pérdida de uniformidad de las propiedades en diferentes puntos de su sección. Puede ser necesario entonces, adoptar alguna forma de control de la atmósfera del horno. Aún cuando la estructura obtenida como resultado del tratamiento térmico no depende directamente de la rapidez del calentamiento inicial, en la práctica, el calentamiento debe llevarse a cabo rápidamente como sea posible, para reducir al mínimo el crecimiento del grano de la componente tratada.

2.2.3 Control de presión

El control de presión es de vital importancia

para el tratamiento de nitruración, ya que el gas disociado no puede entrar al generador de atmósfera a una presión superior a 0.005 kg/cm^2 y es por esta razón que el sistema viene con un reductor de presión de 0.0625 kg/cm^2 , que es la presión que nos da el tanque de amoníaco en la línea de alta, a 0.003 kg/cm^2 , que debe ser la presión de entrada al Atmo-Gen.

Estas presiones están controladas por dos manómetros, uno para la línea de alta y el otro para la de baja presión. El regulador de presión es del rango de reducción de 0.125 kg/cm^2 a 0.003 kg/cm^2 , el sistema además cuenta con dos válvulas de seguridad las cuales sirven de alivio en caso que los límites anteriormente dichos, son superados tanto en la línea de alta, como en la de baja presión respectivamente. Además, de estos controles tenemos el medidor de flujo por medio del cual sabemos la cantidad de amoníaco que entra al generador de atmósfera, es de señalar que el volumen de gas disociado es el doble al que entra al generador.

La medición de la presión dentro del generador se lo efectúa por medio de un manómetro, el

mismo que viene ensamblado al sistema, el mismo se lo observa en la Fig. 2.5.

2.3 PRUEBAS PRELIMINARES CON ACEROS ORDINARIOS

A continuación se da la composición química del acero usado en las experiencias preliminares, acero SAE 3315

Carbono	0.14% - 0.18%
Manganeso	0.50% - 0.60%
Silicio	0.30%
Níquel	3.50%
Cromo	0.80%

Las probetas fueron obtenidas de la siguiente forma:

- a) El acero existente en el mercado, su forma de suministro, es en barras. Tabla 2.2.
- b) La barra cortada en dimensiones aproximadas de 4cm, largo de la probeta.
- c) A estas probetas deberá dársele un pulido y acabado total, con la finalidad de eliminar todas las impurezas. El acabado total es debido también, a que cuando se hace el tratamiento de nitruración

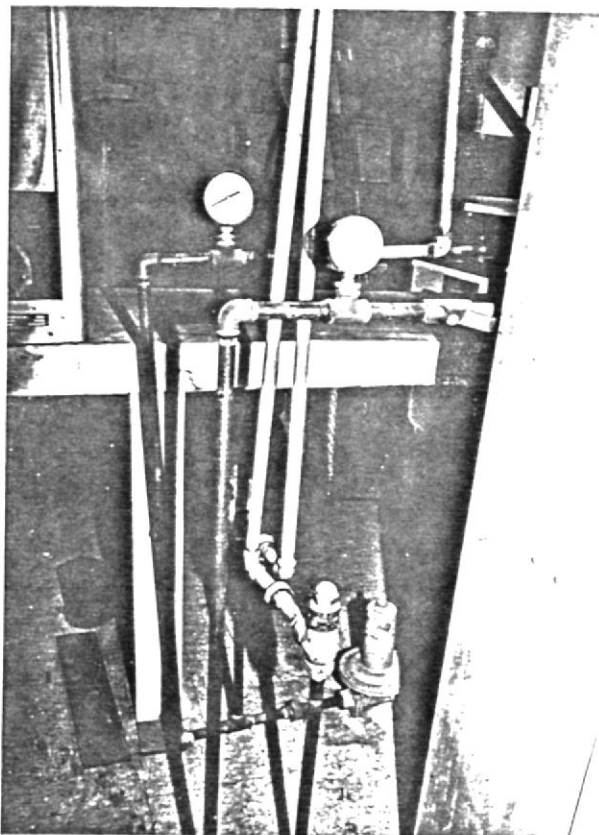


Fig. 2.5 Controles de presión del sistema

gaseosa la capa formada es delgada, lo cual impide un mecanizado posterior ya que se debilitaría o eliminaría esta capa.

En las tablas 2.3 y 2.4, se dan los resultados obtenidos al ser tratado este acero a 560°C . Las figuras 2.10 y 2.11, corresponden a las curvas obtenidas del acero SAE 3315.

El acero SAE 3315 es suministrado en forma normalizado o sea, que no ha sufrido ningún tratamiento, es por esto que el mismo tuvo que ser bonificado antes del tratamiento de nitruración, lo cual comprende:

- a) Temple a 960°C durante 30 minutos y luego enfriado en aceite.
- b) Revenido a 640°C durante 4 horas y enfriado al ambiente.

La dureza alcanzada luego de estos tratamientos, es de 22 Rc, dureza con la cual se comienza el tratamiento de nitruración, en el cual se alcanzó 46 Rc de dureza máxima, con un espesor máximo de capa de 0.51 mm.

2.4 PRUEBAS CON ACERO BONIFICADO SAE 4140 EN AMONIACO

Entre los diversos factores que se deben tener en cuenta para seleccionar el tipo de acero para nitruración son:

- a) Forma y tamaño de la pieza
- b) Aleantes del acero
- c) Costo
- d) Suministro (normalizado, bonificado)

Luego de analizar todos estos criterios de selección se ha convenido que para los propósitos de investigación del proceso de nitruración en medio gaseoso, el elemento más relevante para la selección, es el mencionado en el literal (b), en relación a la utilización que se recomienda en este trabajo, o sea la nitruración de moldes usados para la producción de plásticos por inyección.

Por esta razón se escogió el acero SAE 4140.

2.5 ENSAYOS DE LABORATORIO

Posterior a las pruebas preliminares, que sirvieron para verificar el procedimiento de operación del equiu



Fig. 2.6 Probetas antes de la nitruración.

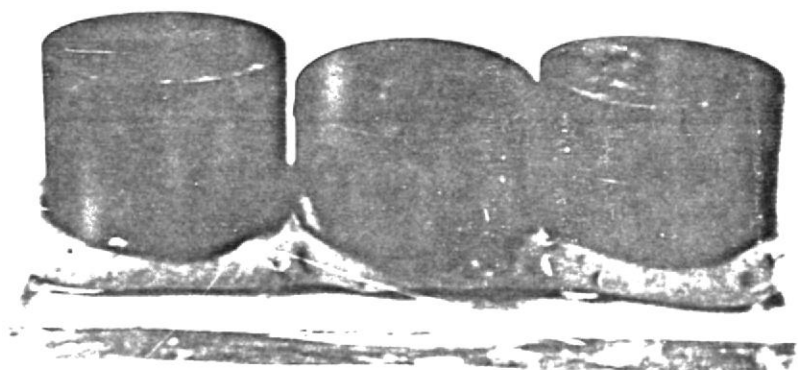
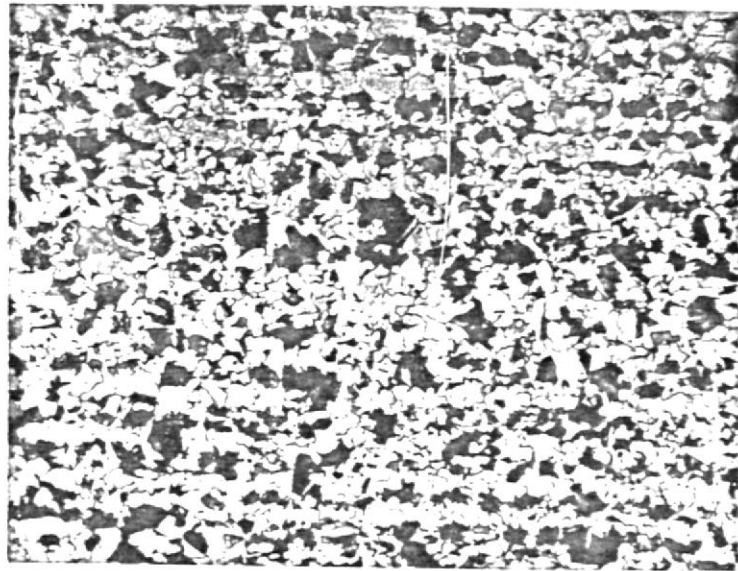


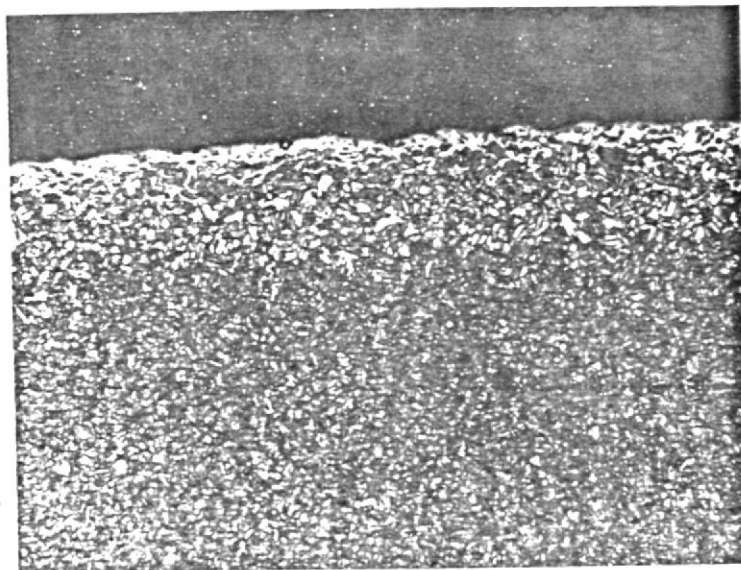
Fig. 2.7 Probetas luego de la nitruración.



200x

Nital 2%

Fig. 2.8. Zona exterior de un acero SAE 3315, sin tratamiento térmico de nitruración. Se aprecia la estructura Uniforme de bandas de ferrita y perlita, característico de los aceros laminados en caliente.



200x

Nital 2%

Fig. 2.9 Zona exterior de un acero
ZAE 3315 nitrurado. Se
observa la zona afectada
por el tratamiento.

Tiempo en horas		Penetración en milímetros (máxima)			
	1. medida	2. medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	0.060	0.062	0.061	0.062	0.0613
20	0.100	0.102	0.102	0.101	0.1012
30	0.205	0.204	0.206	0.206	0.2052
40	0.290	0.288	0.289	0.293	0.2900
50	0.402	0.400	0.402	0.403	0.4018
60	0.461	0.460	0.462	0.458	0.4603
70	0.511	0.526	0.518	0.523	0.5195

TABLA 2.2 Mediciones de la capa nitrurada
de un acero SAE 3315 tratada a
560°C.

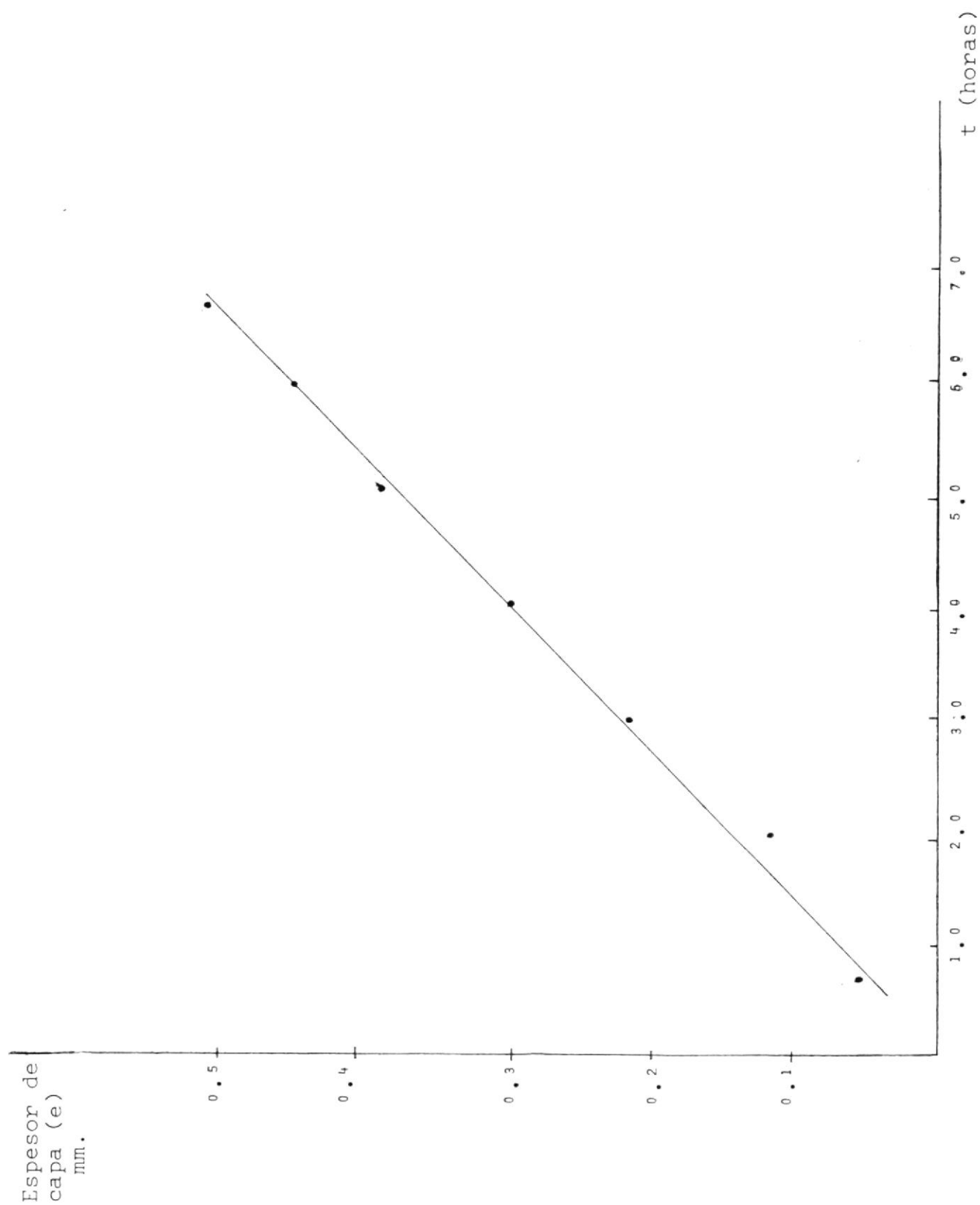


Fig. 2.10 Espesor de capa vs. Tiempo
Material SAE 3315.

TEMPERATURA 560°C

TIEMPO EN HORAS		DUREZA Rc (máxima)			
	1. medida	2. medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	25.0	24.0	23.5	22.4	23.72
20	28.0	28.1	29.4	26.2	27.93
30	30.2	33.0	31.5	32.0	31.68
40	34.0	33.5	32.3	34.2	33.50
50	38.0	39.0	37.8	38.0	38.20
60	43.1	43.6	44.0	44.0	43.68
70	46.2	46.8	45.9	45.1	46.00

TABLA 2.3 Mediciones de dureza en un acero SAE 3315 nitrurado a una temperatura de 560°C.

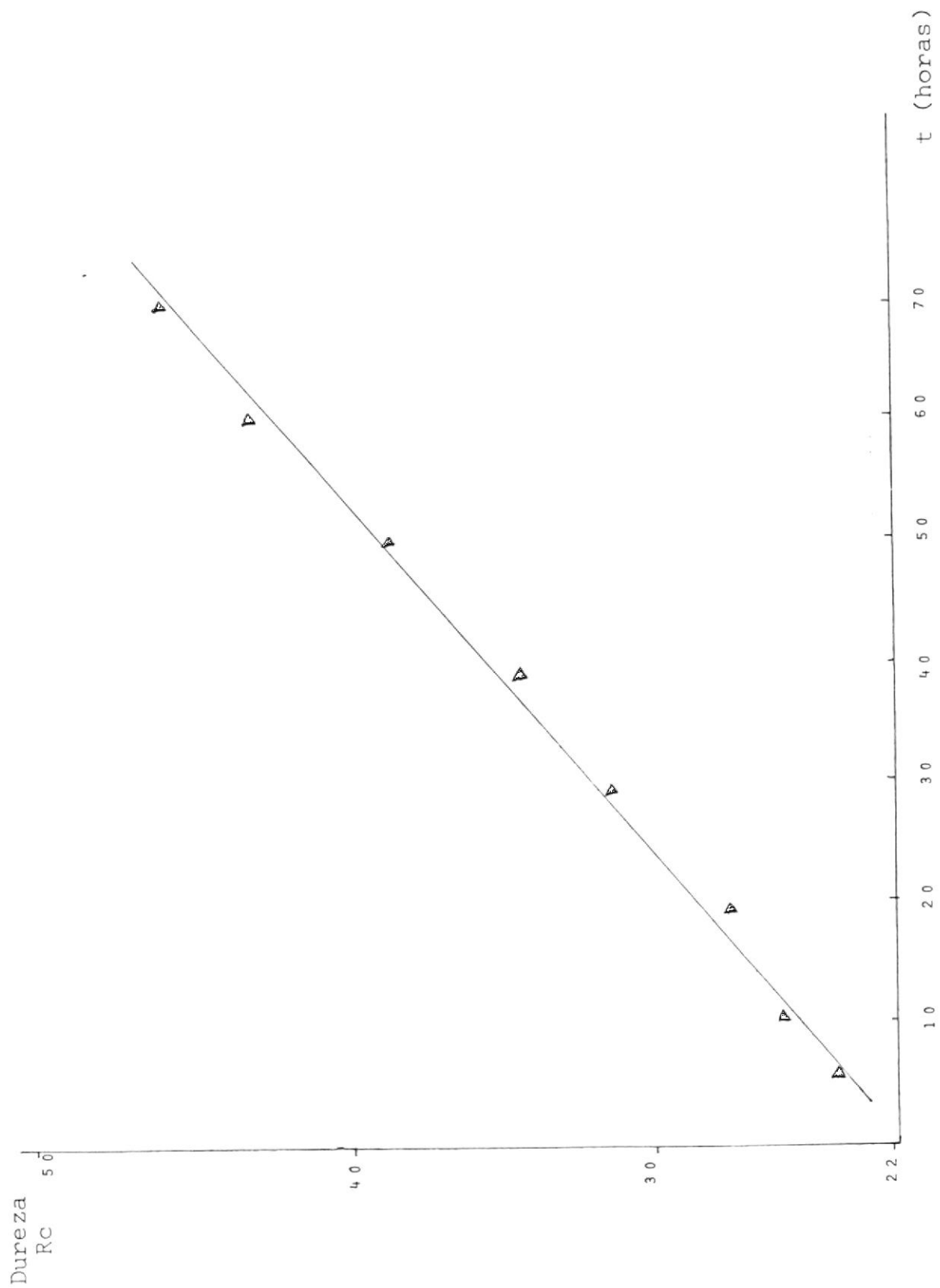


Fig. 2.11 Dureza vs. Tiempo material
SAE 3315.

po y la calidad del acero a usar, se procedió a realizar las pruebas de laboratorio con acero 4140, a fin de estudiar los parámetros involucrados en la técnica a saber: Tiempo de permanencia en el horno, dureza superficial y profundidad de penetración.

2.5.1 Espesor de capa nitrurada vs tiempo a diferentes temperaturas.

Para poder apreciar y medir con nitidez el espesor de capa que se ha logrado a los diferentes tiempos de tratamiento, es imprescindible efectuar una labor de adecuamiento de las probetas. Debemos recalcar, que la capa a medirse no es una adición a la superficie de trabajo, sino una difusión que ha sufrido el material de átomos de nitrógeno a dichas temperaturas, la misma que es uniforme en toda la probeta.

Este adecuamiento consiste en el corte transversal de la probeta aproximadamente 1 cm. Luego se efectúa el pulido de desbastado y se lo ataca con Nital 2%, para diferenciar la microestructura de las partes que han sufrido adición de nitrógeno, de las que han quedado con su estructura original.

TRATAMIENTOS TERMICOS.- A continuación se da una lista de las temperaturas recomendadas, por el fabricante para los diversos tratamientos a los que puede ser sometido este acero.

Forjar		1050 - 850°C
Normalizar		850 - 880°C
Recocer		680 - 720°C
Templar		830 - 850°C (aceite)
Revenir		hasta 650°C

El acero es suministrado en estado bonificado y en barras circulares de diferentes diámetros, en la tabla 2.4 se da una lista de los diferentes diámetros y pesos. Para la experiencia se utilizó una barra de 18 mm de diámetro, de la cual se obtuvieron probetas de 5 cm de largo.

Luego de obtener las probetas, estas fueron sometidas a limpieza con lijas y paño, con el fin de eliminar todas las impurezas existentes en la superficie a fin de prevenir alguna falla en el tratamiento.

Después de limpiar las probetas se procede al encendido del sistema, siguiendo la secuencia antes mencionada. Las piezas tratadas térmicamente presentan un color plumizo. Luego de el espesor de capa logrados a diferentes temperaturas y tiempos.

Luego de tener con nitidez la superficie a medir en el ocular del microscópico, se procede a la medición de la capa nitrurada, tomada desde la superficie hacia el centro de la probeta, tomando como referencia la variación de la microestructura. La medición se la realiza en micras.

2.5.2 Dureza vs tiempo

Para observar la función que realizan estas variables, se toma la dureza superficial de las probetas tratadas a diferentes horas, esta dureza es constatada en el microdurómetro ya que la capa nitrurada es muy pequeña y puede ser estropeada por el durómetro.

Para tomar estas durezas no es necesario hacer un maquinado posterior. Las tomas de durezas

se realiza tanto en forma transversal como longitudinal.

En las siguientes tablas se dan los valores correspondientes a las mediciones, cuyos valores están graficados en curvas a diferentes temperaturas.

2.5.3 Metalografía

Para efectuar este ensayo, se cortaron seccionalmente las probetas tratadas y preparadas metalográficamente para su observación, a fin de determinar la microestructura del tratamiento.

2.5.4 Ensayo de resistencia al desgaste

Después de haber realizado la nitruración, se efectuó los ensayos de resistencia al desgaste, utilizando para el caso el aparato construido para este objetivo por el Ing. Luis Eras .

TEMPERATURA 560°C

Tiempo en horas	Espesor de capa (mm) Máximo				
	1. medida	2. medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	0.12	0.14	0.11	0.13	0.125
18	0.35	0.36	0.34	0.33	0.345
24	0.42	0.46	0.45	0.48	0.452
36	0.51	0.55	0.58	0.54	0.545
45	0.63	0.61	0.64	0.64	0.630
50	0.70	0.70	0.70	0.72	0.705
60	0.80	0.82	0.79	0.83	0.810

TABLA 2.4 Mediciones del espesor de la capa nitrurada a la temperatura de 560°C y a diferentes horas.

TEMPERATURA 620°C

Tiempo en horas		Espesor de capa (mm) Máxima			
	1. medida	2 medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	0.18	0.19	0.17	0.16	0.175
18	0.38	0.37	0.37	0.37	0.372
24	0.52	0.51	0.54	0.53	0.525
36	0.61	0.60	0.63	0.60	0.610
45	0.72	0.73	0.70	0.72	0.718
50	0.76	0.75	0.77	0.75	0.758
60	0.84	0.84	0.85	0.84	0.840
70	0.88	0.87	0.86	0.88	0.872

TABLA 2.5 Mediciones del espesor de capa nitrurada de un acero SAE 4140, a la temperatura de 620°C a diferentes tiempos.

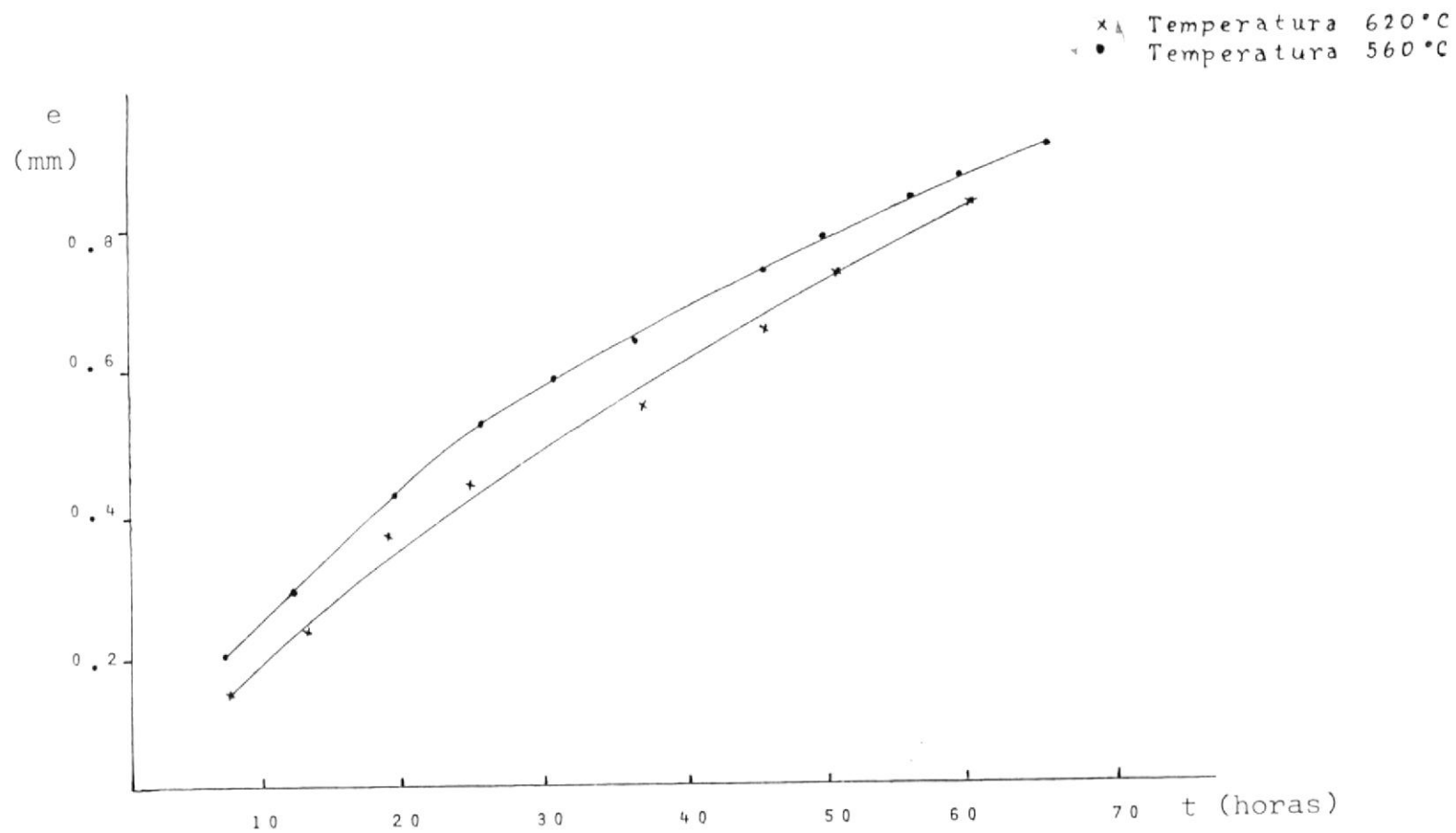


Fig. 2.12 Espesor de capa vs. Tiempo a diferentes temperaturas.
Material acero SAE 4140.

TEMPERATURA 560°C

Tiempo en horas	Dureza Rc (Máxima)				
	1. medida	2. medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	35.0	34.0	36.0	35.0	35.0
18	48.5	48.0	49.0	47.0	48.1
24	52.0	53.0	51.0	52.0	52.0
36	55.0	57.0	56.0	56.0	56.0
45	61.0	62.3	60.8	61.6	61.4
50	64.1	63.2	66.0	63.8	64.3
60	68.6	69.1	70.3	68.9	69.2

TABLA 2.6 Mediciones de dureza en un acero SAE 4140, nitrurado a una temperatura de 560°C.

TEMPERATURA 620°C

Tiempo en horas		Dureza Rc (Máxima)				
		1. medida	2. medida	3. medida	4. medida	Promedio
6	34.5	34.7	34.5	34.6	34.58	
18	42.4	42.6	42.5	42.8	42.58	
24	47.3	47.0	47.5	47.2	47.25	
36	51.2	51.0	51.0	51.5	51.18	
45	56.8	56.4	56.8	56.3	56.58	
50	62.1	62.5	62.4	62.3	62.33	
60	64.0	63.8	64.0	64.0	63.95	
66	66.2	66.1	66.0	66.5	66.20	

TABLA 2.7 Mediciones de la dureza en un acero SAE 4140 nitrurado a la temperatura de 620°C.

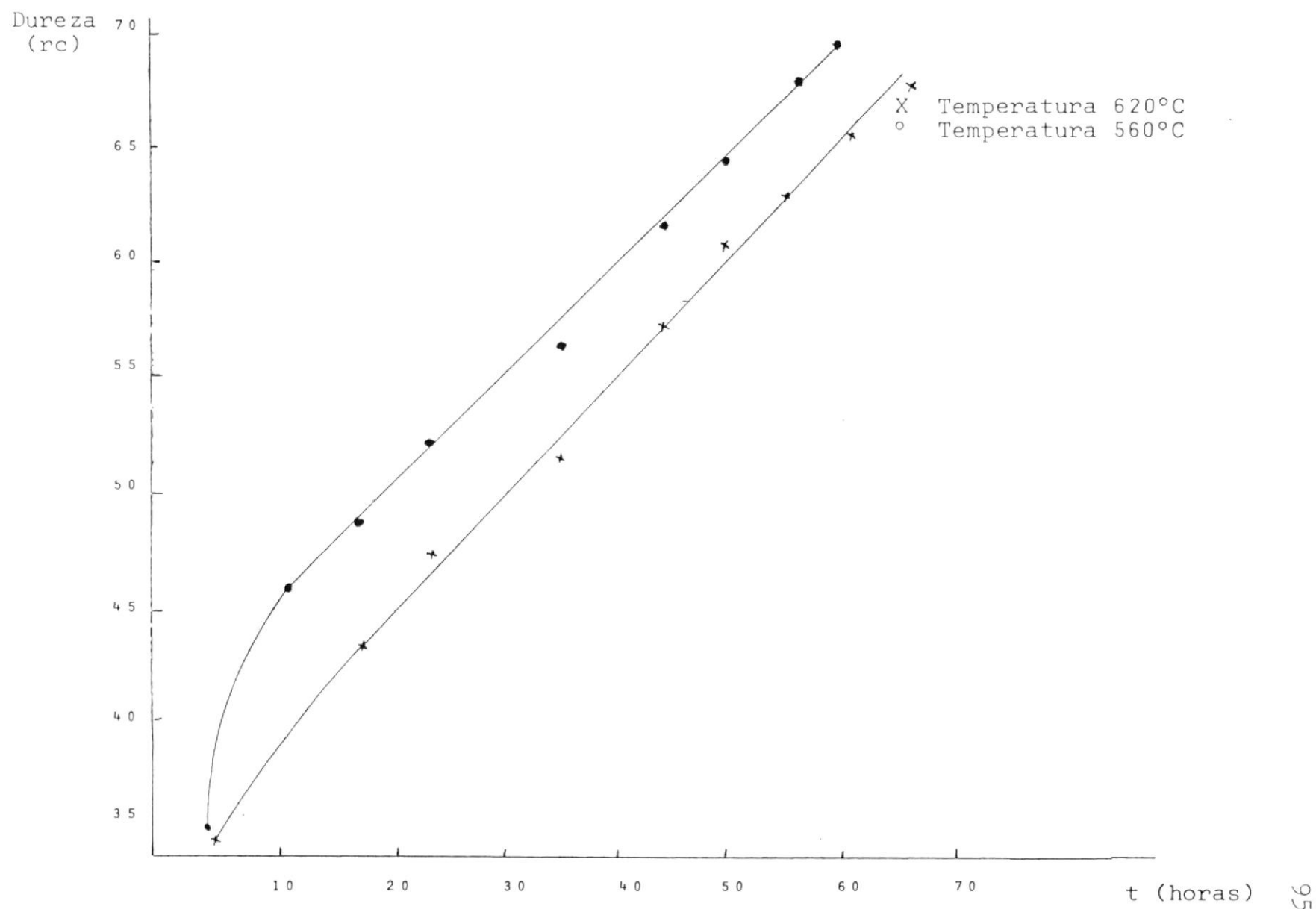


Fig. 2.13 Dureza vs. Tiempo a diferentes temperaturas. Material SAE 4140.

TEMPERATURA 560°C

Espesor de capa (mm).	Dureza Rc			
	18 horas	36 horas	50 horas	60 horas
0.05	40.0	38.0	48.0	48.0
0.10	44.0	45.0	55.0	56.0
0.20	46.5	50.0	60.0	65.5
0.30	42.0	56.0	63.0	69.0
0.40	36.0	53.0	63.0	70.0
0.45	34.0	50.5	58.0	66.0
0.50	34.0	47.5	56.0	60.5
0.55	34.0	45.0	50.5	53.5
0.60	34.0	41.0	48.0	49.0
0.70	34.0	38.0	45.0	45.5
0.80	34.0	34.0	38.0	39.0
0.90	34.0	34.0	34.0	34.0

TABLA 2.8 Espesor de capa Vs. Dureza a diferentes horas.

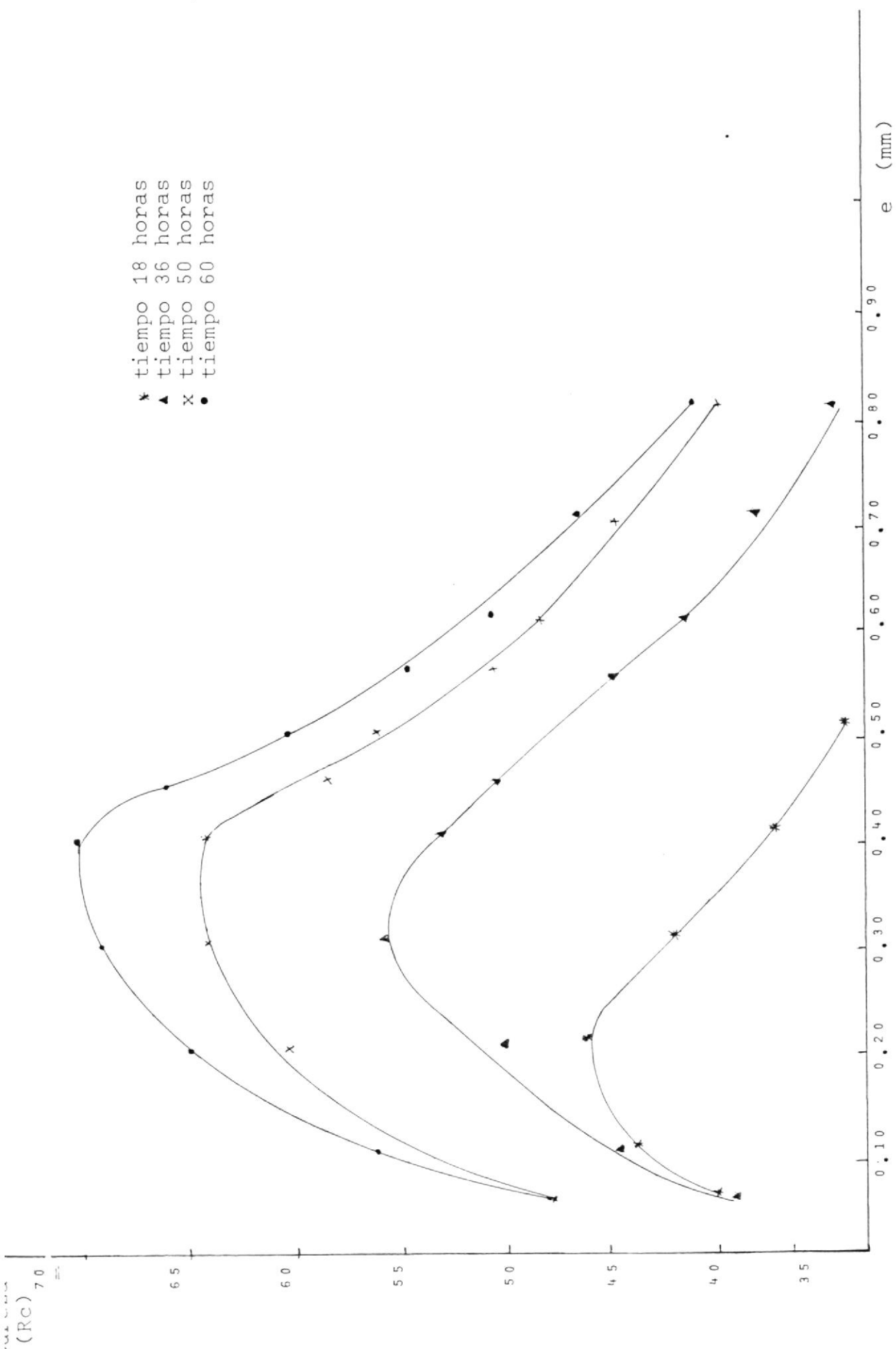


Fig. 2.14 Dureza Vs Espesor de Capa
Material acero SAE 4140
Temperatura 560°C.

TEMPERATURA 620°C

Espesor de Capa (mm)	Dureza Rc			
	18 horas	24 horas	45 horas	70 horas
0.05	34.0	38.0	39.0	40.0
0.10	38.0	42.0	42.0	45.0
0.20	42.5	47.1	48.0	51.0
0.30	38.5	43.0	52.0	56.0
0.40	38.0	38.0	56.6	62.0
0.45	35.0	36.0	50.4	66.0
0.50	34.0	35.2	46.0	60.0
0.55	34.0	34.0	44.0	58.3
0.60	34.0	34.0	38.0	48.4
0.70	34.0	32.0	35.0	39.7
0.80	34.0	34.0	34.0	37.4
0.90	34.0	34.0	34.0	36.1

TABLA 2.10 Espesor de capa Vs dureza a diferentes horas.

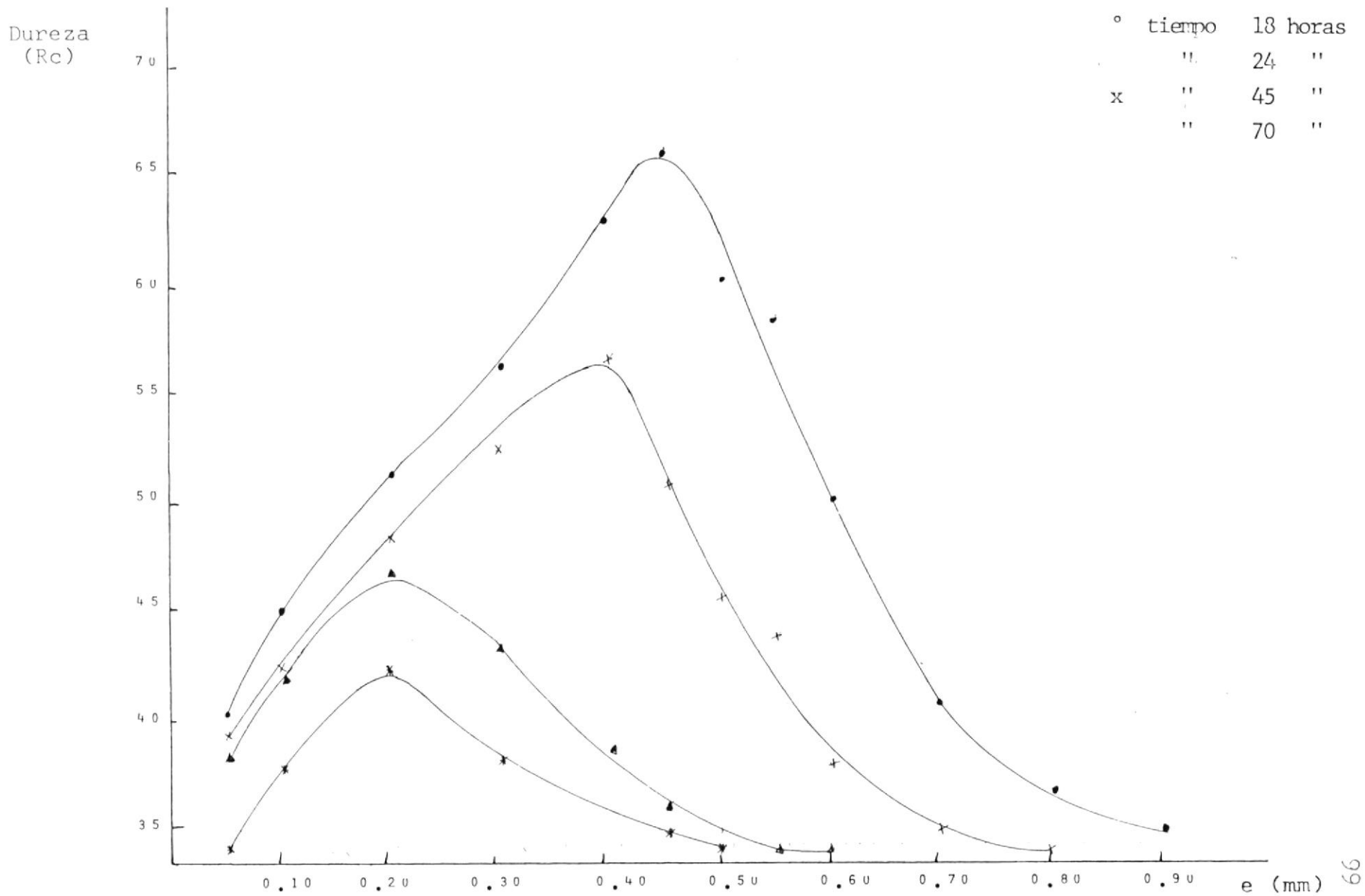
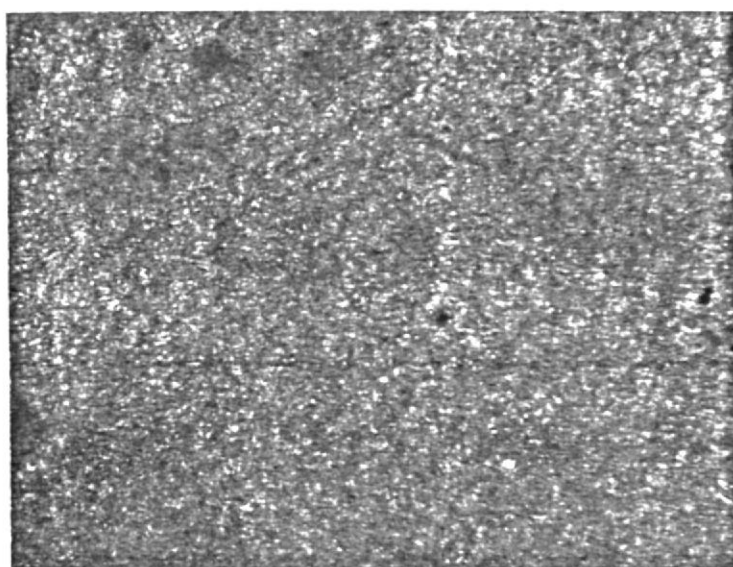


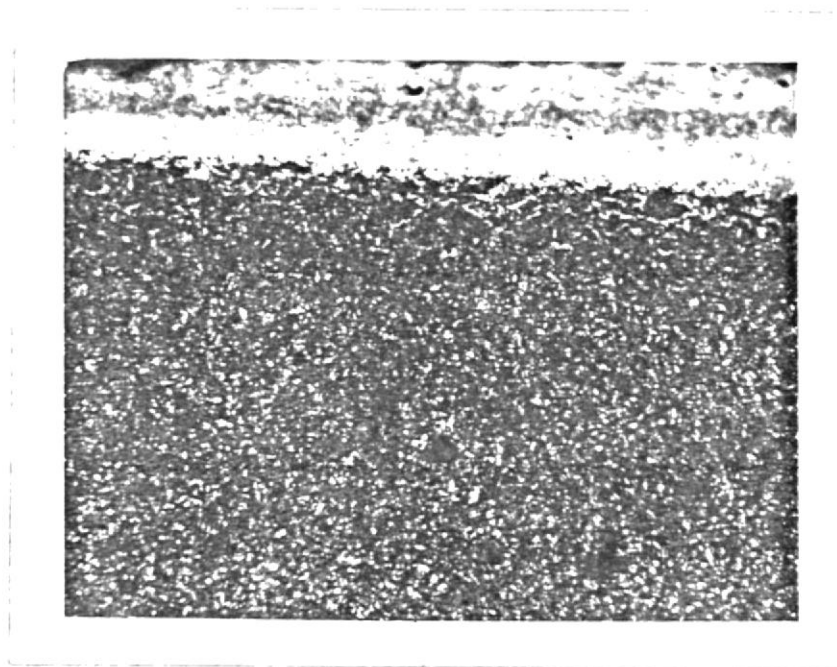
Fig. 2.15 Dureza vs. Espesor de capa, Material acero SAE 4140
Temperatura 620°C.



200x

Nital 2%

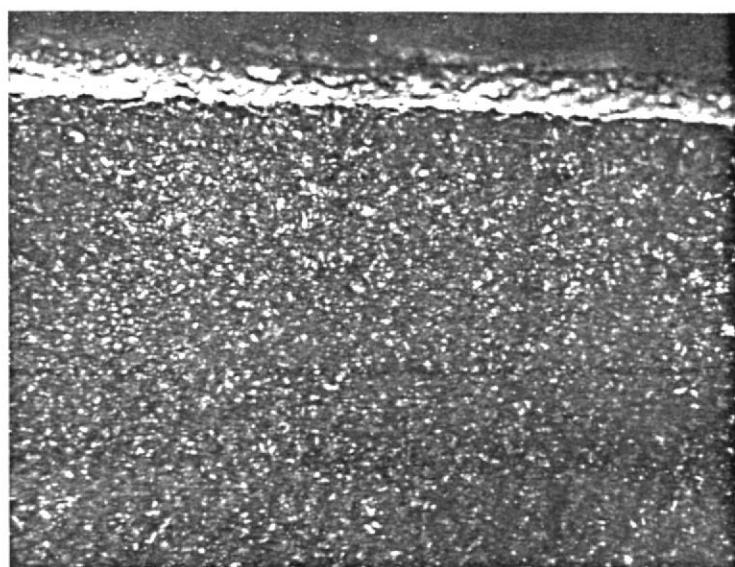
Fig. 2.16 Probeta correspondiente a
un acero bonificado SAE
4140, sin tratamiento.



200x

Nital 2%

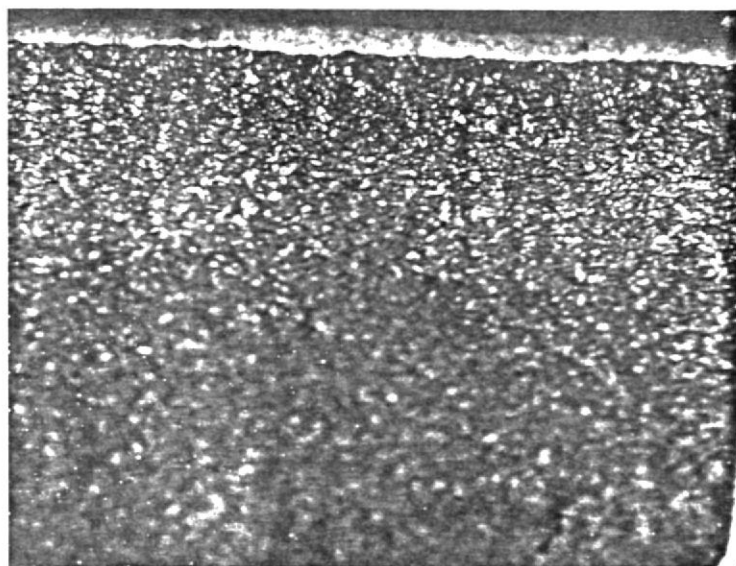
Fig. 2.17 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 560°C
Tiempo de tratamiento 18h.



200x

Nital 2%

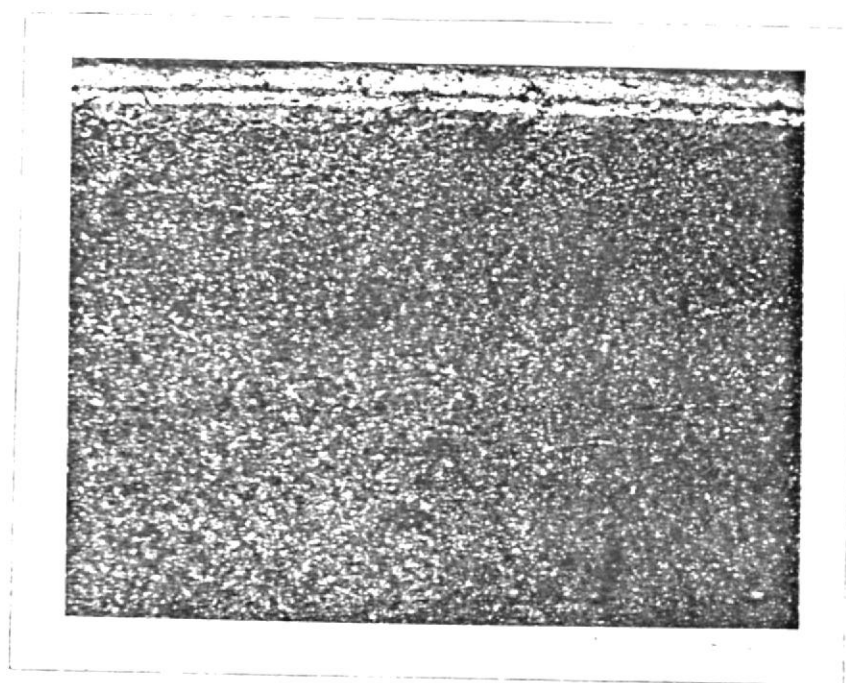
Fig. 2.18 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 560°C.
Tiempo de tratamiento 24h.



200x

Nital 2%

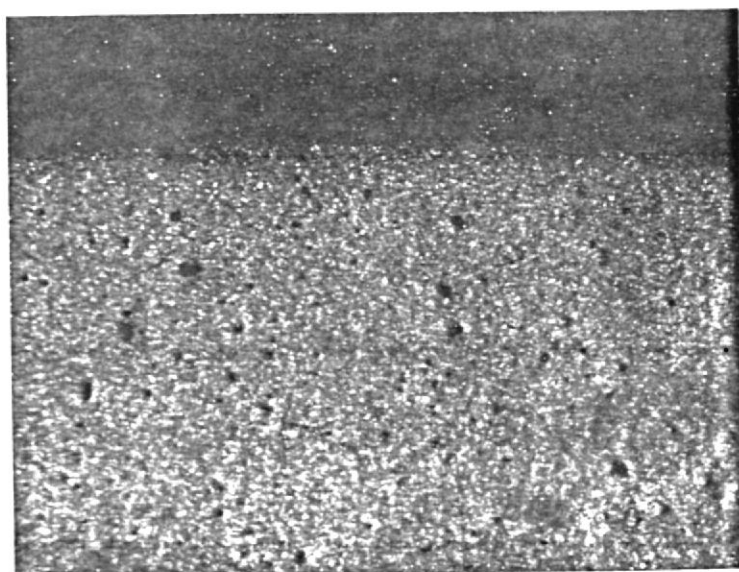
Fig. 2.19 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 560°C.
Tiempo de tratamiento 36h.



200x

Nital 2%

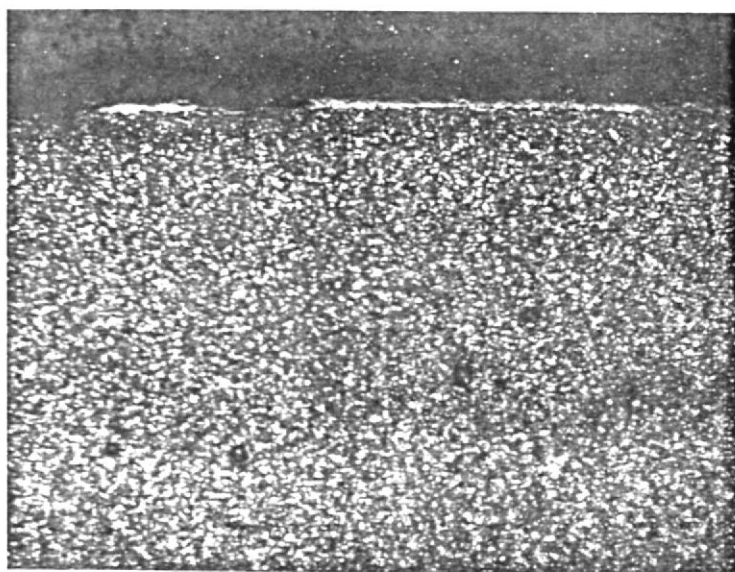
Fig. 2.20 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 560°C.
Tiempo de tratamiento 60h.



200x

Nital 2%

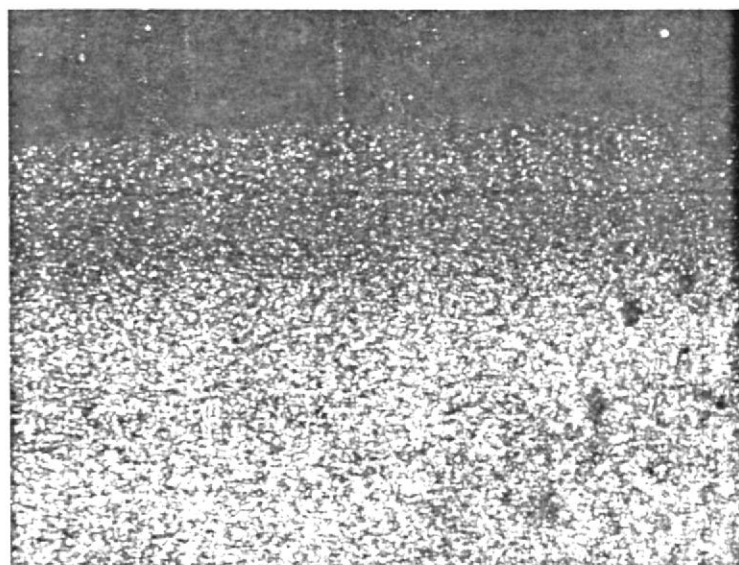
Fig. 2.21 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 620°C.
Tiempo de tratamiento 18h.



100x

Nital 2%

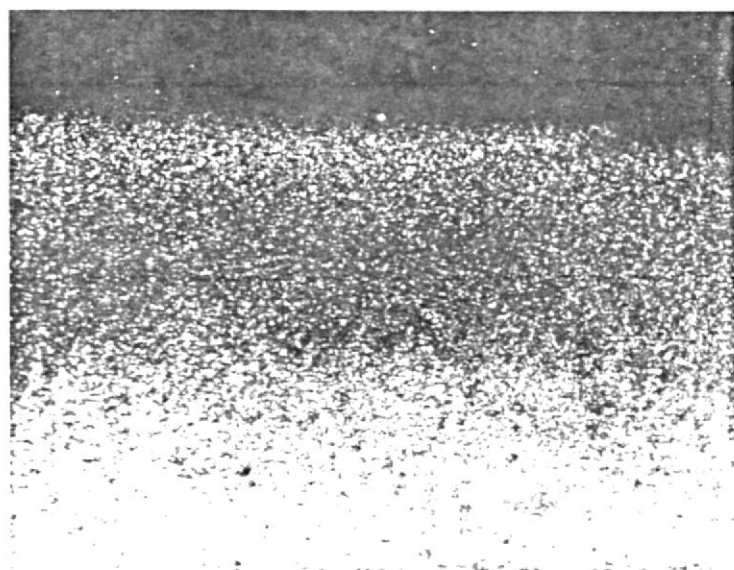
Fig. 2.22 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 620°C.
Tiempo de tratamiento 24h.



100x

Nital 2%

Fig. 2.23 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 620°C.
Tiempo de tratamiento 45h.



100x

Nital 2%

Fig. 2.24 Zona exterior de un acero
SAE 4140, tratado a 620°C.
Tiempo de tratamiento 70h.

TIPO DE ACERO	LONGITUD (mm)	DIAMETRO INICIAL (mm)	DIAMETRO FINAL (mm)	VELOCIDAD RPM	TIEMPO min.
SAE 4140*	90	18.0	17.8	450	15
SAE 4140**	90	18.0	18.0	450	30
SAE 4140***	90	18.0	18.0	450	30

TABLA 2.11 Resultados del ensayo al desgaste

* Sin tratamiento térmico de nitruración
 ** Con tratamiento térmico de nitruración a 560°C
 *** Con tratamiento térmico de nitruración a 620°C

CAPITULO III

DISCUSION DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo es de dar a conocer un proceso de endurecimiento superficial de las piezas de acero, con el cual se combinan algunas características mecánicas como son: Resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga y además, que pueden trabajar a temperaturas relativamente altas (400°C), sin perder sus propiedades citadas. Este es el caso típico de aplicación en los moldes de acero, que sirven para moldear el plástico por extrusión o inyección. En esta parte se va a realizar la discusión de los resultados, encontrados en la parte correspondiente al trabajo experimental con la información bibliográfica encontrada.

En primer lugar, uno de los parámetros que influyen en el tratamiento de nitruración gaseosa, es el porcentaje de disociación que sufre el amoníaco en el generador de atmósfera y en el horno al entrar en contacto con el metal caliente, ya que hay una relación estrecha con el espesor de la capa de nitruros de Fe, en formación, la misma que

se encuentra en la parte externa de la pieza y posee menor dureza, aunque su resistencia a la corrosión es inmejorable. En el presente trabajo no ha sido posible controlar el porcentaje de disociación, aunque el fabricante del horno Lindberg, asegura un valor que se encuentra alrededor del 35% a 850°C, los tiempos de tratamiento, las durezas y espesores obtenidos concuerdan en amplio margen con los datos de práctica normal del proceso llevado a cabo en otros trabajos similares ASM.

El porcentaje de disociación debe ser el adecuado, dependiendo del proceso a usar, de allí la importancia del control, ya que toda la información concuerda en que esta disociación no debe ser menor al 25%, para que se pueda llevar a cabo la difusión del nitrógeno en el acero, quedando solamente como atmósfera protectora en el horno.

Los resultados encontrados muestran la importancia de la selección del material, ya ha sido demostrado que los valores de dureza depende de los elementos aleantes que contiene el acero, ver Figs. 3.10, 11, 12, 13, ya que los nitruros de los elementos aleantes son más duros que los nitruros de Fe. También influyen en los resultados la buena ejecución de los tratamientos preliminares al que debe ser sometido el acero, págs. 23, 24, 25, para obtener un nú-

cleo lo suficientemente tenaz para evitar el desprendimiento de la capa nitrurada, y a su vez una estructura interna del material uniforme, evitando de esta forma la presencia de una superficie , con diferentes grados de dureza. Es por esta circunstancia que se seleccionó elementos aleantes como: Moligdeno, Manganeso, Cromo, obteniéndose con ellos una dureza final de 34 Rc, en estado bonificado, que representa un valor de dureza medio combinado un núcleo de alta tenacidad y base resistente a la capa de elevada dureza, sin la cual ésta tendería a desprenderse de un núcleo demasiado suave.

Las curvas 3.1, 3.2 y 3.3, nos señalan la influencia de la temperatura en este tratamiento, observándose claramente que la tendencia es a coadyuvar a la difusión del nitrógeno aumentando de esta forma la penetración de los nitruros. Esta condición se puede manejar indiscriminadamente, ya que en contraposición al aumento del espesor de capa nitrurada se presenta una disminución en la dureza.

De las figuras 3.14 y 3.15, se puede ver que la dureza y el espesor de capa nitrurada aumenta con el tiempo, aunque este incremento tiende a disminuir, es por esto que más allá de 90h. de tratamiento lo poco que se consigue es antieconómico.

Además, en estas figuras se observa que la dureza llega al máximo entre 0.20 y 0.30 mm de la superficie para un acero SAE 4140 tratado a 560°C y entre 0.20 y 0.45 mm para el mismo acero tratado a 620°C, notándose la influencia de la temperatura en la difusión. Se ha demostrado que el núcleo no sufre ninguna alteración en sus propiedades procedentes del bonificado preliminar, el cual ha sido hecho a temperaturas superiores y de esta manera permanece inalterable, bajo las condiciones impuestas durante el tratamiento de nitruración, que toma un tiempo considerable a temperatura elevada.

También se demuestra aquí que las durezas alcanzadas después del tratamiento, sólo dependen del mismo y no de procesos posteriores, por lo que su enfriamiento final no tiene importancia. Esta condición le da ventaja sobre sus más cercanos competidores, como la carbonitruración y la cementación, que necesitan de temperaturas elevadas y tratamientos posteriores, los cuales causan problemas en las piezas tratadas.

Los ensayos metalográficos que se llevaron a cabo para establecer el control riguroso de las condiciones internas del metal en las zonas modificadas por el proceso, se los puede identificar claramente a través de las tres zonas

que forman la adición de nitrógeno. La primera zona, es la compuesta por nitruros de Fe; la segunda, es la zona formada por los nitruros de los elementos aleantes; y la tercera es la zona del metal base, la cual no sufre ninguna alteración. Las piezas nitruradas no sufren ningún cambio en sus dimensiones y por lo tanto no necesitan de rectificado posterior.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En los capítulos anteriores se ha detallado el presente trabajo, los experimentos realizados, resultados, controles y ensayos practicados, estos últimos con la finalidad de determinar la efectividad del tratamiento. De lo cual podemos sacar las siguientes conclusiones:

- a) El porcentaje de disociación, es necesario mantenerlo en el orden de 30% para obtener mejores resultados.
- b) En el tratamiento termoquímico efectuado, es usado en todo tipo exterior de pieza.
- c) La temperatura debe ser escogida de acuerdo al uso que se va a dar a la pieza, ya que a mayor temperatura, mayor penetración y menor dureza.
- d) Como las temperaturas a usar son bajas, no es necesario ningún tratamiento posterior y a la vez costoso.

- e) El costo de funcionamiento es muy alto, por cuanto se necesitan muchas horas para su realización, lo que significa un gran consumo de energía y a la vez los aceros utilizados son especiales.
- f) Se obtienen grandes durezas y espesores de capa relativamente gruesas.

RECOMENDACIONES

- a) Dotar al Laboratorio de los equipos necesarios para controlar el porcentaje de disociación que sufre el amoníaco.
- b) Se puede hacer recircular los gases que salen de la cámara del horno de tratamiento, bajando con esto el costo de operación del proceso.
- c) Dado la peligrosidad de trabajar con este gas, es conveniente mejorar la ventilación del laboratorio, previniendo cualquier escape que pueda haber en el sistema.
- d) Adicionar al sistema otro tanque de amoníaco, evitando de esta forma la suspensión del proceso por falta de gas.

D I A G R A M A S



Diagrama de equilibrio
hierro carbono (7).

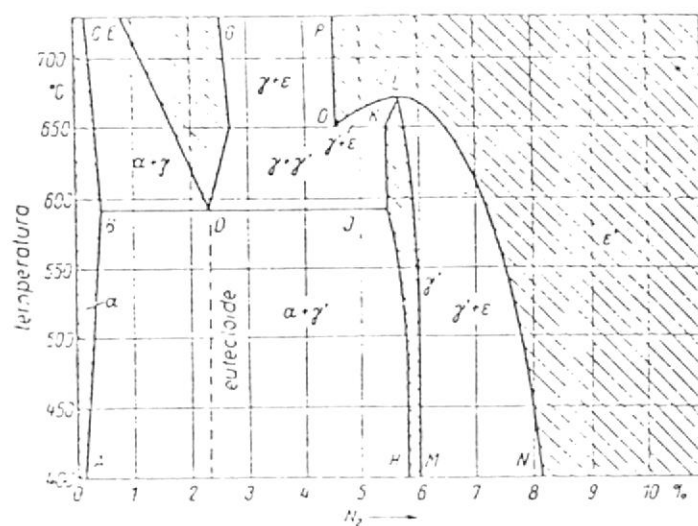


Diagrama de equilibrio del sistema hierro-nitrógeno (7).

Diagrama sobre la transformación isoterma de la austenita.

Temperatura: 925°C. Tiempo: 20 min.

*Diagrama TTT
para ASSAB M-4*

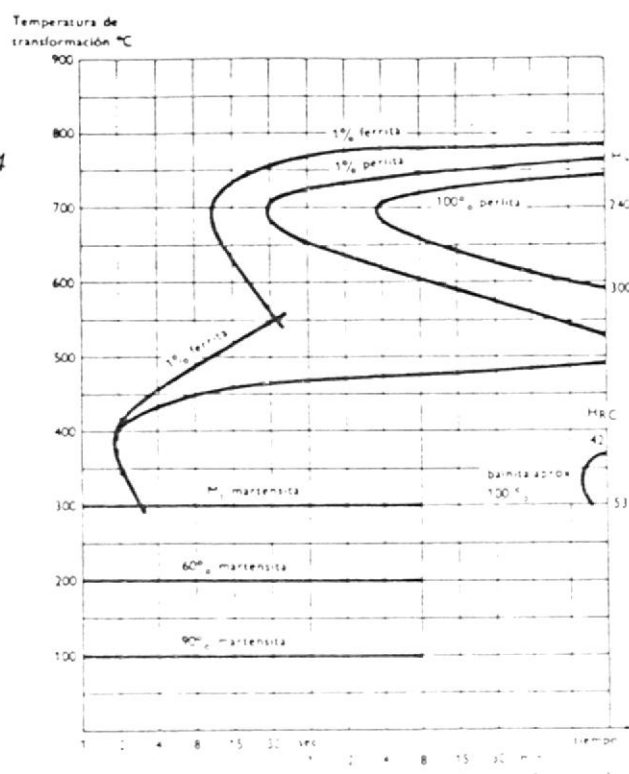


Diagrama TTT para el acero 3315

*Deformación durante el
tratamiento térmico.*

Pieza de prueba: 5mm $\varnothing$ x 50 mm

D_m = dia. al extremo de la pieza

D_k = dia. al medio de la pieza

H_m = largo

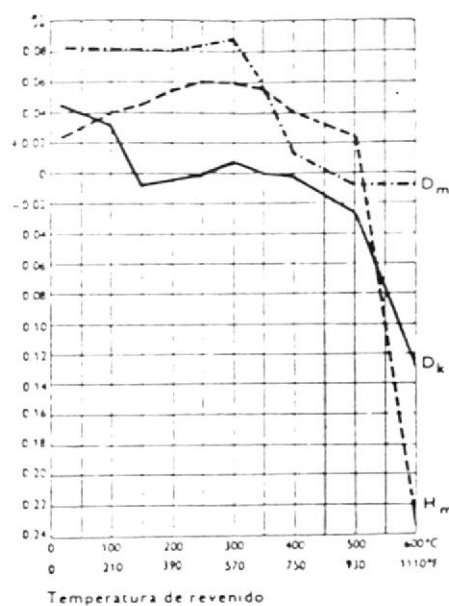


Diagrama de deformación del acero 3315, durante el tratamiento térmico.

Diagrama de revenido para ASSAB M-4

Medida: 20 mm $\varnothing$

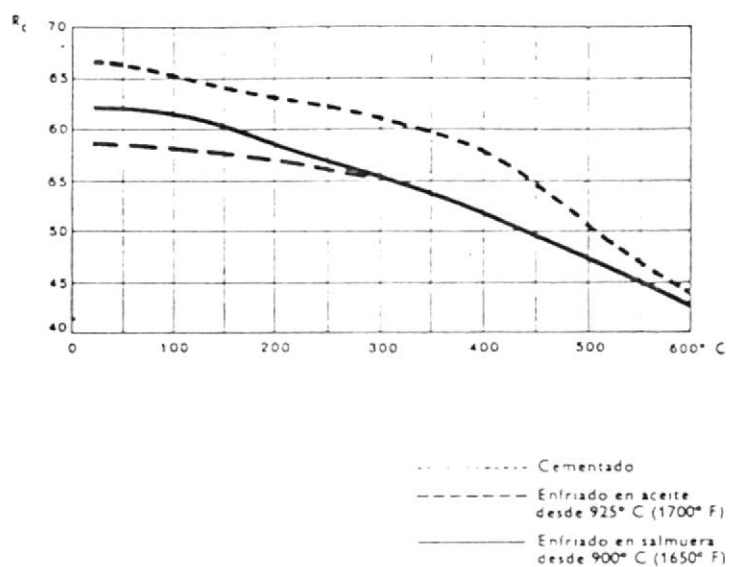


Diagrama de revenido para el acero 3315 en estado de recocido.

TRANSFORMACION ISOTERMICA.
DIAGRAMA, TTT

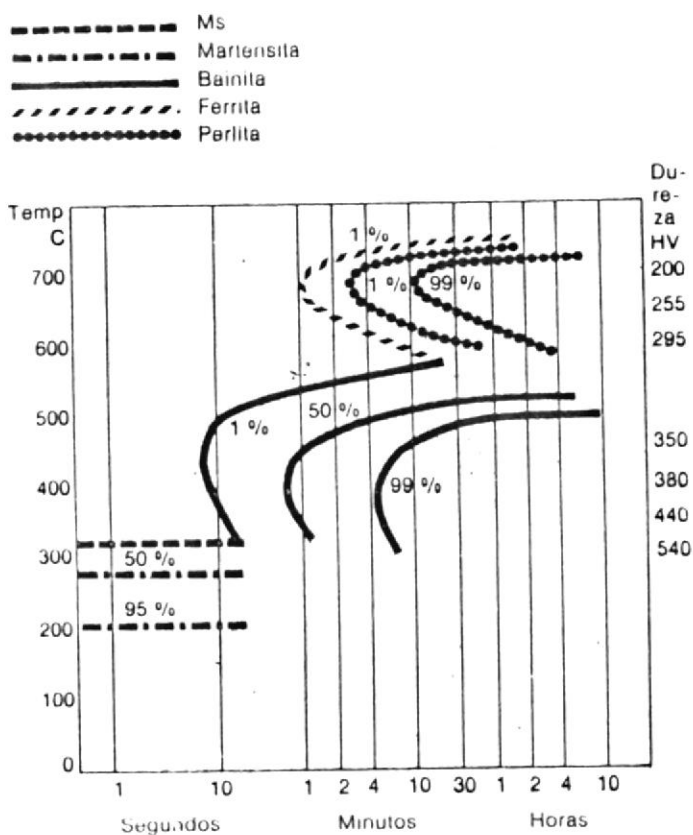


Diagrama TTT para el acero
bonificado SAE 4140.

TEMPLABILIDAD DE ACUERDO A PRUEBA JOMINY

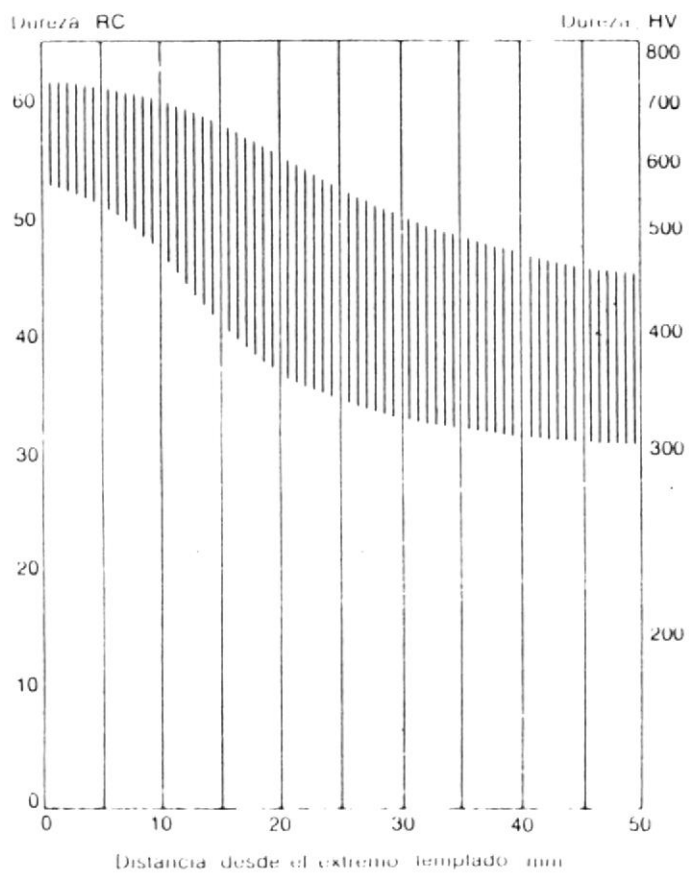
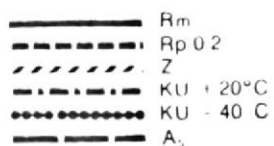


Diagrama de Templabilidad de acuerdo
a prueba Jominy.

DIAGRAMA DE REVENIDO



Pieza de prueba de 35 mm ϕ templada al aceite a 860°C

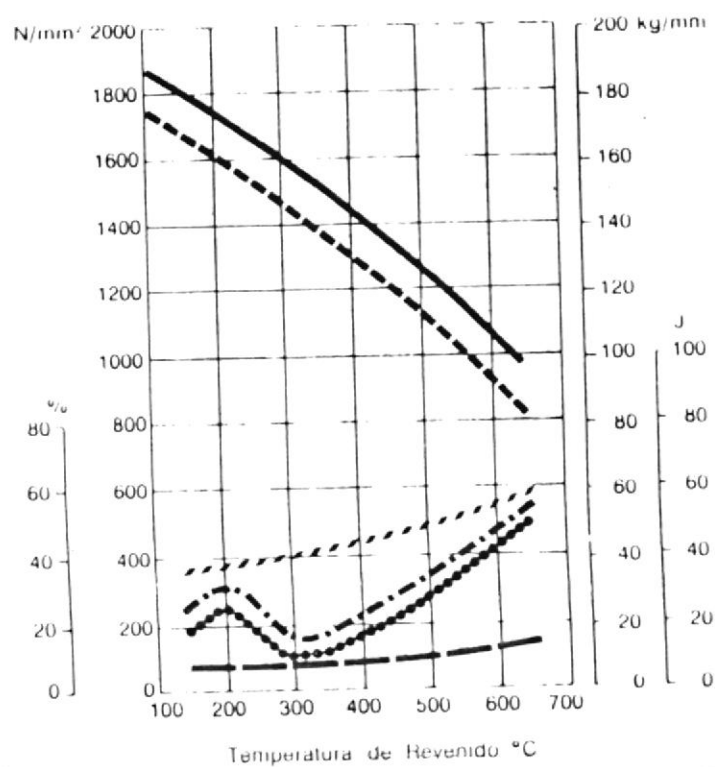


Diagrama de revenido para un acero bonificado SAE 4140.

T A B L A S

Equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza de los aceros al carbono

DUREZA								
BRINELL		ROCKWELL		VIC 185	SHORE Para 200 mm	Kg por mm ²	× 1000 Libras por pulgada cuadrada [pounds sq. in.]	Toneladas por pulgada cuadrada (Tons. sq. in.)
Bola 10 mm con 3000 kg	Dureza	C Carga de 150 kg y cono de diamante	B Carga de 100 kg y bola de 1/16"					
Dímetro de la bue-lla en mm								
2,05	898	—	—	—	—	—	440	—
2,10	857	—	—	—	—	—	420	—
2,15	817	—	—	—	—	—	401	—
2,20	780	70	—	1,040	107	—	384	—
2,25	745	68	—	980	105	—	368	—
2,30	712	66	—	900	101	216	352	—
2,35	682	64	—	820	98	235	337	150
2,40	653	62	—	765	95	227	324	145
2,45	627	60	—	715	91	218	311	139
2,50	601	58	—	670	87	208	298	133
2,55	578	57	—	630	86	200	287	128
2,60	555	55	120	610	82	193	276	124
2,65	534	53	119	575	79	184	266	119
2,70	514	52	119	558	77	177	256	114
2,75	495	50	117	525	74	170	247	109
2,80	477	49	117	510	72	164	238	106
2,85	461	47	116	480	69	159	229	102
2,90	444	46	115	466	67	154	220	98
2,95	429	45	115	453	66	149	212	95
3,00	415	44	114	444	65	144	204	91
3,05	401	42	113	416	62	138	196	87
3,10	388	41	112	404	61	133	189	84
3,15	375	40	112	389	59	128	182	81
3,20	363	38	110	375	57	124	176	79
3,25	352	37	110	363	56	120	170	76
3,30	341	36	109	350	54	116	165	74
3,35	331	35	109	339	53	113	160	71
3,40	321	34	108	327	52	109	155	69
3,45	311	33	108	316	50	106	150	67
3,50	302	32	107	305	49	103	146	65
3,55	293	31	106	296	47	100	142	63
3,60	285	30	105	287	46	98	138	62
3,65	277	29	104	279	45	95	134	60
3,70	269	28	104	270	44	92	131	58
3,75	262	26	103	263	—	90	128	57
3,80	255	25	103	256	—	88	125	56
3,85	248	24	102	248	—	86	122	54
3,90	241	23	100	241	—	84	119	53
3,95	235	22	99	235	—	82	116	52
4,00	229	21	98	229	—	80	113	50

No es recomendable usar el ensayo Brinell para aceros de R > 200 kg/mm², Dureza Rc > 57.

Equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza de los aceros al carbono

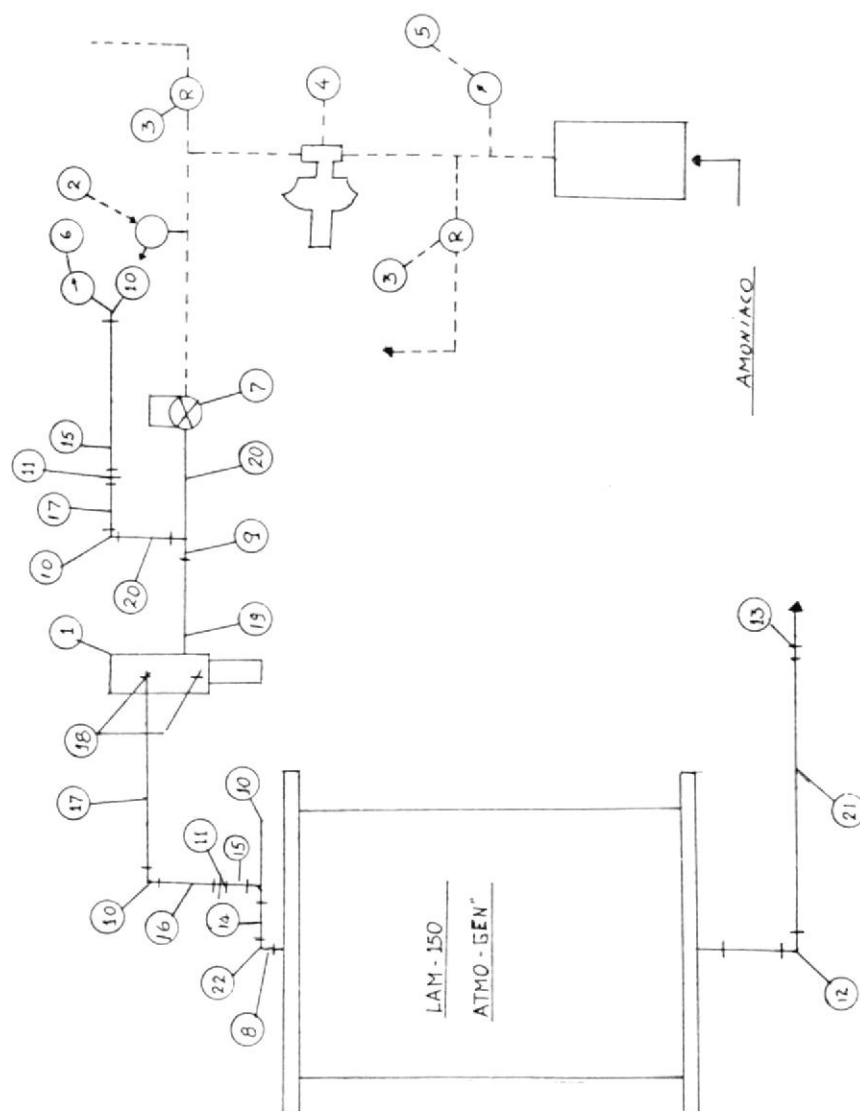
DUREZA								
BRINELL		ROCKWELL		VICKERS	SHORE	Kg por mm ²	x 1000 Libras por pulgada cuadrada [pounds sq. in.]	Toneladas por pulgada cuadrada (Tons. sq. in.)
Bola 10 mm con 3000 kg.	Dureza	C Carga de 150 kg y cono de diamante de 120°	B Carga de 100 kg y bola de 1/16"					
Dímetro de la huella en mm								
4,05	223	20	97	223	80 milímetros de diámetro de la misma dureza Vickers, el redondo de 80 milímetros de diámetro de la misma dureza Shore más, y el de 400 mm da 2 unidades menos.	78	110	49
4,10	217	18	96	217		75	107	48
4,15	212	17	96	212		73	104	47
4,20	207	16	95	207		71	101	46
4,25	202	15	94	202		70	99	45
4,30	197	13	93	197		68	97	43
4,35	192	12	92	192		67	95	42
4,40	187	10	91	187		66	93	42
4,45	183	9	90	183		64	91	41
4,50	179	8	89	179		63	89	40
4,55	174	7	88	174	80 milímetros de diámetro de la misma dureza Vickers, el redondo de 80 milímetros de diámetro de la misma dureza Shore más, y el de 400 mm da 2 unidades menos.	61	87	39
4,60	170	6	87	170		60	85	38
4,65	166	4	86	166		59	83	37
4,70	163	3	85	163		58	82	37
4,75	159	2	84	159		56	80	36
4,80	156	1	83	156		55	78	35
4,85	153	—	82	153		54	76	34
4,90	149	—	81	149		53	75	34
4,95	146	—	80	146		52	74	33
5,00	143	—	79	143		51	72	32
5,05	140	—	78	140	80 milímetros de diámetro de la misma dureza Vickers, el redondo de 80 milímetros de diámetro de la misma dureza Shore más, y el de 400 mm da 2 unidades menos.	50	71	32
5,10	137	—	77	137		49	70	31
5,15	134	—	76	134		48	68	30
5,20	131	—	74	131		47	66	30
5,25	128	—	73	128		46	65	29
5,30	126	—	72	126		45	64	28
5,35	124	—	71	124		44	63	28
5,40	121	—	70	121		44	62	27
5,45	118	—	69	118		43	61	27
5,50	116	—	68	116		42	60	26
5,55	114	—	67	114	80 milímetros de diámetro de la misma dureza Vickers, el redondo de 80 milímetros de diámetro de la misma dureza Shore más, y el de 400 mm da 2 unidades menos.	41	59	26
5,60	112	—	66	112		40	58	26
5,65	109	—	65	109		39	56	25
5,70	107	—	64	107		38	55	25
5,75	105	—	62	105		37	54	24
5,80	103	—	61	103		37	53	24
5,85	101	—	60	101		36	52	23
5,90	99	—	59	99		35	51	23
5,95	97	—	57	97		35	50	22
6,00	95	—	56	95		34	49	22

Tampoco es conveniente efectuar el ensayo Rockwell para aceros de $R < 70 \text{ kg/mm}^2$. Dureza $H_{RC} < 15$.

A N E X O S

BARRA REDONDA		BARRA REDONDA		BARRA REDONDA	
mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
6.4	0.25	60.3	22.4	172	185
8.4	0.39	63.5	24.8	178	198
10.0	0.62	66.7	27.4	184	212
11.1	0.78	70.0	30.2	191	228
12.7	0.99	73.0	32.9	197	243
14.3	1.26	76.2	35.9	203	258
16.0	1.58	80.0	39.5	210	276
17.5	1.89	82.6	43.5	216	292
19.1	2.25	85.7	46.7	222	308
20.6	2.59	90.0	51.5	230	330
22.2	3.10	95.3	57.8	242	366
25.4	3.98	102.0	66.1	248	384
28.6	5.01	105.0	69.9	254	402
30.0	5.55	108.0	73.9	267	445
32.0	6.31	115.0	83.6	280	489
35.0	7.55	121.0	92.5	305	579
38.1	8.95	127.0	101.0	330	676
41.3	10.50	135.0	114.0	343	731
45.0	12.50	140.0	123.0	356	788
48.0	14.20	146.0	134.0	380	897
50.8	15.80	153.0	147.0	407	1028
54.0	18.00	160.0	160.0	457	1295
57.2	20.10	165.0	170.0	508	1600

Anexo A Dimensiones del acero en estado de suministro



Anexo B Instalación del sistema de inyección de amoníaco.

Lista de los componentes del diagrama de instalación de los equipos usados en el proceso de nitruración.

1. Medidor de flujo 0-100 CFH
2. Manómetro de alta
3. Válvula de seguridad en la línea de alta
4. Reductor de presión
5. Manómetro
6. Manómetro de baja
7. Válvula selenoide
8. T de reducción 18 x 18 x 6 mm.
9. T de 6 mm por lado
10. Codo de 90° 6 mm
11. Unión 6 mm.
12. Codo 90° de 9 mm.
13. Acople de 9 mm.
14. Neplo de 6 x 38 mm.
15. Neplo de 6 x 100 mm.
16. Neplo de 6 x 75 mm.
17. Neplo de 6 x 112 mm.
18. Bushing reductor de 18 a 6 mm.
19. Neplo de 6 x 150 mm.
20. Neplo de 6 x 88 mm.
21. Neplo de 9 x 100 mm.
22. Tubería de 9 mm.
23. Válvula selenoide

B I B L I O G R A F I A

1. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Atom Movements, edición 1951. Claveland, Ohio.
2. METALURGIA FISICA, A.H. Cottrell, editorial Reverté S.A. 1962.
3. CARBONITRURACION DEL ACERO SAE 1020 EN SALES DE CIANURO, Tesis de grado del Ing. Luis Eras, Guayaquil 1982.
4. GULIEV A. P, Metalografía Tomo 1, editorial Mir-Moscú, edición de 1978.
5. GROSSMAN Y BAIN, Principios de tratamientos térmicos, editorial Blume, edición 1972.
6. AVNER S, Introducción a la metalurgia física, MC Graw Hill, México 1975.
7. Wanke y Schramm, temple del acero, editorial Aguilar Madrid, edición de 1972.
8. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Propertiers and selection edición de 1973.
9. VAN VLACK, Materiales para ingeniería, CEGSA, Mc Graw Hill, México 1975.
10. RAYMOND A. HIGGINS, Ingeniería metalúrgica tomo II Cegsa.

