



ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"CARBONITRURACION DEL ACERO SAE 1020 EN SALES DE CIANURO"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

LUIS ALBERTO ERAS GUAMAN

GUAYAQUIL-ECUADOR

1982

AGRADECIMIENTO

*A la Escuela Superior
Politécnica del Litoral*

*A los profesores del
Departamento de Ingeniería
Mecánica.*

*Al señor Ing. Ignacio Wiesner F.
Director de Tesis, a su loable
actitud como forjador de juventudes
y por la ayuda a la realización del
presente trabajo.*

*A los señores del Laboratorio
de Metalurgia-Mecánica.*

*Al señor Eduardo Eras G., por
ayuda en prácticas y gráficas
realizados.*

*A la señora Alexandra Vaca de Mora
por el mecanografiado del presente
trabajo.*

DEDICATORIA

A mis queridos y abnegados padres José Agenor y Amada

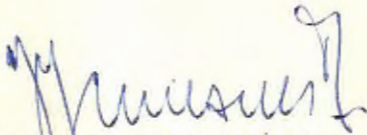
A mis hermanos: Eduardo

Isabel

Manuel

Marcos

Jorge



.....
ING. IGNACIO WIESNER F.

Director de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad de 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".

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


.....
LUIS ALBERTO TRAS GUAMAN

RESUMEN

La presente investigación está relacionada a introducir en el medio una nueva técnica de endurecimiento superficial, que sea capaz de resistir al mismo tiempo a la abrasión y a los esfuerzos producidos por la fatiga, este endurecimiento es la carbonitruración del acero en un baño de sales de cianuro.

Para esto las piezas de acero deberán ser sumergidas en un baño que contenga una concentración de 30 por ciento de cianuro, a temperaturas alrededor de Ac_1 , totalmente pulidas y acabadas, por un lapso de cuatro horas, para luego proceder a templarlas en agua o aceite. El acero deberá ser al carbono o aleado con un contenido de carbono alrededor de un 0.25 por ciento.

La capa carbonitrurada formada tiene diferente composición química, en su parte exterior nitruros seguida por una capa de carburos y finalmente el metal base.



INDICE GENERAL

Página

TITULO	I
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
DECLARACION EXPRESA	V
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
CAPITULO I	
INTRODUCCION	1
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS TEORICOS	
2.1 Principios Físico-químicos del proceso	8
2.2 Tipos de hornos	20
2.3 Parámetros que influyen en la carbonitruración líquida	41
2.3.1 Temperatura	41
2.3.2 Tiempo	43
2.3.3 Concentración del baño	45
2.3.4 Medio de enfriamiento	46

	Página
2.4 Baños de tratamiento	50
2.4.1 Mezclas de sales	50
2.4.2 Características y control de las sales	51
2.4.3 Contaminantes de los baños	52
2.5 Aceros para carbonitruración líquida	53
2.6 Aplicaciones	55
2.6.1 Endurecimiento selectivo	56
2.6.2 Jaspado por carbonitruración líquida	57
 CAPITULO III	
TECNICA EXPERIMENTAL	
3.1 Descripción del equipo experimental usado	58
3.2 Selección del acero y obtención de probetas	62
3.3 Selección y análisis del baño a usarse	68
3.3.1 Determinación del cianuro de sodio	77
3.3.2 Determinación del cianato de nitrógeno	77
3.3.3 Determinación del cianato de sodio	78
3.3.4 Determinación del cloruro de sodio	78
3.3.5 Determinación del carbonato de sodio	79
3.4 Ensayos y controles	79
3.4.1 Tiempo de tratamiento vs. espesor de la capa car bonitrurada a distintas temperaturas.	80
3.4.2 Dureza vs. tiempo a distintas temperaturas	85

	Página
3.4.3 Ensayo de resistencia al desgaste	92
3.4.4 Enfriamiento en agua	94
3.4.5 Control metalográfico	94
3.4.6 Control de microdureza	103
3.5 Seguridad	103
 CAPITULO IV	
DISCUSION DE RESULTADOS	110
 CAPITULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
APENDICES	120
Diagramas, tablas y anexos	121
Bibliografía	134

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
2.1	<i>Localización del eutectoide en el sistema ternario Fe-C-N.</i>	6 6
2.2	<i>Energía de activación necesaria para difusión</i>	13
2.3	<i>Esquematación del gradiente de concentración y autodifusión a) $t = t_0$; b) $t_0 \ll t \ll t_{\infty}$; c) $t = t_{\infty}$</i>	14
2.4	<i>Variación de la constante de difusión con la temperatura.</i>	20
2.5	<i>Difusión a lo largo de una dislocación de cuña</i>	24
2.6	<i>Difusión en los límites de grano</i>	25
2.7	<i>Esquemas de los mecanismos de difusión del C y N</i>	26
2.8	<i>Horno calentado exteriormente por gas o aceite</i>	30
2.9	<i>Horno calentado exteriormente por resistencias eléctricas.</i>	33
2.10	<i>Horno de electrodos inmersos</i>	35
2.11	<i>Horno de electrodos sumergidos</i>	38
2.12	<i>Profundidades de capa carbonitrurada en dependencia de la temperatura y el tiempo de carbonitruración.</i>	44

<i>Número</i>		<i>Página</i>
3.1	<i>Horno de baño de sales calentado por resistencias eléctricas, marca Lindberg, modelo 46-HC-814-16, capacidad eléctrica de 5000 vatios.</i>	60
3.2	<i>Equipo automático de medición y regulación de temperatura. Capacitrol 1471P de la Barber Collman Capacidad de medición de hasta 1023°C.</i>	61
3.3	<i>Sistema de extracción de gases</i>	63
3.4	<i>Probeta pulida y amarrada, lista para sumergirse en el baño.</i>	67
3.5	<i>Probetas con defectos superficiales de coque adherida a su superficie.</i>	71
3.6	<i>Equipo utilizado para determinar la concentración de cianuro.</i>	74
3.7	<i>Probeta luego de un tratamiento exitoso</i>	75
3.8	<i>Relación entre la penetración de capa carbonitrurada y tiempo de tratamiento a distintas temperaturas en un acero SAE 1020.</i>	
3.9	<i>Relación entre la dureza y el tiempo de tratamiento a diversas temperaturas en un acero SAE 1020.</i>	
3.10	<i>Durómetro Rockwell, modelo L., usado para determinar la dureza superficial de las probetas carbonitruradas.</i>	91

Número		Página
3.11	Equipo utilizado para realizar el ensayo al desgaste	93
3.12	Probetas después de realizado el ensayo al desgaste	95
3.13	Huellas dejadas en la lima después de realizado el ensayado al desgaste.	96
3.14	Metal base. Acero SAE 1020 sentido de laminación. Ferrita zonas blancas. Perlita zonas oscuras.	98
3.15	Metal base, acero SAE 1020, sentido transversal a la laminación. Ferrita zonas blancas. Perlita zonas oscuras.	99
3.16	Acero SAE 1020 carbonitrurado en un baño de sales a 870°C, durante 240 min, templado en agua. La micrografía a bajos aumentos muestra la capa combinada y la estructura interior.	100
3.17	Zona central de un acero SAE 1020, carbonitrurado por mantenimiento en baño de sales durante 210 min, a 870°C. Templado en agua.	101
3.18	Zona exterior de un acero SAE 1020, carbonitrurado por mantenimiento durante 210 min, en un baño de sales a 870°C. Templado en agua.	102
3.19	Disminución de la microdureza desde el borde exterior hacia el interior. Acero SAE 1020 carbonitrurado durante 240 min, en un baño de sales a 870°C. (Microdureza Knoop). Templado en agua.	104

Número		Página
3.20	<i>Microdurómetro. Marcha Riehle-Kentron, modelo Ak-8. Usado para medir el espesor de la capa carbonitrurada e identaciones de microdureza (Knoop).</i>	105
3.21	<i>Carbonitruración en un baño de sales a Piñón de 12 kg, de peso. Pieza de máquina corrugadora de papel de Procarsa.</i>	108
3.22	<i>Piñón helicoidal carbonitrurado en un baño de sales. Perteneciente a compresor de aire de 20HP de equipo caminero.</i>	109

LISTA DE TABLAS

Número		Página
2.1	<i>Localización del eutectoide y solubilidad máxima de austenita y ferrita.</i>	5
2.2	<i>Coefficientes de difusión</i>	17
2.3	<i>Constantes de difusión</i>	19
2.4	<i>Componentes de diferentes calidades de cianuro comercial.</i>	50
2.5	<i>Características del cianuro de sodio comercial.</i>	51
3.1	<i>Dimensiones del acero en estado de suministro</i>	66
3.2	<i>Valores de penetración a 760°C</i>	81
3.3	<i>Valores de penetración a 815°C</i>	82
3.4	<i>Valores de penetración a 840°C</i>	82
3.5	<i>Valores de penetración a 870°C</i>	83
3.6	<i>Valores de dureza a 760°C</i>	86
3.7	<i>Valores de dureza a 815°C</i>	87
3.8	<i>Valores de dureza a 840°C</i>	88
3.9	<i>Valores de dureza a 870°C</i>	89
3.10	<i>Resultados del ensayo al desgaste</i>	91

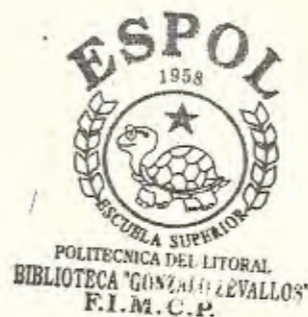
LISTA DE ABREVIATURAS

A_{c1}	<i>Temperatura de calentamiento crítica inferior</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
$AgNO_3$	<i>Nitrato de plata</i>
A1-A1	<i>Aluminio-Aluminio</i>
amp/cm^2	<i>Amperios sobre centímetros cuadrados</i>
C	<i>Carbono</i>
$^{\circ}C$	<i>Grados centígrados</i>
ccc	<i>Cúbico de cuerpo centrado</i>
ccac	<i>Cúbico de cara centrada</i>
ClNa	<i>Cloruro de sodio</i>
cm	<i>Centímetros</i>
cm^2seg	<i>Centímetros cuadrados-segundos</i>
$cm^2/seg.$	<i>Centímetros cuadrados sobre segundo</i>
CNNa	<i>Cianuro de sodio</i>
CNONa	<i>Cianato de sodio</i>
CO ₂	<i>Bióxido de carbono</i>
CO ₃ Na ₂	<i>Carbonato de sodio</i>
Cu-Cu	<i>Cobre-Cobre</i>

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de cobre
$^{\circ}\text{F}$	Grados fahrenheit
Fe	Hierro
Fe-Cr-Ni	Hierro-cromo-niquel
(Fe (CNS) 3)	Tiocianato férrico
Fig	Figura
gr.	Gramo
HCL 0.1	Acido clorhidrico 0.1 normal
Kg/mm^2	Kilogramo por milímetros cuadrados
m^2	Metro cuadrado
2M	2 melar
máx	Máximo
med	Medida
mm	Milímetro
N	Nitrógeno
0.1N	0.1 normal
NaOH	Hidróxido de sodio
NH_4CNS	Tiocianato de amonio
Re	Roxwell - C
SAE	Society of Automotive Engineers

CAPITULO I

INTRODUCCION



La realidad industrial existente en el país, el creciente uso de avanzadas tecnologías, hacen necesario el empleo de materiales con procesos modernos de fabricación, los cuales pueden ser de abastecimiento local. Es por esta circunstancia que el laboratorio de Metalurgia-Mecánica, fomenta la transferencia de tecnología en las áreas de procesos básicos de producción.

Esta actividad de investigación también está relacionada con los proyectos existentes en el país, dentro del marco del Pacto Andino, específicamente en el plan automotriz, puesto en marcha, incentivo a realizar la siguiente experimentación en el campo de los Tratamientos Térmicos, en lo que se refiere al endurecimiento superficial de las piezas fabricadas de acero, de uso común en los trabajos cuyos elementos se encuentran sometidas a un rozamiento continuo y deban soportar esfuerzos de fatigas constantes, para lo cual deben tener una alta resistencia al desgaste producida por este rozamiento y un núcleo tenaz para soportar a estos esfuerzos de fatiga.

Para esto existen diversos métodos para realizar el endurecimiento superficial, tales como la nitruración, cementación y carbonitruración, tanto líquida como gaseosa, temple superficial por inducción, temple a la llama entre otros.

En la presente investigación, se va a centrar la atención al estudio de la carbonitruración líquida. Este proceso consiste en sumergir las piezas en baño de sales de cianuros fundidos de composiciones bien determinadas; calentando el acero a temperaturas elevadas alrededor de A_{c1} , y se mantiene en esta condición hasta que se forme una capa de diferente composición química, compuesta por carburos y nitruros de hierro o de elementos de aleación, según el caso. Luego de ello se procede a un temple en agua o en aceite y se consigue mejorar las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a la abrasión, en aceros de bajo contenido de carbono.

En el presente trabajo se ha usado un acero SAE 1020, sales de cianuro de uso comercial y con ello se ha logrado después del tratamiento capas carbonitruradas hasta 0.55mm de espesor con durezas máximas de 69Rc.

En la realización de las experiencias se pudo hacer aplicaciones prácticas de endurecimiento de piñones para la industria local.

Se encontró además, una composición de sales, cuyos componentes pueden ser encontrados en el mercado local. Pues, las sales que usan los talleres dedicados a estos menesteres que son muy pocos, las importan preparadas.

Sin conocer cual es su composición, de tal suerte que están sujetos a usarlas siempre. Este trabajo tiene como objetivo desechar esta clase de dependencia tecnológica.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS

GENERALIDADES

Por definición de carbonitruración se entiende el tratamiento termoquímico de difusión, que tiene por objeto incrementar simultáneamente el contenido de carbono y nitrógeno de la capa superficial de la pieza. Para que esto sea posible, es necesario calentar la pieza a una temperatura superior a A_{c1} , pero, en determinados casos, puede realizarse a temperaturas ligeramente inferior al susodicho A_{c1} . Puede hacerse en medio gaseoso (carbonitruración propiamente dicha) o en baño de sales fundidas (cianuración). Normalmente este tratamiento se sigue de temple.

Las temperaturas en las cuales se desarrolla el proceso, generalmente oscilan entre 760° y 900°C . En determinadas ocasiones, cuando principalmente se pretende conseguir una capa de compuestos sumamente resistente al desgaste y al agrietamiento, se carbonitrua a temperaturas notablemente más bajas, en condiciones de tratamiento que son ideales para lograr gran estabilidad dimensional.

La incorporación del carbono y nitrógeno, implica una modificación sustancial de la composición química del acero próximo a la superficie, con formación de unos gradientes de carbono y nitrógeno, que dan lugar a una diferenciación entre el comportamiento a transformación de la capa y del núcleo, durante el enfriamiento posterior, para conferir al acero un buen -

comportamiento al desgaste y a la fatiga.

Aunque la carbonitruración se conoce hace unos 65 años, la utilización industrial de este procedimiento se ha incrementado rápidamente desde la década del 30, por habersele encontrado aplicaciones prácticas. Actualmente, la carbonitruración se aplica tanto a aceros de cementación, como aceros de resistencia, e incluso a aceros de herramientas, para lograr profundidades de capa que van desde el orden de centésimas a varios milímetros.

Cuando se pretende lograr un endurecimiento máximo por temple martensítico, tanto de la capa como del núcleo, la temperatura mínima de carbonitruración corresponde a la más baja compatible con la austenización del acero a tratar. En los aceros de medio contenido de carbono, o en los aceros eutectoides, que presentan resistencias de núcleo elevadas y capaces para soportar grandes cargas transmitidas por las capas, se precisan profundidades pequeñas de carbonitruración y también puede carbonitrurarse a menor temperatura.

La temperatura de carbonitruración, tiene una influencia decisiva en la relación entre las proporciones de ambos elementos incorporados. Cuando la temperatura de tratamiento es elevada, existe normalmente un predominio de la proporción de carbono incorporado respecto a la del nitrógeno.

Por ello hay tendencia a considerar la carbonitruración a temperatura alta como una variante del proceso de cementación. Sin embargo, esta interpre-

tación pierde su sentido cuando se carbonitrua a temperaturas inferiores a 815°C , ya que la incorporación de nitrógeno puede ser incluso más importante del carbono. Por esta circunstancia es interesante considerar cual es el efecto del nitrógeno disuelto, también como intersticial, en austenita que contiene carbono.

El campo de la estabilidad de la austenita en los sistemas binarios de hierro-carbono y hierro-nitrógeno, tal y como se deduce de los diagramas correspondientes mostrados en el APENDICE, pone de manifiesto que las analogías en el comportamiento del carbono y del nitrógeno, a crear soluciones sólidas son cualitativas. Si se tiene en cuenta, los efectos cuantitativos, las posiciones de los puntos singulares que definen el campo gamma en ambos diagramas, claramente se evidencia que el carbono y el nitrógeno se diferencian notablemente.

En la tabla 2.1 se indica la localización del eutectoide y del máximo de solubilidad en austenita, también en ferrita, para ambos intersticiales.

	Diagrama Fe-C	Diagrama Fe-N
Temperatura eutectoide	723°C	590°C
Concentración eutectoide	0.83% C	2.35% C
Temperatura de solubilidad máxima	1130°C	650°C
Solubilidad máxima en austenita	2.0% C	2.80% N
Solubilidad máxima en ferrita; a temperatura eutectoide.	0.025%	0.10% N

TABLA 2.1 Localización del eutectoide y solubilidad máxima de austenita y ferrita. (4)

El nitrógeno tiene mayor capacidad que el carbono para solubilizarse en austenita y en ferrita, y además, produce un descenso notable en las temperaturas correspondientes al máximo de solubilidad y de localización del eutectoide.

En la figura 2.1 se muestra la localización del eutectoide, de un sistema ternario Fe-C-N.

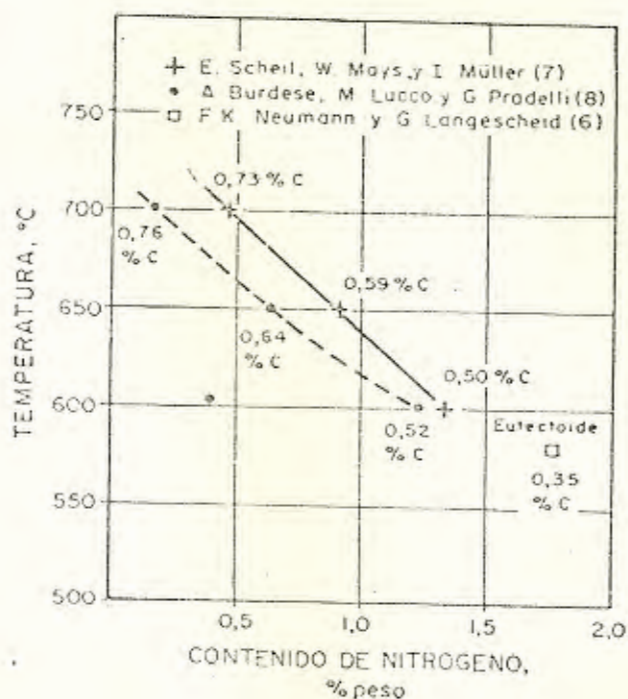


Fig. 2.1 Localización del eutectoide en el sistema ternario Fe-C-N (4)

Este punto eutectoide está localizado a 565°C aproximadamente y una concentración de 0,35 por ciento C y 1,8 por ciento N. La temperatura ha sido representada en función del contenido de nitrógeno, señalando las concentraciones de carbono correspondientes a cada punto señalado. Esta disminución

de temperatura por la presencia del nitrógeno aumenta la templabilidad, siendo posible templar en aceite los aceros al carbono, lo cual es una gran ventaja, porque así son menores las deformaciones de las piezas, y con frecuencia son eliminados el enderezado y rectificado final. La austenita con carbono y nitrógeno es más estable a bajas temperaturas que la austenita con carbono y, se transforma en el enfriamiento más lentamente. La austenita con carbono y nitrógeno, se transforma a martensita a más baja temperatura que cuando no tiene nitrógeno.

La existencia de lugares blandos en la superficie se deberá en ciertos casos a la presencia de la austenita retenida, en estos casos la carbonitruración no es recomendable, salvo que se procediera a la transformación posterior de la austenita retenida. Para esta transformación con el propósito de disminuir el contenido de ésta, se recurre al tratamiento subcero enfriando las piezas a temperaturas de -40 a -100°C . Este tratamiento se trata de evitar en lo posible, por ser muy costoso. Ya que la austenita retenida es máxima cerca de las superficies puede ser removida mecánicamente, removida de los contornos simétricos por pulverización o granallado, aunque esta operación se considera también costosa.

Un procedimiento que puede minimizar esta austenita retenida, y que resulta económico, es seleccionar con preferencia los aceros y controlar adecuadamente el proceso de carbonitruración.

El proceso en sí, se lo desarrolla en un horno de sales calentado externamente por resistencias eléctricas, el cual contiene un crisol, y en el

interior de éste una combinación de sales de cianuro, carbonato y cloruro de sodio en proporciones adecuadas.

Luego de fundidas, se sumergen en éstas, las piezas y se las temple en agua tomando finalmente mediciones de penetración y dureza.

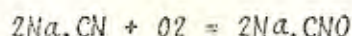
2.1 Principios Físicos-Químicos

En lo que respecta al principio físico-químico del proceso de carbonitruración, será enfocado al desarrollo del mecanismo químico de la formación de átomos activos de carbono y nitrógeno, sus reacciones química y su posterior difusión al interior del acero.

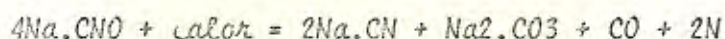
No se hará mucho énfasis a la termodinámica que acompaña al tratamiento; es decir, no se sigue paso a paso lo que sucede interiormente; pues, experimentalmente no se ha hecho una confirmación de la teoría por falta de medios en el laboratorio, para tal efecto y además, porque se ha hecho un enfoque más directo a la técnica del proceso, a su manera de transferirla al medio.

Explicada esta razón anterior, se procede a considerar las reacciones que se producen en el baño y lo referente al principio de operación de éste. Existe en su composición cianuro, carbonato, cianato y cloruro de sodio; el cianato sódico no se añade intencionalmente al baño, sino que se forma por oxidación del cianuro durante el trabajo con el aire que rodea a éste, cuando se opera entre las temperaturas

de 760 y 900° C. La reacción del cianuro con el oxígeno del aire - para dar el cianato es:

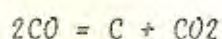


El cianato sódico a temperatura de trabajo se descompone por la acción del calor externo en cianuro sódico, carbonato sódico, carbonato sódico, óxido de carbono y nitrógeno naciente.



El cianuro vuelve nuevamente a comenzar su ciclo, siendo el carbonato el producto final de transformación.

El óxido de carbono que se libera durante la descomposición del cianato, se descompone en carbono naciente y dióxido de carbono, que en contacto con el acero caliente se disuelve en el hierro gamma, y se difunde al interior. La formación del carbono se produce en la siguiente forma:



siendo C el carbono que pasa al acero. También pasa como se ha dicho, algo de nitrógeno al acero formando nitruros.

El CO producido en las diversas reacciones que se acaba de citar, se descomponen siendo en definitiva el carbono naciente, que se produce en esa descomposición y el nitrógeno naciente producido también en -

esas reacciones las que pasan al acero. El carbono forma carburos de hierro o aleados y el nitrógeno forma nitruros.

Para que se realice la carbonitruración es necesario o fundamental la formación de cierta cantidad de cianato. Pues un baño con alto porcentaje en cianuro sin cianato no carbonitrua el acero, lo cual es difícil que ocurra, pues en la práctica industrial los baños de cianuro contienen algo de cianato, ya que su formación es casi automática al elevarse la temperatura de los baños.

En las reacciones anteriores se ha producido carbono y nitrógeno naciente, también se ha mencionado que estos elementos se difunden al interior del acero a carbonitrurar, alojándose de manera especial en la superficie. Por eso se hace necesario como se realiza esta difusión cuando existen las condiciones adecuadas.

Difusión

Se trata de explicar que es la difusión; la palabra DIFUSION se la emplea para describir cualquier cambio en las posiciones de los átomos o moléculas en un medio que suponemos inmóvil. Esta no incluye los movimientos atómicos que se producen en el flujo o deformación plástica del medio. Puede tener lugar en los gases y en

los líquidos y bajo condiciones adecuadas en los sólidos. La que tiene lugar en los gases carece de interés, por lo que se limitará a estudiar la que se produce en los líquidos y en los sólidos. La difusión en los sólidos puede dividirse en difusión en los cristales, difusión a lo largo de las dislocaciones, difusión en los límites de los cristales y difusión sobre las superficies libres. El tipo mejor es la correspondiente a cristales, por lo que se ocupará de ella en primer lugar.

DIFUSION EN LOS CRISTALES

Esta difusión en los cristales tal como se ha definido, es debido al movimiento de los átomos individuales con respecto al cristal, cuya posición está definida por los átomos que no cambian su posición relativa. En lo que se denomina proceso unitario cabe destacar el movimiento de un átomo desde la posición que ocupa actualmente hasta otra posición cualquiera. Todos los átomos tienen un continuo movimiento alrededor de sus posiciones medias y el proceso unitario o salto es el suceso en el que cambia la posición media del átomo. Solo puede producirse si el átomo tiene una energía suficientemente elevada y si existe una posición a la que pueda ir.

FRECUENCIA DE SALTO

El proceso de difusión, es el resultado de todos los saltos que tiene lugar en un cristal que contiene un número muy grande de átomos

en un período de tiempo que es muy largo comparado con el característico de la vibración atómica. Es por esto, que se debe estudiar el proceso estadísticamente y no con referencia a los átomos individuales, siendo la magnitud más importante el tiempo medio τ que transcurre entre dos saltos consecutivos de un átomo agregado. Es imposible cualquier predicción acerca del momento en que un átomo dado puede saltar, pero es posible predecir el intervalo medio entre los saltos. Esta dado por:

$$\frac{1}{\tau} = P\nu \exp(-\Delta H/RT) \quad (2.1)$$

$\exp(-\frac{\Delta H}{RT})$.- Es la probabilidad de que un átomo tenga una energía ΔH debida al movimiento térmico durante una sola oscilación.

ΔH .- Es la energía de activación para el salto

ν .- Es la frecuencia de la vibración térmica

P .- Es un factor que establece la probabilidad que un átomo con la energía necesaria pueda alcanzar una posición.

ENERGIA DE ACTIVACION

Si los átomos han de cambiar de lugar, los "brincos de energía" de la siguiente figura deberán sobrepasarse.

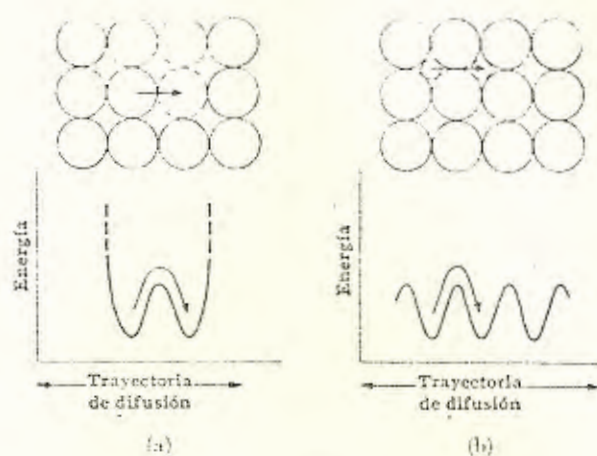


Fig. 2. 2 Energía de activación necesaria para difusión (Van Vlack)

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 2.2a se requiere energía para empujar el átomo fuera de sus actuales vecinos; con difusión de intersticios, se requiere energía para forzar al 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 movimientos intersticiales requieren más energía que los movimientos de huecos. Finalmente, se requieren - altas energías de activación para la difusión de materiales de alto punto de fusión fuertemente ligados como el tungsteno, el carburo y el corundo.

GRADIENTES DE CONCENTRACION

El proceso de homogeneización mostrado en la siguiente figura

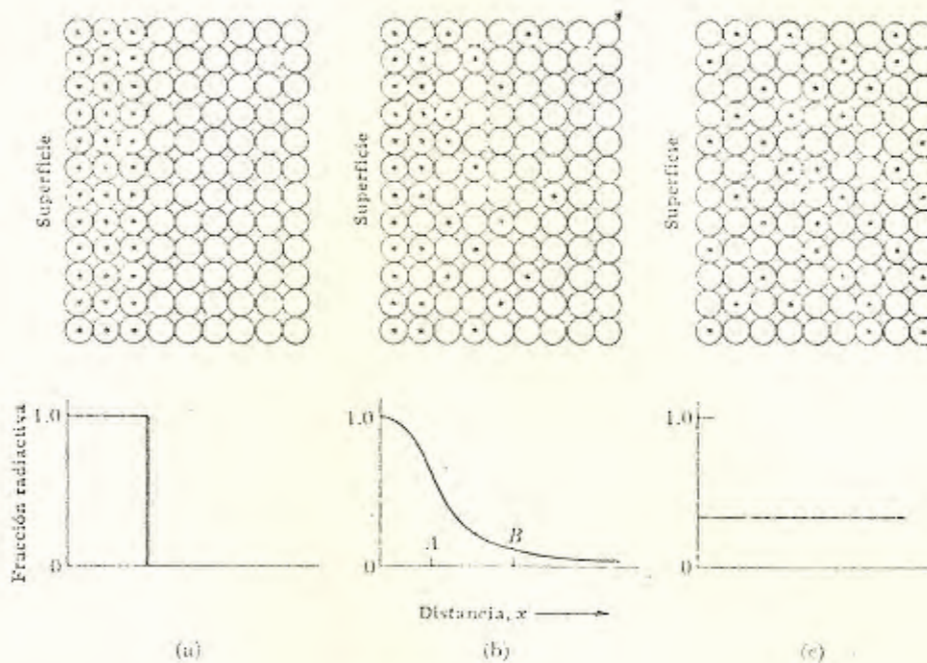


Figura 2.3 Esquematización de gradiente de concentración y autodifusión a) $\tau = \tau_0$; b) $\tau_0 < \tau < \tau_{\infty}$; c) $\tau = \tau_{\infty}$. (VAN VLACK)

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 por átomos para los átomos marcados en A para moverse - hacia la izquierda la diferencia de números produce una diferencial en movimientos y aumenta la uniformidad en la estructura.

LA AUTODIFUSION

También es graficada por esta misma 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 radioactivo (Ni^{59}) 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 contradifusión de los átomos no marcados hacia la superficie).

LEYES DE FICK Y COEFICIENTES DE DIFUSION

Tanto los aspectos atómicos como los estadísticos de difusión, pueden ser sumados como ecuaciones de difusión por las Leyes de Fick. La primera ley es:

$$J = -D \frac{dC}{dX} \quad (2.2a)$$

Esta ley establece que la cantidad de material, o sea el flujo que se mueve a través de una superficie unitaria en un tiempo unitario, y que los es proporcional al gradiente de concentración dC/dX . La constante de proporcionalidad D se llama "coeficiente de difusión", y se expresa en $cm^2/seg.$, como se muestra abajo:

$$\frac{\text{átomos}}{cm^2 \text{seg}} = \frac{(cm^2/seg) (\text{átomos}/cm^3)}{cm} \quad (2.2b)$$

El signo negativo de la ecuación 2.2a indica que el flujo está hacia abajo del gradiente, en el sentido que decrece la concentración.

La segunda ley de difusión, que relaciona un cambio de concentración con el tiempo dC/dt establece que

$$\frac{dC}{dt} = D \left(-\frac{d^2C}{dx^2} \right) \quad (2.3)$$

De esta ley es fácil apreciar por que los pasos finales de la homogeneización (Fig. 2.3) son lentos. La rapidez de decrecimiento según el gradiente de concentración va disminuyendo.

Los coeficientes de difusión varían con la naturaleza de los átomos en solución, con la naturaleza de la estructura sólida y con los cambios de temperatura. En la tabla (2.2) se dan varios ejemplos.

Algunas razones para los distintos valores de esta tabla son:

- a) Mayores temperaturas llevan a mayores coeficientes de difusión, porque los átomos tienen mayor energía térmica y, por lo tanto, mayor probabilidad de ser activados más allá de sus barreras de energía.
- b) El carbono tiene mayor coeficiente de difusión en el hierro que el níquel en el hierro, porque el átomo de carbono es pequeño.
- c) El cobre se difunde más fácilmente en aluminio que el cobre, porque las ligas Cu-Cu, son más fuertes que las ligas Al-Al; como -

SOLUTO	SOLVENTES (Estructura Patrón)	COEFICIENTE DE DIFUSION $\text{cm}^2/\text{seg.}$	
		500°C (930°F)	1000°C (1830°F)
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	ccc hierro	$10^{-16.1}$	($10^{-9.5}$)
5. Niquel	ccac hierro	($10^{-19.0}$)	$10^{-11.6}$
6. Manganeso	ccac hierro	($10^{-19.6}$)	$10^{-12.0}$
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 2.2 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



puede evidenciarse por sus temperaturas de fusión.

- d) Los átomos tienen mayores coeficientes de difusión en el hierro de cuerpo centrado, que en el hierro de caras centradas, porque el interior tiene un menor acomodamiento atómico. Aunque el cuerpo de caras centradas tiene mayores huecos intersticiales, sin embargo, los espacios entre agujeros son menores que uno de cuerpo centrado.
- e) La difusión se produce más rápidamente a lo largo de los límites de grano, porque éstos son una zona de imperfección del cristal.

COEFICIENTE DE DIFUSION CONTRA TEMPERATURA

La dependencia de D con respecto a la temperatura se expresa por la ecuación:

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} \quad (2.4)$$

Donde D_0 , es una constante que incluye varios factores. Incluidos están tales factores como la distancia de brinco y la frecuencia de vibración del átomo, los 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)

Los valores de D_0 y Q son únicos para cada sistema de difusión. En la tabla (2.3) se dan varios valores de pares de Q u D_0 .

SOLUTO	SOLVENTE (estructura huésped)	D_0 , cm ² /seg	Q , Cal/mol
1. Carbón	ccac hierro	0.21	33 800
2. Carbón	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 compacto	2.24	41 699

Tabla 2.3 Constantes de difusión (Van Vlack)

Los valores experimentales de las constantes de difusión D , son series de valores de D obtenidos a diferentes temperaturas. La ecuación de Arrhenius muestra que debe existir una relación lineal entre $\log D$ y $1/T$, si se trata de un solo proceso activado. Los resultados experimentales confirman estas afirmaciones.

Los valores de D_0 y Q se relacionan a partir de la gráfica que se presenta a continuación:

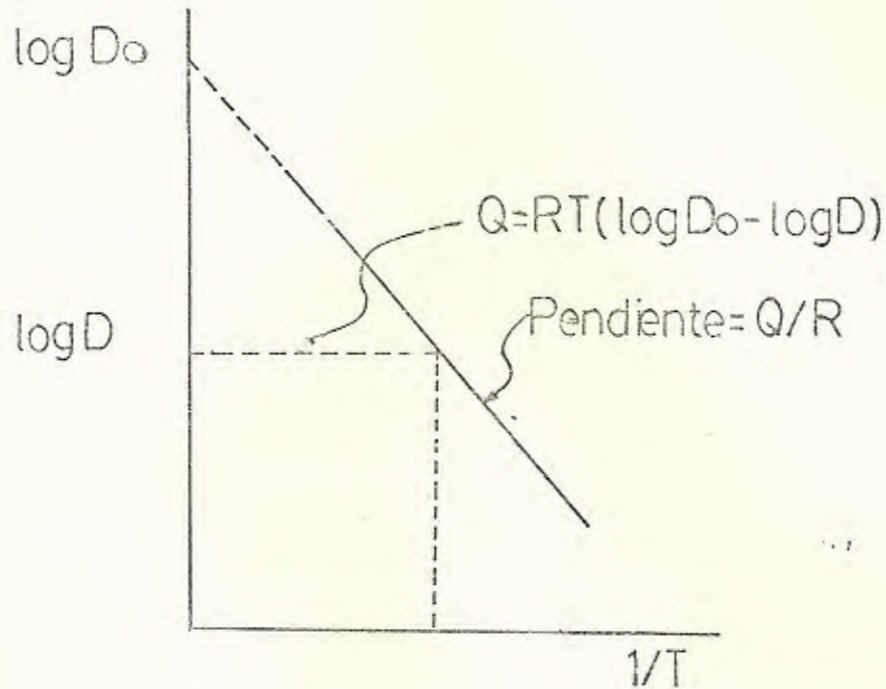


Figura 2.4 Variación de la constante de difusión con la temperatura

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

$$\log D = \log D_0 - (Q/RT)$$

o también

$$Q = RT (\log D_0 - \log D)$$

DIFICULTADES DE APLICACION DE LAS LEYES DE FICK

La expresión de la primera ley de Fick, implica que la fuerza impulsora de la difusión, es el gradiente de concentración, y que el proceso se interrumpe cuando se alcanza una concentración uniforme:

Cuando existen sistemas metálicos esta condición no se cumple, porque el estado de equilibrio de una aleación no es necesariamente aquel en que la composición es la misma en todos los puntos. El criterio de estabilidad es la igualdad de potencial químico en todos los puntos del sistema.

La verdadera fuerza impulsora, es por lo tanto y por tales razones, el gradiente de potencial químico. Y esto explica por que puede producirse la llamada difusión "cuesta arriba".

Esta es la difusión de un componente desde una región en la que su gradiente de concentración es más baja hacia la otra que es la mayor, pues son muchos los casos que se producen en este sentido. Dentro de una misma fase, el gradiente de composición es casi siempre muy parecido al de concentración y, es admisible medir y definir el coeficiente de difusión empleando el gradiente de concentración.

Existe otra dificultad al aplicar la ley de Fick a los metales y procede de la falta de homogeneidad y de la anisotropía. La difusión se produce de manera diferente y con distinta dependencia de la temperatura dentro de los cristales y en los límites de grano de una muestra cristalina.

En cualquier cristal de simetría no cúbica el valor de D depende de la dirección. Para los estudios básicos son ideales los monocrista-

les como material experimental, pero aún, en éstos puede tener importancia la presencia de dislocaciones.

La otra dificultad es más sutil. Si el gradiente de concentración o de potencial químico es la fuerza impulsora de la difusión, no se podrá producir ésta, cuando no exista gradiente. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que existe autodifusión, es decir, redistribución espontánea de los átomos en un cristal sin transferencia de masa y sin fuerza termodinámica impulsora.

La ley de difusión de Fick no es aplicable a la autodifusión, sólo el resultado de la difusión química. A pesar de todo, se pueden atribuir coeficientes de difusión a la autodifusión y éstos son comparables a los de la difusión química, de lo que se deduce que ambos procesos son fundamentalmente idénticos.

Pueden presentarse fuerzas impulsoras adicionales que incrementen la probabilidad de desplazamiento de un átomo a regiones de mayor o menor concentración, según la energía de los átomos de soluto aumente o disminuya por la proximidad de otra de la misma naturaleza.

Los dos efectos que produce la concentración de soluto son por un lado, una modificación de la fuerza impulsora, y por el otro, una alteración de la movilidad con respecto a la dirección.

Para el primero, se puede dar una explicación de que al aumentar la probabilidad del salto en una dirección determinada, por ser distintos los máximos de energía libre existentes en los lados de concentración más alta y más baja de un átomo de soluto.

Para el segundo significa una modificación de la energía libre del átomo en su posición de equilibrio y por tanto, una alteración de la energía libre de activación y de la frecuencia de salto correspondiente.

También se encuentra que un gradiente de presión o de temperatura puede producir difusión aunque no exista el gradiente de concentración.

DIFUSIÓN EN LAS DISLOCACIONES

El estudio que hasta ahora se ha hecho consistía en la difusión de el caso ideal en un cristal perfecto, salvo la presencia de vacantes, se ha comprobado que es necesaria 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 consideraremos se produzcan por difusión en las dislocaciones.

En la figura 2.6 se puede analizar con más detenimiento.

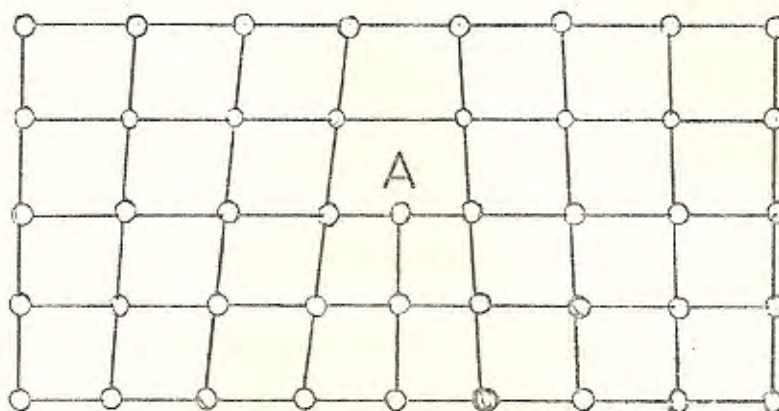


Figura 2.5 Difusión a lo largo de una dislocación de cuña

Puede ser el movimiento de los átomos desde la posición A, a la correspondiente al plano próximo. La energía de activación puede ser baja porque hay un espacio disponible relativamente grande en el movimiento del átomo que se convierte en semiintersticial en estas circunstancias.

DIFUSION EN LOS LIMITES DE GRANO

La difusión en los límites de grano han sido estudiados de una manera completa por Fisher y permite averiguar la relación existente entre los coeficientes de difusión en el borde y en el retículo. La gráfica siguiente es tomada para dicho estudio

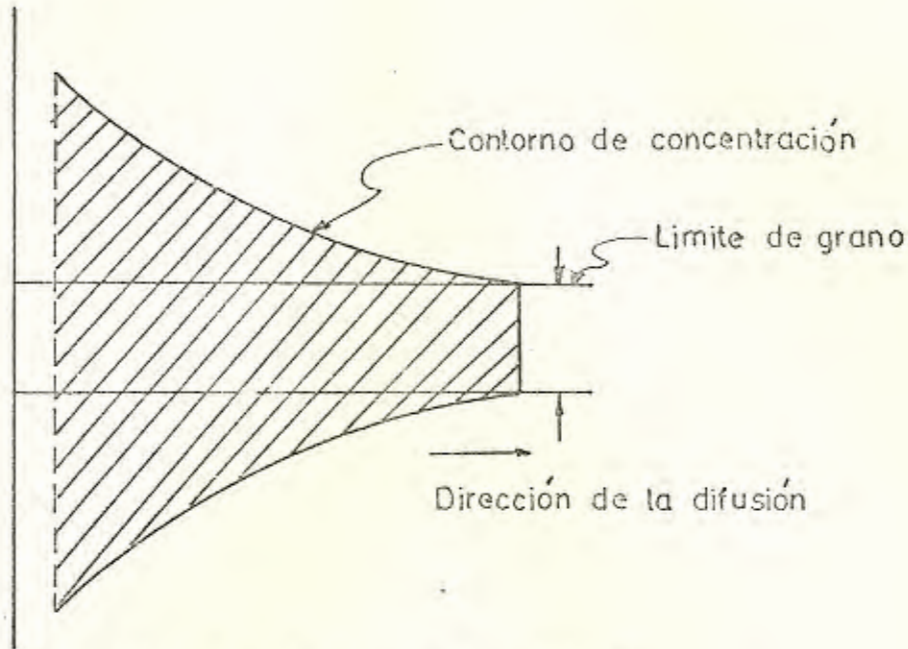


Figura 2.6 Difusión en los límites de grano (6)

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

Es el momento adecuado para tratar de como se realiza la difusión del carbono en el hierro, se lo tratará como la difusión de un sólido en un sólido; y es necesario comentar, que como la difusión es de natura

leza estadística, resultado 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 tales movimientos pueden producir un flujo sistemático. Mediante tres métodos el carbono se puede difundir en soluciones sólidas sustitucionales mediante el mecanismo de vacancias, el mecanismo intersticial y el mecanismo de intercambio de átomos. Estos mecanismos los presentamos esquemáticamente a continuación.

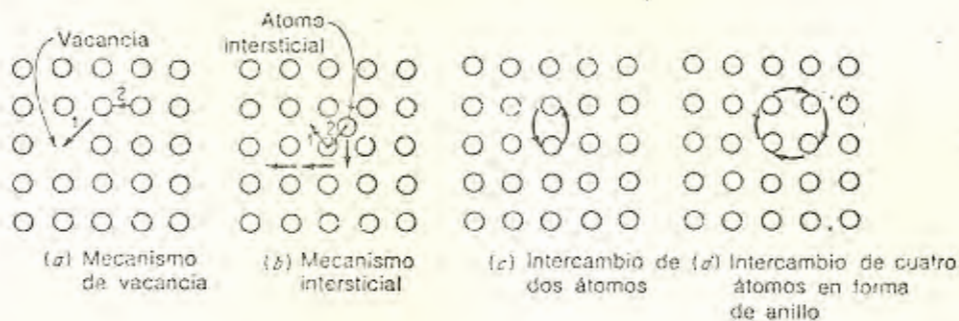


Figura 2.7 Esquemas de los mecanismos de difusión del C (AVNER)

Es de destacar además, que las vacancias y los sitios intersticiales son una característica normal de la estructura cristalina. Estas imperfecciones facilitan grandemente la difusión del carbono, o el salto de los átomos adyacentes de carbono existentes ya. En la figura 2.7 (a) se muestra como un átomo soluble puede moverse un espacio atómico hacia la izquierda mediante un salto a una vacancia. Por supuesto, es igualmente probable que cualquiera de los átomos vecinos existentes podrían haber hecho el salto pero es el carbono en vista de su

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

El mecanismo intersticial se observa en la figura 2.7 (b), en la que un átomo en la posición normal se mueva a un espacio intersticial y el lugar desocupado lo ocupe el átomo intersticial de carbono, o éste se quede ocupando el mismo intersticio por su menor tamaño. Como se muestra en la misma figura, la difusión puede ocurrir por un átomo intersticial de carbono errante a través del hierro; posiblemente, el movimiento tiene lugar por un intercambio directo entre dos átomos adyacentes como se muestra en la figura 2.7 (c), o por un intercambio de cuatro átomos como en la figura 2.7 (d), sin embargo esto ocurriría en condiciones especiales, ya que el problema físico de deslizarse entre átomos vecinos compactos incrementaría la barrera de difusión. La evidencia experimental ha indicado que el uso de vacancias es el método principal 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 la más importante es la temperatura. Como regla general se puede establecer que el coeficiente de difusión se duplica por cada 20°C de aumento de temperatura. Esto no es sorprendente, ya que todos los átomos vibran constantemente respecto a sus posiciones de equilibrio en la red y la amplitud de vibración aumenta al elevarse la tempera-

tura. Los valores de D los podemos encontrar en las tablas dadas anteriormente.

Todo lo que se refiere a la difusión del nitrógeno en el hierro, deberá considerarse como la difusión de un gas dentro de un metal. La costumbre de tratar la difusión de un gas-metal como un sujeto independiente, puede algunas veces ser engañoso; y esto da una falsa impresión a través de sólidos, esas sustancias las cuales son normalmente gaseosas, procede de una manera fundamentalmente diferente de esas sustancias las cuales son normalmente sólidas. Es establecido que la tendencia de los gases a difundir a través de los metales está estrechamente asociado con su habilidad para combinar con el correspondiente metal, las razones de difusión empieza 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 las 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. El nitrógeno forma compuestos, es soluble y su difusión a través del hierro es bastante alta. La alta velocidad de la difusión gas-metal generalmente es asociado con la solución intersticial de gas en el metal. Los átomos no metálicos necesitan ser desplazados de sus posiciones 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, esto era esperado, además, que el calor de activación de la difusión del gas-metal, será mucho menor que para metal a través de metal.

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

Los mecanismos de difusión explicados para la difusión del carbono, son aplicables a la difusión del nitrógeno, ya que este posee un menor radio atómico, que el hierro, factor este que lo hace más difusible.

2.2 Típos de hornos

Las piezas con mecanizado de precisión en las que el tratamiento térmico no debe producir descaburación ni cascarilla; deben calentarse preferentemente en baños de sales. Cuando se trata de un gran número de piezas en una fabricación en serie compensa el emplear hornos continuos.

El gas y la electricidad son agentes calefactores que permiten el control más preciso en los tratamientos térmicos y consecuentemente

son los que más se usan.

Los hornos de gas que pueden ser del tipo de fuego directo, en el cual los productos de la combustión entran a la cámara de calentamiento. Alternativamente puede ser de combustión directa e indirecta de manera que la cámara del horno quede aislada de los productos de combustión dentro de tubos metálicos, que se proyectan dentro de la cámara de calentamiento y que se constituyen la fuente de calor radiante. Igual que en los hornos calentados indirectamente la carga se encuentra aislada de los productos de combustión.

Después de esta clasificación general podemos tratar de describir los siguientes tipos:

a) Hornos calentados por gas o aceite como el que se muestra en la siguiente figura

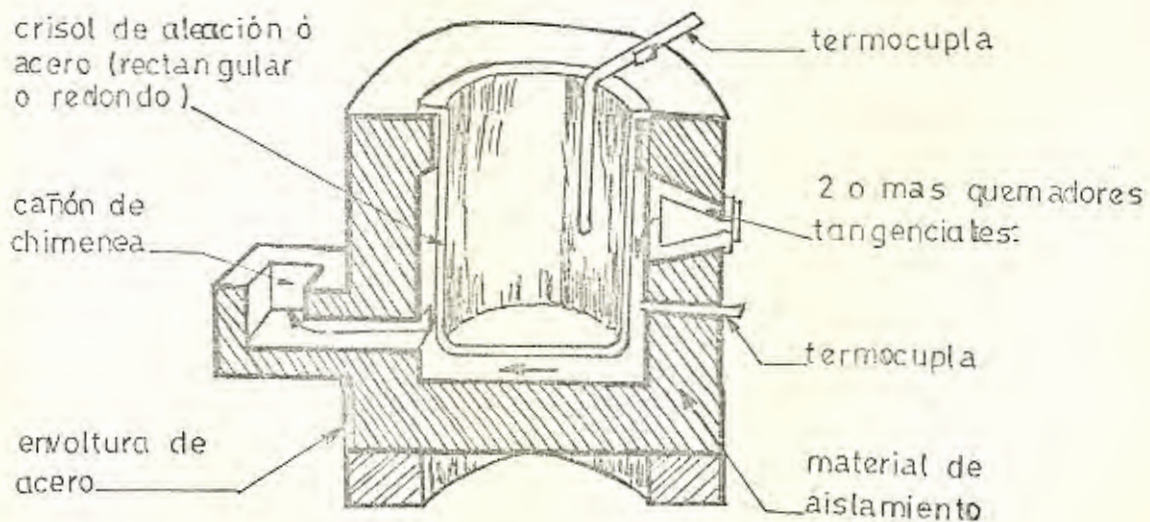


Figura 2.8 Horno calentado exteriormente por gas o aceite

Es uno de los diferentes tipos de hornos usados en la carbonitruración líquida, usado cuando se tiene ciertas dificultades económicas para empezar a producir, estos son los hornos más aconsejados por su costo inicial bajo.

Este horno está provisto de un crisol en el cual se ponen las sales a fundir, el cual está constituido de acero o aleaciones, su borde superior es generalmente redondo y prominente para evitar la salida de las sales fundidas, que pueden afectar al resto del horno.

Las llamas le llegan tangencialmente por dos o más quemadores que se encuentran entre la pared del crisol y la parte exterior del horno.

Después que las llamas han efectuado su misión despiden gases calientes los cuales salen despedidos al exterior por una campana de chimenea que se encuentra cerca del tope. Es necesario revestir la cámara de combustión con ladrillo refractario y si es posible con un aislamiento adicional, además, una envoltura de acero será necesaria en todos los lados del horno, por si acaso ocurre una falla en el crisol.

Se pueden contar como ventajas las que a continuación se anota, su facilidad con la que se puede arrancar nuevamente una vez que se ha apagado el horno, es decir es un horno del tipo intermitente en sus operaciones. La variedad de aplicaciones que tienen estos hornos; pues únicamente es necesario cambiar de crisol y composición de sales para

un nuevo tratamiento térmico.

No todo son ventajas pues posee también sus desventajas por cuanto generalmente son abiertos y disipan calor por radiación y convección y, crean un gradiente de temperatura en el baño. Se puede generar un sobrecalentamiento en el fondo y en las paredes del horno, debido a la campana de extracción de gases calientes, que enfrían la parte superior, dando esto lugar a que en las sales se produzcan una expansión térmica con una elevación de presión; con el peligro de causar una explosión.

La producción continua no se puede hacer en esta clase de hornos calentados exteriormente porque los crisoles son pequeños en tamaño y, la temperatura máxima de operación es de 1000°C . Cuando está operando el horno calentado por gas o aceite es menester que exista grandes espacios para la combustión, para que la llama no toque al crisol, y si esto es inevitable el crisol será rotado al menos una vez a la semana.

b) Hornos calentados por resistencias eléctricas, tal como el que se muestra en la figura siguiente:

Es otro de los hornos que se usan para realizar el proceso de carbonitruración líquida, son menos usados que los hornos calentados por gas o aceite, su calentamiento se produce o es causado por una serie de resistencias eléctricas que se encuentran alrededor del crisol.

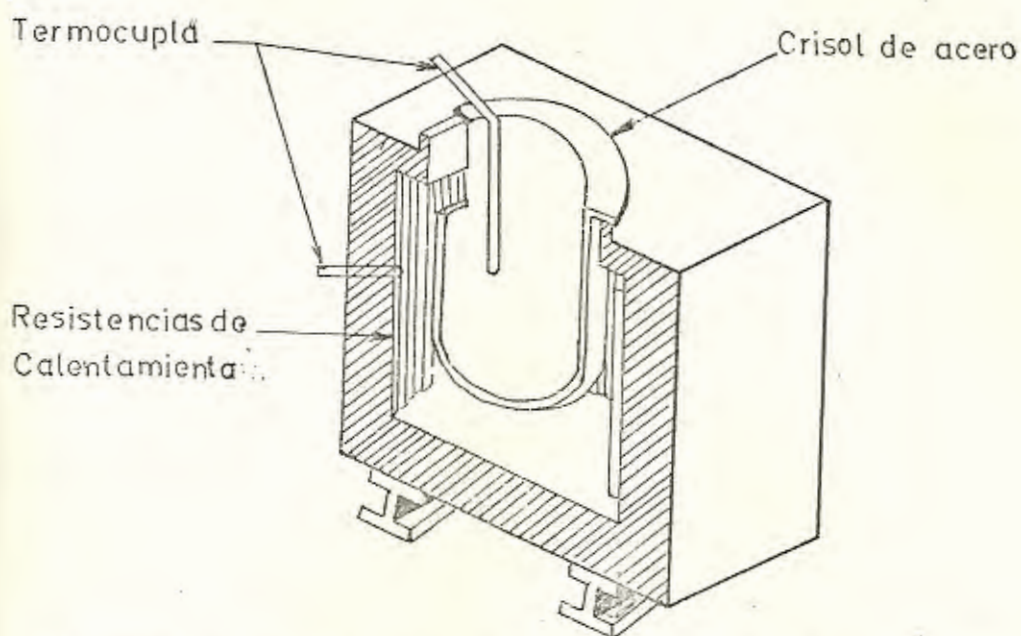


Figura 2.9 Horno calentado exteriormente por resistencias eléctricas

Estas resistencias eléctricas se pueden destruir cuando se produzca una falla en el crisol por oxidación, es por esto recomendable el uso de temperaturas menores que 900°C . Para evitar el sobrecalentamiento cuando está en operación existe una termocupla en la parte de la cámara, entre el crisol y los arrollamientos, que indicará la temperatura y nos prevendrá de daños posteriores.

Los elementos de calentamiento son arrollamientos a través de los cuales pasa la corriente eléctrica, la refractariedad y la resistencia mecánica en caliente de los materiales para elementos de

calefacción no permite calentamientos tan grandes como los baños calentados por gas y sólo se alcanzan pequeñas cantidades.

El calentamiento en general es lateral, si se sitúan resistencias en el fondo, es fácil que por la fuga de los depósitos fluya el líquido de los baños sobre los arrollamientos de calentamiento, por lo que únicamente es admisible calentar el fondo cuando la conexión de los arrollamientos correspondientes se realiza separadamente de los laterales y estos se conectan primero.

La carga por unidad de kilovatio/m², debe ser un 20% menor que la de las superficies laterales. Los elementos de calefacción laterales deben ser lo suficientemente separados del crisol para que no se produzcan sobrecalentamientos locales. Las ventajas y desventajas son similares a la de los hornos calentados por gas o aceite.

c) Hornos de electrodos inmersos tales como los mostrados en la figura que sigue:

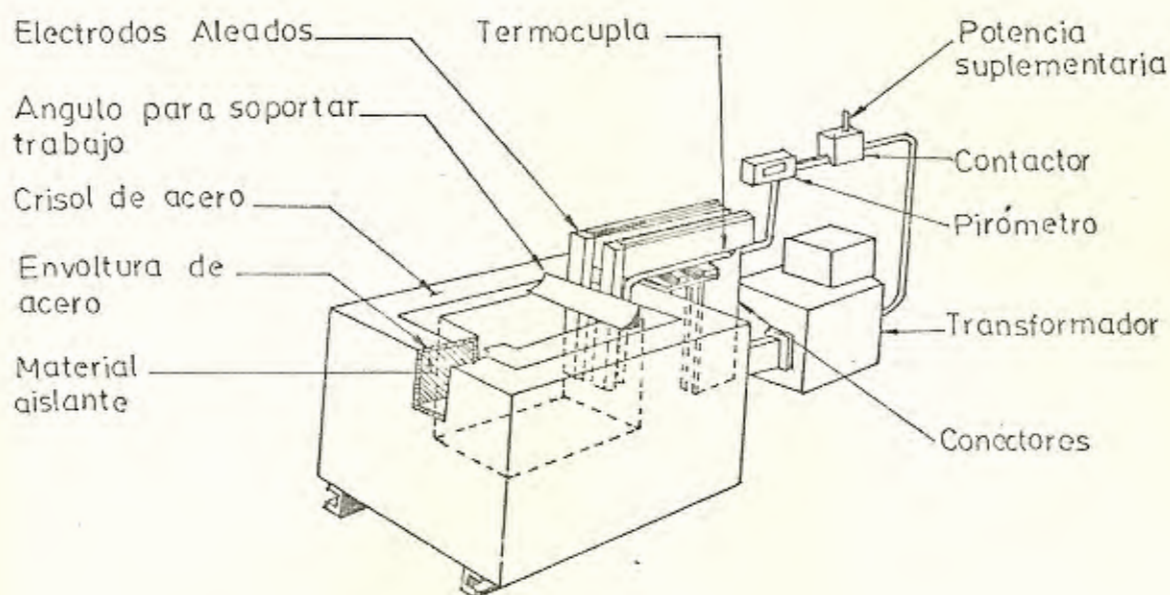


Figura 2.10 Horno de electrodos inmersos (8)

Aquí se puede anotar que cuando el uso y la capacidad son parámetros determinantes, este tipo de horno es de los que más grandemente está extendido su empleo.

En la generalidad los recipientes en que reposan las sales fundidas, con espesor de 1.3 - 3.8 centímetros se encuentran recubiertos de material aislante y alrededor de este un acero de alta presión que adiciona esfuerzos estructurales al horno. La corriente que pasa a través de las sales es la encargada de producir el calentamiento de éstas.

Para la transmisión de corriente a los transformadores éstos se de

berán agarrar con cables de aluminio o cobre con un transformador el cual nos hará la reducción de voltaje de línea, a unos 5-15 voltios que deberán pasar por los electrodos. Es necesario el uso de termocuplas, pirómetros, contactores y relé para un control y regulación automática de la temperatura.

En lo referente al tamaño de los crisoles estos están limitados a determinadas dimensiones de unos 1.5- 2,4 m, aunque existen diseños especiales.

Las ventajas que tienen estos hornos es el poco espacio que ocupan en el taller, y su mantenimiento es mínimo, pueden ser usado para todo tipo de baño de sales; los electrodos son hechos de acero aleado y operados a una densidad de máxima de 12 amp/cm² de área de electrodos, éstos pueden ser reemplazados y no es necesario de recubrimientos costosos cuando están en operación.

Es importante su posición dentro del baño, pues esto determina la posición de la medición de temperatura y se obtiene fácilmente en estos hornos una desviación de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, el calor es generado dentro del baño.

Los crisoles usados no requieren de aleaciones de Fe-Cr-Ni, cuando operan normalmente, en el sentido general un crisol de acero al carbono dura un año o más, son de construcción soldada, con ladri-



llos para su aislamiento.

Los períodos de duración de los crisoles son de acuerdo a su temperatura de operación tal como detallamos a continuación:

840°C máx.	.....	2 - 3 años
870°C "	.....	1.5 - 2 años
900°C "	.....	1 - 1.5 años
926°C "	.....	1 año

su tamaño no está restringido, varían tanto en su longitud como en su anchura para usos adecuados; varios electrodos pueden ser usados para proveer el calor necesario con suficiente capacidad. Los crisoles son fijos no son intercambiables, resulta dificultoso esta operación ya que se necesita una considerable cantidad de esfuerzo y, generalmente resulta en el estropeo del aislamiento que se encuentra a su alrededor. Para un uso con diferente tipo de sales es más fácil vaciarlo que reemplazarlo por otro.

Los hornos de electrodos inmersos no están desarrollados para producciones intermitentes, y depende de su tamaño para recalentamiento de la carga de las sales y esto puede requerir de un día o más.

d) Hornos de electrodos sumergidos como los mostrados en la figura:

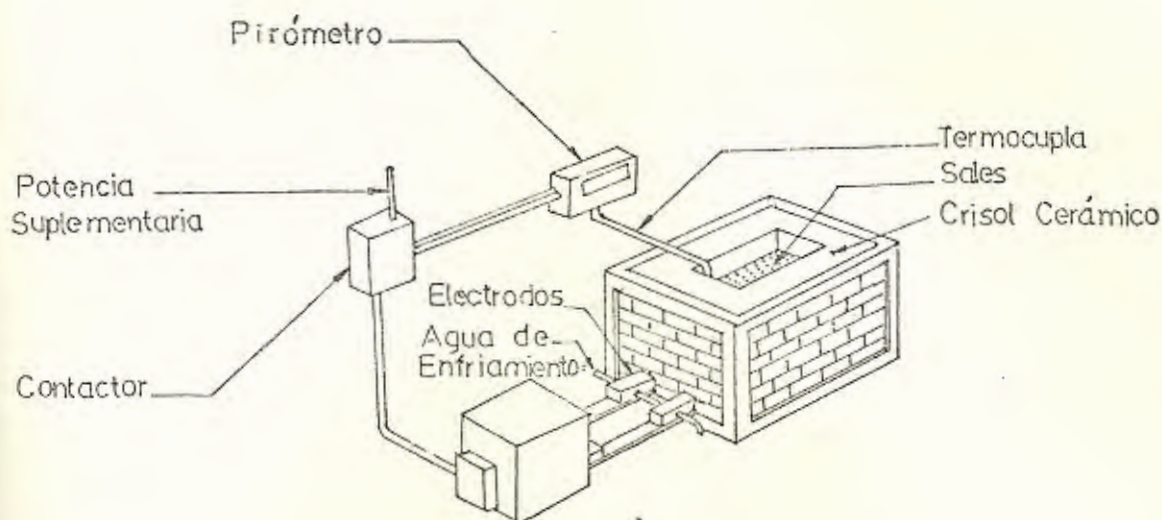


Figura 2.11 Horno de electrodos sumergidos

Son *construidos generalmente de ángulo de hierro; y una placa de acero que está colocada en la base debajo del enladrillado. El enladrillado exterior consiste de teja cerámica o construcción de ladrillo común. El crisol de sales está hecho de ladrillo refractorio de aluminio quemada. Se usan los desperdicios aptos de aislamientos para llenar el espacio entre los lados de las paredes y el crisol de cerámica.*

Cuando las sales están fundidas en el crisol, ellas penetran en el refractorio para enfriar convenientemente, lo suficiente hasta solidificarse. La cáscara resultante de la solidificación de las sales retendrá las sales líquidas en el horno. Si se producen -

grietas es necesario bajar la temperatura del baño para permitir una solidificación de las sales en las rajaduras.

El agua de enfriamiento de los electrodos que están en contacto con las sales fundidas del crisol, se encuentran aisladas entre las paredes del refractorio por las sales frías. La corriente viaja entre los electrodos, la cual está fluyendo con los lados de la pared. La línea de corriente viaja extendido a pocas pulgadas alrededor del tope de los electrodos. Si una pieza de trabajo grande está suspendida en este horno, de manera que el extremo más bajo se encuentre en esta trayectoria, la corriente fluirá a través de la pieza de trabajo. Por consiguiente, si la pieza de trabajo es de sección transversal delgada, será calentada a una temperatura que es más alta que la del baño.

El sobrecalentamiento resultará en la penetración de la capa carbo-nitrurada. Un protector de acero, puede ser usado para proteger la pieza de trabajo de la corriente, si el horno no está lo suficientemente profundo para la pieza de trabajo y no es digno de agregarse un enladrillado en el tope del horno para profundizarse el baño.

Para arrancar este horno, se puede usar sales fundidas de otros hornos o por uso de una antorcha calentada por gas para fundir un charco de sales que humedecen ambos electrodos y proveerán sales

fundidas para el paso de corriente. Se puede adicionar una pequeña cantidad de polvo de grafito para reducir la oxidación de la superficie de los electrodos y bajar la resistencia al arranque.

Después, la corriente empezará a fluir siendo establecidas en las sales fundidas entre los electrodos, sales adicionales serán requeridas para mantener este nivel, porque unas se colarán dentro del enladrillado y solidificarán.

Si el horno va a ser cerrado las sales fundidas serán desagüadas del horno antes de solidificarse. Sin embargo, si las sales son admitidas para permanecer en el horno, un arranque de calentamiento de resistencias frío será sumergido en el fondo del baño, en el cual la sal está fundida. Este arrollamiento permanece en la sal solidificada y es conectada al transformador en primer lugar para arrancar desde arriba el baño.

Entre las ventajas podemos citar, el espacio que ocupan en el taller es pequeño y son adaptables a la mecanización, también este horno puede ser usado sobrecargado debido a que sus electrodos y transformador son enfriados por agua y los de electrodos inmersos son enfriados por aire y se pueden usar sobrecargados un 10 por ciento; las fallas inesperadas son imposibles en hornos de electrodos sumergidos y el horno puede ser reconstituido en un plan de inventario anual de cerramiento.

Es común con otros equipos eléctricos, los hornos de electrodos su mergidos tienen una desventaja donde las razones de potencia eléctrica son altas, pero esto puede ser superado en la misma extensión por trabajo del horno en períodos fuera de pico, donde las razones de potencia son aplicables. Los hornos de electrodos no son desarrollables para usarse con sales de carbonitruración solubles en agua, que tiene en su contenido alto contenido de carbonato o cianuro de sodio a causa de los efectos erosivos de esos químicos en los crisoles cerámicos. Esos hornos pueden ser usados únicamente con sales de carbonato y cianuro bajos. A una temperatura de operación de 926°C , la vida de servicio de crisoles cerámicos están en el rango de 1a. 1.5 años con un baño de 8 a 12 por ciento de cianuro de sodio.

2.3 Parámetros que influyen en la carbonitruración líquida

Entre los principales parámetros que pueden influir directamente en el desarrollo conveniente y eficaz de la carbonitruración líquida se encuentran los siguientes:

2.3.1 Temperatura

Cuando se refiere a este parámetro, en realidad se está refiriendo a uno de los más importantes en la carbonitruración líquida, la cual varía generalmente en el rango de 760 a 900°C .

Las grandes temperaturas son seleccionadas para exceder el punto Ac1 del acero, para ejecutar una veloz penetración y producir un completo endurecimiento en el centro de la pieza después del enfriamiento.

Implícitamente cuando se desea seleccionar un cierto tipo, se determinará en que está influirá directamente en la estabilidad dimensional de las piezas enfriadas después del tratamiento; tiene un apoyo directo en el endurecimiento de superficies y corazones. Los aceros tratados a altas temperaturas de carbonitruración y enfriados arriba de la temperatura crítica superior producirá altas durezas en el corazón. Esas altas durezas en el corazón son deseables en aplicaciones que involucren altos esfuerzos superficiales, porque un corazón duro es necesario para soportar estos esfuerzos.

La temperatura también influirá en el contenido de carbono y nitrógeno, ya que a más altas temperaturas el contenido de carbono en la superficie carbonitrurada es mayor, que el contenido de nitrógeno; y cuando es menor esta temperatura, el contenido de nitrógeno es mayor que el contenido de carbono.

También influye en la austenita retenida; ya que al aumentar la temperatura del horno, se reduce el contenido de nitrógeno de la porción exterior de la capa, entonces se minimiza la -

cantidad de austenita retenida; ya que ésta es indeseable en muchas aplicaciones, la baja dureza en la indentación es causada por la presencia de esta austenita retenida.

Además, ésta puede ser extremadamente perjudicial en las partes componentes de juntas de cierre meticuloso como son, ejes y juntas de mangos donde el eje es designado para rotar con movimientos de vaivén del mango.

En general, los baños de carbonitruración operan a temperaturas alrededor de 740°C contendrán del 1 al 2 por ciento de cianato, mientras los baños que operan entre 760 y 840°C contendrán de 2 a 5 por ciento de cianato. El cianato contenido puede ser incrementado por movimiento o aireación.

2.3.2 Tiempo

En mucho depende la carbonitruración líquida de este parámetro, su función es esencial para realizar un acertado y buen endurecimiento superficial, se puede empezar el tratamiento con tiempos relativamente cortos, a diferencia de otros procesos de endurecimiento superficial como la cementación, cuyo tiempo mínimo es de ocho horas para obtener resultados satisfactorios o la nitruración que son necesarios muchas horas, días e inclusive semanas.



Para la carbonitruración son necesarios períodos desde 10 minutos hasta 4 - 4.5 horas, lapso en el cual podremos alcanzar durezas de hasta más de 60Rc, generalmente cuando se usa el tiempo superior es fácilmente alcanzables durezas comprendidas entre 60 y 65 Rc, y profundidades de capa de 0.6 a 0.8mm.

Posteriormente, se observará que el tiempo está íntimamente relacionado a la temperatura y es así que a mayor tiempo y mayor temperatura la penetración de la capa y la dureza son mayores.

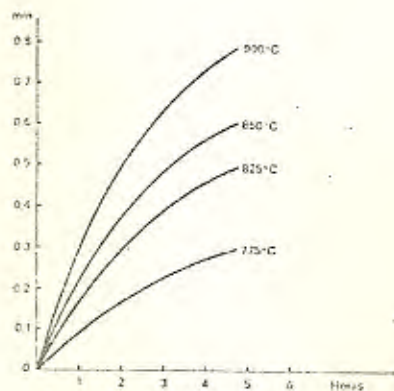


Figura 2.12 Profundidades de capa carbonitrurada en dependencia de la temperatura y del tiempo que dura la carbonitruración en sales de cianuro.

2.3.3 Concentración del baño

En cuanto se refiere a la concentración del baño, es menester señalar como será afectada la carbonitruración por la variación de este parámetro.

Va a depender de esto también las diferentes aplicaciones que se de al proceso, debiendo tomar en cuenta que lo más importante es cuánta cantidad de cianuro se encuentra en el baño.

En el mercado se encuentran presentes tanto cianuro de sodio como de potasio, siendo de nuestro interés el cianuro de sodio comercial por ser de menor precio, que el cianuro de sodio - concentrado o que el cianuro de potasio. Se adiciona además, sales inertes tales como el carbonato de sodio y cloruro de sodio, pues agregadas en proporciones convenientes, se comportan de igual manera que el cianuro de sodio, además, su finalidad es proporcionar fluidez y para controlar los puntos de fundición a los cuales nos referiremos posteriormente.

Se empieza anotando que cuando se quiere seleccionar una concentración para endurecimiento por carbonitruración líquida, el cianuro deberá estar en una proporción del 25 al 30 por ciento; pero otra concentración será usada para el recalentamiento de partes previamente tratadas, está constará con una cantidad de cianuro del 15 al 25 por ciento, o una concentra-

ción del 2 al 15 por ciento para endurecimiento abierto o restauración de carbón de piezas descarburizadas.

Sin embargo, para el caso que se quiera un endurecimiento por carbonitruración, se empieza con un baño inicial o de arranque de un contenido no mayor que el 30 por ciento de cianuro de sodio. El contenido de carbono en el caso desarrollado por un baño de cianuro, incrementa con la concentración de este en el baño, y es así como se dijo anteriormente un contenido de cianuro del 2 al 4 por ciento y operando a una temperatura de 815 o 840°C, es usado para restaurar carbón.

El contenido de nitrógeno en el caso de carbonitruración líquida, depende del contenido de cianato en el baño, incrementa cuando más grandes cantidades de cianato existen; pero esto depende de la concentración de cianuro, temperatura del baño, cantidad de aireación del baño, nivel de composición química.

2.3.4 Medio de enfriamiento

Si las partes carbonitruradas son enfriadas en agua o en aceite depende de la distorsión admisible, el tamaño y forma de las partes, la composición del acero, los requerimientos metalúrgicos (igual como dureza), y tipo de horno empleado.

Cuando se enfría en agua es muy importante observar la distor-

sión permisible, las partes hechas de acero de bajo carbono son propensas a este enfriamiento.

El enfriamiento en agua será libre, como posible disolver de gases, los cuales pueden producir lugares blandos. Entonces el agua de enfriamiento o salmuera no serán agitados por medio de aire. Para obtener máximo endurecimiento y para distorsiones mínimas, el baño de enfriamiento será movido únicamente en lugares donde las partes son largas o delgadas, para poder enfriarlas y normalmente son enfriadas como sea posible.

Los puntos blandos generalmente aparecen cuando entra agua nueva en un depósito en el fondo y sale calentada por un extremo superior, aparecerán cuando los aceros son sensibles a ellos; este contratiempo es atribuible en primer lugar, a los gases disueltos en el agua nueva como el anhídrido carbónico, el oxígeno y el nitrógeno, y en segundo lugar del anhídrido carbónico procedente de la disociación de los bicarbonatos.

Aún en el agua nueva en reposo se forman burbujitas sobre los productos que se enfrian. El agua corriente de las cañerías y los pozos está muy enriquecida en gases que favorecen la formación de películas de vapor. Tan pronto como el agua de enfriamiento alcance temperaturas superiores a 50°C, aproximadamente, se registran oscilaciones en las durezas obtenidas.

La situación es mejor cuando se usa para el enfriamiento agua dura vieja, de la cual constituyentes gaseosos han sido ya expulsados en su mayor parte o han precipitado las sales que endurecen el agua. Para eliminar estos inconvenientes se emplean en lugar de agua soluciones salinas como por ejemplo, soluciones de sal común al 10 por ciento.

Si el enfriamiento se lo hace usando aceite, éste deberá ser un aceite mineral, la mezcla de aceites minerales y animales nunca serán usados para enfriar aceros carbonitrurados en sales de cianuro, porque la materia untuosa del aceite animal, saponificará con la descomposición producida en el baño de cianuro (álcali) causando un jabón duro. Este retardará la velocidad de enfriamiento del aceite y podrá también impedir el desagüe.

Además, es muy frecuentemente la impurificación del aceite por la presencia de trazas de agua. Los aceites minerales de enfriamiento sólo disuelven el 0,003 por ciento de agua y las cantidades mayores se dispersan libres más o menos finamente. Cuando el contenido de agua supera al 0,5 por ciento se aminora el efecto refrigerante del aceite; porque se prolonga la fase de revestimiento por vapor y si llega a varios porcentajes se puede producir agrietamientos en el acero. Además, cuando el contenido de agua es tan alto, se forma mucha espuma

al enfriar las piezas y en condiciones desfavorables, puede inflamarse el aceite finamente disperso en la espuma formando una viva llama.

La espuma aparece más fácilmente cuando la temperatura del baño es superior a la normal. Por estas razones es necesario evitar que el agua llegue al aceite. La eliminación de la que contenga, sólo puede conseguirse evaporándolo por calentamiento a más de 100°C o por purificación en filtros de prensas.

La temperatura del aceite de enfriamiento puede variar de $37-200^{\circ}\text{C}$, un aceite especial de punto de gran destello puede ser usado a grandes temperaturas, en orden a minimizar la distorsión. En el rango normal de temperatura ($50-70^{\circ}\text{C}$) un aceite mineral, con un mínimo punto de destello a 120°C y una viscosidad de 100 SUS, es comúnmente usado. Los aceites especiales contienen aditivos para incrementar la razón de enfriamiento.

En general el aceite de enfriamiento usado, tendrá una baja capacidad para disolver agua en orden a mantener la máxima cantidad de enfriamiento eficiente.

Si usamos aceite de enfriamiento que disuelva pequeñas cantidades de agua, puede ser menos eficiente en tres o seis meses,

esos que arrojan el agua completamente pueden ser usados por un largo de dos años, para ser reemplazados luego por aceite fresco.

2.4 Baños de tratamiento

2.4.1 Mezclas de sales

La carbonitruración líquida se suele efectuar con mezclas de sales que contienen cianuro de sodio en el rango comprendido del 20 al 50 por ciento; 30 a 40 por ciento de carbonato sódico y 20 a 30 por ciento de cloruro sódico. De donde lo más recomendable, es usar porcentajes de cianuro sódico variables de 30 a 40 por ciento.

En el comercio existen cianuro sódico para usos industriales de varias concentraciones, siendo las más corrientes las que señalan en la siguiente tabla:

CONCENTRACION	CIANURO SÓDICO CNa %	CARBONATO SÓ- DICO CO ₃ Na ₂ %	CLORURO SÓDICO ClNa %
96 a 98%	97.0	2.3	trazas
75%	75.3	3.5	21.2
45%	45.3	37.0	17.7
30%	30.0	40.0	30.0

Tabla 2.4 Composiciones de diferentes calidades de cianuro comercial. (2)

Porque la mezcla de cianuro sódico comercial contiene muy poco cianato de sodio, ellas antes son fundidas en un volumen menor un baño de cianuro puede ser envejecido alrededor de 700°C de 4 a 8 horas, para proveer suficiente cianato para dar más eficiencia en el caso de actividad del tratamiento. A la temperatura de envejecimiento, la razón de cianato es alta y la razón de descomposición es baja.

2.4.2 Características y control de las sales

Como una de las principales características es de que estas sales son de carácter alcalino. A continuación presentamos una tabla con las características más importantes:

CONCENTRACION	PUNTO DE FUSION $^{\circ}\text{C}$	GRAVEDAD ESPECIFICA	
		A 25°C	A 560°C
97 %	560	1.50	1.10
75 %	588	1.60	1.25
45.3 %	570	1.80	1.40
30.0 %	625	2.09	1.54

Tabla 2.5 Características del cianuro de sodio comercial 57

En lo que respecta al control de estas sales, en los talleres se hacen periódicamente análisis de las sales y cuando con el uso disminuye el porcentaje de cianuro y el baño pierde actividad, se hacen adiciones de cianuro de alta concentración -

(generalmente 96 a 75%) para mantener el contenido de cianuro del baño dentro de los límites convenientes. En la parte experimental se dará a conocer los pasos respectivos y métodos analíticos para determinar el cianuro de sodio, cianato de sodio, cianato de nitrógeno, cloruro de sodio y carbonato de sodio.

2.4.3 Contaminantes de los baños

Para proteger el baño de los contaminantes y obtener una carbonitruración satisfactoria, todo trabajo o pieza de trabajo colocado en el baño, será completamente limpio y libre de óxido en la superficie, cualquier limpieza con líquido abrasivo es recomendado antes de la carbonitruración.

También, las partes serán precalentadas antes de ser sumergidas en el baño, para librar de humedad la superficie.

Para minimizar la corrosión de la interfase del aire salado, la sal será cambiada cada tres o cuatro meses, (el reemplazo de la sal es usualmente más económico que reemplazar el crisol).

Cuando el baño no se usa, será cerrado; una exposición excesiva al aire causa una transformación de cianuro a carbonato y afecta adversamente a vida del crisol. Todo baño puede ser

periódicamente descargado de los productos de oxidación, los cuales producen gradientes de temperatura desfavorables.

A estos baños no debe llegar ningún trozo de material cerámico por ejemplo, arena, chamota, cemento, arcilla, barro o cualquier masa aisladora. Incluso las más pequeñas cantidades de estas materias dañan a estos baños y los inutilizan por completo.

Cuando el baño ya se encuentra en operación, espontáneamente se generará una espuma en su superficie. La espuma es un producto de la reacción de cianuro a cianato y, además puede ser vista, por la presencia de aceite en el trabajo, es usualmente, causada por un cianuro en exceso sobre el 30 por ciento.

Cuando se forma la espuma en el baño, las partículas finamente divididas de carbón y distribuidas a través del baño, manchará las piezas de trabajo, se adherirán a éstas cuando se retiran del baño y pueden interferir con el medio de enfriamiento para producir extensos lugares blandos en la superficie endurecida.

2.5 Aceros para carbonitruración líquida

En la carbonitruración se facilita mucho la sustitución de los aceros de alta aleación por aceros de bajo precio. Además, se amplía el -

campo de las aplicaciones de los aceros baratos, que
tan el inconveniente que después del temple que sigue
ción ordinaria, pues aparecen algunos puntos blandos
presentarse en la carbonitruración.

A veces, en los aceros aleados disminuye algo la dureza superficial
por la presencia de la austenita retenida. Estos aceros conservan
después del revenido durezas más elevadas que los aceros de cementa-
ción debido a la presencia de nitrógeno en la capa carbonitrurada.
Generalmente, es necesario emplear temperaturas de revenido más al-
tas que las empleadas en la cementación para obtener la misma dure-
za.

Comúnmente los aceros para carbonitruración incluyen a estos SAE o
AISI 1000, 1100, 1200, 1300, 4000, 4100, 4600, 5100, 6100, 8600 y
8700, con un contenido de carbón alrededor del 0.25 por ciento.

También muchos aceros en esas mismas series con un rango de conteni-
do de carbono de 0.35 a 0.50 por ciento, son carbonitrurados para -
penetración de alrededor de 0.3mm, con una combinación de una razona-
ble dureza, un interior completamente duro y un requerimiento de gran
dureza superficial (Ejes y engranajes de transmisión son ejemplos tí-
picos).

Partes de medio carbono, de carbono o aceros aleados son a menudo -
calentados para endurecimiento en baños de sales para producir un -

caso de alto endurecimiento superficial y gran resistencia al desgaste como los aceros de la serie SAE o AISI 4140, 5140, 8640 y 4340 que son usados para engranajes de servicio duro.

2.6 APLICACIONES

Por ser la carbonitruración una modificación del proceso de carbonitruración, las aplicaciones son más restringidas. La carbonitruración está limitada para casos de penetración de alrededor de 0.8mm, o menos, mientras estas limitaciones no son iguales para la carburización.

Por otro lado, la resistencia de una superficie carbonitrurada al ablandamiento es marcadamente superior que el de una superficie carburizada. Otra notable diferencia existe en términos de tensiones residuales patrones, estructura metalúrgica, resistencia a la fatiga y al impacto a niveles específicos de dureza.

A continuación se presentan los diversos elementos que se pueden carbonitrurar, hechos de aceros al carbono y templados en aceite, tales como portacojinetes, levas, bujes, filos de cinceles, engranajes, tuercas exagonales, mandriles, eslabones, ejes, engranajes corredizos rectos, pasadores de bisagras, resortes de pasadores, piñones de transmisión rectos.

En aceros aleados, también templados en aceite como engranajes helicoidales, piñones diferenciales, coronas dentadas, engranajes planetarios, piñones de transmisión, arandelas del árbol de transmisión,



entre otros.

2.6.1 Endurecimiento selectivo

Cuando únicamente ciertas áreas de una parte van a ser endurecidas, esto se hace a menudo posible, sumergiendo únicamente la parte de la pieza de trabajo a ser endurecida en el baño de cianuro.

Si el templeado o recocido que ocurre inmediatamente alrededor de la línea de baño es inadmisibles, la pieza de trabajo puede ser enfriada en aceite o aire frío, lavado, deshidratado y calentado para reendurecimiento en un baño de sales neutras.

También es posible, endurecer áreas superficiales selectas por calentamiento al rojo de partes enteras, rociando cianuro en polvo en las áreas a ser endurecidas. -recalentando (usualmente en una forja o en un baño de plomo), retrociando y enfriando. Porque el ferrocianuro de sodio no es venenoso, es preferido para estas aplicaciones, es tan efectivo como el cianuro de sodio. Por otra parte, cuando el acero es calentado en un baño de plomo, la capa de ferrocianuro de sodio, previene que el plomo se adhiera al acero).

2.6.2 Jaspeado por carbonitruración líquida

A los aceros de alto carbono pueden darse un jaspeado o plateado fino permanente, por inmersión en un baño de cianuro al 30 por ciento a 760°C . Las partes, completamente terminadas y pulidas, pueden ser sumergidas largamente, lo suficiente para ganar la temperatura del baño.

Las partes entonces van a ser sacadas del baño y suspendidas en el aire hasta que sus superficies esten casi blancas, esto es, hasta que las sales en las superficies se aproximen al punto de solidificación. Las partes son, entonces enfriadas en soluciones acuosas que contienen nitrato de sodio o potasio al 10 por ciento. El enfriamiento produce una superficie dura, azul, plateada, que puede ser lavada, empolvada y aceitada. La falla para ejecutar satisfactoriamente el plateado o jaspeado, es usualmente causado por una excesiva alta temperatura de enfriamiento.

Este jaspeado puede ser removido por inmersión de la pieza de trabajo en una solución acuosa, que contiene ácido clorhídrico al 10 por ciento y calentado a 65°C . Una inmersión prolongada en la solución ácida dará como resultado un picado.

CAPITULO III

TECNICA EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL USADO

Lo que se relaciona al equipo experimental usado, es uno de los aspectos más importantes que se debe tomar en cuenta, este experimento o en cualquier otro tipo de experimentación; de esto depende el éxito o fracaso, la rapidez o demora de las pruebas necesarias.

Razón por la cual se trató de poner el mayor énfasis en la puesta en marcha del equipo experimental usado, que a continuación se pasa a describir.

a) Horno de baño de sales

Este es un tipo de horno, descrito con más detalle en la sección 2.2, calentado exteriormente por resistencias eléctricas y tiene una capacidad de calentamiento hasta de 790°C .

En su parte central está montado un crisol hecho de una aleación denominada INCONEL X, de juntas soldadas, con una capacidad volumétrica para almacenar en su interior unos 15 litros de sales fundidas; generalmente, no será llenado hasta su tope, sino hasta un 75 por ciento de éste, para evitar derramamiento de las sales.

En la siguiente figura 3.1 se muestra el citado horno.

b) Control de temperatura

Para un control eficiente de la temperatura del baño se requiere equipos automáticos de precisión, tanto para su medición como para su regulación. En la figura 3.2 se muestra el equipo de medición y regulación.

c) Sistema de extracción de gases

La razón que hace que se instale un sistema, es principalmente por lo siguiente:

Los gases que salen del horno despedidos por las sales fundidas, aunque no son de carácter venenoso, tienen el inconveniente que son irritantes y, producen malestares en el personal que opera el horno. Existiendo la posibilidad de que se pueda combinar con algún ácido en estado volátil, ácido cianhídrico el cual es altamente mortal.

Para evitar cualquier inconveniente posterior que pueda presentarse como en efecto sucedió. Existiendo la necesidad de eliminar o evacuar del laboratorio un polvo fino a manera de neblina, que emanan las sales fundidas. Polvo de carácter irritante, llegando en determinadas ocasiones a perturbar el normal trabajo de las personas que se encuentran presentes.

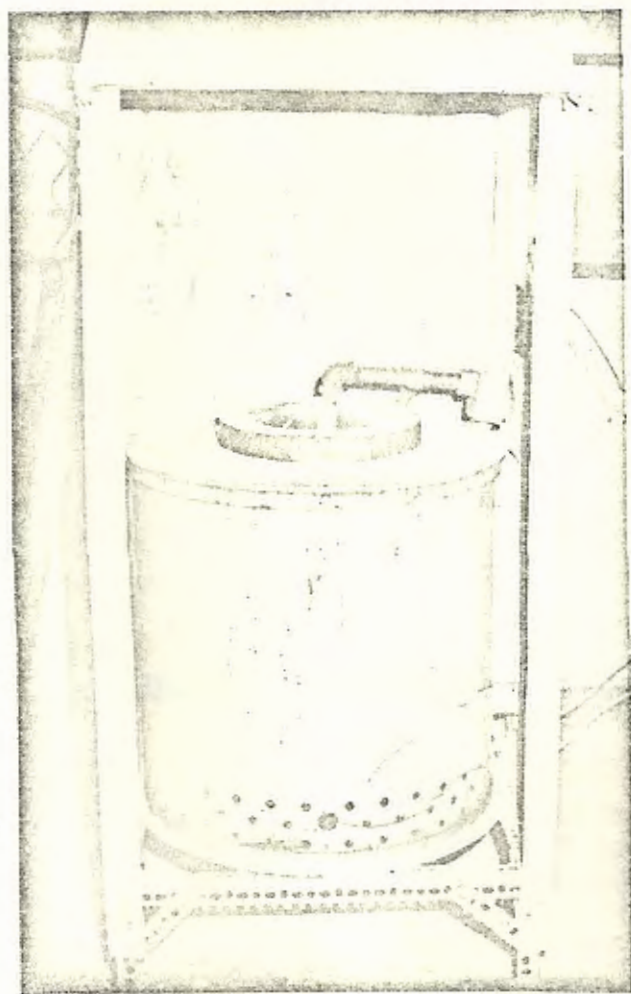


Figura 3.1 Horno de baño de sales calentado por resistencias eléctricas marca Lindberg, modelo 46- HC-814-16. Capacidad eléctrica de 5000 vatios.

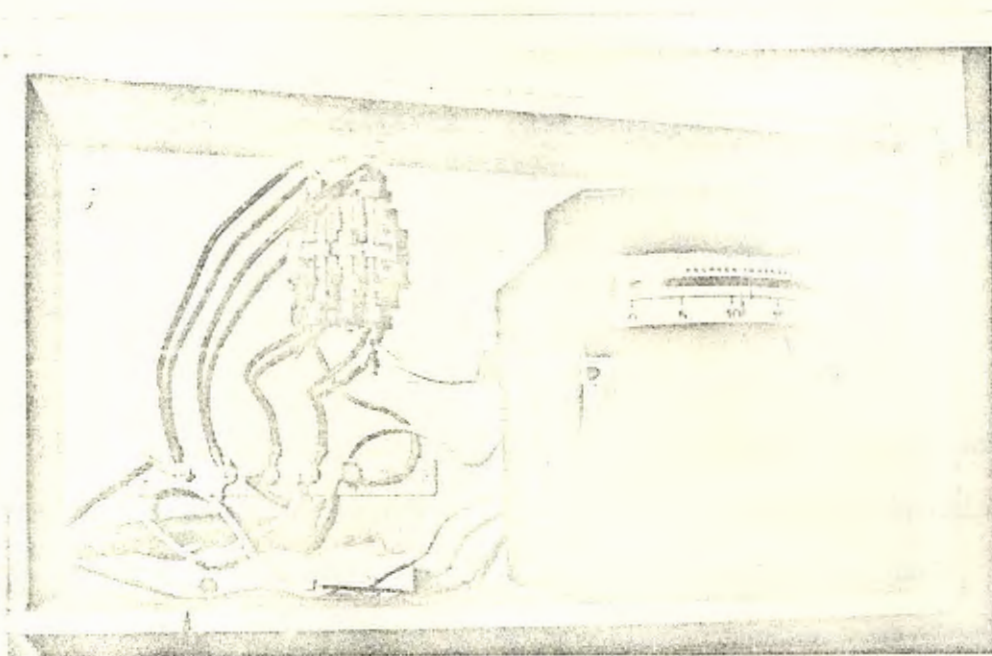


Figura 3.2. Equipo automático de medición y regulación de temperatura. Capacitrol 471P de La Barber Collman. Capacidad de medición hasta 1023°C.

Por lo citado anteriormente, se procede a la construcción del sistema, empleándose para esto plancha galvanizada de 0.8mm., (1/32 pulg). El uso de plancha galvanizada se justifica en el hecho de proteger a este de la corrosión que puede producirse al contacto con los gases de las sales, los cuales son altamente corrosivos, lo mismo ocurre con la unión de sus juntas a las cuales se debe soldar con soldadura de estaño, para protegerlas de esta corrosión. Se usa soldadura y no simplemente un doblado, por el hecho de evitar el escape de gases por algún hueco que quede al doblar con sus consecuentes molestias.

El encendido del extractor se lo debe hacer en los momentos más críticos únicamente, ya que este absorbe gran cantidad de calor y esto produce un enfriamiento de la parte superior del baño, y un sobrecalentamiento en la parte inferior del mismo, resultando efectos nocivos al sistema de resistencias eléctricas del horno.

La figura 3.3 muestra el sistema instalado.

3.2 SELECCION DEL ACERO Y OBTENCION DE PROBETAS

Entre los diversos factores que se deben tomar en cuenta en la selección de uno u otro tipo de acero para carbonitrurar, los más importantes a considerar son

a) La forma o tamaño de las piezas que se van a fabricar, junto con

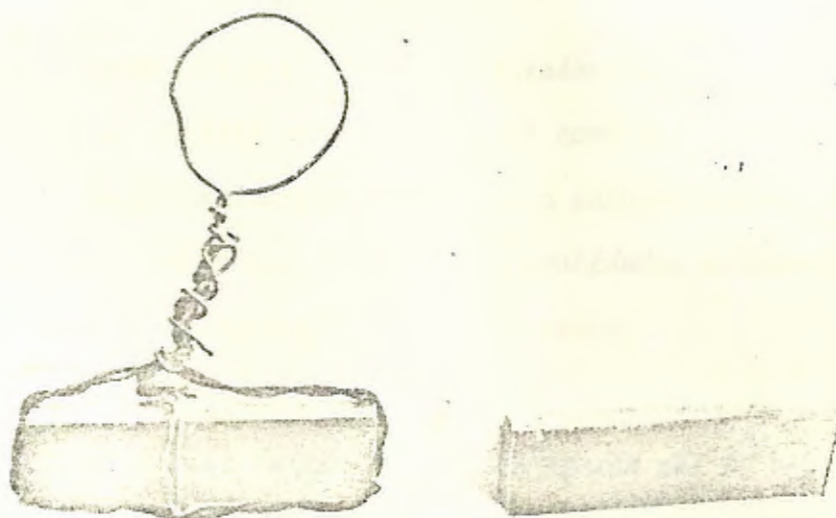


Figura 3.4 Probeta pulida y amarrada, lista para sumergirse en el baño.

d) Antes de introducir estas probetas en el baño se hace necesario -
 amarrar las probetas con alambres delgados, con la finalidad de -
 removerlas del baño con relativa facilidad después de transcurrido
 el tiempo de tratamiento. Cuando por su tamaño esto no sea posi-
 ble, es necesario colocarlas en cestas de alambre entretejido para
 realizar el tratamiento.

3.3 SELECCION Y ANALISIS DEL BAÑO A USARSE

Para la selección del baño es menester referirse a la sección 2.3, en
 la cual se hace un detalle pormenorizado de como influye la concentra-
 ción del baño, en el tratamiento del acero a carbonitrurar, a la sec-
 ción 2.4.1, donde también se trata de las cantidades necesarias tanto
 de cianuro, como de cloruro y carbonato de sodio.

De aquí se toma como base inicial la concentración del 30 por ciento
 para el cianuro de sodio, que es la que se usa cuando se desea hacer
 un endurecimiento, a esto acompaña una concentración de 30 por ciento
 de cloruro sódico o sal común, y del 40 por ciento de carbonato só-
 dico. Todo esto, en porcentaje de peso, convenientemente mezclado,
 se introducen en el crisol hasta su posterior fusión. las cantidades
 pesadas en forma inicial fueron:

30% de CNNa	.....	1000 gr.
30% de ClNa	.....	1000 gr.
40% de CO ₃ Na ₂	.....	1333 gr.

El carbonato y el cloruro de sodio adicionados actúan como diluyentes y combinados en estas proporciones actúan tal como si fueran cianuro, además varían el punto de fusión del baño haciéndole descender notablemente. Anteriormente, se usaba el cianuro solo, lo cual resultaba muy honeroso por el elevado precio de éste.

Aunque su punto de fusión es de 625°C , se reguló la temperatura a 820°C . Una vez fundidas estas sales y alcanzada la temperatura de regulación, se sumergen las probetas en el baño, no sin antes precalentarlas para eliminar la humedad que pudieran tener y provocar salpicaduras con sus consecuencias posteriores como son las quemaduras.

El tiempo que duró el tratamiento fue de cuatro horas aproximadamente, transcurrido este se sacan las probetas todas a la vez, sin considerar tiempo. Se los enfría en agua y se observa que estas tienen un color plomizo, se comprueba su dureza en el durómetro Rockwell, estableciendo que sus durezas oscilaban entre 42 y 52 Rc, durezas estas que no llegaban a satisfacer las metas pre-establecidas o sea una dureza que oscilará alrededor de los 60 Rc.

Durante el tiempo en el cual se realiza la experimentación, se observa en la boca del horno un polvo muy fino, que resulta molesto por su carácter irritante, por lo que se debe eliminarlo rápidamente. Este polvo es producto de una desconcentración del cianuro lo que se comprobó posteriormente.

Este fenómeno produce efectos desagradables en las probetas tratadas, los cuales se presentaron en la segunda experimentación; ya que con la intención de graficar curvas se la hace con un mayor número de probetas, con distintos tiempos de tratamiento. Pero esto no fue posible, por el hecho que en la superficie de las probetas se produjo una cascarilla negra como se muestra en la figura 3.5, esta cascarilla se desprende con facilidad de la superficie de las probetas, y la dureza en estas no es mayor que 45Re en las probetas de mayor tiempo de tratamiento.

Este problema hace que se evacúen las sales del horno y se funda sales nuevas, con las mismas proporciones anteriores y se realiza una nueva experimentación, pero el problema sigue subsistiendo, en especial para las probetas de más largo tiempo de tratamiento.

En estas circunstancias se hace necesario parar las siguientes experimentaciones y analizar que es lo que pasa. En primer lugar, el no conocer a ciencia cierta la concentración de cianuro que existe en el baño, pues hasta ese momento se trabajaba con la concentración dada por porcentajes en peso y con la información del distribuidor del cianuro (97% CNNa). La falta de control de la concentración del baño daba como resultados todas estas anomalías en el proceso. Por esto se hizo necesario solicitar ayuda al Instituto de Química, para poder realizar el control de las concentraciones existentes en el baño, en especial de la concentración de cianuro, control realizado de

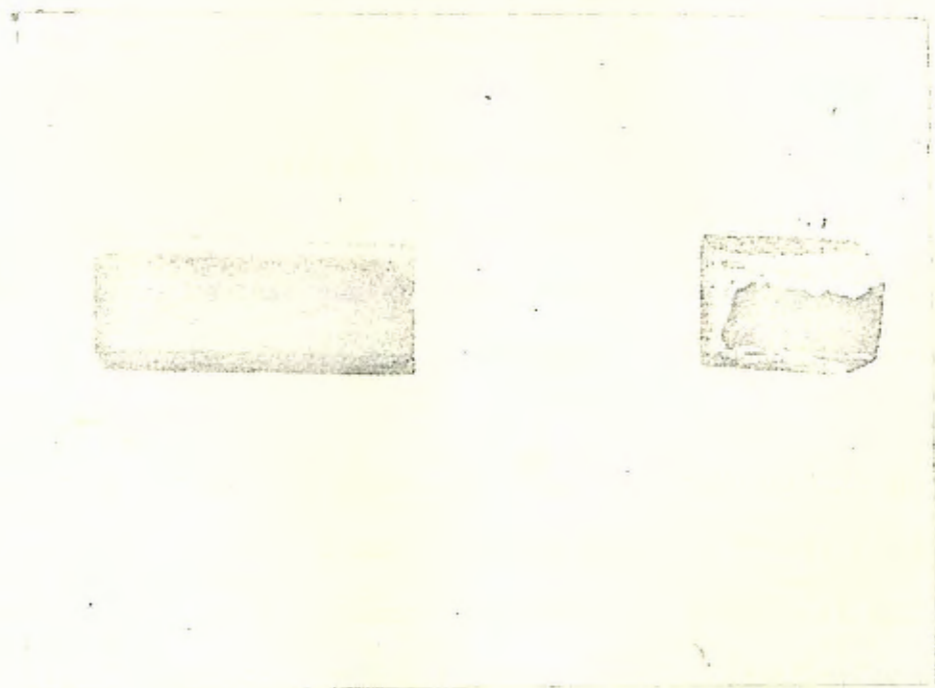


Figura 3.5 Probetas con defectos superficiales de cascarilla adherida a su superficie.

acuerdo a la técnica que se señalan en el anexo. Este análisis nos demostró que la concentración existente en ese momento era de un 3 por ciento, la cual comparada con el 30 por ciento necesario para el tratamiento resulta irrisorio.

Esta disminución de la concentración es producida por la falta de protección de la superficie del baño, ya que ésta se oxida rápidamente al contacto con el aire, transformándose en carbonatos.

Para evitar esta reacción del cianuro con el oxígeno del aire se optó por rociar con una fina capa de grafito la superficie del baño en proporciones menores que el 1 por ciento, con la finalidad de evitar el contacto directo con el ambiente y su rápida oxidación.

Aunque no se uso en esta experiencia, es necesario señalar que oxígeno o bióxido de carbono pueden ser insuflados a través del baño en orden a mantener la producción de cianato. También se puede agregar dióxido de manganeso y óxido bórico para suplir el oxígeno del baño, pero están sujetas a la adición de pequeñas cantidades porque en grandes cantidades causarían salpicaduras y gran emanación de polvo.

Daada a la baja concentración obtenida, se procede al vaciado de las sales del crisol y se coloca unas nuevas, se empieza esta nueva experimentación con la única diferencia del recubrimiento de la superfi-

cie del baño con grafito, la temperatura será mantenida a 815°C , y las cantidades de sales en iguales condiciones.

Después de fundidas éstas, se procede a determinar la concentración de cianuro existente, lo cual da un valor de 18 por ciento, que todavía no corresponde a lo necesario, por lo que se agregó una cantidad adicional de cianuro solo. Se vuelve a realizar la determinación y proporciona un valor de 36 por ciento, lo cual satisface los requerimientos.

Se procede a sumergir las nuevas probetas, se repite el ensayo de cianuración por un tiempo de cuatro horas, transcurrido éste, se las netiza del baño, notándose un prominente color plumizo como las de la primera experimentación. Se comprueba su dureza y esta oscila entre los 58 y 64 Kc. La concentración final del baño después del tratamiento es de 26 por ciento, perdiéndose un 10 por ciento en las cuatro horas.

En la figura 3.7, se presenta una probeta que ha obtenido un tratamiento exitoso.

Con estos resultados satisfactorios, se selecciona esta última mezcla como la adecuada y se la usará para las posteriores pruebas en las que se va a variar el tiempo de tratamiento, así como la temperatura.

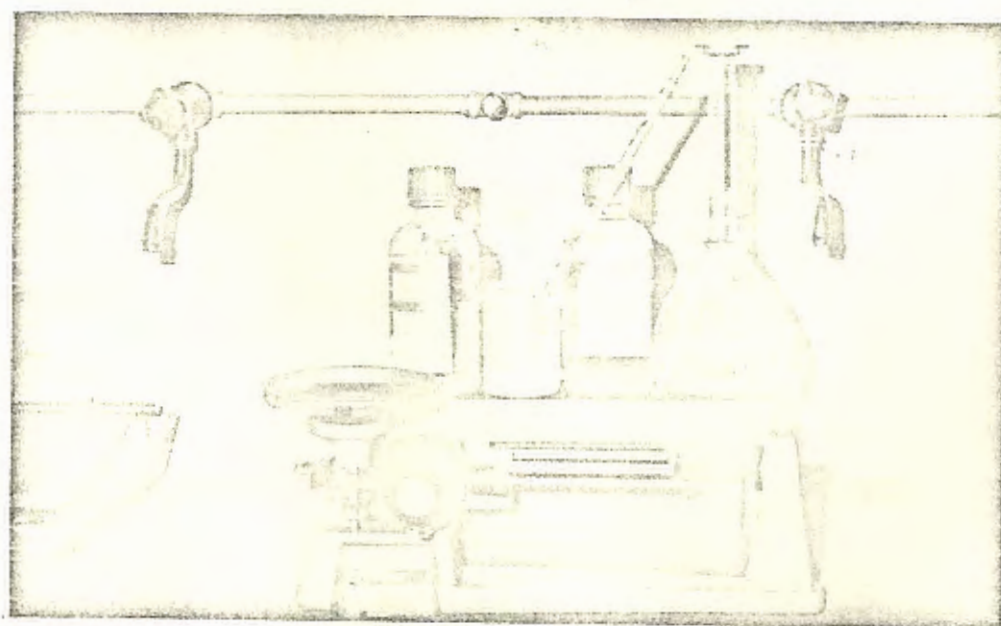


Figura 3.6 Equipo utilizado para determinar la concentración de cianuro.

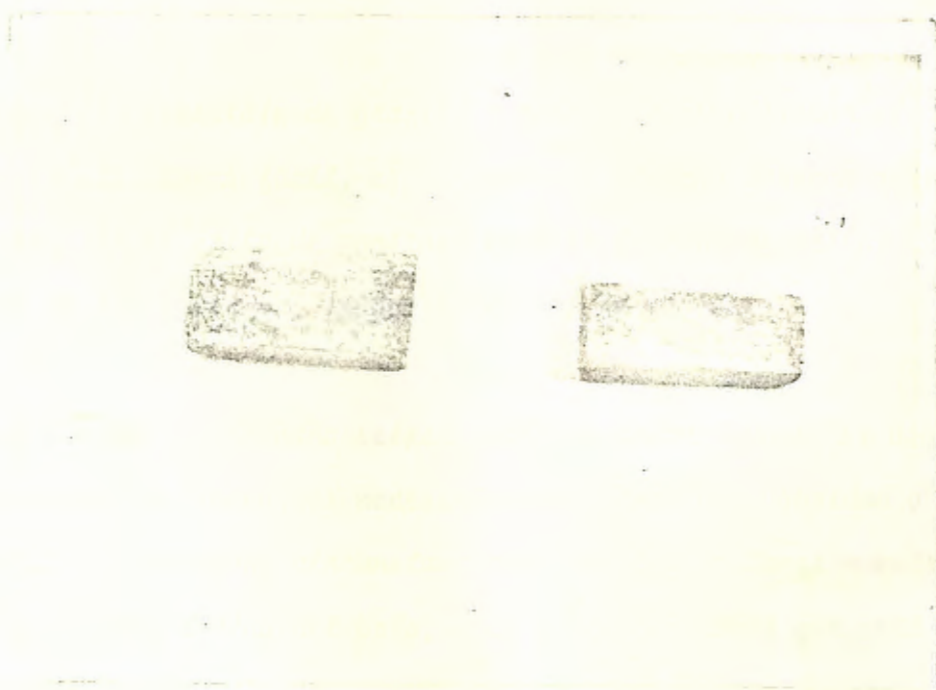


Figura 3.7 Probeta luego de un tratamiento exitoso.

La mezcla final en peso quedaría constituida así:

Cianuro de sodio	2000 gr.
Cloruro de sodio	1000 gr.
Carbonato de sodio	1333 gr.

Debiendo agregar cantidades en peso de cianuro de acuerdo al porcentaje de concentración perdida.

Dado que el porcentaje de grafito a agregarse es el 1 por ciento o menos su cálculo es fácil, es de suma importancia agregar este, porque ahí está el éxito de mantener estable la concentración, ya que es uno de los problemas fundamentales en el proceso.

Para el análisis del baño seleccionado en primer lugar, se debe tomar muestras del baño, es necesario usar gafas de seguridad o una máscara; bajo ninguna circunstancia la varilla de tomar muestras, será sumergida dentro del baño, sino hasta comprobar que está absolutamente seca.

Rápidamente se sumerge esta varilla de acero limpia y seca y pulida (alrededor de 1.6cm., de diámetro), dentro del baño fundido y se retira inmediatamente. El revestimiento delgado de las sales que se adhieren a la varilla, rápidamente se las reduce a pequeños pedacitos. Esto se repite hasta obtener suficiente muestra (si la varilla se recalienta se la enfriará antes de volver a sumergirla).

Se molieron las piezas de las sales sólidas en un mortero de hierro y protegio la muestra hasta ser usada para los análisis respectivos, realizadas de acuerdo a los métodos presentados en el anexo del apéndice. Las determinaciones y resultado se presentan a continuación.

3.3.1 Determinación del cianuro de sodio

En la determinación de este componente del baño, en la parte A) del anexo, se presenta el método que se utilizó. Se determinó la concentración de cianuro antes y después de cada experimentación, por ser el elemento más importante del baño, ya que de éste depende la producción del carbono y nitrógeno naciente. Para todas las experiencias realizadas el valor inicial promedio, fue de un 32 por ciento, y el valor final promedio del 26 por ciento.

3.3.2 Determinación del cianato de nitrógeno

En la parte B) del anexo, se puede apreciar el método de determinación del cianato de nitrógeno, habiéndose usado 20ml, de NaOH 0.1N y realizando el cálculo matemático respectivo,

el valor final fue de un 5.6 por ciento de este cianato de nitrógeno.

3.3.3 Determinación del cianato de sodio

La parte C) del anexo nos muestra una manera detallada de determinar el porcentaje de cianato de sodio existente en el baño.

Como la cantidad usada de ácido clorhídrico corresponde a 8.4 ml., multiplicando por el factor de 1.3, da un valor final de 10.92 por ciento de cianato de sodio.

3.3.4 Determinación del cloruro de sodio

En lo referente a determinar la cantidad de cloruro de sodio que está presente en el baño, es necesario que el uso de la parte D) del anexo, allí se pormenoriza los pasos que se siguen hasta encontrar dicha cantidad.

El nitrato de plata usado, y el tiocianato de amonio corresponden a 30ml., y 6ml., respectivamente; aplicando las fórmulas indicada para la determinación, da un valor correspondiente al 28.06 por ciento.

3.3.5 Determinación del carbonato de sodio

Es necesario que el uso del proceso indicado en la parte E del anexo, para encontrar el carbonato de sodio que el baño contiene.

Habiéndose usado 4ml., de ácido carbónico, 3.8ml, de hidróxido de sodio, y la fórmula detallada para su determinación; el resultado es de 38.37 por ciento.

3.4 ENSAYOS Y CONTROLES

Técnica operativa.- Para obtener muestras con los que se llevan a cabo los controles de los ensayos experimentales del proceso de carbonitruración, se ha seguido la siguiente secuencia de trabajo.

- a) Una vez pesadas las cantidades de cianuro, cloruro y carbonato de sodio, se las mezcla y ponen en el crisol hasta su fundición posterior.
- b) Luego, cuando ya está fundido se espera hasta que alcance la temperatura de operación, para tomar las muestras respectivas de acuerdo a lo establecido en el anexo, parte ^A, y se procede a la determinación de la concentración del cianuro en el baño, si está no es la conveniente, adicionar cianuro solo hasta alcanzar la concentración deseada.
- c) Se precalienta las probetas, y se las sumerge en el baño; es necesario este precalentamiento para evitar salpicaduras por la hume-

dad que puede tener.

- d) Con intervalos de tiempo de media hora se saca las probetas, se las temple en agua y se ejecuta los análisis posteriores para poder graficar con estos datos las curvas resultantes que identifiquen funciones del comportamiento del proceso.

3.4.1. Espesor de la capa carbonitrurada vs. tiempo de tratamiento a distintas temperaturas.

En esta sección, para poder apreciar y medir con nitidez el espesor de la capa que se ha producido a los distintos tiempos de tratamiento, es imprescindible efectuar una labor de adecuamiento de estas probetas. Es necesario recalcar que la capa a medirse no es una adición a la superficie de la probeta o pieza de trabajo, sino una difusión atómica que ha sufrido ésta, de átomos de carbono y nitrógeno, cuando estaban expuestas a altas temperaturas, esta capa es uniforme en todos los lados de la probeta.

Este adecuamiento consiste en un desbaste en el esmeril de uno de sus lados de aproximadamente 1mm., o sea el espesor de la capa carbonitrurada, enfriando repetidamente con la finalidad de no cambiar su microestructura por calentamiento. Se hace seguidamente un pulido especular del lado desbastado y se lo ataca con Nital al 2 por ciento, con el propósito de di

ferenciar la microestructura de las partes que han sufrido adición de átomos de carbono y nitrógeno de las que han quedado con su estructura original.

Luego de fijar con nitidez la imagen de la superficie a medirse en el ocular del microscopio, se procede a la medición de la capa carbonitrurada, es tomada desde el borde exterior hacia el centro, hasta donde se observa claramente una diferencia de microestructura entre la capa carbonitrurada y su núcleo, su valor es en micras.

A continuación se presenta los valores que se obtuvieron al realizar las distintas mediciones.

TEMPERATURA 760°C		CONCENTRACION 32% CNNa				
TIEMPO (Horas)	PENETRACION (micras) (100 μ = 0.1mm.)					
	1a.Med.	2a.Med.	3a.Med.	4a.Med.	5a.Med.	Promedio
1/4	62.0	65.0	60.0	64.0	60.0	62.0
3/4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1.0	109.0	111.5	112.5	119.5	109.0	112.3
1 ¹ / ₂	150.0	157.5	157.5	157.5	155.0	155.5
2.0	181.0	178.5	178.0	175.0	180.0	178.5
2 ¹ / ₂	178.0	192.0	192.0	190.0	190.0	188.3
3.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
3 ¹ / ₂ *	--	--	--	--	--	--
4.0 *	--	--	--	--	--	--

TABLA 3.2 VALORES de penetración a 760°C.

* No se pudo tomar valores en estas probetas

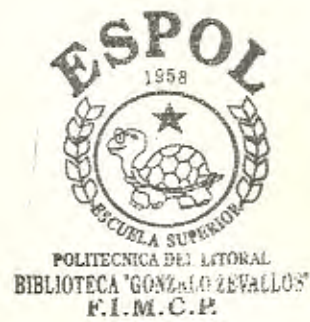
TEMPERATURA 815°C		CONCENTRACION 32% CNNa.				
TIEMPO (Horas)	PENETRACION (micras)					
	1a.Med.	2a.Med.	3a.Med.	4a.Med.	5a.Med.	Promedio
1/4	142.0	150.0	145.0	124.0	130.0	138.20
3/4	169.0	171.0	170.0	170.0	170.0	170.00
1.0	208.0	214.0	220.0	220.0	210.0	215.00
1 1/2	250.0	268.0	265.0	245.0	264.0	258.00
2.0	300.0	306.0	315.0	312.0	310.0	310.00
2 1/2	373.0	355.0	348.0	349.0	347.0	355.00
3.0	350.0	350.0	365.0	360.0	360.0	357.00
3 1/2*	--	--	--	--	--	--
4.0	450.0	455.0	454.0	440.0	440.0	448.00

TABLA 3.3 Valores de penetración a 815°C.

* No se pudo tomar valores

TEMPERATURA 840°C		CONCENTRACION 32% CNNa.				
TIEMPO (Horas)	PENETRACION (Micras)					
	1a.Med.	2a.Med.	3a.Med.	4a.Med.	5a.Med.	Promedio
1/4	163.0	172.0	140.0	181.0	150.0	161.00
3/4	200.0	180.0	200.0	180.0	200.0	192.00
1.0	266.0	240.0	250.0	250.0	262.0	254.00
1 1/2	246.0	275.0	273.0	280.0	290.0	272.80
2.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.0	300.00
2 1/2	380.0	420.0	400.0	390.0	410.0	400.00
3.0	420.0	422.0	427.0	425.0	415.0	421.80
3 1/2	408.0	442.0	427.0	420.0	430.0	425.40
4.0	470.0	450.0	470.0	450.0	450.0	450.00

TABLA 3.4 Valores de penetración a 840°C.



TEMPERATURA 870°C		CONCENTRACION 32% CNNa				
TIEMPO (Horas)	PENETRACION (Micras)					
	1a. Med.	2a. Med.	3a. Med.	4a. Med.	5a. Med.	Promedio
1/4	150.0	157.0	164.0	145.0	154.0	154.00
3/4	196.0	200.0	200.0	200.0	200.0	199.20
1.0	250.0	250.0	300.0	270.0	265.0	267.00
1 1/2	326.0	350.0	370.0	370.0	370.0	353.00
2.0	370.0	400.0	380.0	400.0	370.0	384.00
2 1/2	450.0	450.0	460.0	470.0	450.0	456.00
3 1/3	530.0	550.0	550.0	550.0	520.0	540.00
4.0 H2O	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.00
4.0 OIL	550.0	520.0	544.0	550.0	550.0	542.80

TABLA 3.5 Valores de penetración a 870°C.

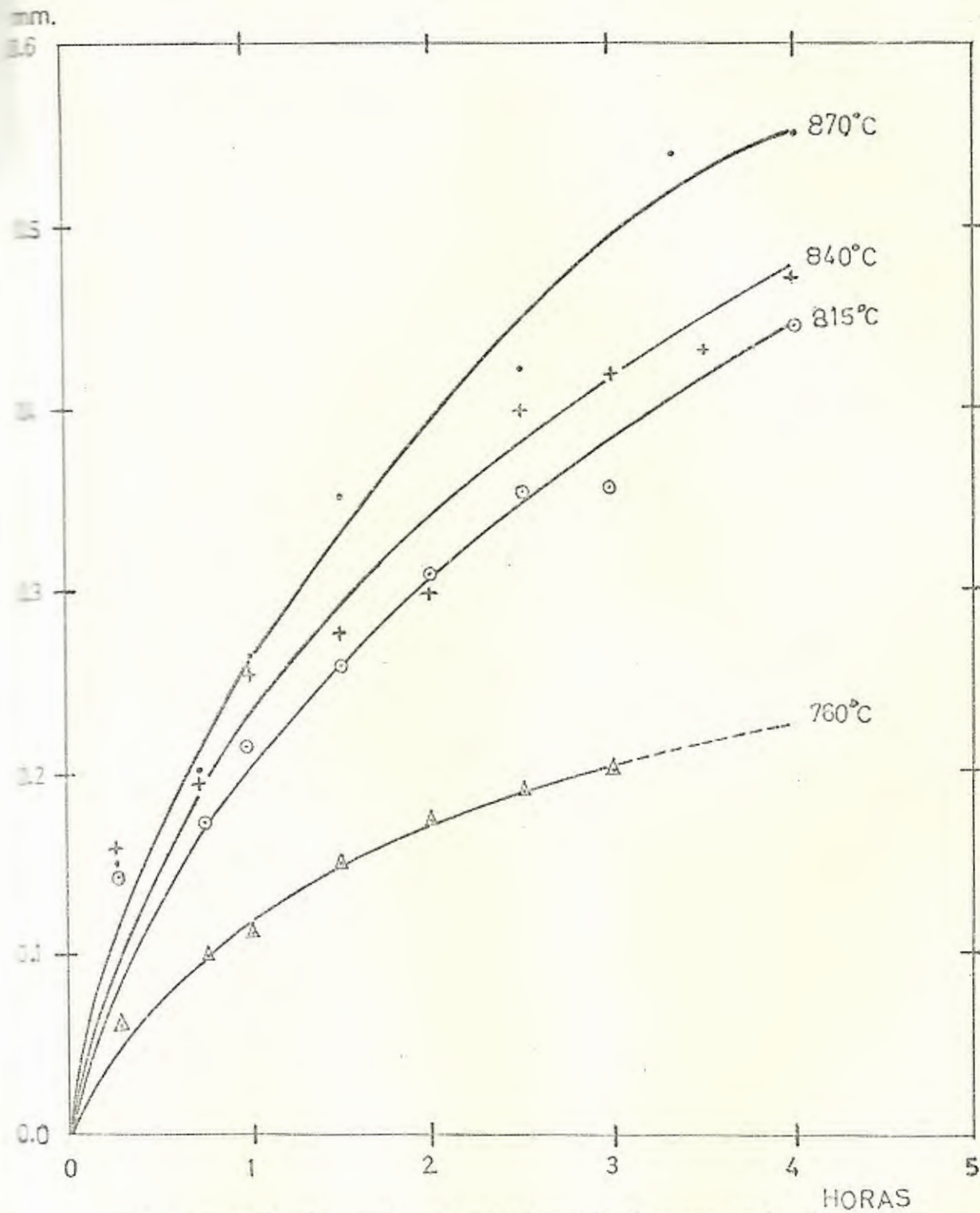


Figura 3.8 Relación entre la penetración de capa carbonitrurada y tiempo de tratamiento a distintas temperaturas en un acero SAE 1020.

3.4.2 Dureza vs. tiempo a distintas temperaturas

Para observar la función que relaciona estas dos variables, se toma la dureza superficial de las probetas sacadas a distintos intervalos de temperatura, esta dureza es constatada en el durrómetro ROCKWELL, por ser este el de más utilización en los talleres, que se dedican a efectuar tratamientos térmicos.

Para tomar esta dureza no es necesario hacerle una operación o maquinado posterior; se la toma luego del enfriamiento sufrido y se procede a la determinación de su dureza en diferentes puntos, tanto transversalmente como longitudinalmente, notándose en algunas probetas algunos lugares blandos.

En las tablas siguientes se da los valores correspondientes a estas mediciones. Con estos valores se grafica la curva de dureza Vs. tiempo a distintas temperaturas.

TEMPERATURA		760°C		CONCENTRACION 32% CNNa		
TIEMPO (Horas)	DUREZA Rc.					
	1a.Med.	2a.Med.	3a.Med.	4a.Med.	5a.Med.	Promedio
1/4	45.0	40.0	42.0	41.5	43.5	42.4
3/4	--	--	--	--	--	--
1.0	44.0	45.5	45.0	44.0	42.0	44.2
1 1/2	46.0	48.5	46.5	48.5	50.0	47.9
2.0	48.5	50.5	50.5	50.5	53.0	50.6
2 1/2	52.0	54.0	53.5	53.0	55.5	53.6
3.0	54.0	56.5	57.0	57.0	59.0	56.7
3 1/2	56.0	56.5	57.0	60.0	56.0	56.9
4.0*	--	--	--	--	--	--

TABLA 3.6 Valores de dureza a 760°C.

* No se puede tomar medición a este tiempo

TEMPERATURA		815°C		CONCENTRACION 32% CNN α		
TIEMPO (Horas)	DUREZA Rc.					
	1a. Med.	2a. Med.	3a. Med.	4a. Med.	5a. Med.	Promedio
1/4	51.0	47.0	49.0	49.0	51.0	49.40
1/2	54.0	56.0	54.0	51.0	53.0	53.60
3/4	56.0	57.0	59.0	59.0	58.0	57.80
1.0	58.0	59.0	58.0	57.0	60.0	58.40
1 1/2	63.0	62.0	61.0	63.0	60.0	61.80
2.0	63.0	64.0	62.0	64.0	63.0	63.20
2 1/2	63.0	63.0	65.0	64.0	64.0	63.80
3.0	65.0	66.0	67.0	63.0	65.0	65.17
3 1/2*	--	--	--	--	--	--
4.0	66.0	66.0	65.0	64.0	66.0	65.40

TABLA 3.7 Valores de dureza a 815°C.

* No se pudo tomar valores



TEMPERATURA		840° C		CONCENTRACION 32% CNNa		
TIEMPO (Horas)	DUREZA Re.					
	1a. Med.	2a. Med.	3a. Med.	4a. Med.	5a. Med.	Promedio
1/4	48.0	49.0	49.5	47.0	50.0	48.70
3/4	55.0	54.5	57.0	56.0	58.0	56.10
1.0	56.0	57.0	57.0	57.0	57.0	56.80
1 1/2	58.0	57.0	57.0	59.0	60.0	58.20
2.0	65.0	65.0	64.5	65.0	64.0	64.70
2 1/2	66.0	65.5	65.0	66.0	66.0	65.70
3.0	67.0	66.0	66.0	67.0	68.0	66.80
3 1/2	68.0	68.0	67.0	68.0	67.0	67.60
4.0	68.0	67.0	67.0	66.0	69.0	67.40

Tabla 3.8 Valores obtenidos a 840° C.

TEMPERATURA		870°C		CONCENTRACION 32% CNNa		
TIEMPO (Horas)	DUREZA Re.					
	1a.Med.	2a.Med.	3a.Med.	4a.Med.	5a.Med.	Promedio
1/4	51.0	51.0	49.0	51.0	52.0	50.80
3/4	57.0	60.0	60.0	60.5	58.0	59.10
1.0	60.0	61.0	64.0	61.5	61.5	61.60
1 1/2	63.5	65.5	65.2	66.5	64.5	65.04
2.0	64.0	66.0	66.0	67.0	68.0	66.20
2 1/2	64.5	66.5	67.0	67.0	67.0	66.40
3 1/3	67.0	68.0	68.0	66.0	67.5	67.30
4.0 H2O	67.0	68.0	68.5	67.0	68.0	67.70
4.0 OIL	65.5	66.0	66.5	65.5	66.2	66.04

TABLA 3.9 Valores de las mediciones a 870°C.

Rockwell-C

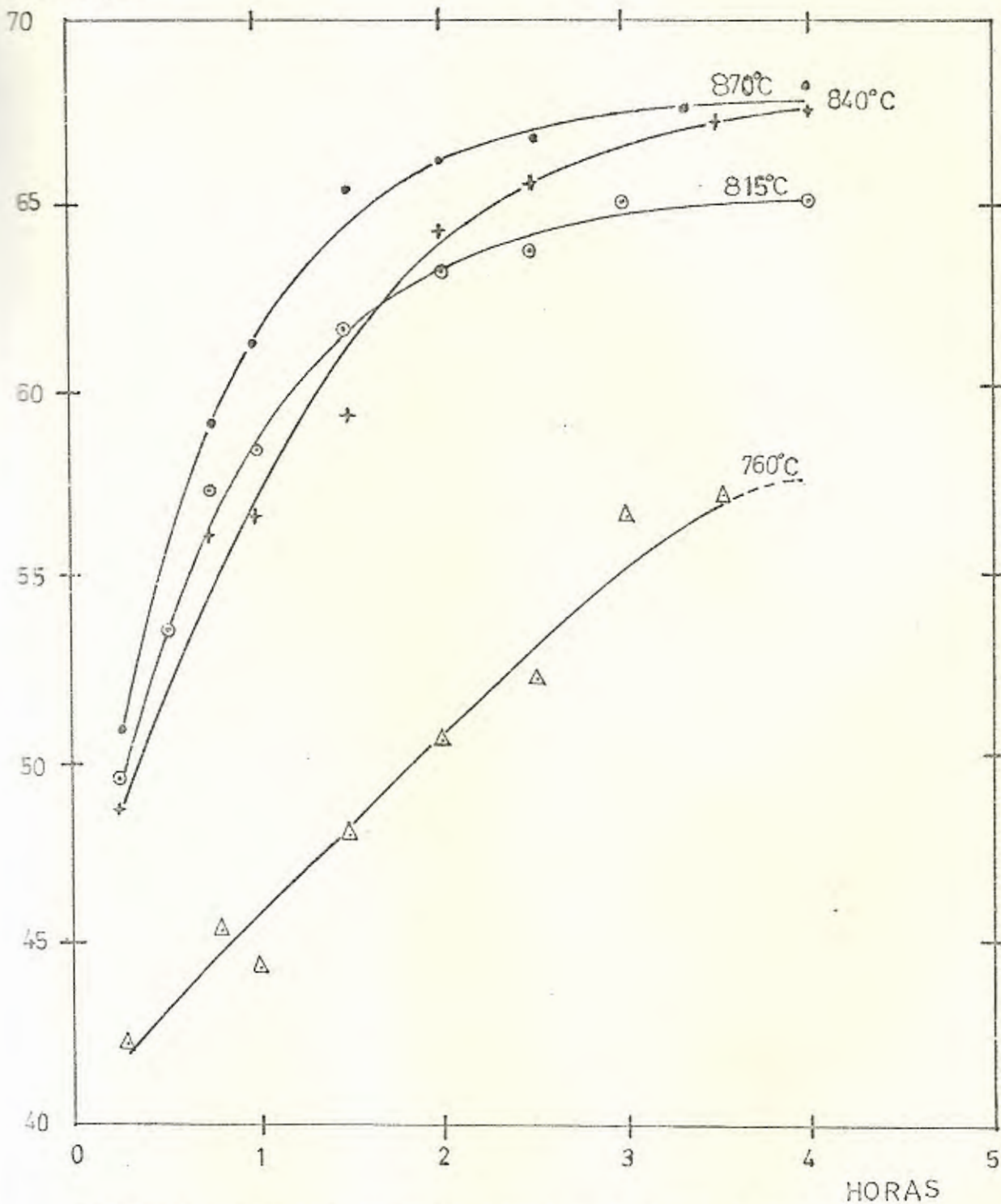


Figura 3.9 Relación entre la dureza y el tiempo de tratamiento a diversas temperaturas en un acero SAE 1020

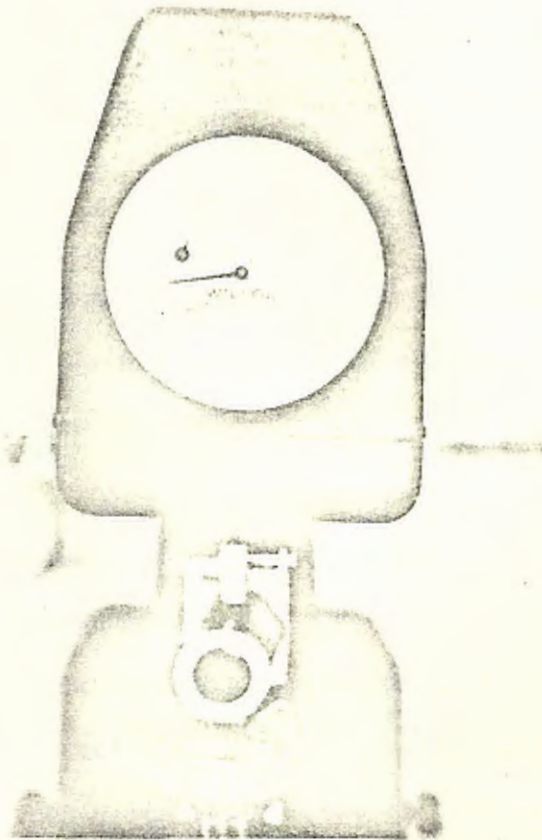


Figura 3.10 Duroómetro Rockwell. Modelo L
Usado para determinar la dureza superficial de las probetas carbonitruradas.

3.4.3 Ensayo de resistencia al desgaste

Luego de haber realizado la carbonitruración, se decidió hacer ensayos de resistencia al desgaste, para determinar cualitativamente la resistencia a la absorción de las piezas tratadas. Para esto fué necesario construir un instrumento para determinar este desgaste, el mismo que cumple algunas condiciones de aparatos normalizados de uso corriente en esta clase de ensayos.

En la figura 3.11, se muestra este equipo funcionando, la parte que roza con la pieza a ensayar está construida de lima con una dureza de 68 Rc.

Como se puede observar fué necesario sujetar la pieza a ensayarse entre la contrapunta y el plato de un torno, y hacerla girar. Se sometieron a prueba dos barras en condiciones siguientes: una con acero SAE 1020 carbonitrurada; y, la otra de acero AISI S1 con y sin tratamiento de carbonitruración.

Los resultados fueron los siguientes: la pieza no tratada al tiempo que se indica se produjo desgaste, presentando huellas en el material, a causa de lo cual el aparato empezó a vibrar fuertemente, expulsando los pesos, razón por la cual se suspendió el ensayo.

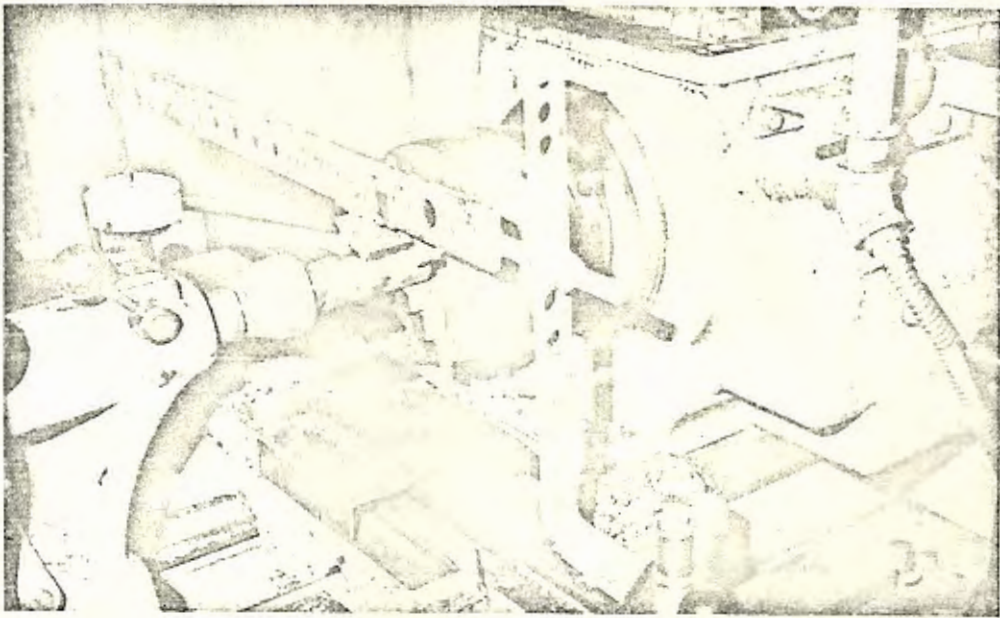


Figura 3.11 Equipo utilizado para realizar el ensayo al desgaste.

En las piezas que recibieron tratamiento térmico, no sufrieron ningún desgaste aunque el tiempo de exposición fue mayor. Es importante notar en estos casos que el desgaste se produjo en la lima.

En la figura 3.12 se muestran estas piezas después del ensayo.

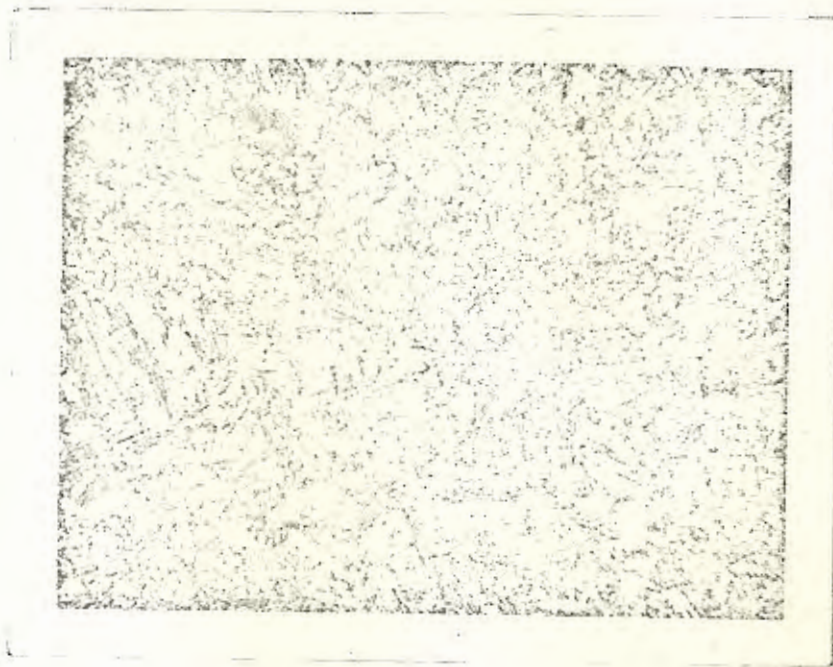
En la tabla 3.10, se presentan los diversos resultados obtenidos.

3.4.4 Enfriamiento en agua

Se utilizó este tipo de enfriamiento en vez del usual en aceite, a fin de encontrar durezas más altas en la carbonitruración. Aunque se corre riesgos que por el uso de una severidad de temple mayor. Pero en todos los casos ensayos realizados no se reportó en este trabajo ninguna anomalía de esta naturaleza, por supuesto que las formas tratadas no revestieron ninguna complejidad de formas, y es de preveer ciertos cuidados cuando se trate de otro tipo de piezas.

3.4.5 Control metalográfico

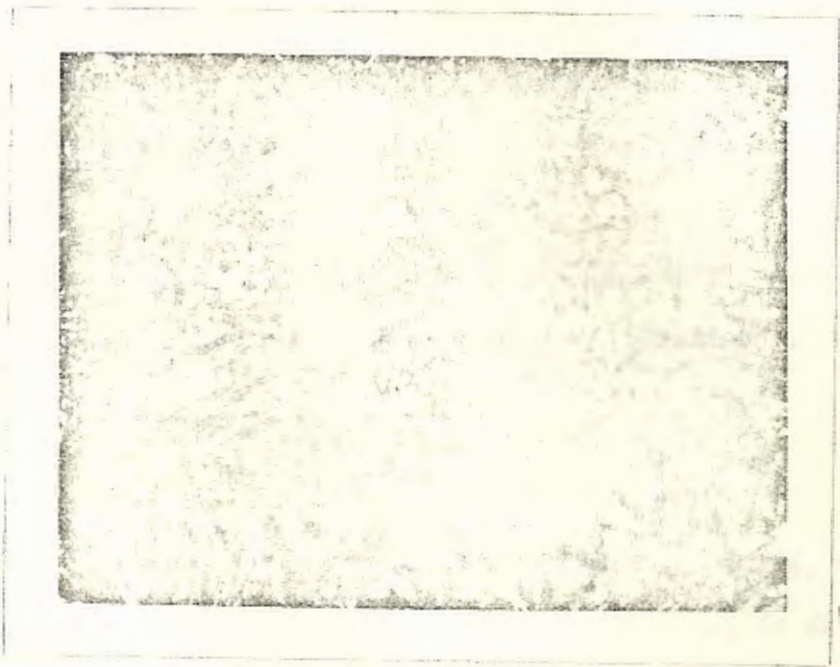
Para efectuar este ensayo, se cortaron seccionalmente las probetas tratadas y preparadas metalográficamente para su observación, a fin de determinar las microestructuras de tratamiento. Estas se muestran en las figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18.



200 X

Nital 2%

Figura 3.17 Zona central de un acero SAE 1020, carbonitrurado por mantenimiento en baño de sales, durante 210min, a 870°C. Templado en agua.



1000X

Nital 2%

Figura 3.18 Zona exterior de un acero SAE 1020, carbonitrurado por mantenimiento durante 210min, en un baño de sales a 870°C. Templado en agua. Se nota presencia de estructura martensítica.

3.4.6 Control de Microdureza

Este control es efectuado con el propósito de mostrar la variación de la dureza de la capa, desde la superficie exterior hacia el interior.

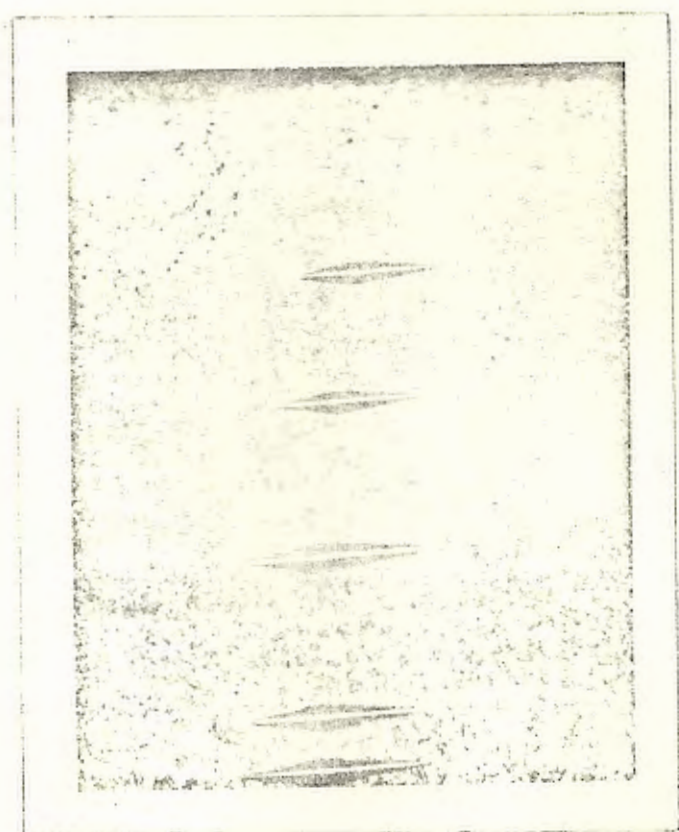
Se efectúa este ensayo en las probetas provenientes del ensayo metalográfico. Se ha hecho uso del microdurómetro, con un penetrador Knoop, que tiene una forma piramidal, produce una impresión en forma romboidal.

Los resultados se ubican en la fotomicrografía para la probeta proveniente del ensayo con mejores resultados. Figura. 171 2.19.

3.5 SEGURIDAD

Dado que el cianuro es un veneno altamente eficaz y mortal, es necesario tomar las debidas precauciones para la manipulación de las sales de cianuro, u otras sales que contengan o puedan formarlo durante el calentamiento. Las intoxicaciones graves se pueden presentar bruscamente, sin ningún anuncio previo. Por esto, se debe cumplir con las siguientes precauciones:

Se debe guardar los cianuros solamente en recipientes bien cerrados con juntas de caucho, para protegerlos del contacto con el aire, porque incluso el anhídrido carbónico del aire puede descomponerlos con



200 X

Nital 2%

Figura 3.19 Disminución de la microdureza desde el borde exterior hacia el interior. Acero SAE 1020 carbonitrurado durante 240 min, en un baño de sales a 870°C. (Microdureza Knoop) Templado en agua.

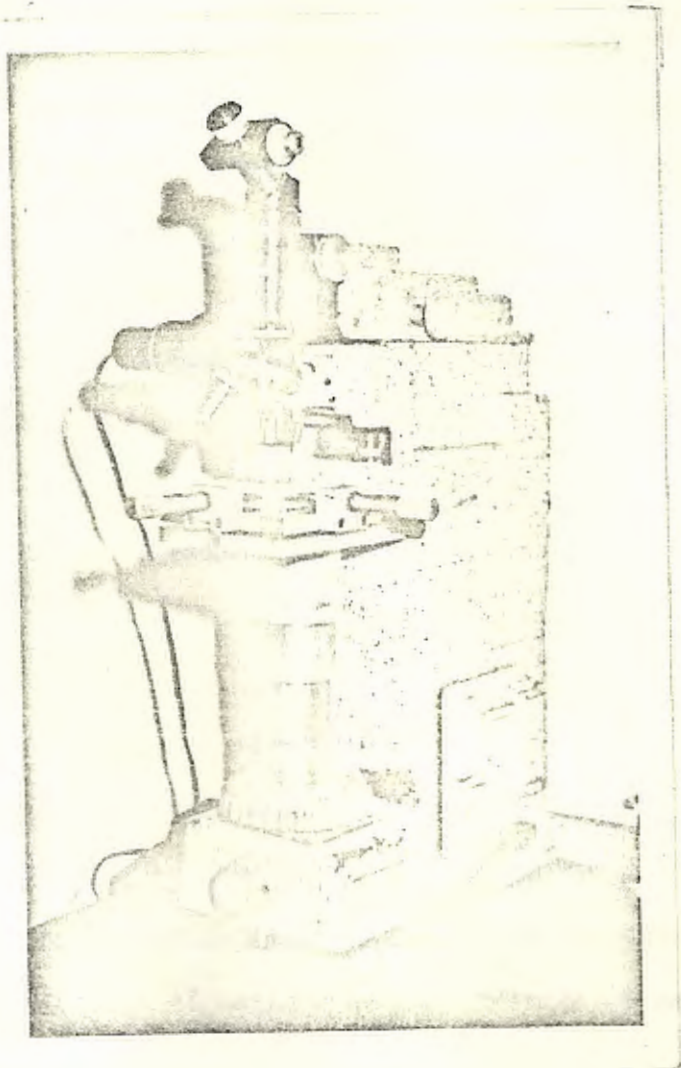


Figura 3.20 Microdureómetro. Marca Riehle-Kentron, modelo Ak-8. Usado para medir el espesor de la capa carbonitrurada, e indentaciones de microdureza (Knoop).

desprendimiento de ácido cianhídrico altamente venenoso. Se debe marcar los recipientes con inscripciones bien visibles, que adviertan la toxicidad de su contenido. No se debe emplear para ninguna otra finalidad las vasijas de conservación y almacenamiento de cianuros.

Nunca se debe mezclar los cianuros, ni sus soluciones con ácidos, porque las cantidades de ácido cianhídrico formado, pueden alcanzar concentraciones mortales.

No se debe cojer los cianuros con las manos desnudas, ni tampoco trabajar con cianuros cuando se tienen heridas abiertas o rasguños.

Para manipular los cianuros se debe llevar siempre delantales y guantes protectores; y, en todos los trabajos que se puedan producir salpicaduras de cianuros, se debe proteger la cara con una máscara (estas salpicaduras se pueden producir por ejemplo, al introducir en el baño las piezas a tratar, en el vaciado de los crisoles, y en el temple de las piezas).

Se debe evitar la impurificación de los baños con chamota, barro, porcelana y materiales análogos, porque entre estos materiales y las sales se pueden producir reacciones y provocar la expulsión de los baños fundidos.

Se debe emplear únicamente crisoles de hierro con sales que contienen cianuros.

Debe limpiarse periódicamente los baños, eliminando las torneaduras y cascarillas y materias parecidas para evitar el sobrecalentamiento del baño en el fondo del crisol y la descomposición de las sales.

Se debe vigilar continuamente los baños, pues existe el peligro de sobrecalentamiento que descompondrán y vaporizarán las sales.

El producto a tratar, se debe introducirlo bien seco y precalentado, para evitar peligrosas salpicaduras de los cianuros.

Cuerpos huecos cerrados deben evitarse en el baño, porque al calentarse puede estallar y producir la expulsión de las sales.

No se debe tirar los desechos de las sales que contienen cianuros, sino guardarlos cuidadosamente de la misma manera que los cianuros nuevos, hasta hacerlos inofensivos, tampoco debe arrojárselos en los desagües (se puede usar sulfato de hierro al 20 por ciento para hacerlo).

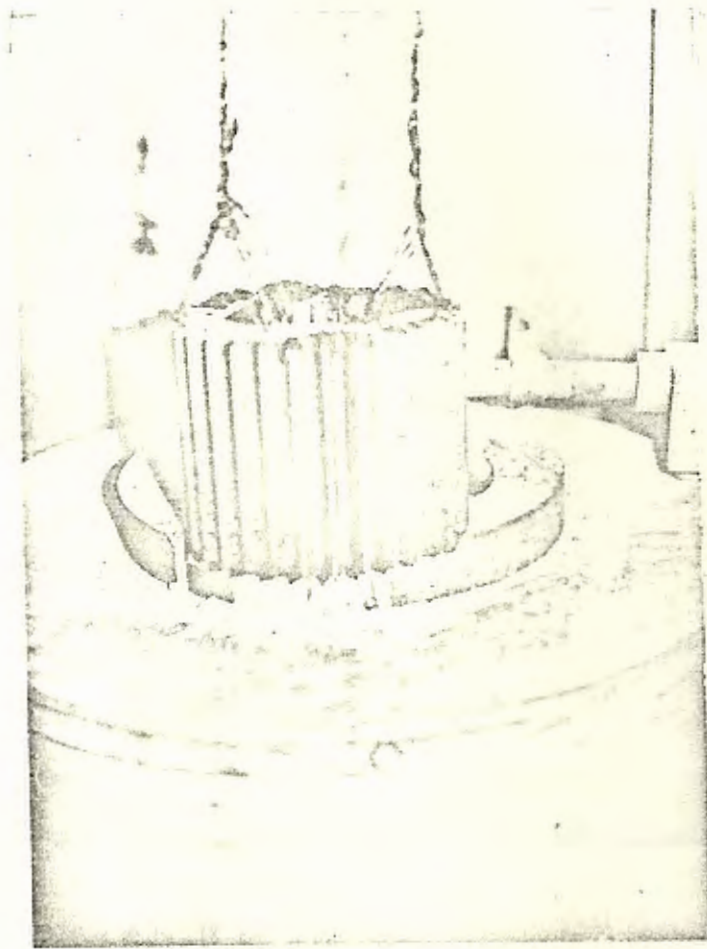


Figura 3.21 Carbonitruración en un baño de sales a Piñón de 12 kg, de peso. Pieza de máquina corrugadora de papel de Procarsa.

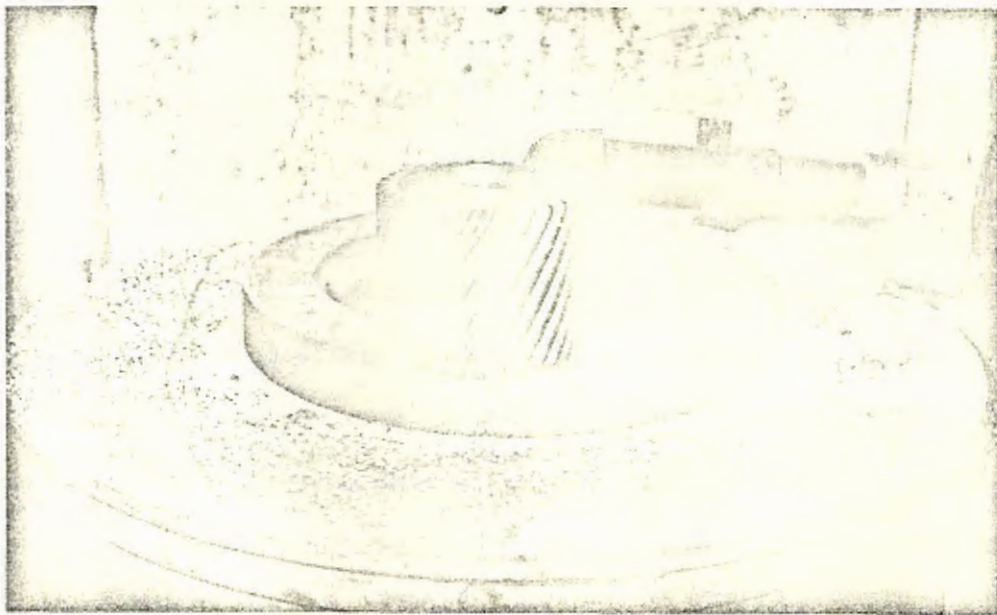


Figura 3.22 Piñón helicoidal carbonitrurado en un baño de sales. Perteneciente a compresor de aire de 200HP de equipo caminero.

CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS



Después de seguida una secuencia lógica en la parte experimental, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y controles practicados, se hace necesario que se haga una discusión del porqué de éstos. A continuación se presenta en forma esquemática esta discusión.

En primer lugar se debe mencionar que, lo primordial en la presente investigación, es dar a conocer una técnica de endurecimiento superficial de las piezas de acero, capaz de producir una combinación de características que den resistencia a la abrasión y a la fatiga, al mismo tiempo. Para que esto sea posible, ha sido necesario preparar una mezcla adecuada de cianuro comercial, cloruro sódico (sal común) y carbonato de sodio, en las cantidades que se indican en la parte que corresponde a la selección del baño, para luego sumergir estas piezas de acero en el baño, por un determinado tiempo, para luego de transcurrido este proceder a removerlas y templarlas en agua.

En la realización de la presente investigación, actúan diversos parámetros sus efectos se analizan de acuerdo a los resultados presentados en el capítulo anterior.

En lo que respecta a la concentración de cianuro que debe existir en el baño, su efecto es decisivo para el éxito final del tratamiento, ya que al

no existir la concentración adecuada (30% para endurecimiento) se producen dos defectos, uno de ellos, la adherencia a la superficie de una cascarilla oscura, la cual se desprende con relativa facilidad, dejando bajo ésta, lugares blandos; el segundo efecto causado por esta baja concentración, es la insuficiente producción de carbono y nitrógeno naciente, que a su vez - repercuten en la pobre difusión de estos elementos al interior del acero, produciéndose una baja dureza superficial en las piezas carbonitruradas, tan necesaria para resistir al desgaste que causa la fricción a que estarán sometidas.

Los resultados muestran además, la necesidad de recubrir con grafito (<1%) la superficie del baño, están para evitar el contacto directo con el aire atmosférico y su rápida oxidación, lo grande de esto mantener estable la concentración.

Los resultados de los análisis químicos, indican que las concentraciones - del carbonato de sodio y el cloruro de sodio no varían.

Las causas son, el carbonato se forma continuamente al reaccionar el cianuro y, el cloruro fue adicionado para que actuará como diluyente. Estos componentes fueron adicionado con la finalidad de disminuir el punto de fusión, y como se dijo de diluyente, además abarata el costo de producción, pues actúan tal como si fueran cianuros.

Estos mismos análisis nos indican que la cantidad de cianato formado, es el

adecuado y con esto se tiene asegurada la producción de nitrógeno y carbono naciente.

En lo que concierne a los parámetros de tiempo y temperatura, existe una íntima relación, los resultados obtenidos y graficados son elocuentes, fig. 3.8 y fig. 3.9.

Pues al aumentar el tiempo y al aumentar la temperatura, los valores de penetración y dureza que se obtienen son mayores.

Un análisis pormenorizado de la figura 3.8 señala muy claramente que al aumentar la temperatura y aumentar el tiempo de permanencia en el baño, la penetración acusa un aumento, debiendo anotar que este aumento no es lineal para un mismo tiempo y diversas temperaturas; para cuatro horas de tratamiento la diferencia de penetración entre 760 y 815°C, existe una diferencia de 0.2mm, entre 815 y 840°C de 0.02 y entre 840 y 870°C de 0.09mm.

En el detalle de la figura 3.9 nuevamente la temperatura y el tiempo son factores importantes, ya que al existir un mayor tiempo y una temperatura también mayor, aumenta la dureza, así mismo sus valores no son lineales a un mismo tiempo, existiendo una mayor diferencia entre la más baja temperatura de tratamiento y la inmediata, ya que para las altas, esta diferencia es mínima tendiendo más bien a unirse o a cruzarse en determinados valores.

TABLAS



POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
F.I.M.C.P.

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

DUREZA								
BRINELL		ROCKWELL		VIC IRS	SIEMENS 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 de 120°	B Carga de 100 kg y bola de 1/16"					
2,05	808	—	—	—	—	—	449	—
2,10	857	—	—	—	—	—	429	—
2,15	817	—	—	—	—	—	401	—
2,20	780	79	—	1,019	107	—	384	—
2,25	745	68	—	980	105	—	368	—
2,30	712	66	—	960	101	246	352	—
2,35	682	64	—	920	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	—	650	86	200	287	128
2,60	555	55	120	610	82	193	276	123
2,65	531	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	234	106
2,85	461	47	116	480	69	159	223	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	434	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	102	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 B < 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"					
Díametro de la huella en mm								
4,05	223	20	97	223		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		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		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		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

En redondos de 80 y 400 mm de diámetro de la misma dureza Vickers; el redondo de 80 milímetros da, con respecto a la tabla, 2 unidades menos, y el de 400 mm da 2 unidades Shore más.

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

A N E X O S

ANEXO A

DETERMINACION DEL CIANURO DE SODIO

Se usa el siguiente procedimiento:

- Preparar una solución modelo de sulfato de cobre por disolución de sulfato cúprico ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) en 1000 mililitros de agua.
- Disolver 5 gr. de la muestra; libre de carbón, en 100ml, de agua y a - esto adicionar 25ml, de amoníaco casero o 5ml, de hidróxido de amonio de grado reactivo.
- Agitar un momento la muestra diluida preparada anteriormente, adicionar suavemente la solución de sulfato de cobre justo hasta que la solución de la muestra del baño se torne azul.
- Determinación.- Cada centímetro cúbico de la solución de sulfato de - cobre, usada para tornar el cambio de color del punto final, equivale al 1 por ciento de cianuro de sodio en el baño.

ANEXO B

DETERMINACION DEL CIANATO DE NITROGENO

Cuando se desea determinar el porcentaje de cianato de nitrógeno presente en el baño, realizamos el siguiente procedimiento:

- Preparar una solución de hidróxido de sodio libre de dióxido de carbono (aproximadamente 2N) como sigue: Disolver 80 ± 2 gr, de hidróxido de sodio en 1800 ml, de agua; adicionar 200ml, de cloruro de bario al 10 por ciento, y agitar bien, entonces admitir el carbonato de bario para asentar o clarificar durante la noche; decantar dentro de una botella con una trampa de dióxido de carbono y un sifón hecho de tubo y una llave de control para uso posterior (dentro o fuera de la solución).
- En un frasco Erlenmeyer, disolver una muestra de 5gr, de la muestra del baño en 100ml, de agua, y para esto adicionar 6ml, de ácido sulfúrico, 9 molar (cuidado: desprendimiento de cianuro de hidrógeno, el cual es venenoso; además, esta operación deberá ser realizada en una campana bien ventilada).
- Debajo de la campana, se hervirá la solución preparada en el paso anterior a un cuarto de volumen original, usando tres o cuatro marcos de un abalorio como piedra hirviente.
- Enfriar la solución caliente en un baño frío o helado, adicionando dos gotas de una solución de rojo metil en alcohol al 2 por ciento.
- Mover un momento la solución de la muestra del baño, hechar suavemente

la solución de hidróxido de sodio 2N (CO_2 - libre), para un color amarillo de punto final. (Nota: puede ser necesario para dosificar posteriormente con ácido sulfúrico 0.1N y una solución de hidróxido de sodio CO_2 - libre 0.1N). Cuando el punto final está marcado, enfriar la solución, entonces adicionar una solución de formal de ido al 20 por ciento y agitar bien. Después de 15 minutos, dosificar con la solución de hidróxido de sodio (CO_2 - libre) y fenolftaleína para el primer punto final de rosado permanente.

Determinación: % de cianato de nitrógeno =

Mililitros netos de NaOH 0.1N X 1.4

Peso de la muestra

ANEXO C

DETERMINACION DEL CIANATO DE SODIO

Se disuelven primeramente 5gr, de la sal triturada en un matrazafonado de 500ml. Se llena hasta la marca y se agita bien. Se traspasan 50ml, de esta solución al matraz Kjeldahl, se diluyen con 250ml, de agua destilada y se acidula con 10 a 25ml, de ácido sulfúrico al 20 por ciento (se debe realizar en una campana bien ventilada porque se desprende ácido cianhídrico). Para expulsar el ácido cianhídrico y transformar el cianato a sulfato amónico se hierve debajo de una campana durante 30 a 40 minutos.

Después de dejar enfriar, se diluye con agua destilada hasta completar un volumen total de 250ml. El matraz se enlaza con el refrigerante, teniendo en cuenta que el cierre a de ser hermético..

Luego se añaden a través del embudo 30 a 40ml, de NaOH al 30 por ciento. Un frasco Erlenmeyer se llena con 100ml, de solución de ácido bórico al 2 por ciento.

Se calienta el matraz hasta que hierva y se destila hasta que hayan pasado del matraz hasta el Erlenmeyer las 3/4 partes del contenido. Terminada la destilación, se valora el contenido del Erlenmeyer con ácido clorhídrico 0.1N, añadiendo unas gotas de mezcla indicadora, preparada mezclando 5 partes de solución alcohólica al 0.1 por ciento de verde de bromocresol y 1

parte de solución alcohólica de rojo de metilo al 0.2 por ciento. Se valora hasta el rosa débil.

Determinación.- El consumo de ácido de HCl 0.1N, multiplicado por el factor 1.30 da el tanto por ciento de CNO₂.

ANEXO D

DETERMINACION DEL CLORURO DE SODIO

Usamos el siguiente procedimiento:

- *Disolver unos 0.5gr, de la muestra de baño en 50ml, de agua destilada en un frasco Erlenmeyer de 150ml. Adicionar 5ml, de una solución de formaldeido al 30 por ciento y dejar por lo menos 15 minutos.*
- *Diluir unos 150ml, entonces adicionar 5ml, de 1 a 1 de ácido nítrico - seguido por un exceso de nitrato de plata 0.1N. El ácido nítrico será libre de cloro y poco óxido de nitrógeno.*
- *Calentar el frasco por 5 minutos para coagular el precipitado de cloruro de plata. Adicionar 5ml, de una solución de saturada de alambre de aluminio férrico como el indicador. Dosificar con tiocianato de amonio (NH₄CNS) 0.1N. El punto final es indicador por un permanente color rojo marrón de tiocianato férrico (Fe (CNS) 3).*
- *Determinación: % de cloruro de sodio =*

$$\frac{(\text{ml. de AgNO}_3 \text{ 0.1N} - \text{ml. de NH}_4\text{CNS 0.1N}) \times 0.5845}{\text{Peso de la muestra}}$$

ANEXO E

DETERMINACION DEL CARBONATO DE SODIO

Realizamos el siguiente procedimiento:

- Disolver a 0.5 de la muestra del baño en 100ml, de agua destilada en un frasco Erlenmeyer de 250ml.
- Adicionar 25ml, de una solución neutral de cloruro de bario al 10 por ciento, a el contenido del frasco, tapar con un tapón ajustadamente y dejar sentado por lo menos 2 horas. (Para mejores resultados, el carbonato de bario será dejado a precipitar durante la noche, pero resultados satisfactorios pueden ser obtenidos después de un período de dos horas. No es aconsejable filtrar algo más pronto).
- Filtrar fuera el carbonato de bario y lavar con agua conteniendo el 1 por ciento de cloruro de bario, hasta que el lavado no de color con fenol ptaleina.
- Colocar el filtro de papel y el residuo conteniendo el carbonato de bario en el frasco original; adicionar cinco gotas rojo de metil, 100ml, de agua destilada y una medida en exceso de ácido hidrocloanhídrico 0.1N. Hervir la solución suavemente aproximadamente durante cinco minutos, para expulsar el dióxido de carbono y, enfriar después, dosificando el exceso de ácido con hidróxido de sodio 0.1N.

Determinación: % de carbonato de sodio =

$$\frac{(ml. \text{ de HCl } 0.1N - ml. \text{ de NaOH } 0.1N) \times 0.530}{\text{Peso de la muestra}}$$

Peso de la muestra

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Atom Movements*, edición de 1951. Claveland, Ohio.
2. APRAIZ BARREIRO JOSE, *Tratamiento Térmico de los Aceros*, editorial Dossat, 6a. edición, Madrid 1968.
3. AVNER S., *Introducción a la metalurgia física*, Mc Graw-Hill, México 1975.
4. BELLO, MEDINA Y FERNANDEZ, *Carbonitruración*, CENIM, Madrid 1975
5. CHARMER BRUCE, *Metalurgia física*, editorial Aguilar, edición 1958
6. GULTIAEV A.P., *Metalografía tomo 1*, editorial Mir-Moscú, edición de 1978.
7. GROSSMAN Y BAIN, *Principios de tratamiento térmico*, editorial Blume edición de 1972.
8. SHEPPARD JOHN, *Cyaniding (Liquid Carbonitriding)*, American Society for Metals, Claveland, Ohio, Vol. 2.
9. VAN VLACK, *Materiales para ingeniería*, CEGSA, Mc Graw-Hill, México 1975.
10. WANKE Y SCHRAMM, *Temple del acero*, editorial Aguilar, Madrid, edición de 1972.
11. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Propertiers and Selection*, edición de 1973, Metals Park, Ohio, Vol. 1.
12. AMERICAN SOCIETY FOR METALS, *Atlas of Microstructures of Industrial alloys*, edición de 1973, Metals Park, Ohio, Vol.7.



ROMERO
M. J. P. S.
M. J. P. S.