



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**CARACTERIZACION EN PRUEBAS DE DESGASTE DE
UN ACERO M-2 CON MODIFICACION SUPERFICIAL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

P R E S E N T A :

HECTOR VAZQUEZ NERI

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1994





Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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


JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE PROF. MARIA EUGENIA NOGUEZ ANAYA
VOCAL PROF. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES
SECRETARIO PROF. TERESITA ROBERT NUÑEZ
1er SUPLENTE PROF. GERARDO ARAMBURO PEREZ
2do SUPLENTE PROF. SERGIO GARCIA GALAN

EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

TEMA DESARROLLADO EN EL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA METALURGICA
FACULTAD DE QUIMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ASESOR DEL TEMA


M. EN C. BERNARDO CAMPILLO ILLANES

SUPERVISOR TECNICO


M. EN C. JOSE LUIS ALBARRAN G.

SUSTENTANTE


HECTOR VAZQUEZ NERI

PARA TI ABUE CON MUCHO CARISO.
MIS DESEOS ERAN QUE COMPARTIESES
ESTOS MOMENTOS CONMIGO.
CON ESTO SE CIERRA UNA ETAPA MAS
EN MI VIDA. EN ESTA VIDA QUE PARA MI
ES SOLO UN PARPADEO ENTRE DOS
ETERNIDADES.
ESTO NO LO ES TODO ABUE. DESEO
ALGO MAS. TODAVIA HAY MUCHO QUE
HACER MUCHO QUE APRENDER.
PUES NO QUIERO SER UN LADRILLO MAS
EN LA PARED.

A DIOS POR PERMITIRME LLEGAR A ESTE
MOMENTO.

A MIS PADRES GRACIAS MIL GRACIAS

- POR DARME LA VIDA.
- POR DARLO TODO SIN PEDIR NADA A
CAMBIO.
- POR CREER EN MI.

A MIS HERMANOS DANIEL, ALFREDO, VIRGINIA,
LOURDES Y TIA MARY GRACIAS POR SU
APOYO, COMPRESION Y CARINO.

PARA MIS AMIGOS. ESPECIALMENTE PARA
CARLOS Y AMADEO.

PORQUE POR UN AMIGO SE VIVE Y SE MUERE.

CON AMOR PARA TI ALI.

AGRADECIMIENTOS:

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. POR LA ENSEÑANZA BRINDADA YA QUE COMO EL SUELO, POR MAS RICO QUE SEA, NO PUEDE DAR FRUTO SI NO SE CULTIVA. LA MENTE SIN CULTIVO TAMPOCO PUEDE PRODUCIR.

AL M. EN C. BERNARDO CAMPILLO ILLANES Y M. EN C. JOSE LUIS ALBARRAN G. POR EL APOYO INCONDICIONAL Y ASESORIA BRINDADAS. ADEMAS DE SU PACIENCIA Y AMISTAD.

AL ING. GERARDO ARAMBURU PEREZ E ING. SERGIO GARCIA GALAN POR LAS FACILIDADES DADAS PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

A LOS MIEMBROS DEL JURADO TERESITA ROBERTS Y MARIA EUGENIA NOGUEZ POR EL TIEMPO DEDICADO A LA REVISION DE ESTE TRABAJO ADEMAS DE SUS SUGERENCIAS Y VALIOSOS COMENTARIOS.

A MIS COMPANEROS DE GENERACION.

INDICE

INDICE

	PAG.
<i>1.0.0. INTRODUCCION</i>	<i>3</i>
<i>2.0.0. REVISION BIBLIOGRAFICA</i>	<i>5</i>
<i>2.1.0. DESGASTE</i>	<i>6</i>
<i>2.1.1. MECANISMOS DE DESGASTE</i>	<i>8</i>
<i>2.1.2. DESGASTE ADHESIVO</i>	<i>9</i>
<i>2.1.3. DESGASTE EROSIVO</i>	<i>10</i>
<i>2.1.4. DESGASTE POR FATIGA</i>	<i>11</i>
<i>2.1.5. DESGASTE ABRASIVO</i>	<i>11</i>
<i>2.1.6. DESGASTE VIBRACIONAL</i>	<i>12</i>
<i>2.1.7. MAQUINA DE DESGASTE</i>	<i>13</i>
<i>2.1.8. CURVA DE DESGASTE</i>	<i>14</i>
<i>2.1.9. CAPA BLANCA</i>	<i>16</i>
<i>2.2.0. TRATAMIENTOS TERMICOS</i>	<i>17</i>
<i>2.2.1. TEMPLE</i>	<i>17</i>
<i>2.2.2. REVENIDO</i>	<i>18</i>
<i>2.3.0. NITRURACION IONICA</i>	<i>20</i>
<i>2.4.0. DEPOSITACION FISICA VAPORES</i>	<i>29</i>
<i>3.0.0. DESARROLLO EXPERIMENTAL</i>	<i>32</i>
<i>3.1.0. HIPOTESIS</i>	<i>33</i>
<i>3.2.0. CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO</i>	<i>33</i>

3.3.0.	<i>METODO EXPERIMENTAL</i>	34
3.4.0.	<i>NITRURACION IONICA</i>	35
3.5.0.	<i>PRUEBAS DE DESGASTE</i>	36
3.6.0.	<i>TECNICAS DE CARACTERIZACION</i>	40
3.6.1.	<i>MICROESTRUCTURA</i>	40
3.6.2.	<i>PERFILES DE MICRODUREZA</i>	40
3.6.3.	<i>MICROSCOPIA ELECTRONICA</i>	41
4.0.0.	<i>RESULTADOS</i>	42
4.1.0.	<i>PARAMETROS DE DESGASTE</i>	43
4.2.0.	<i>EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE N. I.</i>	43
5.0.0.	<i>DISCUSION</i>	63
5.1.0.	<i>NITRURACION</i>	65
5.2.0.	<i>MICRODUREZA</i>	65
5.3.0.	<i>EFECTO DE LAS MODIFICACIONES HECHOS AL ACERO EN LAS PRUEBAS DE DESGASTE</i>	65
5.4.0.	<i>DESGASTE POR ABRASION</i>	66
5.5.0.	<i>DESGASTE ADHESIVO</i>	66
5.6.0.	<i>REGIMANES DE DESGASTE</i>	67
5.7.0.	<i>METALOGRAFIA</i>	68
6.0.0.	<i>CONCLUSIONES</i>	69
7.0.0.	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	72

**CAPITULO 1.
INTRODUCCION**

1.0.0. INTRODUCCION

Uno de los retos que se tienen en el desarrollo de la tecnología es el de encontrar materiales ó modificar los existentes para obtener propiedades superiores a las que se tienen actualmente, para usarse en condiciones más severas de trabajo. Estas propiedades pueden ser: resistencia a la tensión, resistencia a la fatiga, alta conductividad eléctrica, alta ductilidad, dureza, resistencia al desgaste, etc.. Es por esto que el estudio de las propiedades mecánicas de los nuevos materiales ó la modificación de estos tiene una gran importancia tecnológica actualmente.

En años recientes la tribología ha sido extensamente reconocida como un nuevo concepto que permite abarcar todos y cada uno de los factores que se encuentran involucrados en la transmisión y disipación de la energía y la materia en los equipos mecánicos, incluyendo las áreas de fricción, desgaste, lubricación y su relación con otros campos de la ciencia y tecnología.

Como se sabe el desgaste es un importante problema en el remplazamiento continuo de partes. Se ha estimado que el 30% de la energía generada en las áreas industriales del mundo se consume en los procesos de fricción y desgaste lo cual conlleva a que las pérdidas económicas por fricción y desgaste sean aproximadamente del 1 al 2 % del producto interno bruto. Un ejemplo de esto es Alemania donde se pierden 6 billones de marcos anualmente⁽¹⁰⁾. Lo cual nos aclara el porque de la importancia de la tribología para la conservación de la energía y de los materiales.

El desgaste es un proceso que ocurre primeramente en la superficie de los materiales y componentes, Es por esto que hay un interés en el recubrimiento superficial de acuerdo a las varias aplicaciones tribológicas. Una técnica utilizada actualmente es la deposición física de vapores (P.V.D.) que producen películas de nitruro de titanio y titanio carbonitrurado las cuales son muy estables en condiciones extremas de trabajo. Otras técnicas que se han desarrollado son las de tratar térmicamente al acero al carbón por nitruración iónica con la cual se forma una capa de nitruros en la superficie del material.

El presente trabajo estudia en base a diferentes tipos de modificaciones hechas sobre la superficie de un acero rápido M-2, las cuales consistieron en un tratamiento de temple y revenido, una nitruración iónica y un tratamiento de depósito físico de vapores (P.V.D.), cual es el comportamiento que presentan cada uno de estos al desgaste así como el de determinar los posibles mecanismos que interactúan durante el desgaste.

CAPITULO II.
REVISION BIBLIOGRAFICA

2.0.0. REVISION BIBLIOGRAFICA

En este capítulo describiremos brevemente la terminología y algunos conceptos básicos utilizados en desgaste. Se presenta el siguiente resumen, que consiste en la definición del fenómeno desgaste, los principales mecanismos que intervienen en éste, los tipos de desgaste más comunes, maquinas y pruebas de desgaste así como las curvas y resultados esperados. Posteriormente se tratara con detalle los procesos empleados en la investigación experimental a las cuales fué sometido nuestro material, y que son: temple y revenido, nitruración iónica así como P.V.D. (physical vapour deposition), sus características y las propiedades que presentan cada una de ellas.

2.1.0. DESGASTE

Un sistema tribológico, esta formado por dos o mas cuerpos en contacto superficial mecánico o estático. En términos cronológicos, es el desarrollo de los estudios de las areas de fricción, lubricación y desgaste⁽¹⁾, las cuales caen en diferentes periodos de tiempos. Una definición más completa de desgaste es: La remoción de material a partir de un sistema tribológico, lo cual implica superficies en movimiento relativo bajo mecanismos de contacto. Otros fenómenos como la deformación, reacciones químicas, o fenómenos cíclicos son sólo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Se han realizado muchas investigaciones con el fin de encontrar y establecer las bases teóricas para explicar el desgaste en los materiales, las ideas surgidas son análogas a la teoría de fricción propuesta por (Bowden y Tabor 1950), esto supone que el área de contacto real entre 2 objetos es mucho menor que el área aparente y se determina por la longitud de deformación de asperezas en el área de contacto bajo carga. Podrían haber un número de regiones localizadas en las cuales se presente un contacto real, y que varíen durante la prueba y consecuentemente, aumente ó disminuya el número de éstas. La base de esta teoría es relacionar al desgaste con el número y naturaleza de los puntos de deformación producidos durante la prueba.

De la teoría de Archard (2) en 1952 la cual nos dice que hay una deformación plástica de la superficie debido a la carga aplicada, y supone que cada región tiene una probabilidad definida de producir una partícula de desgaste, se propone la siguiente relación:

$$W = Ks P / pm$$

Donde W es el factor de desgaste, s es la distancia de desgaste, P es la carga aplicada, pm es la presión de flujo de el material y K es la constante que relaciona la probabilidad por unidad, encontrada para la producción de un partícula de desgaste. Como podemos observar esta teoría supone dos simples reglas, que la velocidad de desgaste es independiente del área aparente de contacto y es directamente proporcional a la carga aplicada.

2.1.1. MECANISMOS DE DESGASTE

Es en general aceptado que cuando dos superficies metálicas planas se ponen en contacto bajo una carga aplicada, estas se unen o se sueldan debido a la presencia de pequeñas asperezas y a la verdadera área de contacto, la cual se compone de varias áreas individuales. Un estudio del número, tamaño y distribución de las áreas individuales generalmente llamadas "uniones " proporciona información importante de la naturaleza de los procesos de desgaste cuando se encuentran bajo una carga, dependiendo del material, puede ocurrir deformación primero elástica y luego plástica en estas asperezas. La deformación continuara hasta que el área de contacto real sea suficiente para soportar la carga aplicada. En este punto la deformación cesa. Las áreas de contacto pueden formar uniones de acuerdo con la teoría de la adhesión⁽¹⁶⁾. En los movimientos deslizantes, las uniones son continuamente deformadas, plásticamente cortadas y fracturadas, produciendo así el desprendimiento de material y consecuentemente el desgaste.

El microcorte es uno de los mecanismos que produce fracturas y pérdidas de material. Si asperezas duras o partículas se deslizan sobre la superficie de un material blando, bajo condiciones tribológicas particulares actua como una microherramienta de corte. Este mecanismo remueve material de la superficie por la formación de rebabas y fragmentos. La profundidad y tamaño del surco, depende del tamaño de la partícula cortante.

Uno de los aspectos presente en el desgaste es el movimiento relativo entre sus componentes, este puede ser en una dirección ó en dos direcciones, deslizante o rodante. Puede haber una combinación de rodamiento y deslizamiento o movimientos oscilatorios. Un metal puede interaccionar con un no metal ó líquidos tales como aceite lubricante o agua. Dependiendo de la naturaleza del medio envolvente en una interacción bajo carga, el desgaste puede ser clasificado de la siguiente manera:

2.1.2. DESGASTE ADHESIVO

En este, el movimiento relativo puede ser unidireccional ó en dos direcciones y deslizante, la interacción ocurre bajo pequeñas amplitudes de carga. Se caracteriza por la formación y fractura de uniones adhesivas. Eventualmente fracturas por fatiga nuclearán y se propagarán desprendiéndose fragmentos los cuales causan una pérdida neta del material. También se puede dar el proceso de adhesión y transferencia de material el cual puede repetir en ambas direcciones para que finalmente ocurra la pérdida por fragmentos. Dependiendo de la geometría el mecanismo de adhesión produce protuberancias en la superficie sometida a desgaste, formadas por el material transferido de una superficie a otra. Este tipo de desgaste se puede expresar de la siguiente manera.

$$V = ZAS$$

Donde Z es el número de átomos removido por encuentro. A es el área total, V es el volumen removido y S es la distancia recorrida. Pero esa área total se relaciona con la carga como sigue:

$$A = P/T$$

Donde P es la carga y T la tensión de fluencia del material blando, sustituyendo en la primera se obtiene:

$$V/S = Z P/T$$

Que tiene la forma de la relación de Archard.

2.1.3. DESGASTE EROSIVO

Es el desgaste de una superficie, la cual es golpeada por una corriente de partículas. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es llamado erosión por cavilación y cuando se mencionan partículas erosivas se refieren a partículas sólidas. Los sistemas tribológicos erosivos son también llamados sistemas de desgaste de tres cuerpos, un cuerpo es la superficie expuesta, las partículas en contacto momentáneo con la superficie representan el segundo cuerpo, el medio el cual transfiere la carga sobre el segundo cuerpo, (este podrá ser otra superficie, una corriente líquida o el flujo, mismo de partículas) es considerado como el tercer cuerpo.

El principal mecanismo de tribofracturas en el desgaste erosivo son el microcorte y el impacto, adicionando la deformación plástica.

2.1.4. DESGASTE POR FATIGA

Los fenómenos por fatiga son generalmente importantes en todos los tipos de desgaste. Las tribofracturas son un fenómeno interactivo que son promovidas por efectos acumulativos durante fluctuaciones cíclicas de carga. Es común que el material removido sea predominantemente producido por fracturas de tipo fatiga en los sistemas tribológicos. El más típico sistema tribológico de fatiga es dado en contacto rodante como por ejemplo los cojinetes. En estas los efectos de abrasión e impacto son reducidos. El desgaste adhesivo puede ser de importancia, en casos donde la lubricación es difícil. La propagación de fracturas por fatiga esta concentrada en dos direcciones, una perpendicular y otra paralela a la superficie de contacto. El resultado es que al avanzar la fractura, la superficie del material es removida en escalas relativamente grandes en forma de hojuelas.

2.1.5. DESGASTE ARRASIVO

El desgaste abrasivo se caracteriza por la formación de surcos. Estas interacciones se llevan a cabo por microcorte, con deformación plástica, al ser rasgada la superficie por un elemento abrasivo duro. La deformación plástica se refleja en la formación de una cresta al mismo tiempo que el fragmento corta la

superficie. Las partículas abrasivas pueden provenir de material desprendido, de polvo de los alrededores, o de partículas de impurezas que quedan atrapadas en la interfase deslizante y remueven gran cantidad de material. En otros caso se utiliza este tipo de desgaste, para la evaluación de abrasivos en forma sistematizada. El desgaste abrasivo sigue también una relación como la anterior:

$$V/S = B P/H$$

Donde H toma el valor de $0.63 \tan \theta$ para una aspereza cónica y θ es el ángulo que forma la base de la partícula cónica con la superficie del metal blando. Para calcular la resistencia al desgaste abrasivo de un material sometido a investigación se puede usar la siguiente relación :

$$R1/R2 = A H/P$$

Donde $R1$ es la resistencia al desgaste de un material usado como referencia, $R2$ es la resistencia del material bajo investigación, A es una constante, P es la presión aparente de contacto y H la dureza del material bajo investigación.

2.1.6. DESGASTE VIBRACIONAL

El desgaste vibracional o rozamiento, envuelve elementos de todos los otros tipos. Los sistemas tribológicos de este tipo se caracterizan por estar sometidos a oscilaciones de varias frecuencias y pequeñas amplitudes. dependiendo del material y las condiciones de la superficie, la adhesión puede actuar como un mecanismo de activación para mecanismos de abrasión, y la fatiga es un componente inherente.

Dependiendo del diseño del sistema, este puede desprender partículas que no pueden escapar del área de contacto y toman una función abrasiva. al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua, puede provocar adhesión. Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos incrementándose el factor de desgaste. Una mezcla de partículas metálicas y partículas provenientes del rompimiento de la capa de corrosión es un efectivo medio abrasivo el cual previene la adhesión y reemplaza al lubricante. Sistemas prácticos de rozamiento son las uniones mecánicas.

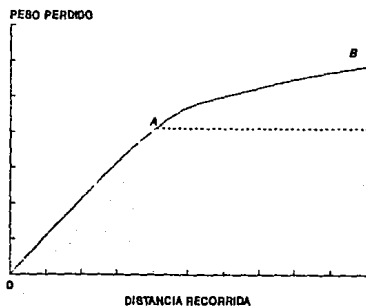
2.1.7. MAQUINA DE DESGASTE

Para caracterizar efectivamente la resistencia al desgaste de los materiales ó aleaciones se requiere de pruebas simples, reproducibles y economicas. Hay varios métodos para hacer este tipo de pruebas, muchas de estas son modificaciones al metodo Taber Mel-abrader(9). El que se empleo en este trabajo es una modificación a este y consta de un disco de acero tratado termicamente (con una dureza de 54 RC a lo largo de toda su superficie), y que gira sobre su eje a una velocidad de 496 r.p.m. sobre el que se colocan pequeñas probetas de 0.635 centímetros de diámetro por 1.778 centímetros de largo colocadas en posición vertical y sometidas a una carga determinada. La cantidad de desgaste puede ser establecida pesando el perno con una balanza analítica. Al final de esta prueba lo que se hace es graficar la pérdida de peso contra la distancia recorrida hasta obtener un desgaste inicial y un estado estable de desgaste.

Es muy importante trabajar bajo condiciones de limpieza extrema ya que cualquier sustancia que se encuentre entre las dos superficies metálicas pueden actuar como lubricante o en el peor de los casos como abrasivo.

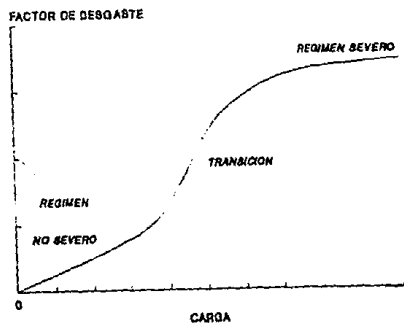
2.1.8. CURVA DE DESGASTE

Cuando el peso perdido de nuestra muestra es graficado contra la distancia recorrida, se obtiene una curva característica como la mostrada en la gráfica 2.01. La pérdida de peso inicial es curvilínea y la cantidad de peso o volumen perdido por unidad de distancia recorrida, decrece hasta el punto A donde se une con una línea recta AB. El aumento del volumen o peso perdido en el estado de desgaste inicial está dado por AO. AB es el estado estable, que es usado para encontrar el factor de desgaste de un material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie.



Gráfica 2.01

Cuando un nuevo material es investigado, la primera fase de el trabajo es usualmente una evaluación de la cantidad de desgaste con el incremento de la distancia recorrida. El siguiente paso es graficar el factor de desgaste contra la carga. Para bajas cargas, hay un regimen de desgaste no severo, seguido por un regimen de transición donde el factor se incrementa en pocos ordenes de magnitud. Posteriormente si se incrementa la carga, la curva se estabiliza, entrando a una zona donde el factor de desgaste vuelve a tener ordenes de magnitud similar. la carga a la cual la curva tiene el punto de inflexión es llamada carga de transición y las zonas donde los factores son estables corresponden a regimen de desgaste. como se muestra en la grafica 2.02



Gráfica 2.02

No necesariamente un material puede presentar tan sólo dos regimens, ya que algunas pueden presentar sólo uno o más de dos, dependiendo de las condiciones de la prueba y de la naturaleza del material.

2.1.9. CAPA BLANCA

Uno de los aspectos más importantes estudiados bajo condiciones de desgaste son la naturaleza y los mecanismos de formación de ésta. La capa ha sido definida como: dura, blanca o no atacada⁽¹⁷⁾. Y se encuentra en la mayoría de los metales ferrosos bajo un cierto rango de condiciones controladas.

Se interpreta esta como la formación de martensita, resultado del calentamiento por fricción de las piezas seguido de un enfriamiento debido a la menor temperatura de las subcapas. Trent atribuyó este comportamiento a la formación de la martensita de tamaño de grano extremadamente fino producido por la rapidez de calentamiento y enfriamiento. La falla o ruptura de esta bajo condiciones severas de operación es debido a que esta capa es dura pero frágil y se reconoce que es un problema referido a la inclusión de partículas de martensita amorfa. La más importante propiedad de esta capa es la dureza elevada varios investigadores reportan durezas de 700 a 1200 H Vickers para aceros⁽¹⁷⁾. Grozin y Iankorich han propuesto que no hay una composición específica de la capa blanca.

2.2.0. TRATAMIENTOS TERMICOS

En los procesos de manufactura encontramos que existen tratamientos térmicos que involucran transformaciones microestructurales de una pieza las cuales tienen por objeto mejorar las propiedades y las características de los aceros; consisten en calentar y mantener las piezas de acero en estado sólido a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas posteriormente en condiciones convenientes. El tiempo y la temperatura son los factores principales, hay que fijarlos siempre, de acuerdo a la composición del acero, la forma, tamaño de la pieza y las características que se desean obtener⁽²⁷⁾.

2.2.1. TEMPLE

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros, para ello se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría rápidamente en un medio conveniente agua, aceite, salmuera, etc..

El temple de los aceros rápidos se hace generalmente llevándolos a una temperatura de 1200 a 1300°C y enfriéndolos en aceite o al aire. Es interesante destacar que estos, debido a la gran cantidad de carburos que contienen son siempre calentados al punto de fusión del acero. El calentamiento para el temple de los aceros rápidos se suele realizar en baños de sales, utilizando hornos eléctricos con electrodos sumergidos que trabajan de 10 a 30 volts. Empleando en

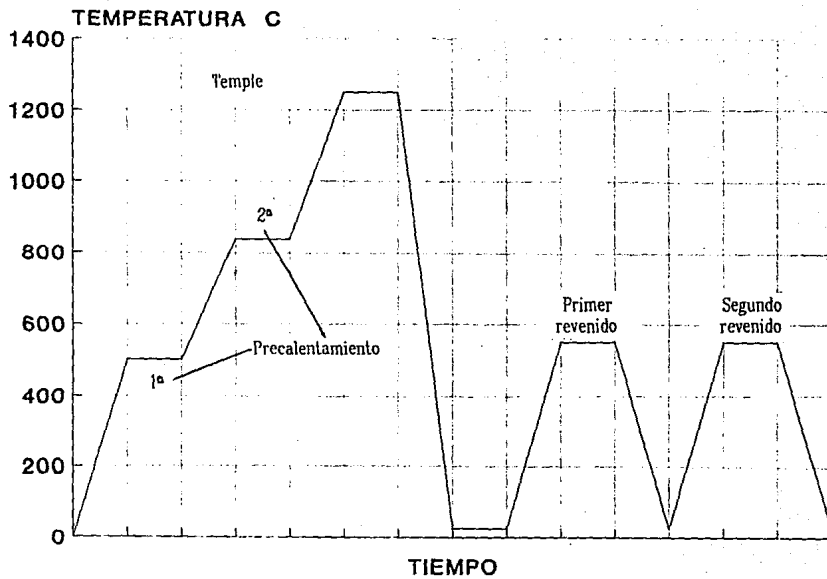
el calentamiento sales de composición adecuada. Con esto se evita la descarburización del acero y la formación de cascarilla superficial en las piezas.

Al sobrepasar la temperatura de los 800°C una gran parte de la masa del acero, se encuentra en forma de austenita que luego del enfriamiento se transforma en martensita, incrementándose así la dureza de nuestro material.

2.2.2. REVENIDO

Es un tratamiento que se le da a las piezas o herramientas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento que consiste en calentamiento a temperatura inferior a la crítica A_{C1} se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando además el acero con la dureza y la resistencia deseada. El revenido de aceros rápidos es una operación que se realiza generalmente entre 500 y 600°C y generalmente se les dan dos otros revenidos sucesivos. En la figura 2.03 se muestra el esquema de un tratamiento térmico de acero rápido.

El revenido de los aceros se pueden distinguir cuatro etapas. En la primera etapa al alcanzar los 150°C aproximadamente, la martensita tetragonal, comienza a transformarse en martensita de red cúbica y también comienza la precipitación de pequeñas partículas de carburo de hierro, epsilon. En la segunda etapa la austenita retenida se transforma en bainita luego, al continuar



Esquema de los tratamientos termicos de un acero rápido.

Fig. 2.03

elevándose la temperatura comienza a desdoblarse la bainita en carburos y ferrita. En la tercera etapa de revenido el carburo épsilon formado en la primera etapa se redisuelve y se forma la cementita, una parte de la cual envuelve las agujas de martensita y otra parte aparece en el interior de las agujas. La cuarta etapa ocurre en los aceros rápidos a temperaturas superiores a los 400°C y en ella se produce la precipitación de carburos aleados submicroscópicos⁽²⁷⁾.

2.3.0. NITRURACION IONICA

La nitruración iónica, es un proceso químico superficial en el cual el nitrógeno se combina químicamente con el hierro y otros elementos de aleación de un acero. la temperatura de los componentes aumenta durante el proceso debido a que se genera calor por el impacto de los átomos de nitrógeno y la superficie de la muestra. los niveles de energía involucrados en el caso anterior son menores a 1 KeV.

Para obtener un mejor entendimiento de la técnica de descarga luminiscente empleado en la nitruración iónica y el proceso que involucra. Consideremos el equipo mostrado en la figura 2.04. Los principales elementos son el horno o la cámara de vacío, el sistema de distribución de gas y la unidad eléctrica. las piezas a trabajar se suspenden o se colocan en la cámara de tal manera que se logre un buen aislamiento térmico. Junto con la bomba de vacío, y el sistema de distribución de gas permiten que el horno o cámara sea evacuado al vacío.

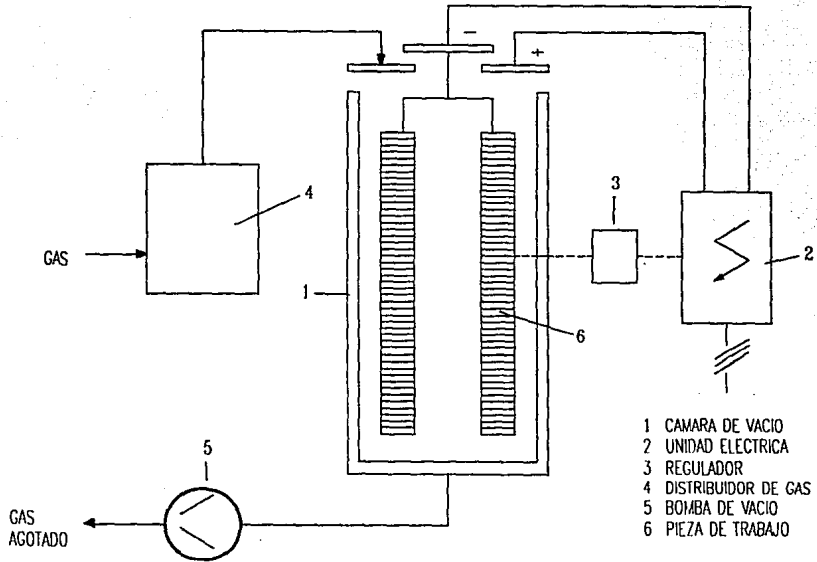


fig. 2.04

llenandolo subsecuentemente con el gas apropiado para el proceso y manteniendolo con un cierto vacío usualmente de 0.10 torr a 10 torr. Se debe seleccionar la corriente directa en voltaje desde unos cuantos cientos de volts hasta 1500 volts, aplicados entre la pieza de trabajo y las paredes del horno, el primero se conecta como cátodo y el segundo como ánodo. Bajo esta diferencia de potencial, las moléculas y los átomos del gas de tratamiento son excitados e ionizados, produciéndose un fenómeno de luminiscencia conocido como descarga luminosa o brillante. Los iones positivos del gas son acelerados a través de la región negativa existente y debido a la diferencia de potencial, golpean la superficie de la pieza con una gran energía cinética. Esta energía produce un calentamiento de la pieza, pues los iones son ocluidos dentro de sus superficie. Por ello el horno no requiere de un sistema de calentamiento.

La nitruración se puede llevar a cabo empleando nitrógeno puro o mezclas de nitrógeno e hidrógeno o con mezclas apropiadas de hidrocarburos. El consumo de gas en el proceso es modesto debido a la baja presión con la que se trabaja.

La cámara de vacío trabaja con volúmenes de carga gaseosa de 0.1 a 8 metros cúbicos, la unidad eléctrica esta equipada con elementos controladores de corriente y voltaje así como sistemas de "rompimiento" de alta velocidad para el control de fenómenos de descarga inestable. Hoy en día, la máxima corriente de salida es de aproximadamente 300 Kw, correspondientes a un voltaje de 1000 V y 300 A.

La temperatura de las piezas se mide con el uso de termopares y se regulan por medio de un controlador que varía el poder de salida de la unidad eléctrica. La temperatura de tratamiento, en muchos casos es de 400 a 600 grados centígrados, dependiendo de la composición y estructura del material a tratar así como de las tensiones que la pieza. Una ventaja particular de la nitruración iónica es el hecho de que a bajas temperaturas entre 350 y 450°C se puede lograr una saturación de nitrógeno óptima.

El tiempo de tratamiento varía de unos 10 minutos hasta un máximo de 20 horas dependiendo del grado del acero o hierro y la profundidad requerida de endurecimiento.

La descarga brillante se produce aplicando un shock de excitación a los átomos gaseosos y a las moléculas en un campo eléctrico de acuerdo a las leyes físicas⁽²⁹⁾. Los requisitos para obtener o lograr la descarga son la presencia de una baja presión y la aplicación de un voltaje de aproximadamente de 300 V mínimo dependiendo de la presión del gas de tratamiento, contenido entre los 2 electrodos en el sistema de descarga. La fig. 2.05 muestra la gráfica voltaje corriente característicos para diferentes tipos de descarga. La región A-B (Rango del tubo Geiger-Counter). La descarga brillante normal empleada en la industria (lámparas, tubos fluorescentes) es mantenida con energía relativamente baja,

corrientes débiles por ejemplo, ellos trabajan en la región de descarga normal estable y de baja corriente la cual es la región E-F.

El proceso de nitruración iónica sin embargo se asocia con altas corrientes y altas densidades de poder que ocurren o se presentan en la región de descarga anormal, inestable y corriente intensiva. El manejo y control de estas regiones de descarga son de principal importancia y cuidados en la producción adecuada de superficies nitruradas. Las características de este tipo de descarga claramente indica que hay pequeños problemas que se deben considerar en su control. Cuando se trabaja en la región anormal de descarga (justo en la frontera del punto G) hay un ligero aumento en la densidad de corriente la cual puede resultar como una concentración de descarga en un punto en particular.

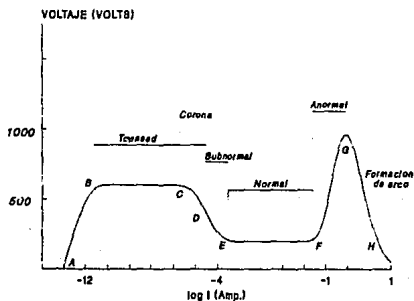


Figura 2.05

Hoy en día, los modernos sistemas electrónicos "rompedores" de alta velocidad permiten controlar las variaciones de corriente voltaje en diferencias dI/dt y dV/dt en milésimas de segundo. Esos sistemas previenen la formación de arcos por lo que la descarga puede mantenerse con seguridad con altas densidades de corriente en la región anormal.

La nitruración iónica usa el estado de plasma, éste consiste en partículas cargadas eléctricamente, por ejemplo iones o electrones. En otras palabras, el estado del plasma está enriquecido por átomos ionizados del gas en tratamiento. En un proceso puramente térmico, este estado sólo puede lograrse por calentamiento del gas a una temperatura de miles de grados. Sin embargo empleando la electricidad, este estado puede lograrse fácilmente como en la descarga brillante.

Las cargas presentes en un gas son aceleradas por un voltaje (creado entre el cátodo y el ánodo). El proceso de colisión de partículas produce moléculas del gas en tratamiento así como átomos ionizados, obteniéndose así cargas continuas. Los electrones se aceleran a través de la zona anódica formada por la pared del horno y los iones positivos a través de la zona catódica formada por las piezas a tratar.

El fenómeno de luminiscencia catódica, el cual puede referirse como brillo se limita a un espacio estrecho alrededor de la pieza, el brillo sigue el contorno de la

pieza en toda su superficie incluyendo muescas y agujeros, sometiéndola a un bombardeo iónico uniforme, produciendo así una dureza homogénea en toda la superficie.

Los iones positivos de nitrógeno producidos por el proceso de colisión son fuertemente acelerados hacia la superficie de la muestra. Dependiendo del voltaje aplicado y el número de partículas disponibles, la energía cinética presente de unas pocas a unas cientos de electróvolts. Estos valores corresponden a la temperatura atómica del plasma que va de aproximadamente diez mil a varios cientos de miles de grados.

Después de aplicar el voltaje necesario, la pieza se calienta debido a la alta energía cinética de los iones. Esta aumenta debido al siguiente proceso:

Cuando los iones golpean la superficie de la pieza, los átomos del metal (Fe así como los elementos aleantes Cr, Mo, Al, Ni, etc.) son separados: esto debe considerarse como un proceso de vaporización debido a que los iones impactados pueden ocasionar un aumento de calor o temperatura en una área localizada de la pieza produciendo que átomos localizados en una región particular se vaporicen. Esta temperatura localizada de varios miles de grados se puede limitar a áreas extremadamente pequeñas y no daña la superficie de la pieza. Durante el proceso, parte de los iones convierten su energía cinética en trabajo A para expulsar

átomos y electrones de la superficie de la pieza, y en energía cinética, (E_{cin}) de las partículas separadas.

$$E_{ionico} = A + E_{cin}$$

Así como los elementos metálicos, los elementos no metálicos como carbono y oxígeno también son expulsados. De esta manera, la superficie puede limpiarse de partículas de carburos, óxidos, etc. Debido a la difusión secundaria (preferencialmente a lo largo del límite de grano) en la superficie, el proceso de chisporroteo afecta grandemente la concentración y comportamiento en el interior del material. Cuando los iones de nitrógeno golpean y penetran las capas externas de los átomos de la muestra, la energía remanente de los iones se convierte en Q por ello la pieza no requiere tratarse térmicamente.

$$E_{ionico} = A + E_{cin} + Q$$

Si se emplea una mezcla de gases en lugar de nitrógeno puro, los iones de los otros átomos como hidrógeno, carbono, oxígeno pueden penetrar y calentar la pieza.

La capa nitrurada se puede dividir en capa de compuestos (capa blanca) y capa de difusión. La velocidad de formación y la composición de la capa superficial de compuestos se puede controlar con los parámetros de operación (presión, voltaje).

El mecanismo de penetración del nitrógeno durante la nitración gaseosa convencional ocurre principalmente por difusión intergranular. No existe consenso sobre los mecanismos de formación de nitruros durante el proceso con plasma.

Sin embargo H. Edenhofel⁽¹⁵⁾, propone que los nitruros que se forman cuando el hierro y los elementos aleantes que son desprendidos de la superficie del acero por el impacto de los iones, se asocian con el nitrógeno en el plasma. Estos nitruros de composición inicial FeN se condensan sobre la superficie metálica, descomponiéndose posteriormente en nitruros menores de Fe₂₋₃N (épsilon) y Fe₄N (alfa) desprendiendo nitrógeno que difunde además del que regresa al plasma.

La composición de la capa superficial es controlada ajustando el contenido de nitrógeno en la atmósfera, de tal forma que cuando este contenido es alto (mayor al 205 en volumen) se forma capa blanca⁽¹⁵⁾, la cual es llamada así por el aspecto que presenta en el microscopio óptico, y que consiste de una mezcla de Fe₂₋₃N y Fe₄N. Esta capa blanca es indeseable, porque el diferente sistema cristalino que presentan los dos tipos de nitruros produciendo una estructura porosa y extremadamente frágil, motivo por el cual se producen microfracturas que son el origen de fallas por fatiga. Generalmente se presenta como mezcla de las fases Fe₄N (fcc) y Fe₂₋₃N (hcp) aunque se pueden formar selectivamente ajustando la composición de la atmósfera de tratamiento.

Un método alternativo para evitar la presencia de la capa blanca consiste en descomponerla una vez que se ha formado. Normalmente se utiliza un plasma inerte de hidrógeno o argón el cual produce una erosión por bombardeo de la superficie, difundiendo el nitrógeno de la superficie hacia la atmósfera de la cámara y hacia el interior de la pieza. El tratamiento de eliminación de la capa blanca con el gas inerte puede hacerse rápidamente calentando la pieza a una temperatura más alta que la del tratamiento.

2.4.0. DEPOSITACION FISICA DE VAPORES

El depósito físico de vapores P.V.D. cubre tres grandes técnicas: evaporación, espurreo (sputtering) y chapeado iónico.

Originalmente el P.V.D. fué utilizado únicamente para depositar metales, por medio del transporte de un vapor en un vacío, sin involucrar una reacción química. Ahora la tecnología de éste se ha desarrollado versátilmente en el depósito de una gran gama de materiales. En general el P.V.D. consiste de un reactor vacío que contiene una fuente de vapor y un sustrato sobre el cual ocurre la condensación del material que da como resultado el depósito. Existen variaciones en la atmósfera, por ejemplo la presencia de un gas inerte como el argón o uno reactivo como nitrógeno; el método de calentamiento de la fuente de vapor por inducción o por medio de un cañon de electrones se muestra en la figura 2.06.

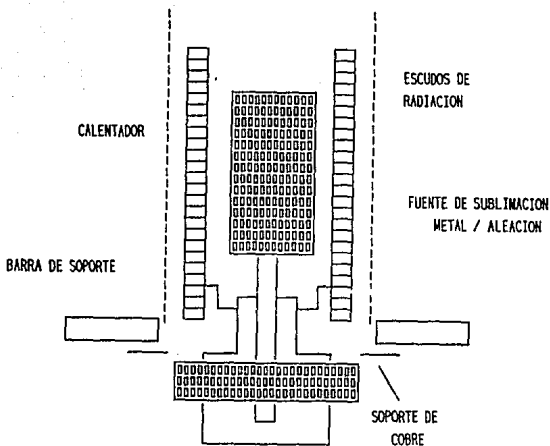


figura 2.06

El depósito toma lugar de acuerdo a las siguientes etapas simplificadas:

1. *Síntesis del material que va ser depositado. Transición de la fase condensada (sólida o líquida) a la fase vapor, la cual es introducida al reactor.*
2. *Transporte del vapor entre la fuente y el sustrato*
3. *Condensación de los vapores seguida por la nucleación y crecimiento de la película.*

En los depósitos P.V.D. la interfase entre los recubrimientos y el sustrato es una región distinta, mientras que en los procesos de implantación iónica esto no ocurre ya que el recubrimiento forma parte del sustrato. En el P.V.D. pueden controlarse la dureza, estructura y la adhesión de las películas. El proceso de evaporación al vacío es mucho más rápido que el espurreo en las mismas condiciones, pero para este último es más fácil controlar las composiciones de las aleaciones y la tasa de depósito. El chapeado iónico es preferido por su muy buena adhesión.

Hay muchas ventajas de los procesos P.V.D. sobre otros procesos competitivos como el electrodeposito C.V.D. (Chemical Vapour Deposition) y spray en plasma algunas de estas son:

- 1. Gran variedad de composición en los depósitos, casi cualquier material puede ser depositado: metales, aleaciones, refractarios y compuestos intermetálicos, así como también algunos materiales de tipo polimérico y sus mezclas⁽²²⁾.*
- 2. Existe la posibilidad de variar la temperatura de los sustratos en un punto amplio rango desde el subcero hasta muy altos valores.*
- 3. Alta pureza de los depósitos.*
- 4. Habilidad de producir depósitos de sustratos con formas complejas con una alta tasa de depósito.*
- 5. Excelente unión con el sustrato (adherencia)*
- 6. Excelente acabado superficial, el cual puede ser igual al del sustrato, por tanto minimizado o eliminado el post pulido y el maquinado de las piezas.*

CAPITULO III.
METODO EXPERIMENTAL

3.0.0. METODO EXPERIMENTAL

3.1.0. HIPOTESIS

Los tratamientos de temple y revenido, nitruración iónica y el depósito físico de vapores (P.V.D.), modificarán las propiedades del acero M-2 en su superficie haciendo que se incremente: la dureza, resistencia al desgaste y fricción.

Las muestras que presentan las películas de nitruro de titanio, serán más resistentes al desgaste que las muestras a las cuales se les hizo la nitruración iónica y por consiguiente que las que solamente fueron templadas y revenidas.

3.2.0. CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO

Para la realización de este trabajo se utilizarán los siguientes aceros :

- Acero M-2 que es un acero para herramienta de alta velocidad al cual se le hicieron las modificaciones en su superficie (Temple y Revenido así como nitruraciones iónicas).*

- Acero de baja aleación 4140 tratado térmicamente (templado y enfriado en aceite el cual obtuvo una dureza de 54 Rc).*

- Acero de importación M-2 el cual se utilizó como sustrato para la deposición de la capa de TiN.

Las normas de la composición química en % de los materiales trabajo son:

Acero de alta velocidad M-2

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>
<i>0.78-0.88</i>	<i>0.15-0.40</i>	<i>0.20-0.45</i>	<i>3.75-4.50</i>	<i>1.75-2.20</i>	<i>5.50-6.75</i>	<i>4.50-5.50</i>

Acero de baja aleación AISI4140

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>S max.</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
<i>0.38-0.43</i>	<i>0.75-1.00</i>	<i>0.040</i>	<i>0.15-0.35</i>	<i>0.80-1.10</i>	<i>0.15-0.25</i>

Acero de alta velocidad M-2 (norma ASTM)

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	<i>V</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>
<i>0.8</i>	<i>0.13</i>	<i>8.2</i>	<i>3.3</i>	<i>0.88</i>	<i>0</i>	<i>8.0</i>

3.3.0. METODO EXPERIMENTAL

Para comprobar las hipótesis dadas anteriormente se realizó el siguiente método experimental.

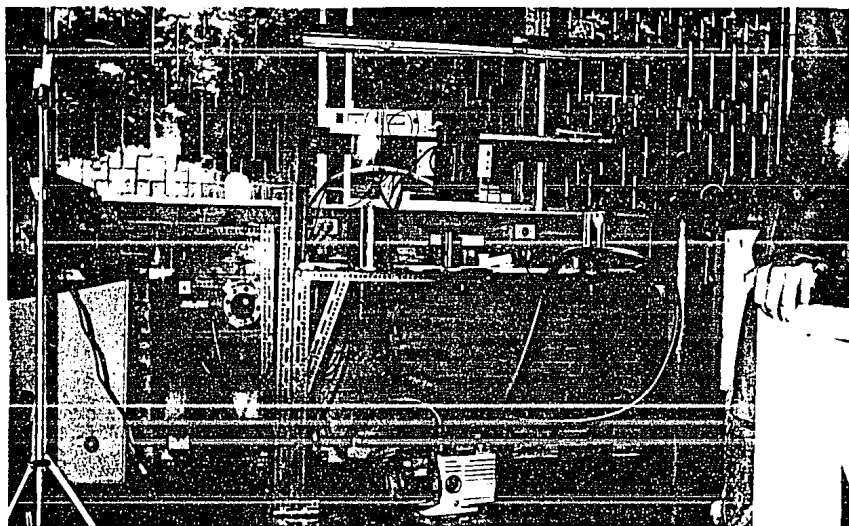
Se procedió a la elaboración de una serie de probetas, que consistieron en pequeñas cilindros de aproximadamente 0.952 cm de diámetro por 1.905 cm de largo de acero comercial M-2. Las que fueron sometidas primeramente a un tratamiento térmico el cual consistió en:

Templar las muestras. Estas fueron precalentadas previamente en dos etapas la primera a 500 °C y la segunda a 850 °C realizando luego el calentamiento final a una temperatura de aproximada de 1200 °C durante 3 minutos. El calentamiento fue hecho en baño de sales (estas estaban constituidas por 95% de cloruro de bario y por 5% de cloruro de sodio) posteriormente fueron enfriadas en aceite, hasta temperatura ambiente. A continuación se le hicieron dos tratamientos de revenido a 550 °C con duración de dos horas cada uno en un baño de sales.

Las muestras ya templadas y revenidas fueron rectificadas a lo largo de toda su superficie utilizando para esto dos tipos de rectificadoras una de superficies planas y otra sin centros hasta reducir las muestras a 0.635 cm de diámetro y 1.778 cm de largo con un acabado a espejo. Por último se les hizo una pequeña muesca como se presenta en la fig. 3.02 para poder ser presionada por un tornillo.

3.4.0. NITRURACION IONICA

Las pruebas de nitruración iónica se efectuaron con el equipo mostrado en la fotografía 3.01 que consta de una cámara de acero inoxidable tipo AISI 304 con un volumen de 0.017 m³ equipada con una bomba de vacío con una capacidad de bombeo 6 dm³ por segundo, una fuente de poder de corriente directa de 0 a 5 Kv, un tanque de gas con una mezcla comercial de hidrógeno y de nitrógeno. La



Fot. 3.01 EQUIPO QUE SE UTILIZO PARA LA NITRACION IONICA.

un tanque de gas con una mezcla comercial de hidrógeno y de nitrógeno. La conexión catódica se logra con un atravesador de alto voltaje. Los parámetros controlados fueron la presión, el voltaje, la corriente, la temperatura y el tiempo cuyos valores y rangos se reportan en la tabla 3.40.

Para evitar la presencia de contaminantes tanto las muestras como la cámara (que funciona como ánodo) y el porta muestra (platina que se utilizó como cátodo) fueron lijadas y desengrasadas con acetona antes de hacer los tratamientos.

Condiciones de operación

<i>Parámetros</i>	<i>Rango de trabajo</i>
<i>Voltaje</i>	<i>410 - 440 Volts</i>
<i>Presión</i>	<i>0.9 - 0.110 torr</i>
<i>Temperatura</i>	<i>490 - 510 °C</i>
<i>Tiempo</i>	<i>2, 4, 8 Hrs.</i>
<i>Atmosfera</i>	<i>82 % H₂ 18 % N₂</i>

Tabla 3.40

El tratamiento inicio con una purga dentro de la cámara para reducir la presión parcial de oxígeno el cual es nocivo para este proces⁽¹⁵⁾. Posteriormente se procedio al encendido de la fuente de poder produciendose una gran cantidad de arcos debido a la presencia de partículas sobre la superficie de las muestras

después de 45 minutos alcanza la temperatura de trabajo que es de 500 °C mas menos 15 °C

3.5.0. PRUEBAS DE DESGASTE

Las muestras se montaron sobre una barra de acero al carbon de 1.905 cm de espesor por 5.08 cm de ancho por 12.7 cm de largo la cual tenia tres barrenos de aproximadamente 0.762 cm de diámetro por 0.9525 cm de profundidad con una distancia de 1 cm entre cada uno y colocados en forma lineal. Estas a su vez tenian colocados en forma perpendicular tornillos alen con los cuales eran sujetas las muestras por el lado donde se encontraba la muesca para mantenerlas siempre en la misma posición durante el tiempo que duro la prueba.

Estas se realizaron en la máquina de desgaste mostrada en la fig. 3.01. El disco utilizado es de acero 4140 templado en aceite y posteriormente reclificado y pulido. Las pruebas se realizaron a 496 r.p.m. y sobre tres pistas diferentes sobre el mismo disco es decir a tres diferentes diametros que son: 10, 12, 14 cm obteniendo por lo tanto una velocidad lineal de 156, 187, 296 m/min respectivamente.

las muestras fueron sometidas a diferentes cargas que eran variadas por medio de discos de acero al carbon que se montaban por encima de la barra que soportaba. Las cargas a las que fueron sometidas fueron de : 4, 9 y 13 Kg.

Las pruebas consistieron en poner a desgastar las muestras a las que se les habia hecho el tratamiento térmico (es decir sólo temple y revenido), las probetas

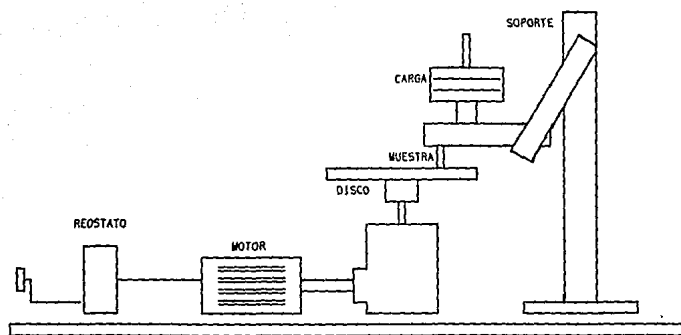


Fig. 3.01 EQUIPO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS DE DESGASTE



Fig. 3.02 FORMA QUE PRESENTABAN LAS MUESTRAS CON UNA PEQUERA MUESCA PARA SER PRESIONADA CON UN TORNILLO

a las cuales se les había hecho la nitruración iónica y que eran de 2, 4, 8 hrs. de permanencia dentro de la cámara, y las muestras que tenían la película de nitruro de titanio. Para cada modificación hecha a nuestro material se tenían muestras por duplicado para las diferentes cargas mencionadas.

3.6.0. TECNICAS DE CARACTERIZACION

3.6.1. MICROESTRUCTURA

Para la observación de la microestructura se tomo una muestra del acero con cada uno de sus tratamientos, las cuales fueron cortadas perpendicularmente desbastadas, lijadas y pulidas con alúmina de 0.05 μ m. posteriormente se atacaron con Nital 3 (3% de ácido nítrico con alcohol etílico). Las superficies fueron analizadas en un microscopio óptico Olympus PM63. Cabe hacer notar que en este trabajo no se realizó un estudio profundo sobre la composición de las capas de las muestras.

3.6.2. PERFILES DE MICRODUREZA

Para la construcción de los perfiles de microdureza tomada a las muestras que fueron nitruradas iónicamente se tomo una muestra por cada periodo de tiempo es decir de 2, 4, y 8 hrs. las cuales fueron cortadas perpendicularmente desbastadas, lijadas y posteriormente pulidas con alúmina de 0.03 μ m. Se utilizó

un microduremetro Leitz Welzel con una carga de 100 gramos. Se midió la dureza desde la superficie de la capa nitrurada hasta una profundidad de 500 μm .

3.6.3. MICROSCOPIA ELECTRONICA

Se observó la morfología de las muestras sometidas a desgaste con las diferentes cargas así como los diferentes tratamientos en un microscopio electrónico de barrido Jeol T-200. Este microscopio electrónico fue utilizado ya que tiene mayor resolución y profundidad de foco que un microscopio óptico.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.0.0. RESULTADOS

4.1.0. PARAMETROS DE DESGASTE

De las curvas obtenidas por pruebas realizadas anteriormente, a las presentadas en este trabajo se encontró que los parámetros en donde se puede apreciar más el efecto del desgaste para este tipo de acero así como de las modificaciones a las que fue sometido era de recorrer una distancia de aproximadamente 10,000. metros así como de cargas de 5 a 13 Kg con intervalos de 4 Kg.

4.2.0. EFECTO DEL TIEMPO EN EL PROCESO DE N.I.

Al aumentar el tiempo de permanencia durante las pruebas de nitruración iónica, la capa de nitruros en cada una de las probetas tenía el siguiente espesor:

<i>TIEMPO DE PERMANENCIA</i>	<i>ESPESOR DE LA CAPA NITRURADA EN MICRAS</i>
<i>2</i>	<i>100</i>
<i>4</i>	<i>160</i>
<i>8</i>	<i>200</i>

Como podemos ver el comportamiento al hacer la nitruración iónica a las muestras para este caso en particular fue en forma lineal. Esto no quiere decir que el comportamiento a mayores tiempos de permanencia dentro de la cámara tenga la misma tendencia. La tendencia a seguir debería ser en forma exponencial de acuerdo a la primera ley de fick⁽²⁸⁾.

Como se puede observar en la gráfica 4.01, donde las muestras fueron sometidas a una carga de 5 kg. Cabe destacar que se presentó un efecto de vibración en todo el tiempo que duraron las pruebas y para todas las muestras esto debido a que la carga a la que fueron sometidas fue muy pequeña y la velocidad lineal fue grande.

Para el caso de las muestras que se les hizo un tratamiento de nitruración de 2, 4 y 8 horas. Se puede observar en las curvas obtenidas, que se presenta un efecto de desgaste similar para las tres muestras, hasta haber recorrido aproximadamente los primeros 5000 metros, donde al rebasar estas, hay un cambio de pendiente para cada una. es decir hay una tendencia de las nitruradas para cada una. es decir de la nitruradas a sufrir un desgaste más severo conforme se va incrementando la distancia recorrida. Este cambio se puede deber en gran parte que la capa en la cual se encontraban los nitruros se fue perdiendo dejándose ver parte del sustrato. Por ejemplo en la muestra que fue nitrurada por espacio de 2 hrs. se puede apreciar el desgaste más severo ya que como se reportó anteriormente la capa nitrurada media tan solo 100 micras de espesor. y que al recorrer aproximadamente los primeros 4000 metros esta había desaparecido por el efecto de un desgaste vibracional.

La tendencia de la muestra la templada y revenida presenta un cambio de pendiente después de los 4000 metros, donde al igual que las nitruradas entran posteriormente a un régimen de desgaste severo en el cual la curva se estabiliza y donde el incremento se presenta más o menos una forma lineal.

Para el caso de la muestra la cual tenía la película de nitruro de titanio el desgaste con respecto a las otras muestras tratadas fue mínimo incrementadas el peso perdido de la muestra después de haber recorrido aproximadamente los 6000 metros esto debido a que después de esta distancia se había perdido una pequeña parte de la película debido a la vibración con la que se encontraba durante la prueba.

En la gráfica 4.02 donde las muestras fueron sometidas a una carga de 9 kg la tendencia de las muestras que fueron nitruradas presentan el mismo comportamiento que las mencionadas en la prueba anterior, exceptuando que el cambio de pendiente se hace ahora después de los 3000 metros. en este caso no se presentó vibración, pero sí un calentamiento mayor en las muestras y a lo largo de la superficie del disco sobre el cual se hizo la prueba, también se observó que se manifestaba un desprendimiento de partículas del disco formando pequeños surcos a lo largo de este. Además de formarse una película a lo largo de toda la trayectoria que recorre la probeta a través de la superficie del disco de color negro formado tal vez por óxidos según se ha reportado⁽¹⁴⁾.

para el caso de la muestra templada y revenida, el desgaste es muy similar al anterior. Solamente que el desgaste es un poco más severo debido al incremento de carga en esta prueba.

El desgaste en la muestra con la película de TiN es muy inferior a las demás ya que solamente se presenta un calentamiento muy severo por parte del disco donde se realizó la prueba.

Para las pruebas que se realizaron con una carga de 13 kg (gráfica 4.03) se presenta el mismo efecto que en las anteriores solamente que en ésta el desgaste es mucho más severo para las muestras nitruradas y las templadas y revenidas que las anteriores exceptuando la que presenta la película de TiN, en donde el efecto del desgaste con respecto a las otras es muy pequeño.

En las gráficas 4.04 y 4.05 se muestra el factor de desgaste para cada una de las muestras sometidas a las pruebas de desgaste y sus diferentes cargas, en donde se puede apreciar el factor de desgaste que no es otra cosa más que la pendiente en donde las curvas presentan un estado estable del desgaste⁽¹⁾. Además en la gráfica 4.04 se puede apreciar que antes de la primera carga se presenta un régimen no severo seguido por un régimen de transición que se presenta entre la primera y segunda carga y en donde el factor de desgaste se incrementa en pocos ordenes de magnitud. Posteriormente al incrementar la carga la curva se estabiliza entrando a un régimen de desgaste severo. En la gráfica 4.05 se puede apreciar que los valores del factor de desgaste en las diferentes cargas, son de una magnitud muy superior para las muestras nitruradas así como de las muestras templadas y

reventadas con respecto a las que presentaban la película de TiN, esta última se mantiene solamente en un primer régimen de desgaste, ya que no tienen puntos de inflexión y sus factores no se incrementan notablemente aun con la carga de 13 kg.

Por último en las gráficas 4.06 a la 4.08 se muestra la microdureza que presentan las muestras que fueron sometidas a las nitruraciones, en las que para las tres cosas se observa que la dureza obtenida en la superficie de las tres es muy homogénea, pero a medida que se van tomando las durezas a mayor profundidad la dureza va decayendo siendo en la nitrurada por espacio de 2 horas en donde la dureza decae más rápidamente después de profundizarse de la periferia de la muestra hacia el centro de esta 100 micras, para el caso de la muestra con 8 horas de nitruración la caída de dureza se presenta después de las 200 micras de profundidad llegando a una dureza estable después de esta. La dureza que presentaron todas las muestras nitruradas en el centro fue la misma. Esto puede tomarse como que la temperatura a la cual fueron nitruradas no afectó la estructura que presentaba el acero.

Cabe hacer mención que en la metalografía de las muestras nitruradas, no se encontraron indicios de la capa blanca ni deformaciones en la pieza.

Los resultados se pueden resumir presentando en las gráficas 4.01 a la 4.03 las curvas de desgaste para cada una de las muestras con las tres diferentes cargas a las que fueron sometidas.

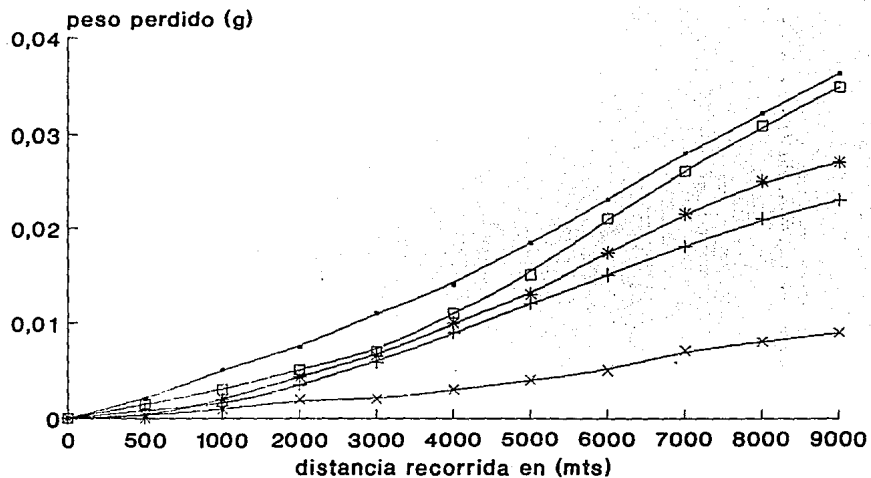
En las gráficas 4.04 y 4.05 se tienen los factores de desgaste para cada uno de los tratamientos, en donde el factor de desgaste .

En las secuencia de fotografías que van de la 4.01 a la 4.11 que se presentan al final de este capítulo se presentan las microestructuras presentadas en algunas muestras, y algunos aspectos de las superficies desgastadas después de haberse realizado las pruebas.

MUESTRA	TRATAMIENTO PREVIO	TRATAMIENTO POSTERIOR	CARGA A LA QUE FUE SOMETIDA
1 Y 1'	TEMPLE Y REVENIDO	NINGUNO	5 Kg
2 Y 2'	TEMPLE Y REVENIDO	NINGUNO	9 Kg
3 Y 3'	TEMPLE Y REVENIDO	NINGUNO	13 Kg
4 Y 4'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 2 Hrs.	5 Kg
5 Y 5'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 2 Hrs.	9 Kg
6 Y 6'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 2 Hrs.	13 Kg
7 Y 7'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 4 Hrs.	5 Kg
8 Y 8'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 4 Hrs.	9 Kg
9 Y 9'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 4 Hrs.	13 Kg
10 Y 10'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 8 Hrs.	5 Kg
11 Y 11'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 6 Hrs.	9 Kg
12 Y 12'	TEMPLE Y REVENIDO	N. I. 8 Hrs.	13 Kg
13 Y 13'	TEMPLE Y REVENIDO	P.V.D.	5 Kg
14 Y 14'	TEMPLE Y REVENIDO	P.V.D.	9 Kg
15 Y 15'	TEMPLE Y REVENIDO	P.V.D.	13 Kg

NOTA: LAS MUESTRAS CON (*) SON LOS DUPLICADOS DE CADA MUESTRA.

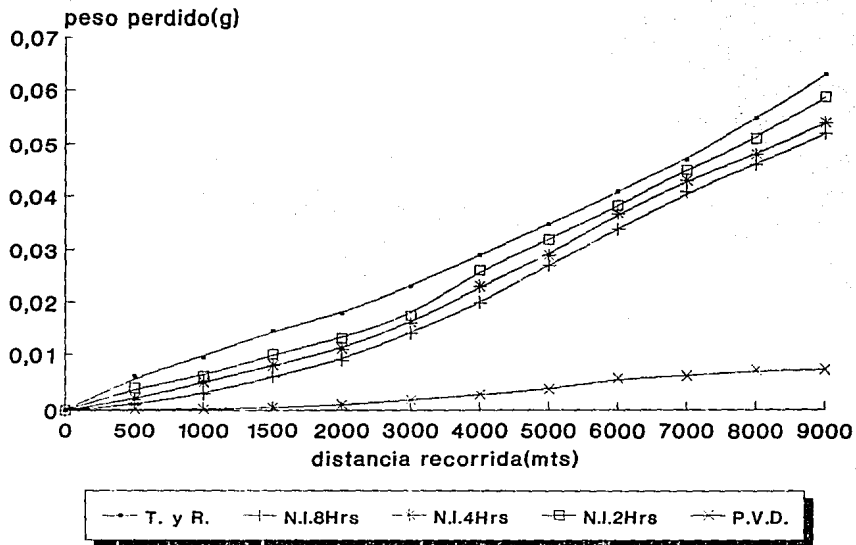
CARGA 5 Kg



—●— T. y R. —+— N.I.8Hrs —*— N.I.4Hrs —□— N.I.2Hrs —x— P.V.D.

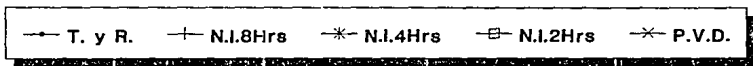
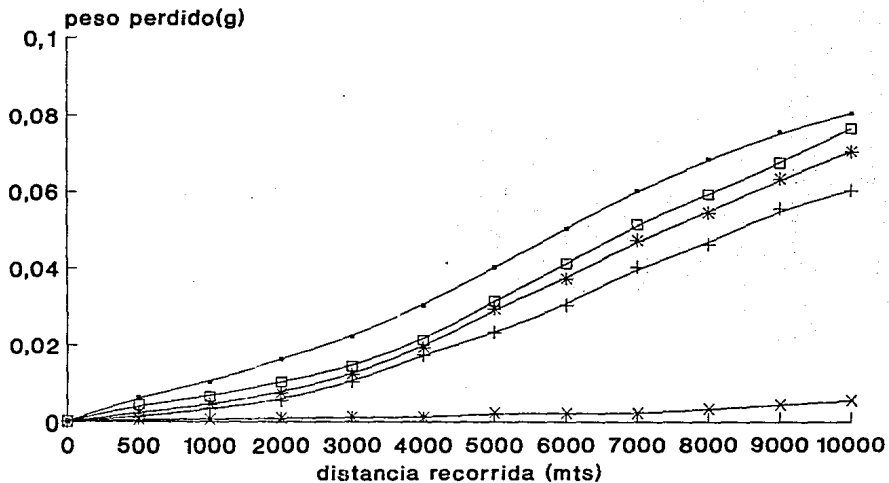
GRAFICA 4.01

CARGA 9 Kg

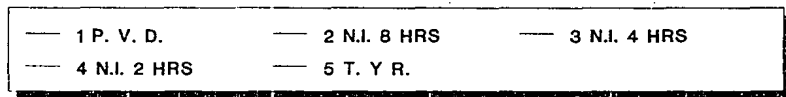
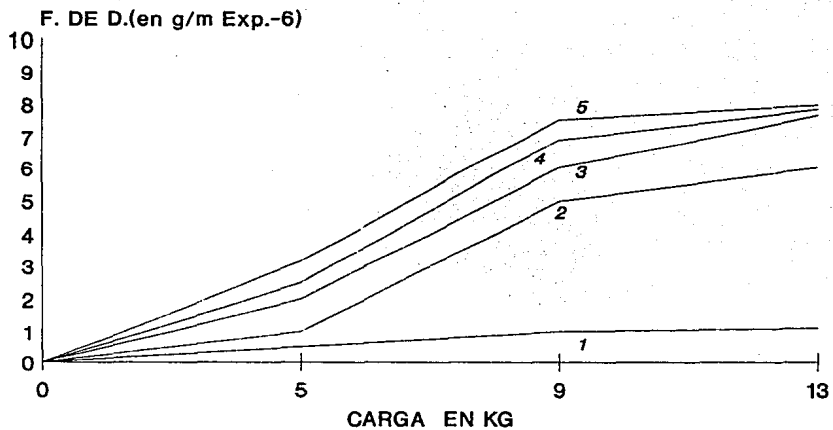


GRAFICA 4.02

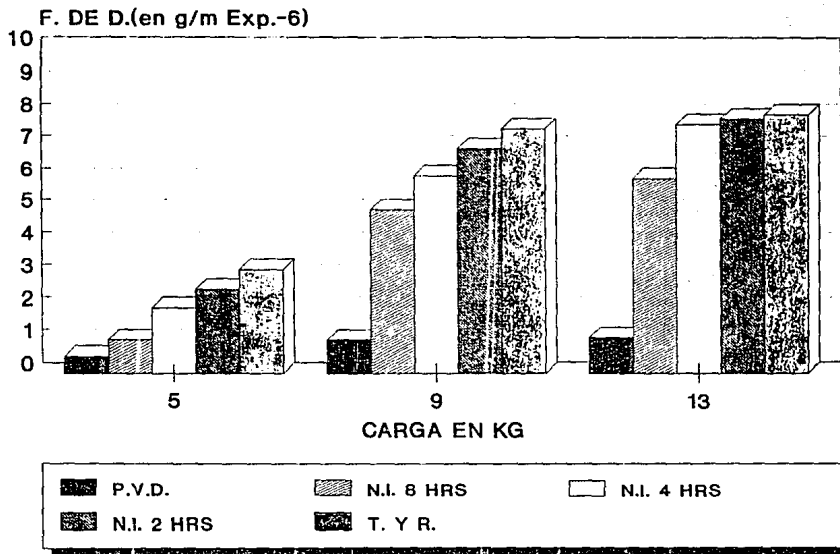
CARGA 13 KG



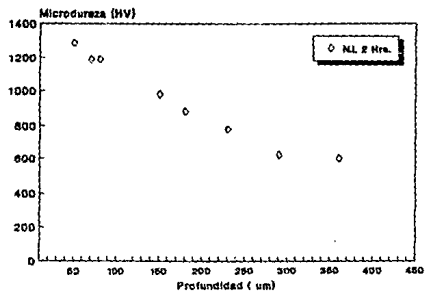
GRAFICA 4.03



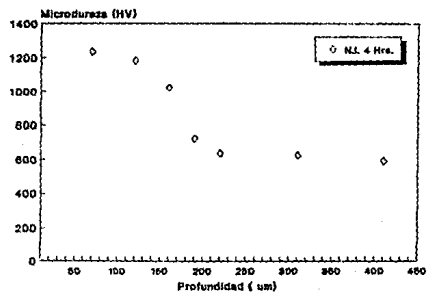
GRAFICA 4.04



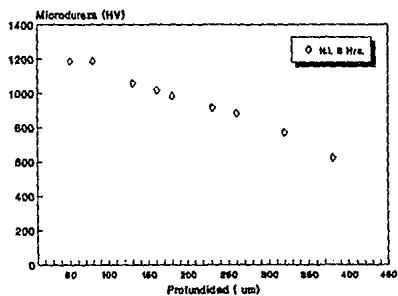
GRAFICA 4.05



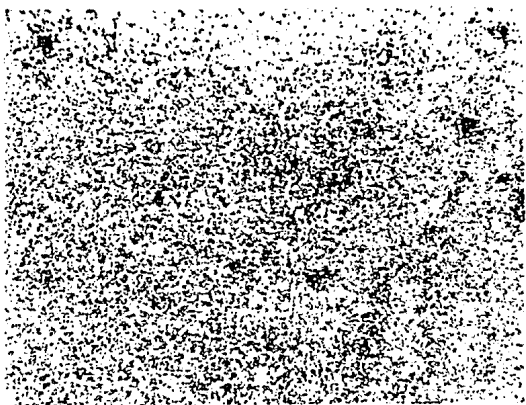
GRAFICA 4.06



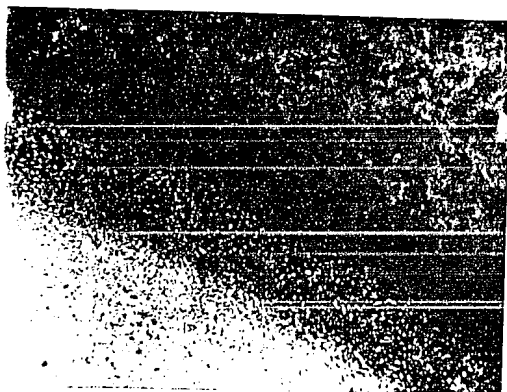
GRAFICA 4.07



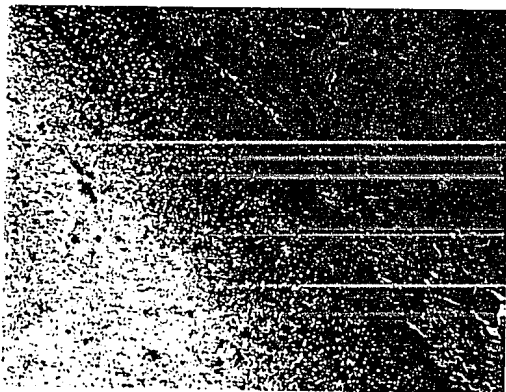
GRAFICA 4.08



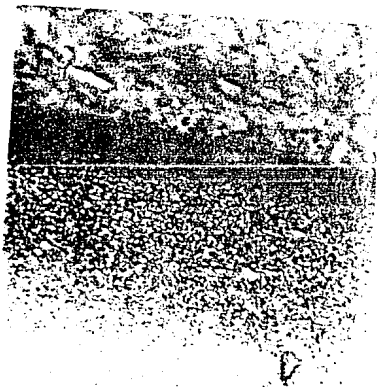
Fotografía 4.01 Acero M-2 templado y revenido el cual muestra matriz ferrítica conteniendo partículas de carburo y que tuvo una dureza de 61 RC muy uniforme en toda su superficie.



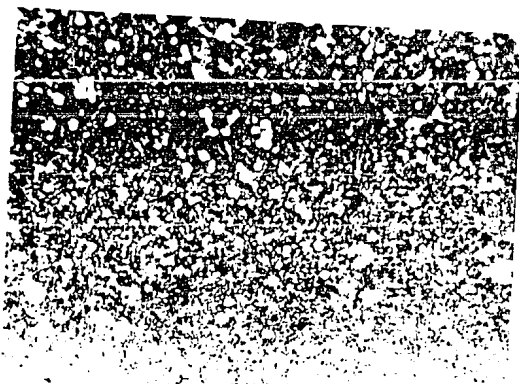
Fotografía 4.02 Acero M-2 el cual se sometió a una nitruración iónica por espacio de 2 hrs. donde el espesor de la capa nitrurada es de 0.10 mm.



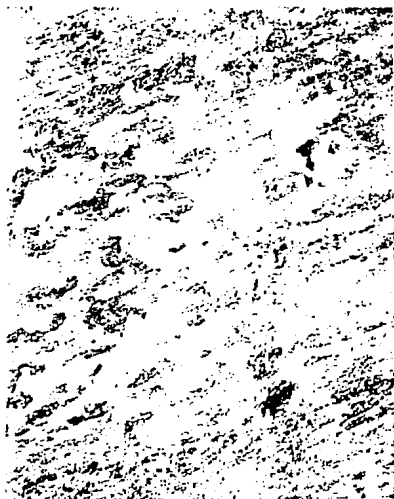
Fotografía 4.03 Acero M-2 el cual se sometió a una nitruración iónica por espacio de 4 hrs. donde el espesor de la capa nitrurada es de 0.16 mm.



Fotografía 4.04 Acero M-2 el cual se sometio a una nitruración ionica por espacio de 8 hrs. donde el espesor de la capa nitrurada es de 0.20 mm.



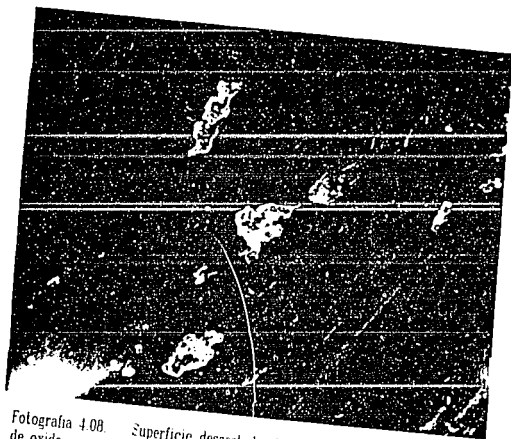
Fotografía 4.05 Matriz ferritica que presentan las muestras despues de ser nitruradas ionicamente y que contiene pequenas particulas de carburos de los elementos de aleacion y otros en forma masiva muy grandes.



Fotografía 4.06 Efecto del desgaste adhesivo donde se presentan desprendimientos de fragmentos los cuales causan una perdida neta de el material. acero templado y revenido. carga de 9 Kg.



Fotografía 4.07 Acero M-2 templado y revenido a 1500 aumentos donde se pueden apreciar surcos debido a un desgaste abrasivo despues de haberse sometido a una carga de 13 Kg



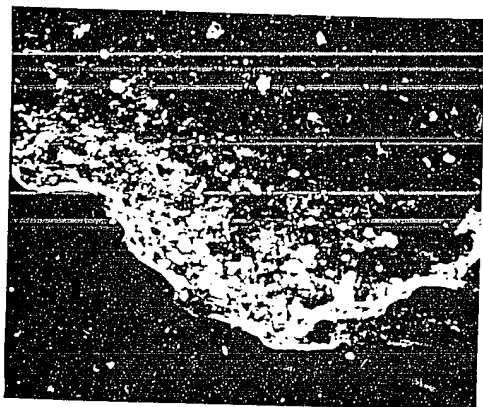
Fotografía 4.08 Superficie desgastada. Regimen severo con partículas de oxido muestra nitrurada por espacio de 2 hrs. carga de 13 kg.



Fotografía 4.09. fragmentos de material adheridos a la superficie de la muestra nitrurada ionicamente por espacio de 8 hrs. carga 13 kg



Fotografía 4.10 superficie de muestra nitrurada 4 hrs. donde la superficie del material es removida en forma de hojuelas, este proceso es llamado "delaminacion" carga 5 kg.



Fotografía 4.11. Pequeñas partículas que han sido desprendidas dentro de una cavidad en la superficie de la muestra con temple y revenido. carga de 9 Kg.

CAPITULO V.
DISCUSION

5.0.0 DISCUSION

5.1.0. NITRURACION

Con respecto a las muestras que fueron nitruradas cabe mencionar que durante el tiempo que duró el tratamiento estas no sufrieron ninguna transformación en su estructura a pesar de que la temperatura a la que se sometieron que era igual a la que se habían hecho los revenidos en el acero. La estructura que presentaban en el centro de estas era la misma que presentaban antes de haberse hecho la pruebas, en donde se pudo apreciar una matriz ferrítica con partículas de carburos.

La capa de nitruros que se formó a lo largo de la superficie del acero, con respecto a los diferentes periodos de tiempo se comportó de una forma lineal. Como se mencionó anteriormente, siendo que éste debería haber tenido un comportamiento en forma exponencial, que tal vez se presente a mayores tiempos de tratamiento.

La continua precipitación de nitruros aleados muy dispersos en la superficie de las muestras, debería de haber llegado a saturar la superficie del acero formándose una barrera de nitruros que se opondrían a la penetración del nitrógeno hacia el interior de esta. Una vez saturada la capa periférica, la velocidad de penetración depende de la posibilidad de que esta capa transmita el nitrógeno hacia el interior, haciendo que la velocidad de penetración sea cada vez mas lenta.

5.2.0. MICRODUREZA

Es posible observar que, en forma general, las microdurezas superficiales aumenten con el tiempo de nitruración. Estos perfiles obtienen su mayor valor en las zonas cercanas a la superficie metálica disminuyendo gradualmente hacia su interior, mostrándose la posible profundidad de penetración de nitrógeno. Como era de esperarse la microdureza en la superficie del acero fue mayor debido a la precipitación de los nitruros y carbonitruros de los elementos aleantes que causan una mayor distorsión de la celda cristalina del hierro alfa (BCC). Estas microdeformaciones son el indicativo de campos locales de microtensiones; las cuales en su interacción con los campos de tensiones de las dislocaciones encontradas en el material inducen al endurecimiento.

para el caso de las muestras con la película de TiN la microdureza presentada fue de casi el doble de la presentada por las nitruradas en donde el orden de magnitud fue de 2000 HV y la adherencia de esta al sustrato era muy buena a pesar de que la película media tan sólo 10 μ m como máximo.

5.3.0. EFECTO DE LAS MODIFICACIONES HECHAS AL ACERO EN LAS PRUEBAS DE DESGASTE

Como podemos observar en las muestras que fueron nitruradas y sometidas a una carga de 5 Kg. presentan un comportamiento más o menos parecido a lo largo de los primeros metros esto debido a que la capa de nitruros que se formó en la superficie de las muestras presentan una gran dureza, pero que debido a

desgaste al que fue sometido y que fue incrementándose conforme aumentaba la carga la capa tendía a perderse. Es por esto que para el caso de la muestra nitrurada durante 2 horas y en la que la capa nitrurada de aproximadamente 100 micras, se perdió más rápidamente, dejando al descubierto parte del acero en dónde a pesar de que esta presenta una gran dureza, el desgaste fue mayor, al igual que las muestras que sólo se templaron y revinieron.

5.4.0. DESGASTE POR ABRASION

La abrasión fue tal vez el mecanismo más común presentado en nuestras pruebas, esto debido a pequeñas partículas duras sueltas que entraron en la interfase actuando como esmeriles. Las partículas duras pueden ser residuos metálicos atrapados por el rozamiento haciendo que aparezcan surcos a lo largo de las superficies de la muestra.

5.5.0. DESGASTE ADHESIVO

Este tipo de desgaste se presentó también en las pruebas con mayor carga en donde el desgaste por transferencia de material de una superficie a otra se puede observar en la fol. 4.09. A bajas cargas también se presentó este tipo de desgaste, pero menos severo que a mayores cargas.

5.6.0. REGIMENES DE DESGASTE

Por lo observado durante las pruebas, podemos decir que el desgaste se presentó en dos regímenes para las muestras que fueron templadas y revenidas además de las nitruradas como se muestra en la grafica 4.04. El primero de ellos, se trata de un régimen de desgaste no severo, que se presentó en todas las pruebas y en las diferentes cargas.

Este régimen presenta desprendimiento de capas de material formandose cavidades como se muestra en la fol. 4.11, también se presentó una pequeña franja oscura a lo largo del recorrido de las muestras sobre el disco, esta se ha reportado que esta constituida de óxidos y de fragmentos que provenían tanto de las muestras, como del disco de trabajo, esto se presentó de manera más frecuente en las muestras que solamente fueron sólo templadas y revenidas, en las que las curvas presentan una curva sin irregularidades ni escalafones. En donde este corresponde a un régimen no severo.

El segundo régimen corresponde a un régimen de desgaste severo (excepto para las muestras que tenían la película de TiN) después de someter las muestras a cargas superiores a los 5 Kg. en donde tanto las muestras nitruradas así como las que se templaron y revinieron, presentan una pendiente menor, debido a que entran a un estado estable en donde el factor de desgaste se incrementa en pocas ordenes de magnitud.

5.7.0. METALOGRAFIA

En general, es muy difícil el estudio metalográfico de las muestras así como de cualquier acero aleado que ha sido nitrurado a temperatura de 500 °C por ser de tamaño submicroscópico los nitruros que se forman en este proceso.

Después de haberse hecho el tratamiento de nitruración no se presentó la capa blanca que reportan algunos autores, así mismo la capa nitrurada presentaba una dispersión fina y homogénea de nitruros y carbonitruros en una matriz ferrítica. Los elementos como el cromo, molibdeno y hierro al combinarse con el nitrógeno son los que forman parte de los nitruros en la superficie de la muestra.

CAPITULO VI.
CONCLUSIONES

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

6.0.0. CONCLUSIONES

1. *En las muestras de acero que fueron nitruradas, no se presentó ninguna capa blanca bajo las condiciones de operación con las cuales se hizo el tratamiento. Se encontró, además que con el incremento del tiempo del tratamiento la capa nitrurada se incrementa y su comportamiento tiende a ser lineal, entre el rango de tiempos en los que se trabajó que comprendió de 2 a 8 horas de tratamiento. En este rango la dureza que presenta con los aceros sobre la superficie fue relativamente la misma.*

2. *En las pruebas de desgaste se observan mejoras en las muestras que fueron nitruradas con un mayor tiempo de tratamiento esto debido a que la capa nitrurada era mayor debido a la alta dureza superficial que presentaban.*

3. *Para el caso de las muestras que solamente habían sido templadas y revenidas a pesar de que presentan una dureza muy alta el factor de desgaste es mucho mayor que con las muestras nitruradas y con las que tenían la película de TiN.*

4. *Para las muestras que presentaron la película de nitruro de titanio se encontró que son más estables en condiciones más severas de operación como lo es en el desgaste, además de que el acero que se tiene como sustrato no sufren ningún debilitamiento. En este trabajo se observó que este tipo de tratamiento supera en forma congruente a los demás tratamientos.*

5. Como se pudo observar, los métodos a los que fue sometido nuestro acero presentan propiedades superiores a las convencionales como lo son el temple y revenido así como los tratamientos termoquímicos convencionales. Ahora bien el proceso que tiende a ser el más adecuado y que tiende a desplazar a muchos de los procesos convencionales es el de depósito de películas de TiN para el caso de aceros de alta velocidad, como lo es el acero M-2 este tipo de acero es el más utilizado, debido a sus propiedades, para la elaboración de herramientas.

6. Con los resultados presentados en este trabajo se pueden despejar algunas de las dudas que se tienen con respecto a este tipo de tratamiento ya que el problema de la aceptación de este tipo de películas radica en la confusión sobre las características relativas de las películas así como de la disponibilidad de las técnicas adecuadas. Por lo que no a tenido suficiente auge en la industria. Con este tipo de recubrimientos podemos ser capaces de elevar aún más la vida útil de un componente ingenieril que los demás métodos. por lo que este puede tener una gran aplicación en el recubrimiento de herramientas.

**CAPITULO VII.
BIBLIOGRAFIA**

7.0.0. BIBLIOGRAFIA

1.- A.D. SARKAR

WEAR OF METALS

PERGAMON PRESS: OXFORD 1976

2.- J. F. ARCHARD Y W. HIRST

THE WEAR OF METALS UNDER UNLUBRICATED CONDITIONS

PROC. ROY. SOC. A. VOLUME 236

3.- C.R. ARGANIS JUAREZ

PROPIEDADES AL DESGASTE DE UNA ALEACION ELECTROLITICA Pb-Cd

TESIS DE LICENCIATURA U.N.A.M. FACULTAD DE QUIMICA 1989

4.- B. S. NAU

CONTACT FRICTION AND WEAR

TRIBOLOGY INTERNATIONAL FEBRUARY 1978

5.- J. APRAIZ BARREIRO

ACEROS ESPECIALES Y OTRAS ALEACIONES

EDITORIAL DOSSAT S.A. MADRID 1982

6.- A. S. W. KURBY

*A STUDY ON THE NATURE OF THE COMPOUND LAYER FORMED DURING THE ION
NITRIDING OF Fe-40B STEEL*

MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 78 (1986) PAG. 95-78

- 7.- G. J. DIXON S.A. PLUMB, AND H.C. CHILD
*PROCESSING ASPECTS OF PLASMA NITRIDING
HEAT TREATMENT 1981 (CONFERENCE ORGANIZED BY THE HEAT TREATMENT
COMMITTEE OF THE METALS SOCIETY AS PART OF THE INTERNATIONAL
CONGRES ON METAL ENGINEERING).*
- 8.- JAMES D. ESTEFANI
*ION IMPLANTATION UPDATE
ADVANCED MATERIALS Y PROCESSES METAL PROGRESS 10 1988*
- 9.- WILLIAM J. SCHUMACHER
*ADHESIVE WEAR RESISTANCE OF ENGINEERING ALLOYS
METAL PROGRESS NOVEMBER 1988*
- 10.- HORST CZICHOS
*TRIBOLOGY: SCOPE AND FUTURE DIRECTIONS OF FRICTION AND WEAR
RESEARCH
JOURNAL OF METALS SEPTEMBER 1983*
- 11.- JOHN A. SCHEY
*MATERIAL ASPECTS OF FRICTION AND WEAR IN MANUFACTURING PROCESSES
JOURNAL OF METALS JANUARY 1980*

12. - T. S. EYRE AND D. WAYNARD

SURFACE ASPECTS OF UNLUBRICATED METAL-TO-METAL WEAR
WEAR-ELSEVIER SEQUOIA S.A. PRINTED IN THE NETHERLANDS

13. - PIRAN SIOGHANSI

IMPROVING THE PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS BY ION IMPLANTATION
JOURNAL OF METALS MARCH 1990

14. - F. H. STOTT AND G. C. WOOD

THE INFLUENCE OF OXIDES ON THE FRICTION AND WEAR OF ALLOYS
TRIBOLOGY INTERNATIONAL AUGUST 1978

15. - J. L. ALBARRAN GOMEZ

CINETICA DE PRECIPITACION DURANTE NITRURACION IONICA DEL ACERO H-12
TESIS DE MAESTRIA U.N.A.M. FACULTAD DE QUIMICA. 1992

16. - G. YOSHIMOTO AND T. TSUKIZOE

ON THE MECHANISM OF WEAR BETWEEN METAL SURFACES

17. - T. S. EYRE AND A. BAXTER

THE FORMATION OF WHITE LAYERS AT RUBBING SURFACES
METALS AND MATERIALS OCTOBER 1972

18. - JOSHUA SALLIK

NITRIDING STEELS WITH ION BEAMS
METAL PROGRESS MARCH 1985

19. - D. M. HULETT AND M. A. TAYLOR

*ION NITRIDING AND ION IMPLANTATION: A COMPARISON
METAL PROGRESS AUGUST 1985*

20. - B. DEGENHOFER

*PHYSICAL AND METALLURGICAL ASPECTS OF IONITRIDING
HEAT TREATMENT OF METALS 1974*

21. - P. C. JINDAL

*ION NITRIDING OF STEELS
J. VAC. SCI. TECHNOL VOL 15 No. 2 MARCH/APRIL 1978*

22. - A. PONCE RICO

*PREPARACION Y CARACTERIZACION DE PELICULAS DURAS POR MEDIO DEL
SISTEMA DE ESPURCEO REACTIVO MAGNETRON
TESIS DE LICENCIATURA MANCOMUNADA U.N.A.M. FACULTAD DE QUIMICA 1992*

23. - A. MATTHEWS

*TITANIUM NITRIDE P.V.D. COATING TECHNOLOGY
SURFACE ENGINEERING VOL 1 No. 2 1985*

24. - A. MATTHEWS

VAPOUR DEPOSITED WEAR RESISTANT COATINGS

25. - R. KRISHNAMURTHY

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, MADRAS INDIA 1987

26. - A. RAVEH G. KIMMEL

CHARACTERISTICS OF R.F. PLASMA NITRIDED TITANIUM ALLOYS
SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY VOL. 36 1988

27. - J. APRAIZ BARREIRO

TRATAMIENTO TERMICO DE LOS ACEROS
EDITORIAL DOSSAT 8 EDICION 1974

28. - B.S. BOKSHEIN

DIFUSION EN METALES
EDITORIAL MIR 1980

29. - BY JOSHUA SALIK

NITRIDING STEELS WITH ION BEAMS
METAL PROGRESS MARCH 1985