



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS  
TERMOQUIMICOS EN LAS PROPIEDADES  
ANTICORROSIVAS DEL ACERO 8620"

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

ELIAS ORTEGA AVALOS

México, D.F.

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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 según el tema:

Presidente	Prof. Enrique Villarreal Dominguez
Vocal	" Guillermo Salas Banuet
Secretario	" Bernardo F. Campillo Illanes
1er. Suplente	" Javier Avila Mendoza
2do. Suplente	" Juan Ganesca Llogueras

Sitio donde se desarrolló el tema:

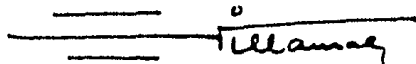
Laboratorios 4-F (Edif. A) y de Metalurgia (Edif. D) de la Facultad de Química U.N.A.M.

Sustentante:



Elias Ortega Avalos.

Asesor del Tema:



Ing. Enrique Villarreal Dominguez.

## CONTENIDO

### CAPITULO

- I.- Fundamentos electroquímicos de la Corrosión
  - A.- Definición e importancia de la corrosión.
  - B.- Condiciones físicas naturales del proceso - corrosivo.
  - C.- Aplicación de la Termodinámica al estudio de la corrosión.
  - D.- Diagramas pH - potencial.
  - E.- Cinética de la corrosión.
  - F.- Polarización sus causas e influencia.
  - G.- Condiciones que afectan la corrosión.
- I.- Métodos de prevención ó reducción de la corrosión.

### CAPITULO

- II.- Los Tratamientos Termoquímicos.
  - A.- Antecedentes.
  - B.- Mecanismo de los tratamientos termoquímicos.
  - C.- Variables que influyen en el mecanismo de los ---- tratamientos termoquímicos.
  - C.- Clasificación de los tratamientos termoquímicos.

### CAPITULO

- III.- Trabajo Experimental.
  - A.- Selección del material (acero) de trabajo.
  - B.- Análisis químico.
  - C.- Metalografía.
  - D.- Prueba de dureza.
  - E.- Determinación del potencial de equilibrio.

- F.- Selección y aplicación de los tratamientos termoquímicos.
- G.- Microdureza de las capas obtenidas termoquímicamente.
- H.- Ensayos de polarización potenciodinámicos para evaluar velocidades de corrosión.
- I.- Pruebas gravimétricas para determinar velocidades de corrosión.

CAPITULO IV.- Resultados.

Análisis de resultados,  
Conclusiones,  
Bibliografía.

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

Todos conocemos la importancia del hierro en el desarrollo ----- industrial, económico y tecnológico de un país. Sin este elemento sería --- casi imposible contar con la infraestructura necesaria para alcanzar el --- mencionado desarrollo. Por esta razón, anualmente se invierten millones de pesos para obtenerlo, primero en estado mineral y después reducirlo a su -- estado elemental.

Los materiales ferreos como el acero, debido a sus propiedades -- metálicas tiene mayor uso en ingeniería y en consecuencia soporta diversas condiciones atmosféricas; al interaccionar con el medio ambiente el mate--- rial sufre una alteración destructiva o deterioro por una reacción química o electroquímica, acarreando con este proceso la pérdida de sus propiedades metálicas y por consiguiente la pérdida total de las cualidades para resistir el trabajo para el que fue seleccionado. A este fenómeno se le llama -- " Corrosión ".

Uno de los problemas de la corrosión que ocasiona mayores pérdidas económicas, interrupción de servicios y además causa problemas de seguridad es el fenómeno de corrosión - erosión, este se presenta cuando el material se encuentra en un medio o ambiente corrosivo y cuando su superficie está - expuesta a una acción mecánica permanente. Hasta el momento las técnicas -- convencionales de protección o reducción de la corrosión no han logrado --- solucionar satisfactoriamente este problema.

Los tratamientos termoquímicos son empleados comúnmente para --- difundir elementos metálicos o no metálicos sobre la superficie de los --- materiales metálicos, provocando en estos una capa superficial interna de alta dureza y en consecuencia de mayor resistencia superficial, además se

## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS ELECTROQUIMICOS DE LA CORROSION

#### A.- Definición e importancia de la corrosión.

La corrosión se define de una manera general como el proceso -- característico de destrucción espontánea del metal por efectos de las reacciones químicas y/o electroquímicas entre este y su medio ambiente. (1)

Esta reacción se debe a que en contacto con diversos ambientes los metales regresan a su estado de menor energía que en la mayoría de los casos es tal y como se encuentran en su estado nativo. Los productos del proceso corrosivo son principalmente óxidos más o menos hidratados, carbonatos y sulfuros. Se denomina erosión, al caso particular en que los daños son causados por acciones mecánicas.

El proceso de la corrosión, no varía con los diversos metales y sus aleaciones, solamente se diferencian en el grado y en la clase, por lo que en general es posible y aceptado considerar el mecanismo de la --- corrosión sobre un sólo metal modelo. El mecanismo de la corrosión sobre el hierro ha sido el más estudiado y por lo tanto el que se toma como punto de partida en los estudios de corrosión.

Debido al carácter destructivo de la corrosión, se ha estimado que nuestro país pierde anualmente por este concepto 3.96 % del producto -- interno bruto, que en 1978 representaban 82800 millones de pesos, según --- cálculo del Dr. J. Zak (Institute Mekaniki Precikijne). (2)

Las pérdidas económicas las podemos clasificar de la siguiente forma:

menciona que también se logra aumentar la resistencia a la corrosión. -----  
Queda por estudiar el efecto de la corrosión en un material tratado termo--  
químicamente con el fin de saber si podría ayudar a resolver el problema de  
corrosión antes mencionado.

Consecuentemente, el presente trabajo experimental está enfo--  
cado a estudiar la corrosión en un acero tratado termoquímicamente y sin --  
tratamiento termoquímico. El proyecto consta de dos partes: en la primera -  
se presenta los fundamentos teóricos de la corrosión, sus mecanismos de ---  
reacción, algunos aspectos de la cinética de la corrosión, factores que ---  
pueden alterar el proceso corrosivo, se clasifica a la corrosión según la -  
forma en que esta se presenta en la naturaleza y se mencionan los métodos -  
de prevención de la corrosión. Finalmente se describen los tratamientos ---  
termoquímicos, los cuales son el objeto de este estudio.

En la segunda parte se presenta el trabajo experimental desa--  
rrollado con los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Determinar velocidades de corrosión en un acero tratado --  
termoquímicamente y sin tratamiento termoquímico.
- 2.- Obtener un material de alta dureza superficial.

Además se reportan los resultados, su análisis y conclusiones.



guiente forma:

a) Costos de operación y mantenimiento.

Incluyen los costos de reposición de equipo o estructuras corroídas ya sea total o parcialmente; también se agrupan en este inciso los costos de compra de materiales resistentes a la corrosión que deban adquirirse como sustitutos del acero al carbón, en donde las condiciones así lo requieran.

b) Costos por fallas de equipo.

En este inciso nos referimos a que frecuentemente las plantas tienen que realizar para imprevistos, ya sea en una pequeña parte de la misma o en su totalidad debido a la falta de algún equipo causada por corrosión

c) Riesgos y costos por contaminación de productos.

Si en alguna etapa del proceso de ciertos compuestos, este resulta contaminado por producto de una reacción de corrosión, los resultados pueden ser de graves consecuencias tanto para la salud como para la economía nacional.

### B.- Condiciones físicas naturales del proceso corrosivo.

Para que se lleve a cabo el proceso de corrosión, hay tres requerimientos básicos que deben estar presentes: (a) ánodos y cátodos deben estar presentes para formar celdas, (b) debe existir un flujo de corrientes y (c) debe existir un electrolito o fluido conductor de la corriente el cual es requerido para completar el circuito.

Los ánodos y cátodos pueden estar muy cerca formando celdas locales o pueden estar separados. La corriente puede ser autoinducida o puede ser impresa sobre el sistema desde una fuente exterior.

El ánodo es la superficie donde la corrosión ocurre y donde la corriente sale del metal hasta la solución. El cátodo es la superficie donde la corrosión no ocurre y donde la corriente entra al metal desde la solución. Anodos y cátodos pueden formarse sobre una sola pieza de metal debido a diferencias locales de potencial originados por heterogeneidades en su superficie.

En las áreas anódicas el metal pasa a la solución en forma de iones, efectuándose una reacción de oxidación, en la solución los iones se hidratan formando hidróxidos. Los electrones dejados en el metal al ocurrir la ionización, pasan a las áreas catódicas a través del mismo metal participando en una reacción de reducción que permite mantener el equilibrio de cargas. Una representación esquemática de esta situación, se presenta en la figura 1.

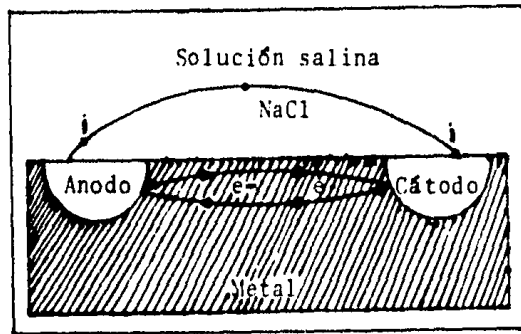
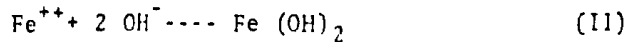
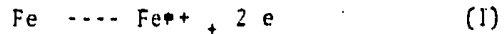


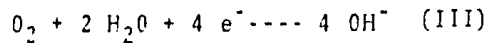
Figura 1.- Representación del proceso corrosivo.

Las reacciones de oxido-reducción que se efectúan en el caso del hierro serán las siguientes:

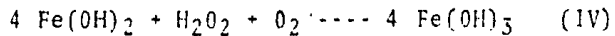
En áreas anódicas: oxidación



En áreas catódicas: Reducción



En solución:



Si dice que el proceso de corrosión está en equilibrio o en estado de "reposo", cuando la reacción de reducción es igual a la reacción de oxidación.

C.- Aplicación de la termodinámica al estudio de la corrosión.

El cambio de energía libre que resulta en una reacción química provee de la información necesaria para determinar la ---

fuerza impulsora de la reacción y la cantidad en la cual procede hasta agotarse, sin dar una indicación de la velocidad de reacción. La ecuación de Vant Hoff, que relaciona el cambio de energía libre  $\Delta G^\circ$  de una reacción con la constante de equilibrio es:

$$\Delta G^\circ = -mRT \ln k \quad (1)$$

en donde  $m$  es la fracción mol,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  la temperatura absoluta. La constante de equilibrio ( $K$ ), se define como la razón entre actividades ( $a$ ) de los productos y la de los reactivos.

El potencial eléctrico que hace que se produzca la reacción está relacionado con la energía libre por:

$$\Delta G = -nEF \quad (2)$$

donde  $n$  es el número de electrones transferidos,  $F$  es el Faraday (96,500 C/equiv.) y  $E$  es el potencial en volts. Esta ecuación es una expresión para calcular el trabajo producido por una reacción.

Cuando un metal se sumerge en una solución de sus propios iones, se establece una diferencia de potencial entre el metal y la solución, que está representada por la ecuación de Nerst:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{a_M^{+n}}{a_{M^\circ}} \right) \quad (3)$$

en donde  $E^\circ$  es el potencial estándar de electrodo, referido al de hidrógeno, cuyo valor es tomado como cero. Como evidentemente el potencial depende de la actividad de los iones y a una actividad unitaria  $E = E^\circ$ .

El potencial estándar de electrodo de un metal es un indicador de la actividad de sus iones. Un metal que tenga un valor muy negativo de  $E^\circ$ , tendrá un valor positivo grande de  $\Delta G^\circ$  para la reacción.

de reducción correspondiente, indicando así su no espontaneidad --  
 Los metales de este tipo forman iones metálicos muy estables, los  
 cuales no se pueden depositar en solución. Por el contrario, los -  
 metales que tienen un valor  $E^\circ$  positivo tendrán por tanto un valor  
 negativo de AG para la reducción del ion, se depositan muy fácil--  
 mente.

La ecuación (2) forma la base para los cálculos termodi-  
 namicos y es poco usada en la práctica, pues en su lugar se utili-  
 za una regla simple basada en ésta ecuación la cual permite deter-  
 minar la dirección de cualquier reacción electroquímica. esta re-  
 gla enuncia que: "Si cualquier reacción electroquímica es más ---  
 negativa, o tiene una media celda más activa que otra, ésta ten-  
 derá a oxidarse y la menos negativa ó media celda más noble ten-  
 derá a reducirse " .

Debe recalcar que no es posible predecir la velocidad  
 de una reacción a partir del cambio de energía libre, éste paráme-  
 tro refleja solamente la dirección de la reacción por su signo .

#### D.- Diagramas pH - potencial.

La reacción de oxidación de un metal está caracterizada  
 por un potencial, que depende del potencial estándar de la reacción  
 y de la concentración de los iones en la disolución para formar -  
 compuestos insolubles, como hidróxidos, óxidos, sulfuros, etc. u o---  
 tros tipos de compuestos, como iones complejos, por lo cual el po-  
 tencial de la reacción anódica depende también del producto de -  
 solubilidad y otros parámetros característicos de los compuestos  
 formados. Cuando en éstas reacciones intervienen directa ó -

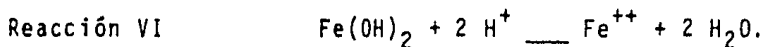
ta o indirectamente los iones del agua, el potencial además es ----- función del pH de la solución.

Como el potencial del proceso está relacionado con la ---- variación de la entalpía libre de la reacción, es posible hallar --- las condiciones termodinámicas de equilibrio del sistema en función del potencial y expresarlas en términos del pH. Las ecuaciones que especifican las condiciones de equilibrio se representan gráficamente en un diagrama pH - potencial. En estos diagramas, llamados también --- diagramas de Pourbaix, se indican regiones de estabilidad de los ----- metales y de sus compuestos oxigenados en función del potencial y --- pH, con lo que queda de manifiesto si determinadas reacciones en ---- medio acuoso son teóricamente posibles. Sin embargo, hay tener pre---- caución en usar los diagramas, pues en su confección no se tiene en -- cuenta las condiciones cinéticas de las reacciones.

A continuación se expone simplifícadamente el procedi----- miento para construir el diagrama de Pourbaix para el fierro:



Ecuación 4  $E = - 0.440 + 0.0295 \log a_{\text{Fe}^{++}}$



Ecuación 5 Se parte de las condiciones de e----  
(pH) equilibrio.

$$K = \frac{a_{\text{Fe}^{++}} \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}^2}{a_{\text{Fe}(\text{OH})_2} \cdot a_{\text{H}^+}^2}$$

$$a_{\text{Fe}(\text{OH})_2} \cdot a_{\text{H}^+}^2$$

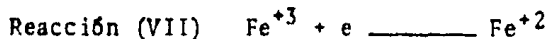
Donde se observa la relación entre  $a_{Fe^{+2}}$  y  $a_{H^+}$ , luego -  
tomando logaritmos:

$\log K + 2 \log a_{H^+} = \log a_{Fe^{+2}} + \log a_{H_2O}^2$  y como:

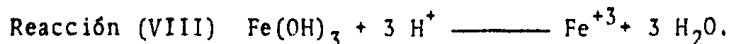
$$A^{\#} = \frac{a_{H_2O}^2}{a_{Fe(OH)_2}} \log K + 2 \text{ pH} = \log a_{Fe^{+2}} + \log A^{\#}$$

$\log a_{Fe^{+2}} = \log K - \log A^{\#} - 2 \text{ pH}$ . entonces,

$$\log a_{Fe^{+2}} = 13.23 - 2 \text{ pH}.$$

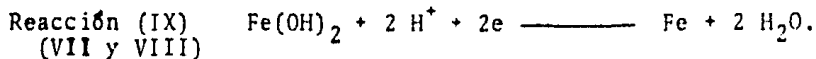


Ecuación (6)  $E = 0.771 + 0.0591 \log \frac{a_{Fe^{+3}}}{a_{Fe^{+2}}}$



Ecuación (7) Siguiendo el mismo procedimiento empleado para -  
obtener la Ec. 5, se llega a:

$$\log a_{Fe^{+3}} = 4.62 - 3 \text{ pH}.$$

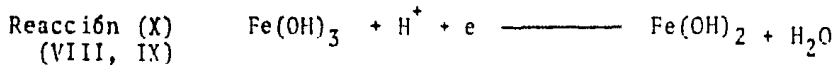


Ecuación (8) Combinando las ecuaciones 8 y 9

$$E = - 0.440 + 0.0295 (13.23 - 2 \text{ pH})$$

o sea:

$$E = - .0494 + 0.0591 \text{ pH}.$$

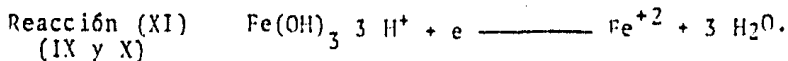


Ecuación (9) Combinando las ecuaciones 4, 5

$$E = 0.771 + 0.0591 (4.62 - 3 \text{ pH} - 13.23 + 2 \text{ pH})$$

y en consecuencia,

$$E = 0.261 - 0.0591 \text{ pH}.$$



Ecuación (10) Combinando las ecuaciones 9 y 10, resulta:

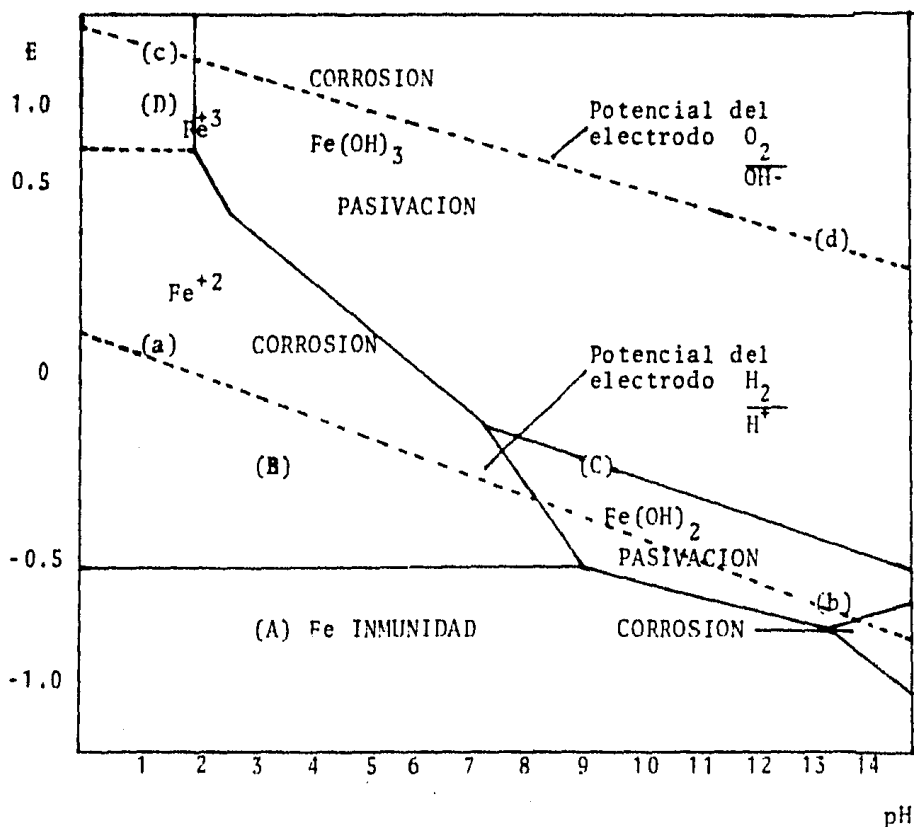
$$E = 0.771 + 0.0591 \log a_{\text{Fe}^{+3}} - 0.0591 \log a_{\text{Fe}^{+2}}$$

O sea:

$$E = 1.004 - 0.177 \text{ pH} - 0.0591 \log_{\text{Fe}^{+2}}$$

Ahora bien, una vez analizadas las reacciones anteriores se puede construir el diagrama potencial-pH para el Fe. Es claro que el diagrama no estará completo sino en la medida que incluya mayor número de reacciones, sin embargo, en este caso se trata so lo de un ejemplo. Sólo se trazaron las líneas correspondientes a actividades unitarias. Ver figura 2.

Fig. I-2 Diagrama E - pH, para el sistema Fe - H<sub>2</sub>O a 25 °C.





### Interpretación del diagrama.

Desde el punto de vista electroquímico, los diagramas ----- de Pourbaix son especialmente útiles, sobre todo en análisis y la predicción de fenómenos de corrosión metálica.

Por ejemplo, el punto (A), corresponde a las condiciones de interfase Fe-solución, en las que, por tratarse de un pH=1 y un -- potencial de -0.5 volts, no hay posibilidad de oxidación para el Fe. Si a partir de estas condiciones, se pasa al punto (B) de igual pH, pero de un potencial de 0.1 volts, se caería en la zona de formación del ion ferroso, lo que significa que en tales condiciones, el Fe -- metálico se haya en equilibrio con el  $Fe^{+2}$ , como consecuencia de la oxidación. Si en el mismo sentido, cambian las características del potencial hasta adquirir valores cercanos a 1 volts., la oxidación del metal llegara hasta los iones  $Fe^{+3}$ , punto (D), zona de corrosión

Por otra parte, en el punto (C), por ejemplo, con un poten- cial semejante al de (A), pero con un pH cercano a 11, representa -- una región de equilibrio Fe -  $Fe(OH)_2$  de la interfase, zona de pasi- vación

La evolución del hidrógeno es posible solo por debajo de la línea (ab), y solo por arriba de la línea (cd) es posible la evolu- ción del oxígeno. Es importante hacer notar que en éstos diagramas --- la electrolisis del agua no puede ocurrir a menos que exista una ---- diferencia de potencial de 1.2 volts., entre electrodos. En estos --- diagramas de pH- E para el fierro. (3)

### E.- Cinética de la corrosión.

La extensión de una reacción de electrodo se puede establecer a partir de la carga transferida . Las leyes de Faraday dan la equivalencia cuantitativa entre la cantidad de masa transformada y la carga que ha pasado a través de la interfase. Si en el curso de un proceso circula una corriente  $I$  durante un tiempo  $t$  , la carga transferida es  $It$  , y la relación  $It/nF$  representa el número de moles transformados durante el tiempo considerado .

De éste modo, la extensión de la reacción viene relacionada con la corriente eléctrica que circula por el electrodo. La corriente implicada en una reacción de electrodo se llama corriente Farádica para diferenciarla de la corriente no Farádica correspondiente a la carga ó descarga de la doble capa electroquímica.

La velocidad de reacción de electrodo se puede definir en términos del número de moles de especies electroactivas transformadas por unidad de tiempo. Como la cantidad de sustancia transformada en el electrodo es proporcional a la carga transferida , resulta que la velocidad de reacción es proporcional a la corriente.

Así, se puede escribir:

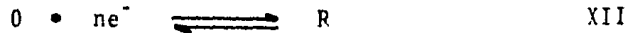
$$\text{velocidad} = \frac{I}{nF}$$

de acuerdo con las leyes de Faraday.

Puesto que las reacciones de electrodo tienen lugar en la interfase metal-disolución, su velocidad depende del área de la interfase, y en consecuencia, se refiere a la unidad de superficie y se expresa en función de la densidad de corriente,  $J$ , esto es , la corriente por unidad de área de la superficie del e-

electrodo.

Si consideramos la siguiente reacción:



y si la reacción se produce simultáneamente directa e inversamente, entonces la densidad de corriente total es igual a la diferencia de las densidades de corriente de las dos reacciones:

$$J = J_c - J_a \quad 12$$

donde, por convenio, la densidad de corriente de reducción, o densidad de corriente catódica, se toma como positiva y la densidad de corriente de oxidación, o densidad de corriente anódica, se toma como negativa. Así, considerando que la densidad de corriente, y por tanto, la velocidad de reacción, es una función de la contribución no eléctrica de la energía de activación, del factor de simetría, del potencial - del plano de Helmholtz externo y del potencial del metal. Se obtiene: (ver referencias... para su desarrollo) (4)

$$J = nF \frac{KT}{h} a_o \exp \left( - \frac{(\Delta G_{fed})n}{RT} \right) \left( \frac{(n-z)F\phi/2}{RT} \right) \left( - \frac{nF\phi^M}{RT} \right) - nF \frac{KT}{h} a_R \exp \left( - \frac{(\Delta G_{ox})n}{RT} \right) \left( \frac{(n-z)F\phi/2}{RT} \right) \left( \frac{(1-\beta)nF\phi^M}{RT} \right) \quad 13$$

La densidad de corriente total será catódica o anódica según las magnitudes de las contribuciones de corriente de las respectivas reacciones.

En condiciones de equilibrio, las densidades de corriente catódica y anódica son iguales y la densidad de corriente total es cero, es decir,

$$J_c = J_a = J_o \quad 14$$

donde  $J_o$  es la densidad de corriente de canje, que representa el

valor común de las densidades de corriente parciales catódica y anódica cuando la reacción está en equilibrio. La corriente de canje describe la cinética del sistema en equilibrio, en cuanto mide la velocidad de transferencia de carga de la forma oxidada y de la forma reducida cuando no hay paso de corriente neta en la interfase.

De acuerdo con la ecuación 13, la corriente de canje es función del potencial del plano de Helmholtz y por tanto depende del potencial del electrodo. Si se elimina el término en  $\phi_2$ , se puede escribir:

$$n F \frac{KT}{h} a_o \exp \left( - \frac{(\Delta G_{red}^{o'})}{RT} n \right) \left( - \frac{n F \phi^M}{RT} \right) \quad 15$$

que sólo es función de la contribución no eléctrica de la energía de activación y del potencial del metal, y corresponde a la corriente de canje cuando  $\phi_2$  es cero, esto es, excluido el efecto de la doble capa electroquímica.

La sobretensión definida como la diferencia entre el potencial del electrodo y el potencial de equilibrio, toma la forma

$$\begin{aligned} \eta &= E - E_e \\ &= \phi^M - \phi_e^M \end{aligned} \quad 16$$

y, como corresponde a la reacción de transferencia de carga, se denomina sobretensión de transferencia de carga. Al introducir la sobretensión en la ecuación 13, teniendo en cuenta la definición de la densidad de corriente de canje, resulta que la densidad de corriente total viene expresada por:

$$J = J_o \exp \left( - \frac{n F \eta}{RT} \right) - \exp \left( \frac{(1 - \beta) n F \eta}{RT} \right) \quad 17$$

Esta relación se conoce como ecuación de Butler-Volmer, y constituye la ecuación fundamental de la cinética electroquímica. De

acuerdo con la ecuación resulta que la velocidad de transferencia de carga, esto es, el paso de corriente a través de la interfase, está gobernada por la sobretensión.

Cuando la sobretensión de una reacción electroquímica es pequeña, inferior a unos 10 mV,  $\frac{nF\eta}{RT} \ll nF \delta / \frac{nF\eta}{RT/(1-\beta)}$  nF, y al desarrollar en serie la ecuación 17 se puede despreciar los términos a partir del segundo, con lo que se obtiene la ecuación linealizada:

$$J = - J_0 \frac{n F \eta}{RT} \quad 18$$

En consecuencia, bajo las condiciones indicadas, la densidad de corriente total es directamente proporcional a la corriente de canje y a la sobretensión. Como la densidad de corriente de canje tiene un valor determinado, esta expresión tiene la forma de la ley de Ohm y permite definir la llamada resistencia de transferencia de carga mediante la relación

$$\left( \frac{\eta}{J} \right)_{J=0} = - \frac{RT}{n F J_0} \quad 19$$

La resistencia de transferencia de carga es independiente del factor de simetría y está relacionada con la corriente de canje.

Para sobretensiones muy grandes, superiores a 100 mV,  $\frac{nF\eta}{RT} \gg nF \delta / \frac{nF\eta}{RT/(1-\beta)}$  nF, y al desarrollar en serie la ecuación 17 se puede despreciar los términos a partir del segundo, con lo que se tiene la ecuación linealizada:

$$\begin{aligned} J &= + J_0 \\ &= J_0 \exp \left( - \frac{nF\eta}{RT} \right) \end{aligned} \quad 20a$$

$$\begin{aligned} J &= J_a \\ &= J_a \exp \left( \frac{(1-\beta)nF\eta}{RT} \right) \end{aligned} \quad 20_b$$

para las reacciones catódicas y anódicas, respectivamente. Esto equivale a suponer que a sobretensiones catódicas altas, muy negativas, la reacción anódica afecta poco a la corriente, mientras que a sobretensiones anódicas altas, muy positivas, es la reacción catódica la que tiene poco efecto. Tomando logaritmos y operando, estas dos ecuaciones se transforman en:

$$\eta = \frac{2,303 RT}{nF} \log J_0 - \frac{2,303 RT}{nF} \log J \quad 21_a$$

$$\eta = \frac{2,303 RT}{(1-\beta) nF} \log J_0 + \frac{2,303 RT}{(1-\beta) nF} \log J \quad 21_b$$

respectivamente. En general, se puede escribir:

$$\eta = a \pm b \log J$$

cuya expresión constituye la ecuación de Tafel, originalmente establecida de forma empírica, donde el signo más correspondiente a la reacción anódica y el signo menos a la reacción catódica. La ecuación de Tafel pone de manifiesto que a sobretensiones altas - existe una relación lineal entre la sobretensión y el logaritmo - de la corriente.

G.- Polarización sus causas e influencia.

Al estudiar la velocidad de las reacciones de electrodo se observa que el valor de dicha velocidad depende del potencial aplicado al electrodo. Este fenómeno se puede interpretar teniendo en cuenta que el paso real de corriente a través de la interfase se desplaza al electrodo de su condición de equilibrio. Se dice que se ha producido la polarización del electrodo. La polarización recoge el conjunto de efectos originados por el paso de corriente, que hacen que el potencial del electrodo sea distinto de su valor de equilibrio. La variación de la polarización del electrodo se conoce como despolarización, y la especie responsable de esta variación se llama despolarizador.

Si el electrodo mantiene su polarización, es decir, que no tienen lugar cambios de potencial con el paso de corriente, se habla de un electrodo no-polarizable. En cambio, se tiene un electrodo polarizable cuando un aumento del potencial aplicado no origina paso de corriente aplicable. En la figura 3 está representado el equivalente eléctrico de un electrodo. Cuando el electrodo se comporta como si la resistencia fuera cero, no tienen lugar variaciones de potencial con el paso de corriente, y se tiene un electrodo no-polarizable. Pero si la resistencia es muy grande no hay casi paso de corriente faradica y el potencial toma un valor determinado, con lo que se tiene un electrodo polarizable.

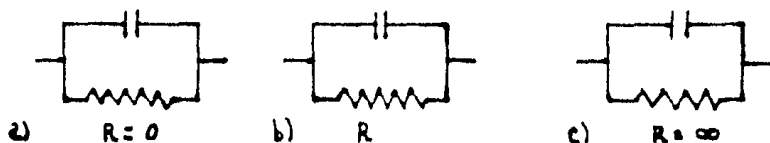


Fig. 3 Representación del equivalente eléctrico del electrodo: a) electrodo no-polarizable ideal; b) electrodo parcialmente polarizable (caso real), y c) electrodo polarizable ideal.

La polarización dá cuenta de la diferencia entre el potencial del electrodo y el potencial del mismo en condiciones de equilibrio. El potencial del electrodo y la polarización son función de la densidad de corriente, de modo que, en ausencia de corriente, toman los valores del potencial de equilibrio y cero, -- respectivamente. Una medida de la polarización es el parámetro de sobrepotencial o sobretensión, el cual ya fué definido anteriormente. El sobrepotencial aparece como consecuencia de los fenómenos de polarización, y es debido a la baja velocidad de alguna de las etapas de la reacción de electrodo, que conduce a un retraso del proceso global, y el potencial se aparta de su valor de equilibrio. Esta etapa lenta controla la reacción de electrodo y constituye la etapa determinante de la velocidad de reacción. La etapa determinante de la velocidad, es la responsable de la polarización, y de ella depende la sobretensión. Así, si el proceso total viene retrasado por la etapa de transferencia de carga, se tiene una sobretensión de carga. La variación de la concentración de especie electroactiva junto al electrodo respecto a su valor en el seno de la disolución origina un transporte de materia que puede constituir la etapa lenta del proceso y dar lugar a una sobretensión de difusión. Cuando existe una reacción química acoplada a la reacción electródica y que retrasa el proceso, de modo que su velocidad viene controlada por la reacción química, se origina una sobretensión de reacción. Las sobretensiones de difusión y reacción, a veces, se tratan juntas, y se habla de sobretensión de concentración, pues ambas están relacionadas con la -- concentración en la interfase. Si en el proceso hay una etapa de formación de una nueva fase puede conducir a una sobretensión de



fase, llamada sobretensión de cristalización. Por último, cabe -  
considerar que la resistencia de la disolución origina, durante -  
el paso de corriente, una caída ohmica de potencial, que puede --  
dar lugar a una sobretensión de resistencia, la cual suele presen-  
tarse cuando existe una capa poco conductora entre el metal del e  
lectrodo y la disolución. (5)

G.- Condiciones que afectan la corrosión.

A parte del efecto del pH, potencial y del fenómeno de polarización. Existen algunas condiciones que favorecen la corrosión y otras que la inhiben, siendo más frecuentes las primeras. A continuación se mencionan algunas de ellas.

Diferencia en la concentración de oxígeno: en la superficie de un metal se pueden desarrollar diferencias de potencial de solución, por la diferencia de concentración de oxígeno. El metal en contacto con la solución de menor contenido de oxígeno tiende a corroerse o disolverse más que el de contacto con la solución de mayor contenido de oxígeno.

Oxígeno y agentes oxidantes: el oxígeno y los agentes oxidantes afectan la velocidad de corrosión de los metales, de dos maneras:

- 1o.- Incrementan la velocidad de ataque por su acción despolarizante.
- 2o.- Disminuyen la corrosión; los agentes oxidantes que forman películas protectoras en la superficie del metal.

Temperatura: los efectos de la temperatura en los procesos de corrosión son complejos, debido a que se producen efectos que pueden influenciar la corrosión de manera distinta. Como regla general, se sabe que en toda reacción química, la velocidad de esta aumenta a medida que se eleva la temperatura, esto es cierto también para efectos químicos de corrosión.

En cambio, la solubilidad de un gas en líquidos disminuye con el aumento de temperatura, esta disminución de solubilidad reduce la velocidad de corrosión, donde participen oxígeno y o---

tros gases oxidantes en la reacción, pero la velocidad aumenta en las reacciones en que se genera hidrógeno.

Velocidades de flujo: el incremento de flujo de un líquido corrosivo sobre la superficie de un metal, en general aumenta la velocidad de corrosión ya sea evitando la formación de películas o reduciéndolas, o por arrastrar los productos de la corrosión. Acciones todas ellas despolarizantes. Las velocidades no uniformes sobre la superficie de un metal, pueden dar lugar a celdas galvánicas debido a diferencias de concentración o de ciertas iones en el medio corrosivo.

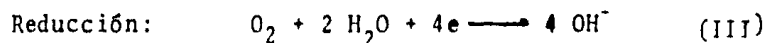
Estructura granular y tensiones: existe el tipo de ataque intercrystalino que afecta las aleaciones de metales. En circunstancias apropiadas los metales puros están afectados por este tipo de ataque, formando celdas galvánicas en presencia de un agente corrosivo. La acción anódica, generalmente principia atacando los bordes de los granos, desarrollando una diferencia de potencial entre; los granos que estén separados por cavidades o impurezas (formadas por el enfriamiento de piezas de aleación obtenidas a partir de moldeo por fundición), entre los granos de metal base y los de su aleación, entre granos que por efectos de laminación, estirado, etc., hayan absorbido diferentes cantidades de energía.

Las tensiones producidas por fuerzas (internas o aplicadas externamente) que actúan sobre piezas metálicas agrandan las cavidades permitiendo se intensifique el flujo de electrones y por lo tanto la acción corrosiva es acelerada.

Influencia de las sales disueltas: el mecanismo que sigue cualquier reacción de corrosión en las condiciones más genera

les fué expresado anteriormente. Sin embargo, en condiciones más específicas el mecanismo tiene ligeras variantes, que pueden hacer el proceso más agresivo como es el caso de la corrosión en presencia de sales.

Para ilustrar el mecanismo, consideremos una pieza de metal que presenta en su superficie pequeñas hendiduras, introducida en una solución salina con  $\text{pH}=7$ . Inicialmente las reacciones observadas, corresponden a la disolución del metal y a la reducción del oxígeno para dar origen a los iones oxidrilos, conforme a las reacciones:

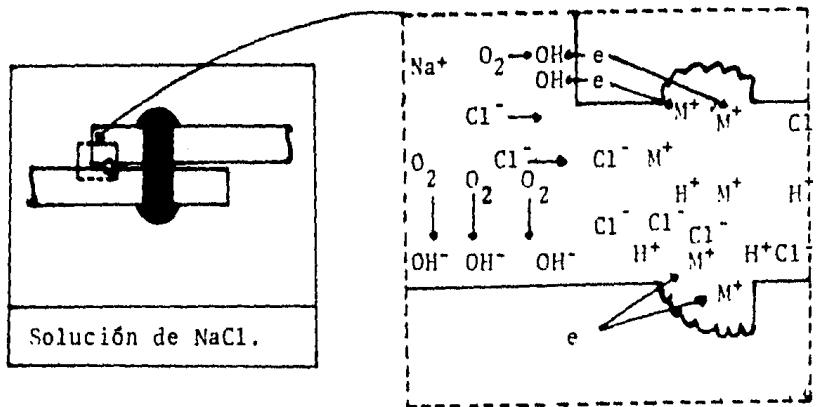


En un principio estas reacciones ocurren uniformemente sobre la superficie incluyendo el interior de las hendiduras. Cada electrón producido durante la formación de un ion metálico es consumido inmediatamente por la reacción de reducción del oxígeno manteniendo de tal forma el equilibrio de cargas en la solución y el metal. Esta secuencia continúa hasta que el oxígeno se agota dentro de la hendidura en forma tal que la reducción dentro de ella cesa. Este hecho por si solo no causa ningún cambio en el proceso ya que el espacio dentro de la hendidura es muy pequeño comparandolo con el área total y la velocidad de reducción oxígeno permanece casi constante.

Los efectos de agotamiento del oxígeno se observan en forma indirecta. Después de que éste se ha agotado no ocurre ninguna reacción de reducción dentro de la hendidura. Sin embargo, la disolución del metal continúa, la cual tiende a producir un exceso de cargas positivas  $M^+$ , que son balanceadas por la migración

de iones cloro hacia dentro de la hendidura. La consecuencia de la migración es un incremento en la concentración del cloruro en esa zona.

Los iones cloro están presentes en la hendidura como resultado de la migración, provocando un proceso corrosivo más acelerado. La figura 4 muestra un ejemplo típico de la presencia de los iones  $\text{Cl}^-$ , en la evolución del proceso corrosivo.



a) Rendida entre dos placas metálicas unidas por remachado.

b) Vista ampliada de la rendija, donde se indica la acumulación de iones  $\text{Cl}^-$ .

Fig. I-4 Esquema de la naturaleza de la corrosión en hendiduras, en las que interviene el agotamiento de oxígeno en la solución corrosiva.

## H.- Clasificación de la corrosión.

Basicamente se distinguen la corrosión química y la electroquímica, la primera se presenta durante la acción, a grandes temperaturas, de diferentes sustancias (líquidos no electrolitos y gases) sobre los metales, y tiene gran importancia en todas las esferas de la actividad humana.

La corrosión electroquímica; surge al poner en contacto metales o aleaciones de metales con un líquido conductor de la corriente, por ejemplo, agua del suelo, agua de calderas de vapor y particularmente con diferentes medios reaccionantes en la industria química. Este tipo de corrosión se caracteriza por el surgimiento de corrientes eléctricas entre partes distintas del metal a consecuencia de reacciones electroquímicas en diferentes partes de la superficie de contacto del metal con el electrolito.

Pero debido a que la corrosión ocurre en muchas y variadas formas, su clasificación se basa en los siguientes factores(6)

### a) Naturaleza de la sustancia corrosiva.

La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Para la primera se requiere un líquido o humedad, mientras que para la segunda las reacciones se desarrollan con gases a altas presiones.

### b) Apariencia del metal corroído.

Dependiendo de la apariencia que presente un metal, la corrosión puede ser:

- 1.- Corrosión uniforme.
- 2.- Corrosión localizada.

La corrosión uniforme: es la forma de corrosión más co

mún, y está caracterizada por la acción electroquímica que ocurre uniformemente sobre la superficie completa o sobre un área amplia. Puede ser húmeda o seca y dependiendo de esto, serán los métodos de protección. Para grandes superficies, lo más común, es utilizar pinturas anticorrosivas.

La corrosión localizada: se presenta en zonas específicas de la superficie de un metal. Este tipo de corrosión ocurre por diferentes fenómenos. Para comprender mejor la corrosión la subdividiremos en:

Corrosión localizada macroscópica:

- corrosión galvánica,
- corrosión por hendidura,
- corrosión por picadura,
- corrosión por exfoliación,
- corrosión-tensión,
- corrosión-erosión.

Corrosión localizada microscópica:

- corrosión intergranular,
- corrosión por fractura.

#### I.- Métodos de prevención o reducción de la corrosión.

En la actualidad se emplea una gran variedad de métodos para lograr la reducción de la corrosión. La elección del método más apropiado depende de las condiciones del medio. Entre algunos de los métodos más empleados tenemos los siguientes:

- a) Protección catódica: es un método eléctrico de prevención contra la corrosión. Este método o técnica de protección, se aplica con corriente impresa o con

ánodos de sacrificio a la estructura que se desea -- proteger.

- b) Selección de combinaciones metálicas colocadas lo -- más cercanamente posible en las series galvánicas.
- c) Aplicación de recubrimientos protectores. (metálicos y no metálicos). Aquí también se incluyen las tecnicas de inmersión en caliente, metálización por rosiado, chapeado, electroforesis y depósito en vacio.
- d) Adición de inhibidores para reducir la agresividad - del medio.
- e) Diseño de parte anódicas reemplazables.

En la práctica, estos métodos pueden emplearse indivi-- dualmente o bien combinarse para lograr un mejor control de la corrosión. (7)



CAPITULO IILOS TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOSA.- Antecedentes.

Es conocido que con el continuo avance de la industria, se exige cada vez más, piezas con mejores características mecánicas y en ocasiones con propiedades mecánicas contrapuestas dadas las condiciones reales de servicio.

En general, excelentes condiciones de rozamiento exigen una elevada dureza y resistencia en la superficie de la pieza, lo que indudablemente, puede lograrse con aceros altos en carbono -- templados y revenidos a bajas temperaturas. Si se requiere una gran resistencia al impacto, por ejemplo, bastará elegir un acero bajo en carbon templado y revenido a la más alta temperatura posible a fin de obtener la máxima tenacidad. Cuando, por último, -- las condiciones de servicio someten al material a rozamiento asociado con esfuerzos dinámicos, tal es el caso de los engranes, el problema presenta difícil solución mediante los tratamientos clásicos de temple y revenido, ya que el ideal será lograr una gran dureza superficial junto a un núcleo de elevada tenacidad. Sin embargo, son dos los caminos posibles para solucionar este problema:

- 1.- Por heterogeneidad en las condiciones del tratamiento térmico, base de los tratamientos superficiales.
- 2.- Por heterogeneidad en la composición química del acero, base de los tratamientos termoquímicos y que recibe distintos nombres, según la naturaleza del -

elemento o elementos que se difunde en el acero. Esta adición, no suele ser suficiente ya que ha de ser complementada con otros tratamientos térmicos, a fin de obtener las características deseadas.

Un tratamiento termoquímico: se define como un proceso que comprende uno o más ciclos térmicos aplicados a un metal o a una aleación en estado sólido, mediante el cual se modifica la composición y las propiedades iniciales de la superficie, químicas y físicas, debido a un proceso de difusión. (8)

#### B.- Mecanismo de los tratamientos termoquímicos.

Como antes mencionamos un tratamiento termoquímico implica, básicamente un mecanismo de transporte másico a nivel atómico. Este mecanismo de transporte se conoce como difusión y es indispensable conocer para el estudio de los tratamientos termoquímicos.

Las leyes básicas para el estudio de la difusión fueron investigadas en 1885, por Fick. Considerando la difusión de manera análoga a un fenómeno de flujo de calor, Fick, obtuvo una expresión para el caso en que existe transferencia de masa de un elemento a través de una membrana, de tal forma que resulte un gradiente de concentración constante a través de la membrana. La expresión analítica que se concluye del estudio hecho por Fick, se conoce con la primera ley de Fick y es la siguiente:

$$J = - D \frac{DC}{DX}$$

17

donde J es el cambio de flujo de masa por unidad de área en la dirección perpendicular a la membrana, C es la concentración y X es

la distancia. La constante de proporcionalidad  $D$  es el coeficiente de difusión o difusividad y está dado en  $\text{Cm}^2 \cdot \text{seg}^{-1}$ . La constante de difusión depende de la temperatura, naturaleza y estructura del sistema. Además, varía con la concentración. La primera ley de Fick es válida para un flujo uniforme y cuando no lo es (como en la mayoría de los casos prácticos) la ley de Fick tiene que ser modificada y dicha modificación da paso a la segunda ley de Fick.

La segunda ley de Fick toma en cuenta el estado no uniforme de la difusión y para ser establecida se consideran dos placas paralelas, de áreas  $S$ , separadas una distancia  $dx$ , ver figura 5. Entonces  $J_1$  y  $J_2$  son los flujos por unidad de área a través del primero y del segundo plano respectivamente.

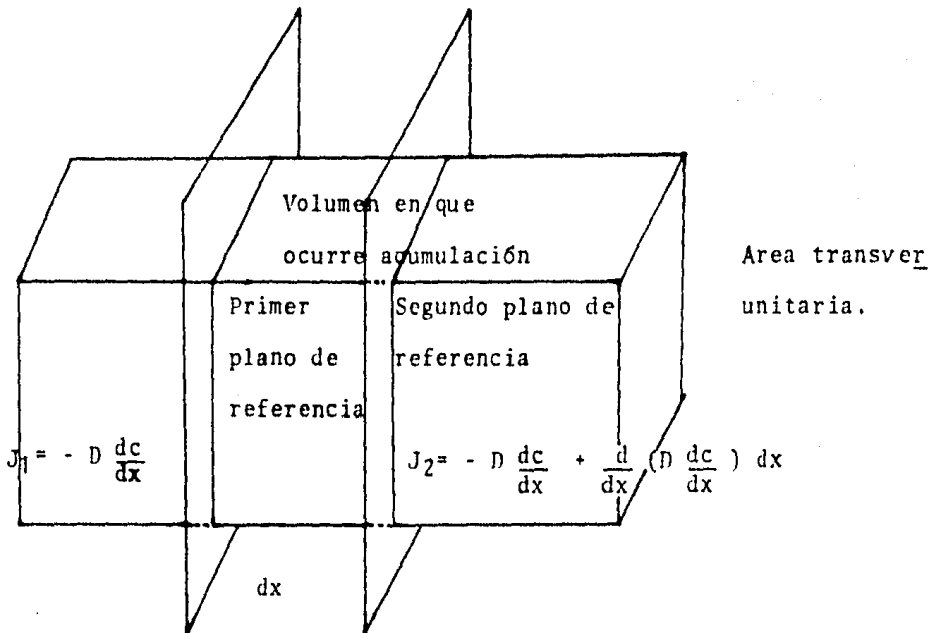


Figura 5.- Esquema que ilustra la deducción de la segunda ley de Fick.

Tomando las expresiones correspondientes de la primera ley de Fick, para cada placa y tomando en cuenta el volumen  $Sdx$ , tenemos; la cantidad de material,  $dm$ , que se acumula en el elemento de volumen por segundo es la diferencia:

$$dm = J_1 - J_2 = -\frac{dj_1}{dx} dx = + \frac{d}{dx} \left( D \frac{dc}{dx} \right) dx$$

Conforme a la práctica usual en matemáticas, se empleará el símbolo  $\partial$  para indicar derivada parcial, como  $\partial c / \partial t$ . El cambio total  $dc$  en la concentración es ahora la suma del cambio en el tiempo y con la distancia:

$$dc = \frac{\partial c}{\partial t} dt + \frac{\partial c}{\partial x} dx$$

Aunque el coeficiente de difusión varía con la concentración,  $D$  en muchos casos puede considerarse constante, lo que permite una versión más simple:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left( D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) \quad (18)$$

El avance tecnológico ha hecho que los científicos se preocupen por interpretar en una forma analítica los fenómenos que se observan en la práctica, p.e., en el caso de carburación, que es un tratamiento termoquímico, el trabajo analítico sobre la difusión con la herramienta de las leyes de Fick nos lleva a una expresión bastante concisa:

$$\frac{C - C_s}{C_2 - C_s} = \text{erf} \frac{x}{2 \sqrt{(D t)}} \quad (19)$$

donde  $C_s$  representa el porcentaje del elemento, que difunde, de los alrededores hacia la pieza; la concentración de carbono en la pieza está representada por  $C_2$ , y  $C$  es la cantidad de carbono en la pieza después de un tiempo  $t$ , suponiendo que sabemos constante

el coeficiente de difusión  $D$  del elemento, en este caso, carbono.

Esta ecuación-solución es conocida como la solución de Grube, se aplica para el caso en el cual se desea evaluar la constante de difusión, no siendo una función de la concentración. Para el caso en el cual  $D$  es una función de la concentración la solución de Grube se aplica únicamente cuando la concentración de ambos componentes es semejante.

Otro método para el cálculo de la constante de difusión, es el conocido como la técnica de Boltzmann-Matano, que únicamente requiere de la condición de que la concentración en ambas bases de cada lado de la interfase sea independiente del parámetro tiempo.

El mecanismo de difusión puede llevarse acabo por sustitución o por difusión intersticial. La difusión sustitucional puede ser por intercambio atómico, por fallas intersticiales o por el mecanismo de vacancias. La difusión intersticial, se presenta cuando en la estructura cristalina existen o se presentan espacios muy grandes, entonces el átomo ocupa ese lugar.

Hasta aquí se ha dado por hecho que la movilidad de los dos elementos en la interfase es igual. Sin embargo, para una mezcla de átomos, el coeficiente de difusión de cada uno de ellos en el otro es diferente y en consecuencia tenemos que si dos especies de átomos diferentes se están moviendo en la zona de difusión con direcciones opuestas, entonces la razón de cambio total o transporte neto resulta mayor en una de las dos direcciones. Esta dirección marca al elemento de mayor movilidad. El fenómeno fué estudiado por el científico Kirkendall, por primera vez en el año de 1942, para el caso relativo al flujo de átomos en la inter

fase Zn-Cu.

El efecto Kirkendall, se estudio de manera cuantitativa a partir de 1947, y se dedujo de los experimentos realizados que es posible relacionar el desplazamiento de la interfase original con el tiempo, resultando dicha relación de la siguiente manera: el desplazamiento de la interfase es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Esta relación se considera ligada al mecanismo de difusión.

C.- Variables que influyen en el mecanismo de los tratamientos termoquímicos.

El coeficiente de difusión  $D$ , no es normalmente constante. Corrientemente,  $D$  es una función que depende de muchas variables, tales como la temperatura, la concentración y la estructura cristalina. En un caso determinado, se supone que todas estas variables tienen valores específicos y el coeficiente de difusión es entonces, un número definido. Sin embargo, al llegar a este número es preciso, frecuentemente considerar los efectos individuales de una o más de estas variables.

Temperatura: la regla empírica, por la que se sabe que la constante de difusión duplica su valor por cada 20 °C de aumento de temperatura, nos da idea de la enorme influencia que ésta ejerce sobre la difusión. Más exactamente, la constante de difusión está relacionada con la temperatura absoluta por la ecuación:

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

en donde  $D_0$ ,  $Q$  y  $R$  son independientes de la temperatura. Cuando la energía de activación  $Q$  está expresada en calorías por gramo mol, la constante de los gases  $R$  tiene un valor de 1.987 cal.mol

por grado kelvin. El factor de frecuencia  $D_0$  está relacionado -- con la frecuencia de vibración de los átomos que se difunden, --- mientras  $Q$  representa la medida de la barrera de energía que tiene de a impedir que se produzca la difusión.

En la tabla 1, se dan los valores de  $D_0$  y  $Q$  para determinar el coeficiente de difusión en varios sistemas binarios.

Tabla I-1 Valores aproximados de  $D_0$  y  $Q$  para varios sistemas temas de difusión.

Metal Difundido	Metal Matriz	$D_0, \frac{m}{seg} 10^{-5}$	$Q, \frac{cal.}{gr-mol.}$	Tem. °C
Carbono	Hierro	0.20	33.8	900
Carbono	Hierro	2.7	18.1	927
Hierro	Hierro	1.8	59.7	927
Niquel	Hierro	0.35	67.5	525
Manganeso	Hierro	2.0	33.0	500
Cobre	Aluminio	0.84	67.9	527
Zinc	Cobre	2.1	38.0	827

Concentración: dado que en la práctica es corriente suponer, por conveniencia matemática, que el coeficiente es independiente de la concentración, es útil conocer el error que se introduce con la hipótesis. En algunos sistemas  $D$  varía en gran medida con la concentración, p.e., en las aleaciones Au-Ni en las que la variación está dada por el factor de multiplicación 100. Por otro lado, la figura -, muestra que existe solo una variación relativamente pequeña en el coef. de difusión del carbono en la austenita hasta 1.3% de C, límite de solubilidad a la temperatura en cuestión. Incluso en sistemas en los que  $D$  depende mucho de la concentración siempre que se produzca la difusión en una solución diluída o sobre un pequeño intervalo de concentraciones.

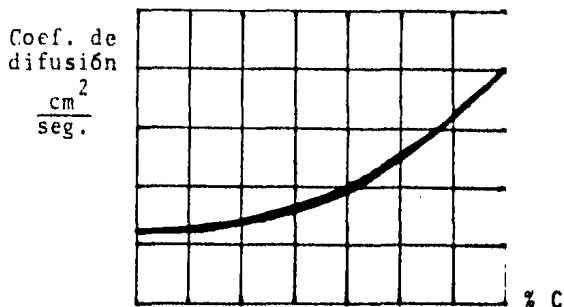


Figura 6.- Variación con la concentración, del coef. de difusión del carbono en hierro a 927°C.

Estructura cristalina: Por la importancia de la transformación alotrópica del hierro, de cúbico centrado a cúbico de caras centradas a temperaturas elevadas, se ha estudiado el efecto que produce esta transformación sobre la velocidad a la que los átomos del soluto difunden en el hierro. A una temperatura dada, estos procesos de difusión y autodifusión del hierro se producen con una rapidez que es, aproximadamente, cien veces mayor en ferrita (cúbica centrada) que en la austenita.

Otro efecto de la estructura cristalina es la variación del coeficiente de difusión con la dirección cristalina en un monocristal del metal solvente. Tal anisotropía no se encuentra en los metales cúbicos, pero el bismuto (red espacial romboédrica) presenta una constante de autodifusión paralela al eje  $c$ , aproximadamente mil veces mayor que la medida perpendicularmente a dicho eje.

Impurezas: la presencia de pequeñas cantidades de metales adicionales produce, normalmente, un efecto relativamente pequeño sobre la difusión de los átomos del soluto en un metal solvente. Con frecuencia, este hecho es útil en un estudio de problema de difusión. Por ejemplo, se puede llegar a la conclusión



de que, las enormes influencias de los elementos aleantes sobre la templabilidad del acero no puede ser consecuencia de variaciones grandes de la velocidad de difusión del acero y deben atribuirse a otros factores.

Tamaño de grano: puesto que la difusión en los límites de grano es mayor que la que se produce dentro de los granos, cabe esperar que la velocidad de difusión total sea mayor en un metal de grano fino. Sin embargo, en la gama usual de tamaño de grano no es preciso tener en cuenta el tamaño de grano al efectuar los cálculos de difusión.

#### D.- Clasificación de los tratamientos termoquímicos.

La primera acepción en cuanto a la clasificación de los tratamientos termoquímicos, es la debido a la naturaleza del elemento o elementos que difunden hacia la superficie de la pieza; ya que un tratamiento termoquímico es considerado fundamentalmente como un tratamiento de superficie y que no cambia la constitución química del material sino la superficie. Llamamos tratamiento termoquímico no metálico a aquel que estudia los mecanismos de difusión de elementos no metálicos en la superficie de la pieza. Si el elemento que difunde es un metal, el tratamiento termoquímico será un tratamiento metálico. El segundo criterio de clasificación para los tratamientos termoquímicos no metálicos, es obvio y necesario ya que se aplica en forma directa a los aceros; este criterio establece dos tipos de tratamientos, el austenítico que como su nombre lo indica se lleva a cabo en la región austenítica del diagrama hierro-carbono, y el ferrítico que se realiza a una temperatura más baja aproximadamente 550 °C.

Los tratamientos termoquímicos austeníticos son dos: el tratamiento de carburación y el de carbonitruración. La carburación o más conocida como cementación es un proceso que se basa -- en la difusión de carbono hacia la superficie de la pieza que se está carburando. Ello se consigue mediante la inmersión de la pieza en un medio llamado cementante, el cual según su estado físico en las condiciones de empleo, se le ha designado convencionalmente sólido, líquido ó gaseoso . El segundo de los tratamientos austeníticos, es el proceso de carbonitruración, se diferencia de la cementación en la composición y carácter de la capa dura, pues -- mientras que en la carbonitruración está tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación -- la concentración en carbono es elevada y la de nitrógeno es despreciable. Tiene cuatro modalidades que son: por medio de sales fundidas, gases, el proceso Thermit y el proceso Noskuff. (15)

Los tratamientos termoquímicos ferríticos son dos: el -- tratamiento de nitruración, que consiste en la difusión de nitrógeno en la superficie de la pieza que se está tratando. Puede ser gaseosa, líquida ó en un medio de plasma. El segundo de los tratamientos termoquímico ferríticos es la nitrocarburización, que se -- realiza en un horno, o bien, en un medio líquido.

Los tratamientos termoquímicos metálicos, comprenden los siguientes casos:

- a) Manganizado
- b) Aluminizado
- c) Boronizado
- d) Técnica por plasma
- e) Electrodepósito

CAPITULO IIITRABAJO EXPERIMENTALAntecedentes:

Como se mencionó anteriormente el presente proyecto está enfocado a estudiar la variación de la resistencia a la corrosión de un acero con tratamiento termoquímico y sin tratamiento. Además de aumentar su dureza superficial y consecuentemente su resistencia a la abrasión.

Para alcanzar este objetivo se desarrolló el siguiente trabajo experimental"

- A.- Selección del material (acero) de trabajo.
- B.- Análisis químico.
- C.- Metalografía.
- D.- Prueba de dureza.
- E.- Determinación del potencial de equilibrio.
- F.- Selección y aplicación de los tratamientos termoquímicos.
- G.- Microdureza de las capas obtenidas termoquímicamente.
- H.- Ensayos de polarización potenciodinámicos para evaluar velocidades de corrosión.
- I.- Pruebas gravimétricas para determinar velocidades de corrosión.

A continuación se describe cada una de estas pruebas.

A.- Selección del material de trabajo.

El criterio que se utilizó para decidir con que tipo de acero se trabajaría, está basado en el estudio de los tratamien-

tos termoquímicos el cual considera las siguientes condiciones:

- 1°.- El acero de trabajo debe tener elementos de aleación que sean buenos formadores y estabilizadores de carburos.
- 2°.- El acero de trabajo debe tener elementos de aleación que sean buenos formadores y estabilizadores de nitruros.
- 3°.- El contenido de carbón en el acero de trabajo debe ser bajo, no superior al 0.25% de C, ya que de lo contrario se causará fragilización en el material.

En base a esto se procedió a investigar que tipos de aceros cumplían con estos requisitos.

#### B.- Análisis químico.

El objetivo de ésta prueba es conocer el contenido en porcentaje de elementos de aleación en el acero de trabajo y con esto corroborar el análisis químico dado por el fabricante.

Al análisis químico del material de trabajo se realizó en el laboratorio de análisis del departamento de metalurgia, utilizando las siguientes técnicas en la determinación cuantitativa de cada uno de los elementos de aleación del acero de trabajo:

Elemento	TECNICA
Carbono (C)	Determinación volumétrica.
Silicio (Si)	Determinación colorimétrica.
Manganeso (Mn)	Determinación colorimétrica.
Cromo (Cr)	Determinación volumétrica.
Fosforo (P)	Determinación colorimétrica
Azufre (S)	Determinación volumétrica.

Nota: El análisis de níquel y molibdeno no se realizó debido a - que no se dispone de los reactivos necesarios para su de-terminación, en su lugar se analizó fósforo y azufre, por-que estos elementos causan fragilización en el acero si se encuentran en altos porcentajes.

### C.- Metalografía.

El propósito de la prueba metalográfica: es determinar el tipo de microestructura presente en el acero de trabajo, tamaño de grano, forma y distribución de fases e inclusiones.

Información preliminar: la metalografía estudia microscópicamente las características estructurales de un acero o aleación. La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende del cuidado que se tenga en preparar la muestra. La técnica de preparación de la muestra es la siguiente; una vez que se ha cortado la muestra, se realiza un pulido burdo, en una lija de banda rotatoria manteniendo la muestra fría durante la operación. En todas las operaciones de pulido, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a las rayaduras existentes. El pulido continúa hasta que la superficie quede plana y libre de mellas y rebabas. El paso siguiente, es el montaje de la muestra, éste se realiza en una prensa especial, que proporciona las bases de un tamaño conveniente para manipular la muestra en ulteriores operaciones de pulido. La resistencia termofijadora que más se emplea es la baquelita. La muestra y cantidad correcta de polvo de baquelita, se colocan en el cilindro de la prensa. Se aplica una presión de moldeo de  $4200 \text{ lb/in}^2$ , simultáneamente con un calentador hasta que la temperatura llegue a  $150^\circ\text{C}$ . Una vez que la baquelita está adherida y curada, en un tiempo de 15 min. aprox. la base con la muestra puede extraerse del dado del moldeo.

Después se pasa al pulido intermedio, el cual se realiza en una serie de lijas con abrasivos sucesivamente más finos. La primera lija es la No. 240, luego la 480, 600 y 800, girando la muestra 90° al pasar de una lija a otra. Y por último, el pulido fino, la aproximación a una superficie plana y libre de rayaduras, se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas de diferentes tamaños. Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el pulido fino. Pero parece haber preferencia por la forma gamma del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y los basados en cobre, óxido de cerio para pulir aluminio, magnecio y sus aleaciones. Otros abrasivos que se emplean son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

El ataque químico, tiene como propósito hacer visible las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química.

#### Aparatos y Reactivos:

- 1.- Máquina cortadora
- 2.- Máquina pulidora de banda
- 3.- Prensa para montaje
- 4.- Dispositivo de pulido intermedio
- 5.- Máquina de pulido fino
- 6.- Reactivo químico nital 2.

#### Procedimiento:

- 1.- Cortar una muestra de acero LEO VIC, tipo AISI 8620, de aproximadamente 2.5 x 2.5 cm.'

- 2.- Pasar a la máquina de pulido burdo, primero por la lija No. 80 y después a la 120, hasta que la superficie éste plana y libre de rebabas.
- 3.- Realizar el montaje de la muestra en la prensa.
- 4.- Realizar el pulido intermedio en las lijas 240, 480, 600, 800, girando la muestra 90°, al pasar de una lija a otra.
- 5.- Pasar a realizar el pulido fino, se utiliza alumina como abrasivo en tamaño de partícula de 1, 0.5, 0.3, 0.05 micras, hasta lograr que el espécimen de trabajo esté libre de rayas y quede completamente a espejo.
- 6.- La última operación, es realizar el ataque de la muestra, se usará como reactivo de ataque nital 2, la muestra debe de estar perfectamente atacada, para observar una buena estructura en el microscopio.

#### D.- Prueba de Dureza.

El objetivo de ésta prueba es determinar la dureza del material de llegada, y que esto nos sirva más adelante como un control para verificar que el tratamiento termoquímico se llevó a cabo en el acero de trabajo.

Información preliminar: la dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo

efectuado en una pieza metálica resulta generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza - de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado, esa estimación proporciona un método rápido y sencillo para el material y procesos particulares.

El ensayo de dureza Rockwell, es la prueba de dureza que más se utiliza, ya que puede llevarse a cabo en metales duros ó - blandos. Si se va a examinar un acero templado, se emplea un - penetrador con punta de diamante, llamado "Brale", si el metal cuya dureza va a medirse es acero blando se utiliza un penetrador de - bola de acero. En ésta prueba de dureza se emplea un instrumento - de lectura directa basado en el principio de medición diferencial. La prueba se lleva a cabo al elevar la muestra lentamente contra el penetrador hasta que se ha aplicado una carga determinada menor. Esto se indica en el disco medidor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor, y con la - carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor.

Aparato:

1.- Probador de dureza Rockwell

Procedimiento:

1.- Calibrar el probador de dureza Rockwell

2.- Colocar en la base del probador la muestra de acero perfectamente plana de sus dos bases.

3.- Elevar la base del probador hasta que el acero de - prueba toque al penetrador, aplicar la carga menor, - ésta se indica en la carátula del probador.



4.- Después se empuja hacia atrás la palanca del probador, para aplicar la carga mayor. Se espera 10 seg., hasta que la aguja del disco se detenga para leer el número de dureza en las unidades Rockwell correspondientes, que aparecen en la carátula del probador.

E.- Determinación del potencial de equilibrio.

El objetivo, que se pretende alcanzar al realizar ésta prueba es tratar de poder determinar el potencial de equilibrio del acero de trabajo, ya que al conocer éste potencial podemos predecir si el acero puede ser corroído por un medio ambiente determinado.

Información preliminar: una celda electroquímica es aquel dispositivo formado por dos electrodos, una solución electrolítica y un alambre que permite el paso de corriente. Los electrodos son generalmente metálicos. Así, en una celda electroquímica donde se utilizan metales diferentes como electrodos, en una solución electrolítica que contenga iones de uno de ellos, uno de ellos se oxidará, mientras que el otro se reducirá.

Es muy importante conocer el potencial de equilibrio de un metal que se corroe. Este potencial se mide determinando la diferencia de potencial existente entre un metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia, lo más usados son los siguientes:

Electrodo saturado de calomel

Electrodo cobre-sulfato de cobre

Electrodo de platino-hidrógeno.

La medición se hace con un potenciómetro de alta impedancia, donde la magnitud y el signo del potencial es una función del metal, composición del electrolito, temperatura y agitación del mismo.

Aparatos y reactivos:

Electrodo saturado de calomel

Vólmetro digital EICO 30A5

Reloj

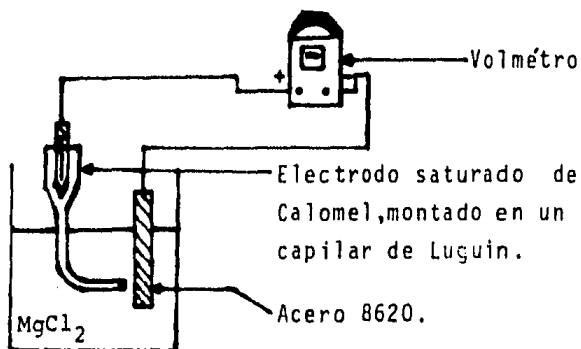
Electrolito  $\text{HgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  al 10% .

Agitador electromagnético.

Procedimiento:

- 1.- Preparar una muestra de acero LEO VIC tipo AISI 8620, la superficie debe estar perfectamente pulida a espejo y desengrasada.
- 2.- Preparar 250 ml. de  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  al 10% de concentración.
- 3.- Colocar la muestra de acero en el dispositivo de prueba junto con el electrolito. Esperar 15 min., para tomar las lecturas de potencial.

Esquema del dispositivo de prueba:



F.- Selección y aplicación de los trat. termoquímicos.

Una vez que se analizó la información referente a los tratamientos termoquímicos, se decidió ensayar los tratamientos más representativos que son la cementación y la nitruración. Ya que los otros tratamientos, son en cierta forma una combinación de los antes mencionados. Además, de que su uso es para propiedades bien específicas de la capa. Descripción del tratamiento de cementación.

Tratamiento termoquímico: Cementación o carburación.

Objetivo: lograr obtener una profundidad de capa cementada representativa de éste tratamiento, aproximadamente 1.0 41 mm., con un porcentaje de carbón no superior a 0.4%.

Información preliminar: la cementación, es el tratamiento termoquímico de difusión que tiene por objeto aumentar el contenido de C, en la superficie de la pieza. La temperatura de operación, a la cual, se lleva a cabo éste tratamiento está comprendida en el intervalo de 850 - 950 °C., es decir, con el acero en estado austenítico y el hierro en forma de hierro gamma, que es cuando tiene mayor capacidad de disolución del carburo de hierro. Una vez absorbido el carbono por la capa periférica del acero, tiene lugar el proceso de difusión de carbono hacia el interior de la pieza. La cementación se le ha venido a llamar sólida, líquida o gaseosa, de acuerdo al estado del cementante empleado. Trabaja con la cementación líquida, que es de acción más rápida y de sencilla aplicación. Además, se aplica mucho a piezas pequeñas. Otro de los factores que tenemos que considerar, es que los aceros que se emplean son de bajo contenido en carbón, no superior a ---

0.25 %, utilizándose aceros aleados con Ni, Cr, Mo, que son especialmente adecuados. El acero de trabajo cumple con este requisito. En la práctica se utilizan dos baños de cementación, uno a alta temperatura y otro a baja temperatura. Se trabajará con el baño a alta temperatura, ya que es necesario manejar el límite superior de la cementación, que es donde se favorece el fenómeno de difusión. Este tipo de baño opera en el intervalo de temperatura de 900-955°C y se usa para producir profundidades de capa de 0.508 - 3.048 mm. Se recomienda trabajar a 955°C, utilizando una concentración del 8% en las sales de cementación (%NaCN). Para determinar el tiempo de duración del tratamiento tenemos que analizar la relación entre la temperatura, penetración de carbono. Revisando las tablas y gráficas donde se muestra esta relación, se encontró, que para el baño a alta temperatura, el tiempo de permanencia en el baño de cementación es de 2 horas. Y por último, otro de los factores que tenemos que considerar, es el medio de severidad usado para el enfriamiento de las piezas. Se recomienda aceite para este tipo de acero, ya que es un medio de severidad menos drástico que el agua. Además, produce menos distorsión del material y por supuesto menos cambios dimensionales. También se acostumbra precalentar las piezas antes de introducir las en el baño de cementación. Para la cementación con sales de cianuro, se suele emplear crisoles de acero, recomendándose el empleo de crisoles de acero inoxidable y no se puede usar en cambio crisoles preparados con ladrillos refractarios, ya que las sales de cianuro son altamente oxidantes.

#### EQUIPO Y OPERACIONES SUBSECUENTES:

1°

Tipo de acero

8620

Número de piezas	5
Dimensiones de las piezas	2.5 x 1.5 cm.
Peso de las piezas	58 - 59 g.

## 2°

Horno precalentador	Mufla: Termoline
Temperatura de operación	500 - 800 °C.
Período de precalentamiento	45 min.

## 3°

Horno tipo crisol	Linberg.
Temperatura de operación	950 °C.
Baño de cementación	Sal comercial Carbogen Ec 10 % CN <sup>-</sup>
Tiempo de operación	90 min.

## 4°

Medio de enfriamiento	aceite con agitación
-----------------------	----------------------

## Precauciones Técnicas:

- 1.- debe cubrirse la superficie de los baños de cementación con escamas de grafito y otro producto que evite su oxidación, para evitar pérdidas considerables de cianuro.
- 2.- Los hornos de cementación líquida deben contar con campanas, para evacuación de gases puesto que estos son venenosos.
- 3.- Las piezas deben de ser precalentadas para eliminar cualquier contaminante que pueda estar presente en su superficie, antes de inmersión en el baño de sales.
- 4.- Todos los recipientes químicos deben estar claramente marcados para indicar su contenido.

- 5.- Las sales de nitratos y nitritos no deben estar en contacto con sales de cementación en estado fundido, puede resultar una explosión.

**Precauciones personales:**

- 1.- El personal debe ser cuidadoso y estar instruido en el manejo de las sales de cementación (son venenosas).
- 2.- Escudo protector, guantes, bata, gafas para los ojos y respirador deben ser utilizados por el personal durante la operación de cementación de las piezas.
- 3.- Al finalizar el tratamiento, el personal debe lavarse perfectamente las manos para evitar contaminación de los cianuros.

**Tratamiento termoquímico: Nitruración.**

**Objetivo:** Tratar de obtener una profundidad de capa nitrurada, representativa de este tratamiento termoquímico, de aproximadamente 0.008 mm.

**Información preliminar:** La nitruración es el tratamiento termoquímico, que se basa en el poder de absorción nitrógeno naciente en el acero sometido a temperaturas adecuadas (510°C - 570°) y formación de nitruros dispersos en la masa superficial del acero que produce un gran endurecimiento de éste. Tal acción se regula con composiciones adecuadas de elementos de aleación en el acero. -- Los grupos de aceros de nitruración más utilizados en la actualidad son: 1°- aceros Cr-Al-Mo, estos aceros fueron los que más se

utilizaron cuando interesaba obtener durezas muy elevadas con --- gran resistencia al desgaste. 2º aceros altos en Cr, con Va y Mo, - se emplean cuando interesan durezas elevadas, pero conviene también que la capa nitrurada sea tenaz y esté bien adherida. 3º aceros - Cr-Mo, que son de menor dureza superficial, y tienen la capa nitru - rada más tenaz. El acero de trabajo cumple con este requisito. Al igual que el caso de cementación, la nitruración se realiza con - tres técnicas que son : gaseoso líquido y por plasma. Utilizaremos la técnica del baño de sales fundidas, ya que es de fácil manejo y mejor control. La nitruración líquida opera en el intervalo de - temperatura de 510-570°C . Un baño comercial típico para nitrura - ción líquida está compuesto de una mezcla de sales de cianuro de sodio y potasio. Las sales de sodio, las cuales componen 60 a 70% en peso de la mezcla total, consiste de 96.5% de Na CN, 2.5% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y 0.5% de NaCNO. Las sales de potasio, de 30 - 40 % en peso de la mezcla, consiste de 96% de KCN, 0.6% de  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 0.75% KCNO y 0.5% KCl. La temperatura de operación de este baño de sales es a 570 °C . El contenido de cianuro en el baño decrece y el contenido de cianato y carbonato se incrementa. El contenido de cianato en el total del baño es el responsable de la acción del nitrógeno y la relación de cianuro y cianato es crítica. Este tipo de baño se usa para producir una profundidad de capa de 0.0254 - 0.0762 cm.

Los mejores resultados se obtienen cuando la nitruración se hace sobre la martensita revenida; en cambio, con estructuras de ferrita y perlita ó ferrita y sorbita, etc., queda la - capa frágil. Por consiguiente va a ser necesario templar y revenir las piezas antes de realizar la nitruración. Se trabajará en el

límite superior de la nitruración para favorecer al máximo la difusión del nitrógeno en el interior del material.

Equipo y operaciones subsecuentes:

1°

Tipo de acero	8620
Número de piezas	5
Dimensiones de las piezas	2,5 x 1,4 cm.
Peso de las piezas	47 - 51 g.

2°

Horno de temple	Mufia: Termoline
Temperatura de operación	900°C.
Tiempo de permanencia	1 hr., 0,5 min.
H = Medio de severidad	aceite

3°

Horno de revenido	Horno de convección Heraeus-electrónico.
Temperatura de operación	200°C.
Tiempo de permanencia	1 hr., 0,5 min.
H = Medio de severidad	Horno.

4°

Horno de nitruración	Linberg
Controlador de temperatura	Linberg ( 570°C. )
Tiempo de permanencia	4 hrs.
H = Medio de severidad	aceite con agitación
Sal comercial Liquid Heat 720 x	50% NaCN, 50% KCN.

Nota: Se debe tener las mismas precauciones técnicas y personales, que se mencionaron para la realización del tratamiento de cementación líquida.



G. - Microdureza de las capas obtenidas termoquímicamente.

El objetivo de ésta prueba es conocer con exactitud la dureza de las capas obtenidas termoquímicamente y de ésta forma - saber cual de los tratamientos termoquímicos utilizados logra aumentar en mayor grado la dureza superficial del material de trabajo.

Información preliminar: prueba de dureza Vickers; en este ensayo de dureza se emplea como cuerpo penetrador un diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular de 136° entre caras, y normalmente se emplean cargas variables de 1 a 120 kg. El principio en que se basa el funcionamiento de esta máquina es el siguiente: primero se aplica la carga seleccionada durante 30 seg. - Después se mide el diámetro de la huella con un microscopio cuyo ocular tiene un retículo graduado normalmente en décimas de milímetro, pudiéndose apreciar a estima hasta la media décima. La distancia entre índices se mide por medio de un tornillo micrométrico graduado en milésimas de milímetro. Conocida la longitud de la diagonal, la dureza se obtiene directamente en una tabla o aplicando la fórmula:

$$HV = \frac{1.854 \times P}{d^2}$$

en la que P = carga aplicada en g.

d = longitud de la diagonal de la huella.

Debido a la gama tan amplia de cargas que utiliza, la máquina Vickers puede emplearse para medir todo tipo de materiales, independientemente del grosor de la probeta.

Aparato:

- Microdurómetro Leitz Getzlar ( Germany )

## Procedimiento:

- 1.- Preparar 2 muestras de acero Leo Vic tipo AISA 8620, una con tratamiento termoquímico de cementación y otra nitrurada. Una vez que las probetas están pulidas ha espejo, se atacan con  $\text{HNO}_3$  para poder observar las capas.
- 2.- Después se pasa al microdurómetro para realizar el ensayo de dureza Vickers. Para esto se realiza el encendido del aparato, accionando un suich que está colocado en la parte posterior del aparato, a continuación se coloca el disparador de carga.
- 3.- El espécimen de prueba se coloca sobre la base del aparato y con el ocular de 10x10 se procede a realizar el enfoque de la zona que desea ensayar.
- 4.- A continuación se coloca el penetrador moviendo el revolver del aparato y se procede a aplicar la carga ( carga utilizada 25 P ) Esta operación tarda 30 seg. y es automática.
- 5.- Después se coloca el ocular de 50x10 y se enfoca la huella de forma de prima rectangular, a continuación con el tornillo micrométrico se localiza uno de los vértices del prisma. Se procede a medir la distancia del vértice inferior al superior utilizando este tornillo.
- 6.- Con los valores de distancia obtenidos se procede a buscar la dureza Vickers en tablas o mediante el uso de la fórmula, para una  $P = 25 \text{ g}$ .

H.- Ensayos de polarización potenciodinámicos para evaluar velocidades de corrosión.

El objetivo de éstas pruebas es determinar las velocidades de corrosión instantánea por medio del método de aproximación de Tafel, para el acero de trabajo con tratamiento termoquímico y sin tratamiento.

Información preliminar: El dispositivo experimental para obtener las curvas intensidad-potencial está constituido por un sistema electrodo y un circuito eléctrico exterior, incluido el aparato de medida. Este dispositivo se denomina potencioestado y consiste en un circuito electrónico con un amplificador operacional, conectado de manera que la salida de corriente depende de la diferencia de potencial aplicada entre sus dos entradas. La figura 6a, muestra esquemáticamente el dispositivo. El potencial programado entre la terminal del electrodo de trabajo y la terminal de control, es decir, potencial del electrodo de trabajo respecto al electrodo de referencia, está conectado a la entrada del amplificador operacional, cuya salida alimenta el circuito que contiene los electrodos de trabajo y auxiliar con la corriente resultante. Si en el curso del ensayo la diferencia de potencial  $V$  entre las terminales de trabajo y de control varía respecto al valor impuesto  $V^+$ , el dispositivo ajusta electrónicamente la corriente de salida hasta que  $V^+ - V = 0$ , y queda restituida la diferencia de potencial programada entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. Al conectar las terminales de la celda al potencioestado, tal como se indica en la figura 6b, se impone al electrodo de trabajo un potencial determinado respecto al electrodo de referencia, y se opera potencioestáticamente. La corrien

te que pasa por el circuito se suele determinar por medio de la caída de potencial a través de una resistencia conocida  $R$  intercalada en el circuito. También se puede medir automáticamente la corriente en función del potencial aplicado mediante un registrador X-Y.

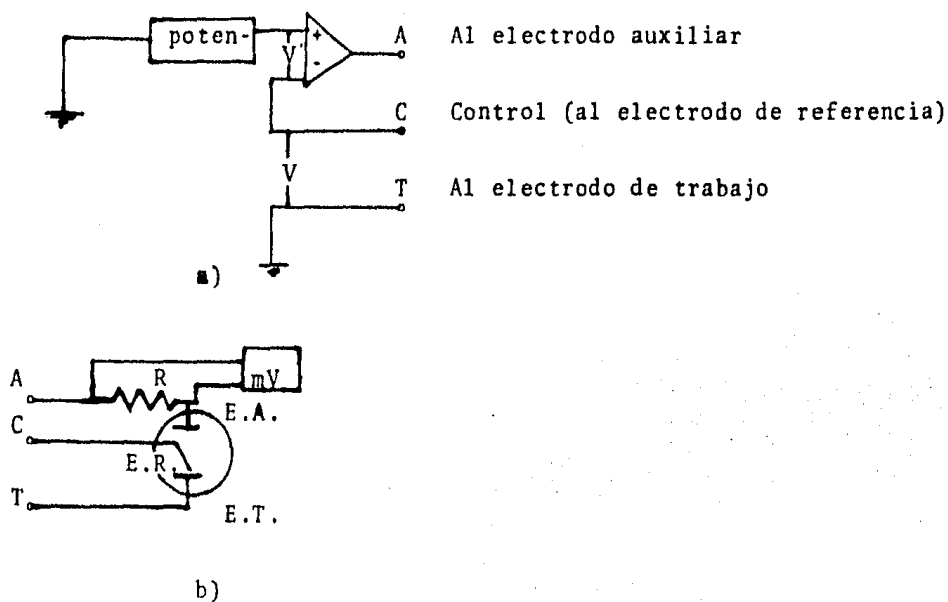


Figura 6.- Potenciostato: a) esquema y diferencias de potencial entre las distintas terminales, b) montaje potencióstático.

#### Aparatos y Reactivos:

Potenciostato/Galvanostato PG-2EV. Electrónica VIMAR.

Electrodo de referencia: Electrodo saturado de calomel.

Electrodo auxiliar : Electrodo de platino.

Electrodo de prueba : Acero de trabajo (8620).

Celda de prueba potenciostática.

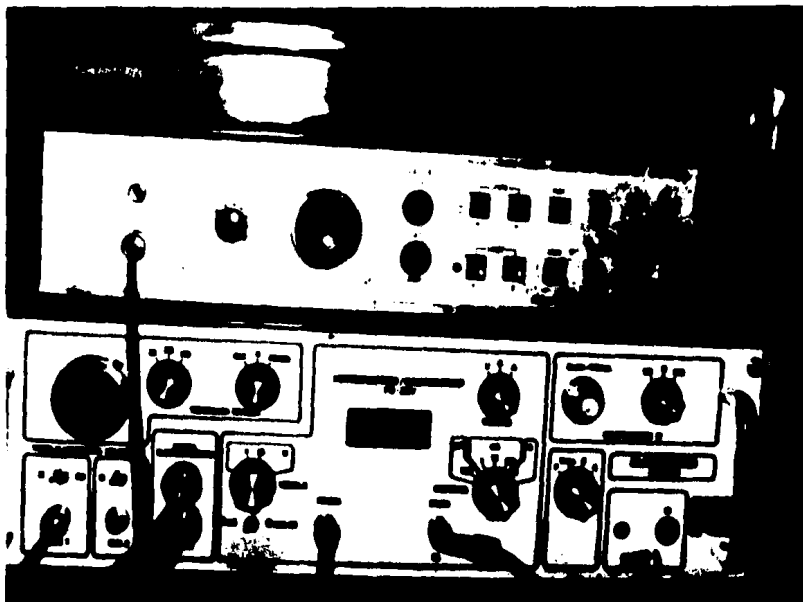
Agitador electromagnético.

Tanque con nitrógeno.

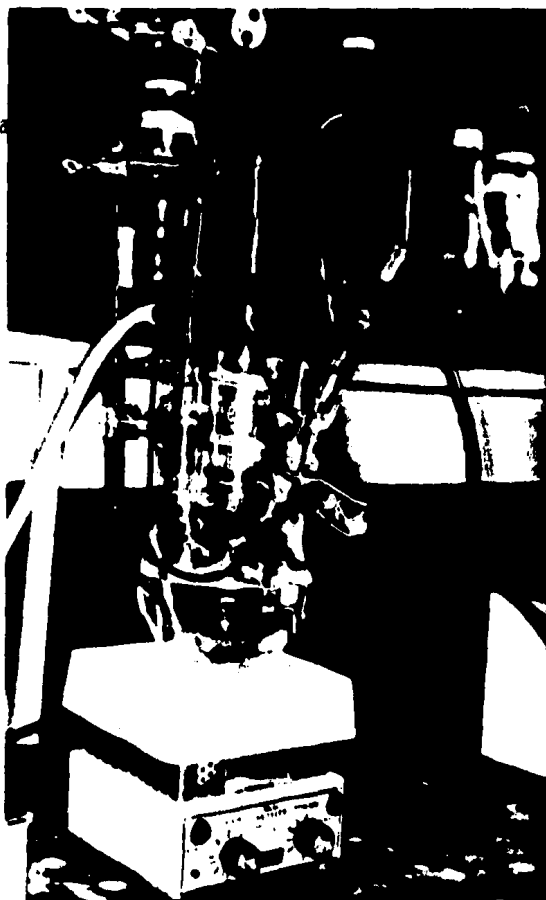
Electrolito de trabajo:  $MgCl_2 \cdot 6_2H_2O$  al 10%.

Procedimiento:

- 1.- Preparar tres muestras del acero de trabajo (8620), una sin tratamiento termoquímico, otra cementada y otra más nitrurada con un diámetro de 1 cm. y se montan en baquelita.
- 2.- Una vez que se han montado las muestras de prueba, se procede a realizar una cuerda interna en la baquelita hasta llegar a la muestra de acero, esto se hace con el fin de poder conectar una varilla de acero la cual funcionará como contacto eléctrico, de ésta manera se preparan los electrodos de prueba.
- 3.- Se coloca el electrolito en la celda de prueba, se burbujea nitrógeno durante una hora con agitación constante.
- 4.- Se procede a introducir el electrodo de prueba en la celda junto con los electrodos de referencia y el electrodo auxiliar. El electrodo de prueba previamente se limpia con acetona y una vez en la solución se realiza una limpieza catódica durante 15min. a un potencial aproximado a - 1400 mV.
- 5.- Se procede a realizar las curvas de polarización catódica y anódica para cada uno de los electrodos de prueba.



Potenciostato  
y  
Celda de prueba



I.- Pruebas gravimétricas para determinar velocidades de corrosión.

El propósito de estas pruebas es determinar en forma -- cuantitativa las velocidades acumuladas de corrosión del acero de trabajo sin tratamiento y con tratamiento termoquímico, en un medio corrosivo particular.

Información preliminar: las pruebas de corrosión pro---veen de las bases para el control práctico de la corrosión y por consiguiente merece una discusión más profunda. Una descripción detallada de todos los procedimientos y dispositivos que se han -- empleado en los estudios de corrosión en muchos países puede no -- ser requerido. Sin embargo, la atención puede ser dirigida principalmente a entender sus principios y comentar sobre el significado y limitaciones de los resultados del método empleado.

Las pruebas de corrosión pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- 1.- Pruebas de laboratorio en las cuales las condicio--nes pueden ser definidas perfectamente y controla--das. Las pruebas de laboratorio son ordinariamente pruebas aceleradas.
- 2.- Pruebas de campo en este tipo de pruebas, diferen--tes tipos de especímenes estan sujetos al medio ambiente experimentado bajo las mismas condiciones de exposición ambiental.
- 3.- Pruebas de servicio en la cual los especímenes o --tratamiento protector es incorporado en la planta o a la estructura bajo consideración, con un conse---cuento bajo grado de control que el que se tiene en

las pruebas de campo.

Las pruebas de corrosión de laboratorio son útiles en:

- a.- Estudios de química y mecanismos de corrosión.
- b.- Indican el medio ambiente en el cual un metal particular o aleación puede ser usada satisfactoriamente.
- c.- Determina los efectos posibles de metales y aleaciones sobre las características de un medio ambiente en el cual pueden estar expuestos.
- d.- Sirven como pruebas de control en un material homogéneo.

Las pruebas de corrosión de servicio y campo son útiles para:

- a.- Selección del mejor material que puede ser usado en un medio ambiente particular y una estimación de su probable durabilidad en ese medio ambiente.
- b.- Asegura la eficiencia de los métodos de prevención de corrosión.

Independientemente del método de prueba empleado o del propósito para el cual fué diseñado, hay ciertas características prácticas las cuales requieren atención:

Preparación de los especímenes: la forma de los especímenes debe ser sencilla. Si es rectangular, no debe sobrepasar los 10x12 cm, en el caso de ser cilíndrica, debe ser 10-5 cm. de longitud y 2.5-3 cm. de diámetro. Además, G.W. Akimov recomienda mantener las muestras una vez preparadas, en un desecador durante 24 horas con el objeto de estabilizar la superficie mecanizada.

Tiempo requerido para la prueba: las pruebas de corrosión se denominan en base al tiempo de exposición ensayo largo --



con tiempos de duración en años, semi-acelerado con tiempos de duración en meses y ensayos acelerados con tiempos de 48 horas a -- 200 horas.

Precisión de la prueba: puede ser de tipo cualitativa o cuantitativa.

Medio corrosivo: Agua de mar, agua corriente, otros líquidos, aire, gases, o suelo.

Aplicación de la prueba: exposición continua o alterada.

Temperatura y humedad: los ensayos se pueden realizar en condiciones atmosféricas normales o en condiciones especiales.

Método de inmersión: inmersión total o parcial, en soluciones aireadas o no, y también inmersión alterada con períodos fuera del medio corrosivo.

Condiciones experimentales: las condiciones bajo las cuales se efectuaron las pruebas de corrosión son las siguientes:

Forma de los especímenes de prueba: Cilíndrica, dimensiones de los especímenes sin tratamiento y cementadas 2.5 cm. de diámetro y 1.5 cm. de altura, muestras nitruradas 2.5 cm. de diámetro y 1.5 cm. de altura.

Tiempo de duración de la prueba : 136 horas.

Localización del ensayo : Laboratorio

Electrolito : Agua de mar sintética  
especificación ASTM--  
D1141-75.

Temperatura y humedad : Condiciones atmosféricas normales.

Método de inmersión : Inmersión total en solución aireada.

pH : 8.6

Dispositivo experimental :



CAPITULO IVRESULTADOSA.- Selección del material de trabajo.

En base a los requisitos mencionados en el Capítulo 3, se procedió a investigar que tipos de aceros cumplieran con esto, para ello se revisó las normas de clasificación de los aceros --- ASTM y AISI. De aquí se llegó a la conclusión de que el acero -- más adecuado es el acero tipo AISI 8620, ya que este acero cumple con las condiciones antes mencionadas. El siguiente paso fué la adquisición de este acero y saber si el acero seleccionado se fabrica en el país. Se realizó una investigación en el mercado en la cual se encontró que este acero si es de fabricación nacional, y que cada fabricante le asigna un nombre propio para su clasificación. La adquisición del acero se logró en la Compañía de Aceros de Calidad S. A.

Generalidades del acero tipo AISI 8620, proporcionada por el fabricante:

Nombre de clasificación	:	LEO VIC (para cementación)
Resistencia a la abrasión	:	baja
Tenacidad	:	baja
Maquinabilidad	:	alta
Dureza	:	HRB 94
Indeformabilidad	:	alta
Tratamiento térmico	:	recocido ( 760 - 790°C. )
Medio de severidad	:	aceite
Análisis químico	:	Elemento            Concentración
		C                    0.20 %

Si	0.30 %
Mn	0.80 %
Cr	0.50 %
Ni	0.50 %
Mo	0.20 %

Este tipo de acero se emplea en la fabricación de las siguientes piezas: pernos, piñones, engranes, sinfines, etc., y en general para todo tipo de piezas que esten expuestas a rozamiento continuo.

#### B.- Análisis químico.

El análisis químico que se realizó en el laboratorio de análisis del departamento de metalurgia, reporta los siguientes resultados para el acero LEO VIC tipo AISI 8620.

Elemento	Concentración ( % )
Carbono ( C )	0.250
Silicio ( Si )	0.325
Manganeso ( Mn )	0.800
Cromo ( Cr )	0.500
Fósforo ( P )	0.020
Azufre ( S )	0.015

#### C.- Metalografía.

La prueba metalográfica resultó satisfactoria ya que se logró distinguir cada una de las fases presentes en el acero de trabajo, su distribución, además del tamaño de grano y las inclusiones. En la fotografía No. 1 se presenta la microestructura --

del acero LEO VIC tipo AISI 8620.

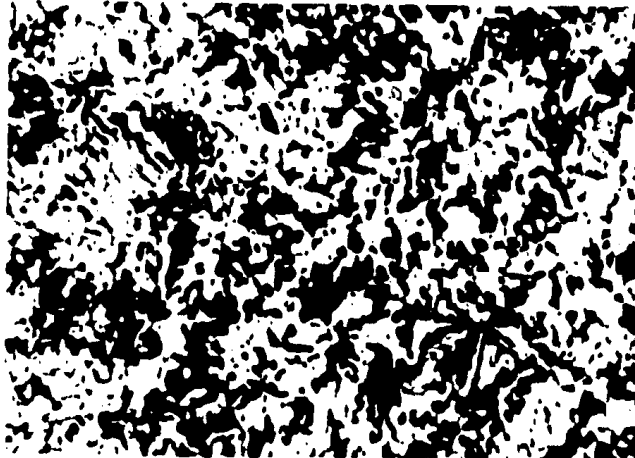


FOTO 1.- Microestructura del acero LEO VIC tipo AISI 8620, atacado con nital 2, observado a 200 aumentos. La matriz está formada por el microconstituyente ferrita presenta una coloración clara, y la parte oscura corresponde a la cementita. Los puntos oscuros que se observan son carburos sin disolver.

Las inclusiones que se observaron son del tipo sulfuros de cromo y manganeso, además se observaron micelas de aluminatos.

#### D.- Prueba de dureza.

Los resultados que se presentan de dureza, se determinaron tanto en el centro de la muestra como en la periferia, con el fin de saber si la dureza del acero de trabajo es homogénea en toda la superficie del mismo.

Dureza	HRB	( acero LEO VIC tipo AISI 8620 )
1.-	79	
2.-	79	Dureza en la periféria.
3.-	78	
4.-	79	
5.-	78	Dureza en el centro.
6.-	79	

E.- Determinación del potencial de equilibrio.

En esta prueba las lecturas de potencial se realizaron minuto a minuto durante los primeros 10 min., después cada 10 min. hasta llegar a una zona de estabilización en la cual se determinó un punto de reposo que se considera representativo del potencial de equilibrio.

Tiempo (min)	Potencial de celda (v)
0	0.532
1	0.537
2	0.545
3	0.552
4	0.560
5	0.568
6	0.579
7	0.589
8	0.596
9	0.599
10	0.601
20	0.612
30	0.617
40	0.620
50	0.623
60	0.624
70	0.625
80	0.627
90	0.628
100	0.628

Tiempo (min)	Potencial de celda (v)
110	0.627
120	0.628
130	0.630
140	0.631
150	0.631
160	0.632
170	0.632
180	0.633
190	0.634
200	0.634

Se anexa la gráfica de la variación del potencial respecto al tiempo.



Potencial  
(volts)

Acero 8020.

Sistema: Calomel +  $HgCl_2$  - Acero 8020.

$T = 20^\circ C$        $pH = 6.6$ .

0.4

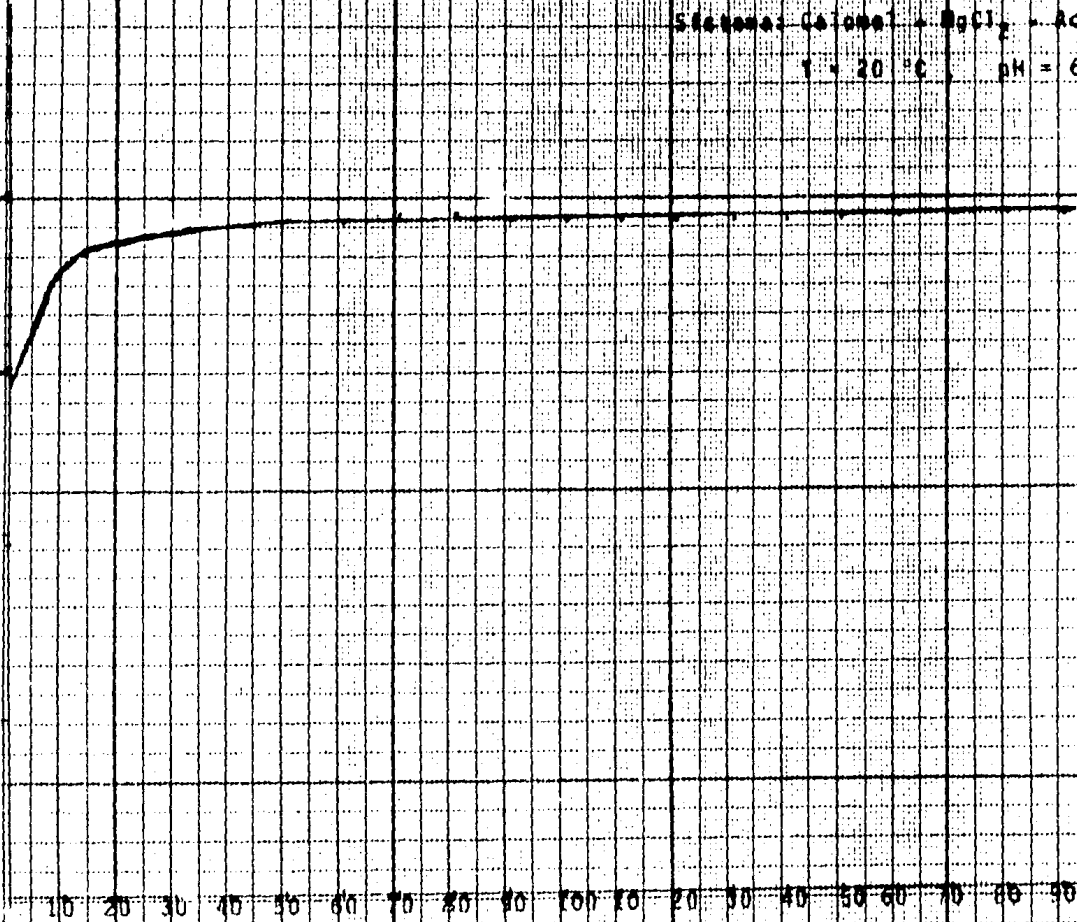
0.3

0.2

0.1

10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200

Tiempo (min)



F.- Selección y aplicación de los tratamientos termoquímicos.

El resultado obtenido no fue el que se esperaba, ya que no se logró obtener la profundidad de capa cementada deseada, pero si podemos decir que la que se obtuvo es representativa de este tratamiento, ya que se encuentra dentro del intervalo de profundidades de capas cementadas, obtenidas por cementación líquida.

Profundidad de capa cementada: 0.606 mm.

Se presenta una fotografía de la capa obtenida.



Foto N°.- 2 Acero LEO VIC tipo AISI 8620, atacado con nital 2 y observado a 75 aumentos en el cual se observa claramente la capa cementada.

El resultado obtenido en el caso de la nitruración fue similar al de la cementación, ya que no se logró alcanzar el objetivo deseado pero también podemos decir que es representativo de este tipo de tratamiento termoquímico.

Profundidad de capa nitrurada = 0.005 mm.

Se presenta una fotografía de la capa nitrurada obtenida.

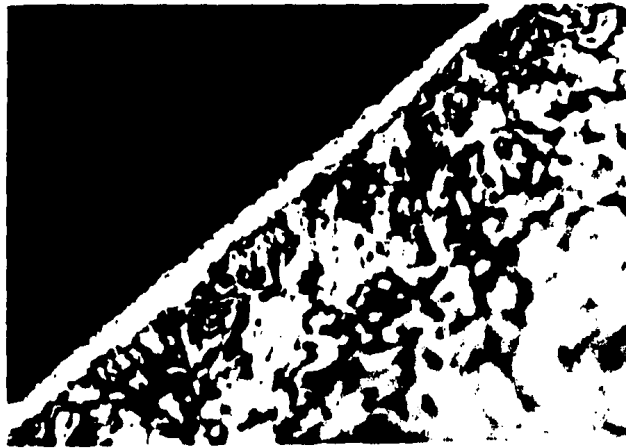
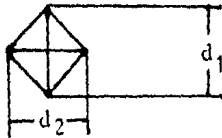


Foto N° 3.- Acero LEO VIC tipo AISI 8620, atacado con nital 2 observado a 600 aumentos en el cual se ve claramente la capa nitrurada obtenida, y algunos nitruros dispersos.

G.- Microdureza de las capas obtenidas termoquímicamente.

En todas las mediciones de microdureza, la distancia de la huella del indentador de forma piramidal se realizó en base a la siguiente figura:



$$\frac{d_1 + d_2}{2}$$

Microdureza de la capa obtenida por tratamiento termoquímico de cementación líquida:

Distancia u del $\phi$ del indentador	Dureza Vickers (HV)
8.55	627
8.75	599
8.85	585

Microdureza de la capa obtenida por tratamiento termoquímico de nitruración líquida:

Distancia u del $\phi$ de la huella del indentador:	Dureza Vickers (HV)
7.275	873
7.45	847
7.55	824

II.- Ensayos de polarización potenciodinámicos para evaluar velocidades de corrosión.

Acero sin tratamiento termoquímico.

Condiciones: curva anódica.

X = potencial = $50 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$	X = $50 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$	SCE = - 1.0 V.
Y = corriente = 5 "	Y = 500 "	vel. anódica = $150 \frac{\text{mV.}}{\text{min}}$
I = 15 mA.		Ae = 0.785 cm <sup>2</sup>
E mV.	I mA.	log i $\frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1000	0	0
- 375	0.112	0.143
- 365	0.150	0.191
- 350	0.225	0.286
- 340	0.300	0.386
- 330	0.375	0.477
- 325	0.450	0.573
- 320	0.525	0.668
- 315	0.600	0.764
- 310	0.750	0.955
- 305	0.900	1.146
- 300	1.050	1.146
- 295	1.200	1.528
- 272	3.000	3.821
- 260	3.750	4.777
- 255	4.500	5.732
- 240	5.250	6.687

E mV.	I mA	$\log i \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$
- 235	6.000	7.643
- 220	7.500	9.550
- 207	9.000	11.464
- 193	10.500	13.375
- 182	12.000	15.286
- 170	13.500	17.197
- 155	15.000	19.108
- 150	16.500	21.019
- 85	30.000	38.216
- 35	37.500	47.770
15	45.000	57.324
75	52.500	66.878
175	67.500	85.987
280	82.500	105.095
330	90.000	114.649
385	97.500	124.203
440	105.000	133.757

Condiciones : curva catódica

$$X = 50 \frac{\text{mV.}}{\text{cm}}$$

$$X = 50 \frac{\text{mV.}}{\text{cm}}$$

$$\text{SCE} = - 1.0 \text{ V.}$$

$$Y = 50 \text{ ''}$$

$$Y = 500 \text{ ''}$$

$$\text{Vel. catódica} = 750 \frac{\text{mV.}}{\text{min.}}$$

$$I = 15 \text{ mA.}$$

E mV.	I mA.	$\log i \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$
- 1000	0	0
- 1045	0.375	0.477
- 1075	0.750	0.955
- 1103	1.125	1.433

E mV.	I mA.	$\log i \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1120	1.500	1.910
- 1143	2.250	2.866
- 1165	3.000	3.821
- 1185	3.750	4.777
- 1205	4.500	5.777
- 1240	6.000	7.643
- 1270	7.500	9.554
- 1300	9.000	11.464
- 1330	10.500	13.375
- 1360	12.000	15.286
- 1385	13.500	17.197
- 1415	15.000	19.108
- 1450	17.250	21.974
- 1565	22.500	28.662
- 1658	30.000	38.216
- 1750	37.500	47.770
- 1837	45.000	57.324
- 1880	52.500	66.878
- 1980	60.000	76.433
- 2065	67.500	85.987
- 2135	75.000	95.541

Acero con tratamiento termoquímico (cementado)

Condiciones : curva anódica

$$X = 50 \frac{\text{mV}}{\text{cm}}$$

$$\text{SCE} = - 960 \text{ mV.}$$

$$Y = 50 \text{ ''}$$

$$A_e = 0.785 \text{ cm}^2$$

$$I = 10 \text{ mA.}$$

E mV.	I mA.	log i $\frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 950	0	0
- 287	0.250	0.318
- 210	0.500	0.636
- 165	1.000	1.273
- 143	1.500	1.910
- 125	2.000	2.547
- 100	3.000	3.821
- 83	4.000	5.095
- 65	5.000	6.367
- 50	6.000	7.643
- 35	7.000	8.917
- 21	8.000	10.191
- 7	9.000	11.464
+ 6	10.000	12.738
60	15.000	19.108
120	20.000	25.477
180	25.000	31.847
280	35.000	44.585
+ 400	45.000	57.324
454	50.000	63.694
510	55.000	70.063
570	60.000	76.433

Condiciones : curva catódica

X = 500 mV. SCE = - 960 mV.

Y = 50 "

E mV.	I mA.	log i $\frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1000	0	0



E mV.	I mA.	$\log i \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1190	2.500	3.184
- 1290	5.000	6.369
- 1425	10.000	12.738
- 1550	15.000	19.108
- 1650	20.000	25.477
- 1750	25.000	31.847
- 1850	30.000	38.216
- 1910	35.000	44.585
- 2000	40.000	50.955
- 2075	45.000	57.324
- 2175	50.000	63.694
- 2275	60.000	70.063
- 2350	65.000	76.433
- 2425	70.000	82.802
- 2500	75.000	89.171
- 2575	80.000	95.541

Acero con tratamiento termoquímico (nitrurado)

Condiciones : curva anódica

$$x = 50 \frac{\text{mV.}}{\text{cm.}}$$

$$\text{SCE} = - 1000 \text{ mV.}$$

$$Y = 50 \text{ "}$$

$$\text{Vel. anódica} = 150 \frac{\text{mV.}}{\text{min.}}$$

$$I = 15 \text{ mA.}$$

$$A_e = 0.795 \text{ cm}^2$$

E mV.	I mA.	$\log i \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1000	0	0
- 325	0.375	0.477
- 295	0.750	0.955
- 275	1.125	1.433

E mV.	I mA.	$\log i \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 260	1.500	1.910
- 250	1.875	2.388
- 235	2.250	2.866
- 200	3.750	4.777
- 180	4.500	5.732
- 163	5.250	6.687
- 125	6.750	8.598
- 85	8.250	10.509
- 45	9.750	12.420
0	11.250	14.331
+ 55	12.750	16.242
95	14.250	18.152
115	15.000	19.108
135	15.750	20.063
145	16.500	21.019
155	17.250	21.974

Condiciones : curva catódica

$$X = 50 \frac{\text{mV.}}{\text{cm}}$$

$$\text{SCE} = - 1.0 \text{ V.}$$

$$Y = 50 "$$

$$\text{Vel. catódica} = 750 \frac{\text{mV.}}{\text{min}}$$

$$I = 15 \text{ mA.}$$

E mV.	I ma.	$\log i \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1000	0	0
- 1155	1.500	1.910
- 1230	3.75	4.770

E mV.	I mA.	log i $\frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2}$
- 1315	7.500	9.554
- 1390	11.250	14.331
- 1460	14.000	17.834
- 1575	21.550	27.1388
- 1680	29.000	36.942
- 1770	36.500	46.496
- 1860	44.000	56.050
- 1960	51.500	65.605
- 2020	59.000	75.159
- 2095	66.500	84.713
- 2170	74.000	94.267

De las curvas catódicas de cada uno de los electrodos de prueba, se determina la pendiente, para obtener la  $I_0$  corrosión y con este valor se calcula la velocidad de corrosión.

Acero sin tratamiento termoquímico:

$$I_0 = 11 \frac{\text{mA}}{2} = 0.011 \frac{\text{C}}{\text{s.cm}^2} \times \frac{1 \text{ equiv.}}{9.65 \times 10^4 \text{ C}} \times \frac{56 \text{ g Fe}}{2 \text{ equiv.}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{9.87 \text{ g}}$$

$$\frac{1 \text{ P.}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{1000 \text{ MP.}}{1 \text{ P.}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ H.}} \times \frac{24 \text{ H.}}{1 \text{ día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. = 4014.910 MPY.

Acero con tratamiento termoquímico (cementado)

$$I_0 = 15.5 \frac{\text{mA.}}{\text{cm}^2} = 0.0155 \frac{\text{C}}{\text{s.cm}^2} \times \frac{1 \text{ equiv.}}{9.65 \times 10^4 \text{ C}} \times \frac{56 \text{ g Fe}}{2 \text{ equiv.}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{9.87 \text{ g}}$$

$$\frac{1 \text{ P.}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{1000 \text{ MP.}}{1 \text{ P.}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ H.}} \times \frac{24 \text{ H.}}{1 \text{ día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. = 5657.416 MPY.

Acero con tratamiento termoquímico (nitrurado)

$$I_0 = 9.6 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} = 0.0096 \frac{\text{C}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \times \frac{1 \text{ equiv.}}{9.65 \times 10^4} \times \frac{56 \text{ g Fe}}{2 \text{ equiv.}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{9.87 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ P}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{1000 \text{ MP}}{1 \text{ P}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ H}} \times \frac{24 \text{ H}}{1 \text{ día}} \times \frac{365 \text{ días.}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. = 3503.948 MPY.

Se anexa las gráficas de cada uno de los aceros.

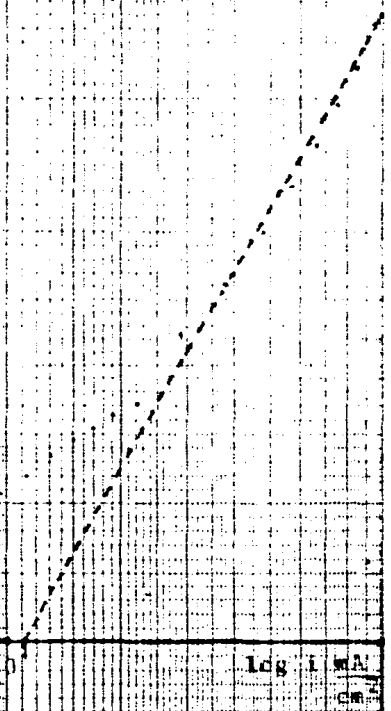
E mV  
-2300  
-2200  
-2100  
-2000  
-1900  
-1800  
-1700  
-1600  
-1500  
-1400  
-1300  
-1200  
-1100  
-1000

ACERO 8620 SIN TRATAMIENTO  
CURVA CATODICA

10<sup>-10</sup>

10<sup>-9</sup>

10<sup>-8</sup> mA  
cm<sup>2</sup>

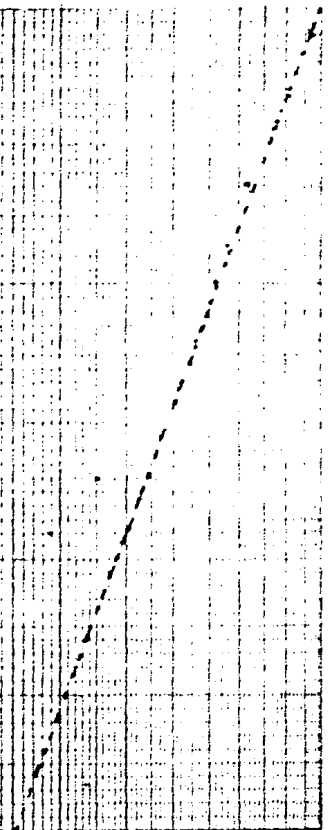


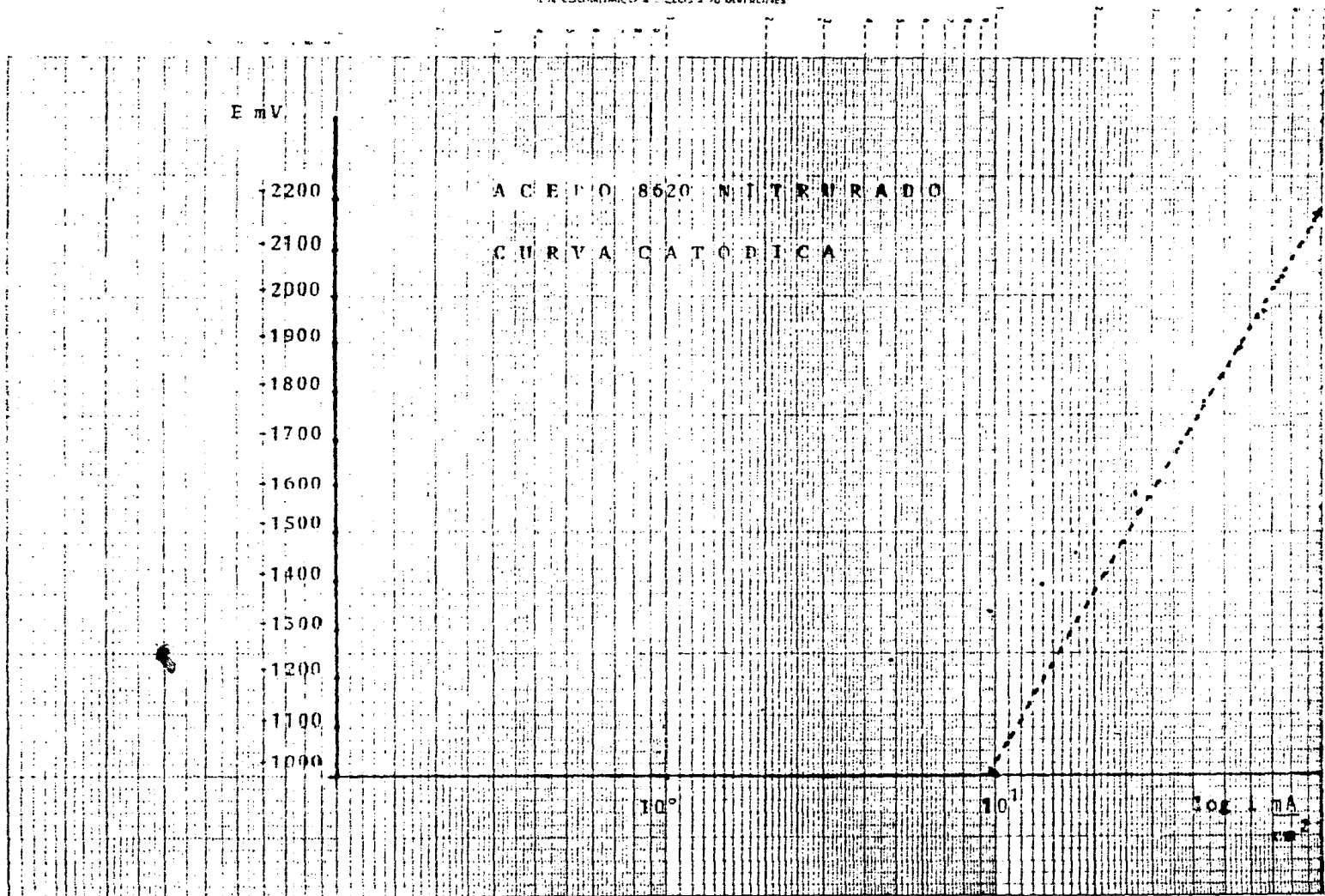
E mV

-2400  
-2300  
-2200  
-2100  
-2000  
-1900  
-1800  
-1700  
-1600  
-1500  
-1400  
-1300  
-1200  
-1100  
-1000

ACERRO 8620 CEMENTADO  
CURVA CATODICA

10<sup>-4</sup> 10<sup>-1</sup> log i  $\frac{A}{cm^2}$





E mV

400

300

200

100

0

-100

-200

-300

-400

-500

-600

-700

-800

-900

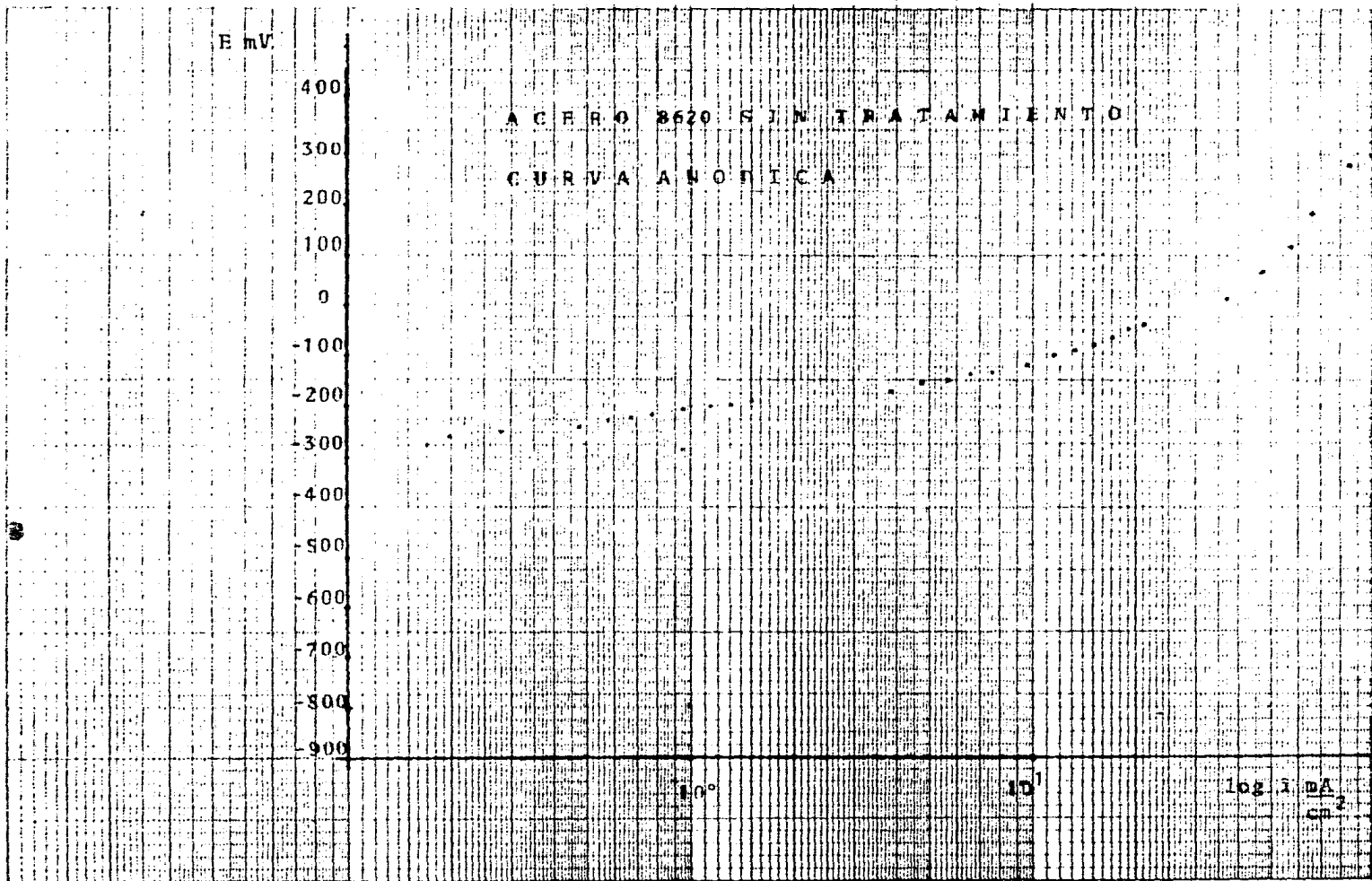
ACERO 8620 SIN TRATAMIENTO

CURVA ANODICA

10°

10

log i  $\frac{\mu A}{cm^2}$





E mV

450

350

250

150

50

-50

-150

-250

-350

-450

-550

-650

-750

-850

-950

ACERO B620 CEMENTADO

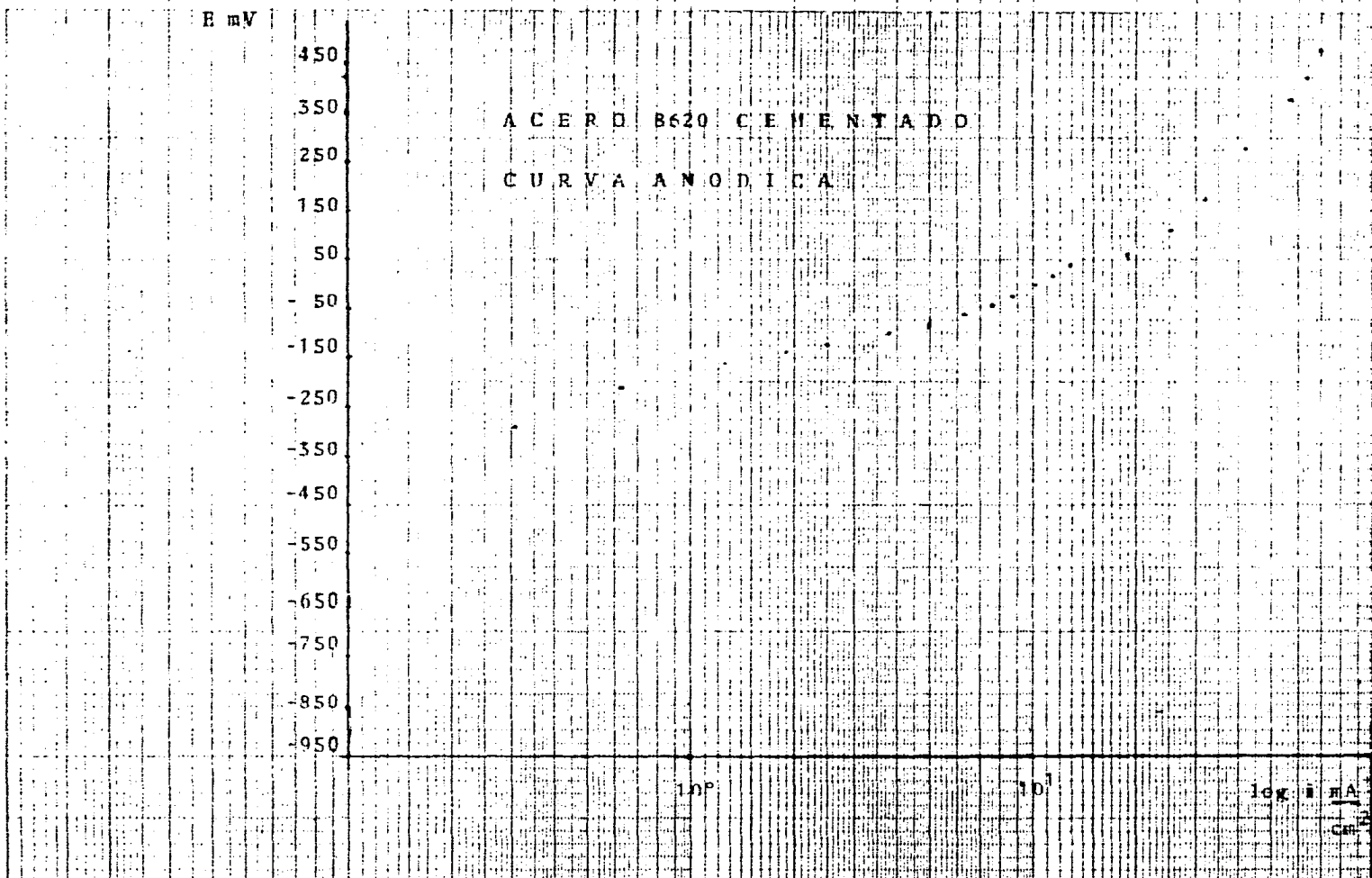
CURVA ANODICA

10<sup>0</sup>

10<sup>1</sup>

log i mA

cm



E mV

+100

0

-100

-200

-300

-400

-500

-600

-700

-800

-900

-1000

-1100

ACERO 8620 MTRURADO

CURVA ANODICA

10<sup>0</sup>

10<sup>1</sup>

log i mA

cm<sup>2</sup>

I.- Pruebas gravimétricas para determinar velocidades de corrosión.

El cálculo de la velocidad de corrosión en este caso se realizó utilizando la diferencia de peso, entre el peso inicial y el final tomando en cuenta el valor del área de las probetas de prueba.

Muestras de prueba cementadas (  $P_i - P_f$  )

$$p_1 = 0.0150 \text{ g}$$

$$p_2 = 0.0170 \text{ "}$$

$$p_3 = 0.0200 \text{ "}$$

$$P_{\text{prom}} = 0.0173 \text{ g}$$

Area aproximada de la muestra :

$$A_t = 2 \text{ II } (1.25) (1.5) + 2 \text{ II } (1.25)^2$$

$$A_t = 21.598 \text{ cm}^2 \text{ aprox.}$$

Muestras de prueba Nitruadas (  $P_i - P_f$  )

$$P_1 = 0.0110 \text{ g}$$

$$P_2 = 0.0120 \text{ "}$$

$$P_3 = 0.0110 \text{ "}$$

$$P_{\text{prom.}} = 0.0113 \text{ g}$$

Area aproximada de las muestras de prueba :

$$A_t = 2 \text{ II } (1.25) (1.25) + 2 \text{ II } (1.25)^2$$

$$A_t = 19.634 \text{ cm}^2 \text{ aprox.}$$

$$P_1 = 0.0136 \text{ g sin tratamiento}$$

$$P_2 = 0.0140 \text{ "}$$

$$P_3 = 0.0140 \text{ "}$$

$$P_4 = 0.0150 \text{ "}$$

$$A_t = 21.598 \text{ cm}^2 \text{ aprox.}$$

Vel. corr. acero sin trat. termoquímico :

$$\frac{0.0141 \text{ g}}{21.6 \text{ cm}^2} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{136 \text{ H}} \times \frac{1 \text{ P}}{9.87 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ MP}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{24 \text{ H}}{1 \text{ P}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. P.A. = 1.677 MPY

Vel. corr. acero cementado :

$$\frac{0.0173 \text{ g}}{21.6 \text{ cm}^2} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{136 \text{ H}} \times \frac{1 \text{ P}}{9.87 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ MP}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{24 \text{ H}}{1 \text{ P}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. P.A. = 2.057 MPY

Vel. corr. acero nitrurado :

$$\frac{0.0113 \text{ g}}{19.6 \text{ cm}^2} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{136 \text{ H}} \times \frac{1 \text{ P}}{9.87 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ MP}}{2.54 \text{ cm}} \times \frac{24 \text{ H}}{1 \text{ P}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Vel. corr. P.A. = 1.481 MPY

## ANALISIS DE RESULTADOS

### A.- Selección del material de trabajo.

La selección del acero de trabajo se realizó en base al criterio adquirido del estudio de los tratamientos termoquímicos, en el que se considera las características que deben tener los aceros que se emplean en este tipo de tratamientos, encontrándose que el acero que cumple con estos requisitos de una forma satisfactoria es el acero LEO VIC tipo AISI 8620. Sin embargo, tenemos que considerar que esto no es una garantía de que el tratamiento termoquímico a aplicar va ser bueno, ya que el mecanismo de estos tratamientos depende de otras variables como son la temperatura, concentración, tiempo, etc., que sino se manejan en forma apropiada pueden provocar que el tratamiento no sea satisfactorio.

### B.- Análisis químico.

Los resultados obtenidos de esta prueba sirvieron para corroborar el análisis químico proporcionado por el fabricante. Además de conocer el porcentaje de cada uno de los elementos de aleación en el acero de trabajo, esto es, los tratamientos termoquímicos exigen un determinado porcentaje de elementos de aleación en el acero de trabajo.

### C.- Metalografía.

Los resultados arrojados por la prueba metalográfica fueron muy importantes ya que nos ayudó a conocer la historia térmica del material de trabajo, su tamaño de grano e inclusiones.

Esto es necesario conocer, para saber como proceder en el momento de aplicar el tratamiento termoquímico.

D.- Prueba de dureza.

Los resultados de dureza obtenidos muestran que el acero de trabajo tiene una dureza superficial homogénea, también este resultado nos sirve como un control para saber cuanto aumentó la dureza superficial del acero de trabajo una vez que se aplicó el tratamiento termoquímico correspondiente:

E.- Determinación del potencial de equilibrio.

Este resultado que se obtuvo en ésta prueba es importante ya que nos proporciona información, para saber si el material puede ser corroído por un medio ambiente determinado. Además con el valor de potencial obtenido podemos comparar, si hay un cambio en el potencial del acero de trabajo una vez que se aplicó el tratamiento termoquímico correspondiente.

F.- Selección y aplicación de los tratamientos termoquímicos.

Los resultados obtenidos en cada una de las capas obtenidas termoquímicamente muestran que el objetivo pretendido no se logró alcanzar en ninguno de los dos casos, pero si podemos decir que son representativos ya que caen dentro del intervalo de profundidades de capas obtenidas por medio de la cementación líquida y nitruración líquida. El que no se halla alcanzado la profundidad de capa deseada lo atribuimos a que alguna de las variables del mecanismo de los tratamientos termoquímicos no fue controlada de manera adecuada, como pudo haber sido la concentración de las

sales de cementación, el tiempo de permanencia, etc.

G.- Microdureza de las capas obtenidas termoquímicamente.

Los resultados obtenidos de las capas cementadas y nitruradas en el acero de trabajo muestran, que la microdureza en el acero nitrurado es mayor que la que se obtuvo en el acero que fue cementado. En consecuencia el acero que presenta una mayor resistencia superficial es el acero que fue nitrurado.

H.- Ensayos de polarización potenciodinámicos para evaluar velocidades de corrosión.

El análisis que podemos hacer de las curvas de polarización anódica y catódica es el siguiente:

1.- De acuerdo a los valores obtenidos de velocidades de corrosión en el acero de trabajo con tratamiento y sin tratamiento termoquímico, podemos decir que el acero que fue cementado es el que presenta mayor actividad ante el fenómeno de corrosión, siguiéndole el acero sin tratamiento termoquímico y el acero que fue nitrurado es el que presenta una mayor resistencia a la corrosión.

2.- Las curvas de polarización anódica presentan una conducta monótona de potencial contra densidad de corriente, al aumentar el potencial en la dirección anódica se observa un incremento en la corriente. O sea, en mayor o menor grado las 3 curvas presentan una conducta semejante o parecida. Es decir que a sobrepotenciales bajos la velocidad de disolución es alta, mientras que a sobrepotenciales elevados existe una restricción en la velocidad de disolución, que se manifiesta por un aumento en la

pendiente de las curvas. De modo general se puede decir que el acero 8620 no posee elementos de aleación en cantidad suficiente como para provocar una pasivación, ejemplo; cromo, níquel, etc., por tanto el fenómeno de pasivación no es observado en este acero.

De modo particular, se observa que el acero sin tratamiento es el que alcanza una velocidad de disolución mayor para un valor de sobrepotencial dado, siguiéndole el acero cementado y por último el acero nitrurado. Esto hace pensar que los datos arrojados por la curva anódica del acero nitrurado está de acuerdo a los valores obtenidos por extrapolación de Tafel, esto es, el proceso de nitruración efectivamente aumenta la resistencia a la corrosión del acero. Para el acero cementado el análisis de Tafel daba una velocidad de corrosión mayor que la del acero sin tratamiento termoquímico y mayor que la del acero que fue nitrurado, este se explica por la formación de la capa cementada, ya que al formarse una capa de carburos en la superficie del material provee áreas anódicas eficientes. Sin embargo, la conducta anódica muestra que se disuelve menos que el acero sin tratamiento, pero más que el acero que fue nitrurado. Esto nos hace pensar que la razón es la formación de un producto superficial de corrosión de este acero, lo que provoca después de una disolución activa una disminución en su velocidad de disolución. Esto se comprobó al término de los ciclos anódicos en donde la superficie del acero cementado terminó con un producto obscuro de corrosión.

#### I.- Pruebas gravimétricas de corrosión para determinar velocidades de corrosión:

Los resultados obtenidos de estas pruebas muestran que



los valores obtenidos de velocidad de corrosión acumulada, muestran una conducta semejante a los obtenidos por medio del método de extrapolación de Tafel. Observándose que el acero nitrurado es el que presenta mayor resistencia a la corrosión, siguiéndole el acero sin tratamiento y por último el acero cementado.

## CONCLUSIONES

- 1.- De los tratamientos termoquímicos de cementación y nitruración líquida ensayados en el acero tipo AISI 8620, el estudio electroquímico realizado demuestra que este acero no manifiesta posibilidad de pasivación. Ni aún a potenciales anódicos elevados.
- 2.- Sin embargo, del análisis de las curvas de polarización catódica podemos decir que el tratamiento termoquímico que presenta la menor velocidad de corrosión, dentro del rango de potencial estudiado, es el tratamiento de nitruración líquida; por ello se considera que este tratamiento termoquímico es el que confiere una mayor resistencia a la corrosión al acero de trabajo.
- 3.- El hecho de que el tratamiento de nitruración líquida sea el que confiere una mayor resistencia a la corrosión al acero de trabajo, parece ser consecuencia del potencial adquirido en la capa, obtenida por medio de este tratamiento.
- 4.- La diferencia de fases presentes en el material que fue tratado termoquímicamente, no da lugar a una fuerza electromotriz considerable.
- 5.- Finalmente, en cuanto a la propiedad mecánica de dureza es claro que el tratamiento de nitruración líquida es el que confiere una mayor resistencia superficial en el material de trabajo.

## BIBLIOGRAFIA GENERAL

- 1.- Denaro and R.A. Elementary Electrochemistry. Butherworths, Londres 1971.
- 2.- GACETA FACULTAD DE QUIMICA. Abril de 1984.
- 3.- Gabe, R.C. Fundamentos del tratamiento y protección de superficies metálicas. Alhambra, Madrid 1975.
- 4.- Villarreal Domínguez, Enrique. Fundamentos de Electroquímica Editorial Libros de México D.F. 1970.
- 5.- Pourbaix Marcel. Lectures of electrochemical corrosion. ---- Plenum Press New York, 1973.
- 6.- Uhlig, H.H. Corrosion of control de corrosion. Urmo, Bilbao 1975.
- 7.- Fontana, M. G. and Green, D.N. Corrosion engineering. McGraw Hill, New York 1967.
- 8.- Guy, A. G. Fundamentos de Ciencia de Materiales. McGraw-Hill. México, D. F. 1980.
- 9.- Avner, H. Sidney. Introducción a la metalúrgia física. McGraw Hill. Impresora y litografía Azteca, S.A. México D.F. 1977.
- 10.- Lasheras Esteban J. Tecnología del acero.Edit.CEDEL,1978.
- 11.- Apraiz,Barrero J. Aceros especiales.Edit.Dossat.Madrid 1975.
- 12.- Aceros de Llodio,S.A. Aceros de cementación.URMO, S.A. - España 1975.
- 13.- Aceros de Llodio,S.A. Tratamientos térmicos de herramientas de acero, URMO,S.A. España 1978.
- 14.- Matking Bsc, B. Met, Fim. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels.A.S.M. 1978.

- 15.- Kar,Erik Thening.Steel and its Heat Treatment.Treatment  
Bofors Handbook. BUTTERWORTHS, USA - Boston,Reimpresión  
1978.
- 16.- A.S.M.,Metal Handbook. 8th Edition,ASM,USA.Vol.7,pp.123-149  
1974.
- 17.- A.S.M. Metal Handbook,8th. USA. Vol.2 pp.45-59.(1974).
- 18.- A.S.M. Metal Handbook, 8th. Edition,USA. Vol. 10,pp.230-  
239.(1974)