

24/15



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

SUSCEPTIBILIDAD DE REFUERZOS DE ACEROS  
MICROALEADOS A FALLAR POR CORROSION  
BAJO TENSION EN ESTRUCTURAS PRETENSADAS  
DE CONCRETO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

MARIA ELENA SANCHEZ VERGARA

MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



1989

OCT. 30 1989



## **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.

# I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
I. Resumen . . . . .	1
II. Introducción . . . . .	3
III. Antecedentes . . . . .	7
1. Corrosión en Estructuras de Concreto Armado . . . . .	
1.1 Introducción . . . . .	7
1.2 Pasividad . . . . .	10
1.3 Factores Desencadenantes de la Corrosión . . . . .	12
1.4 Factores Acelerantes de la Corrosión . . . . .	13
1.5 Mecanismo de la Corrosión . . . . .	14
2. Corrosión por Cloruros y por Carbonatación . . . . .	17
2.1 Corrosión por cloruros . . . . .	17
2.2 Efecto inhibidor de los $\text{NO}_2^-$ . . . . .	21
2.3 Corrosión debida a la Carbonatación del Concreto . . . . .	25
2.4 Dosificación de Cemento. . . . .	29
2.5 Espesor de Recubrimiento. . . . .	32
3. Formas de Evaluar la Corrosión de las Armaduras . . . . .	35
3.1 Métodos Artificiales de Envejecimiento . . . . .	35
3.2 Métodos Electroquímicos . . . . .	35

3.3	Medidas Protectoras . . . . .	36
4.	Corrosión Bajo Esfuerzo. . . . .	38
4.1	Introducción . . . . .	38
4.2	Agrietamiento de Corrosión Bajo Esfuerzo . . . . .	39
4.3	Formas de Propagación de la Corrosión Bajo Esfuerzo . . . . .	40
IV.	Desarrollo Experimental . . . . .	44
1.	Material Engrasado . . . . .	44
2.	Medios empleados . . . . .	46
3.	Técnicas utilizadas . . . . .	50
4.	Equipo y Accesorios . . . . .	53
5.	Sustancias Químicas . . . . .	54
V.	Resultados y Discusión . . . . .	58
VI.	Conclusiones . . . . .	121
VII.	Bibliografía . . . . .	122

## RESUMEN

El presente estudio consistió en analizar la susceptibilidad a fallar por Corrosión bajo Tensión que presenta un refuerzo pretensado embebido en concreto bajo la acción de diversos parámetros, algunos de los cuales, se encuentran presentes en condiciones reales. Para la realización del presente, se recurrió a técnicas electroquímicas, tales como la Voltametría Cíclica y Estudios Potenciodinámicos.

Los experimentos se realizaron en dos medios diferentes: En soluciones de Hidróxido de Calcio Saturado y en Sistemas reales, constituidos por Refuerzos Metálicos Embebidos en Concreto. Estos sistemas fueron sometidos a diferentes condiciones de temperatura, velocidad de barrido y concentración de cloruro de calcio, con el fin de conocer ampliamente el comportamiento de la capa pasiva y en general, los diversos cambios fisicoquímicos producidos por las reacciones de hidratación del concreto en todo el sistema.

Debido a que en general, fenómenos tales como, la Corrosión Bajo Tensión se producen a largo plazo, se diseñaron experimentos a 3 meses en los cuales se analizó periódicamente la susceptibilidad de los refuerzos metálicos a fallar por este tipo específico de Corrosión.

Los refuerzos metálicos estudiados son de acero alta resistencia baja aleación ( $42 \text{ Kg/mm}^2$ ) colados últimamente en SICARTSA como una alternativa para la industria de la construcción, ya que, éstas varillas, debido a sus propiedades, son consideradas como "antisísmicas", de aquí el interés del presente estudio.

De los resultados obtenidos se concluye que el sistema CONCRETO/REFUERZO METALICO, falla debido a una oxidación constante en la varilla; ocasionada en gran medida por una adsorción de iones cloruro que impide que se formen capas pasivas que protejan al material. El uso de velocidades de barrido lentas hacen más fácil la detección de éste fenómeno.

Esta oxidación en la varilla o refuerzo metálico ocasiona además, que los productos de la corrosión agrieten el concreto debido a que como tales, ocupan mayor volumen que el que tenían originalmente, ocasionando ésto que el sistema sea más sensible a corroerse.

En general, altas temperaturas, así como la presencia de iones agresivos como los cloruros promueven la corrosión (por cloruros) y aceleran la formación de grietas que dan lugar, posteriormente, a una falla por corrosión bajo tensión en la varilla de acero estudiada.

## INTRODUCCION.

Los terremotos que sacudieron varias zonas de la República Mexicana, incluyendo el Distrito Federal, en septiembre de 1985; uno de ellos en septiembre 19 y el otro al día siguiente, motivaron la realización de una gran cantidad de estudios<sup>(41)</sup> y de una revisión profunda de las normas y procedimientos relacionados con la construcción en estas zonas<sup>(47)</sup>.

El elemento de construcción más importante se denomina "concreto armado" y es un material compuesto por concreto y armadura o varilla de acero, asociados de modo que forman un sólido único desde el punto de vista mecánico.

A nivel experimental en 1986, SICARTSA produjo una cola da de varilla de baja aleación dentro de la Norma B-457 con 0.24% C, 1.28% Mn, 0.31% Si, 0.014% P, 0.03% S, 0.04% V y 0.04% Nb. Esta varilla, presenta un comportamiento mecánico apropiado para estructuras dúctiles de concreto reforzado. Exhibe un límite elástico claramente definido y tiene un límite de cedencia amplio. Es dúctil y tenaz. En términos de soldabilidad, por su composición química se ubica aceptablemente en el diagrama de carbono contra carbono equivalente<sup>(41)</sup>.

Casi toda la producción de varilla en México, se produce de grado 42 ( $42 \text{ Kgf/mm}^2$ ) y la mayor parte está comparada bajo la Norma B-6. El acero con el que se fabrica es una aleación de hierro, carbono, manganeso y silicio, principalmente. Recientemente se expidió en México la Norma B-457, equivalente a la especificación A-706 de Estados Unidos<sup>(41)</sup> (48). Se especifica un sólo nivel de resistencia mecánica que es el grado 42 ( $42 \text{ Kgf/mm}^2$ ).

Al limitarse el contenido de los elementos aleantes más comunes, la resistencia del acero sería insuficiente para su perar los niveles que establece el grado 42. Como alternativa para subir la resistencia, la norma propone una serie de elementos entre los que se encuentran níquel, cromo, mo libdeno, vanadio, niobio, circonio y titanio. Las cantidades de aleantes son relativamente bajas y el costo de la va rilla también lo es.

En estructuras debidamente diseñadas y elaboradas, las varillas de acero se conservan intactas en el concreto <sup>(2)</sup> pues en dicho medio, el conjunto de condiciones es tal, que el acero resulta protegido contra la corrosión por pasiva - ción. Esta pasivación se atribuye a una capa superficial de óxido submicroscópica y libre de poros, que impide casi totalmente la reacción anódica de oxidación <sup>(3)</sup> <sup>(4)</sup>

Existen circunstancias bajo las cuales, las películas pa sivas se rompen localmente o en amplias zonas, provocando un deterioro acelerado de las estructuras. Para que este riesgo potencial se convierta en real, es imprescindible la presencia de algún factor "desencadenante" que genere sobre el metal zonas con una diferencia de potencial tal que, la corriente provocada pueda romper la capa pasiva. Por otro lado, la cinética de ataque durante la corrosión, resulta condicionada por los factores "acelerantes" que controlan la corrosión debido a que influyen sobre la velocidad de ésta. Además de estos dos tipos de factores, existen los factores intrínsecos de cada una de las partes del sistema ACERO/ CON CRETO/ MEDIO DE SERVICIO, que también contribuyen en el tiem po total del proceso de corrosión.

En las estructuras de "concreto armado" donde los refuer zos se encuentran pasivados, el tipo de corrosión que se pue



de presentar es el localizado, ya sea por picaduras o bajo esfuerzo.

Para que exista la Corrosión Bajo Esfuerzo; se tienen que conjuntar, un metal susceptible a sufrir este tipo de ataque y un medio específico.

Los cloruros son los agentes agresivos más peligrosos para las varillas en el concreto. Su presencia en cantidad suficiente, produce la rotura local de la capa pasiva que el acero desarrolla en la elevada alcalinidad aportada por el cemento. El contenido en ión cloruro, en la masa del concreto armado y pretensado, está limitado rigurosamente por las normas de los distintos países.

La cantidad de cloruros presente en la capa más superficial del concreto, depende fundamentalmente de la relación cemento/arena y no parece existir una relación directa con la porosidad y/o relación agua/cemento. Así mismo, existe una relación entre porosidad y permeabilidad a los cloruros, si bien no hay una proporcionalidad cuantitativa <sup>(8)</sup>.

La protección eficaz de las varillas del concreto, contra la corrosión, no requiere la adopción de medidas especiales; con la adopción de una relación agua/cemento reducida, la aplicación de un espesor suficiente de concreto cuidadosamente compactado, exento de cloruros y con elevada reserva alcalina, es posible proteger las armaduras durante períodos que satisfacen plenamente las exigencias de la industria de la construcción <sup>(2)</sup>.

Debido a que no existe en la literatura información del comportamiento de la falla del sistema de "concreto armado" con la varilla de acero alta resistencia, baja aleación, se

dio origen al estudio que se genera en este trabajo, el cual tiene como objetivo; conocer la susceptibilidad que tiene esta varilla, a fallar por Corrosión Bajo Tensión.

La susceptibilidad que tiene este material a fallar por el tipo de corrosión anteriormente mencionado, será evaluada por técnicas electroquímicas, las cuales simulan las condiciones químicas y electroquímicas necesarias para que dicho fenómeno ocurra.

**CAPITULO I**  
**ANTECEDENTES**

## 1.- CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO.

### 1.1 Antecedentes.

Se denomina "concreto armado" al material compuesto por concreto y armadura o varilla de acero, asociados de modo que forman un sólido único desde el punto de vista mecánico. El "concreto armado" se puede clasificar según el grado de esfuerzo al acero de refuerzo, de la siguiente manera :

- I) Concreto Reforzado. Concreto y acero de bajo carbono sin previo esfuerzo.
- II) Concreto Preesforzado. Concreto y acero de alta resistencia que es intencionalmente tensionado y se divide en:
  - . Concreto Pretensado. Donde el refuerzo de acero es puesto en tensión antes del colado de concreto.
  - . Concreto Postensado. Donde el refuerzo de acero es puesto en tensión después del curado de concreto.

El concreto u hormigón<sup>(1)</sup>, es un material sintético producido cuando el cemento se mezcla con agregados finos como arena, agregados gruesos como la grava y agua. El uso al que se destina el concreto es el que determina la proporción o relación agua/cemento (a/c) y cemento/arena (c/a), así como también el tipo de cemento y la dosificación de los agregados finos y gruesos. El cemento que constituye la parte más importante de la mezcla que forma el concreto, es un producto de la calcinación de una mezcla íntima de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y arcilla ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un horno rotatorio a temperatura de semifusión, aproximadamente  $1,500^\circ\text{C}$ . El producto de esta calcinación, llamado "clinker", se muele con un pequeño porcentaje de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) hasta un polvo fino. El cemen

to de mayor uso es el cemento Portland, aún cuando se fabrican otros tipos de cemento.

Las varillas del concreto armado<sup>(2)</sup>, consisten normalmente en redondos de acero de baja aleación laminados en caliente (dureza natural) y, en ocasiones, endurecidos posteriormente por deformación en frío. Los aceros empleados en armaduras para pretensado, suelen contener un 0.7-0.9%C y recibir un tratamiento térmico, un trefilado y, finalmente, un tratamiento de eliminación de tensiones internas.

A la rápida aceptación del concreto armado, ha contribuido en gran medida, el feliz complemento de propiedades de dos materiales relativamente baratos: Acero y concreto, que reunidos en un material mixto, le dotan de la destacada resistencia a la tracción del primero y de la buena resistencia a la compresión del segundo. La excelente unión entre ambos, garantiza la transferencia de propiedades de un material al otro y facilita, además, la acción protectora del concreto contra la corrosión del acero. Esta acción protectora es de doble naturaleza:

- a) Por una parte, cuando el concreto se elabora correctamente, debido a su elevado pH ( $\approx 12.6$ ), mantiene en estado pasivo a las armaduras o varillas presente.
- b) Por otra parte, el concreto supone un considerable impedimento físico a la penetración por difusión, de oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas hasta la superficie del acero.

Como consecuencia, muchas estructuras de concreto armado se muestran exentas de corrosión, aún después de períodos muy prolongados de servicio. Cuando tienen lugar fenómenos

de corrosión en las varillas, éstos están normalmente asociados con defectos de construcción, un medio ambiente especialmente agresivo o con cambios en las condiciones de servicio de las estructuras. En estos casos, generalmente se produce una disminución de las características mecánicas de éstas; perjuicios que con frecuencia son muy difíciles de evaluar. Las reparaciones que pueden derivarse, son normalmente muy costosas y, por tanto, es aconsejable evitar la explosión a condiciones que puedan ocasionar tales daños.

Si bien el concreto es un material resistente y durable existen factores físicos y químicos en el medio de servicio que pueden contribuir a su deterioro o falla <sup>(1)</sup>. Frecuentemente una falla prematura puede atribuirse a la baja calidad del concreto. En otras circunstancias, un concreto de buena calidad experimenta deterioro debido principalmente a los siguientes factores :

- . Ciclos de hielo y deshielo.
- . Ciclos térmicos y de humedad.
- . Deterioro químico.
- . Cargas mecánicas.
- . Corrosión del acero embebido en el concreto.

#### Ciclos de Hielo y Deshielo.

El mecanismo de este daño es complejo y debe ser considerado con respecto a la pasta de cemento y a los agregados del concreto.

#### Ciclos Térmicos y de Humedad.

Cambios drásticos de temperatura y humedad, resultan en cambios en el volumen del concreto, los cuales pueden fisurarlo.

### Deterioro Químico.

Existe una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas que pueden atacar al concreto si existen condiciones favorables de humedad.

### Cargas Mecánicas.

El concreto falla cuando las cargas mecánicas exceden la capacidad para la que estuvo diseñado.

En este caso, y debido a que el presente trabajo se basa en uno de muchos fenómenos de corrosión localizada del acero embebido en concreto, se hablará con más detalle acerca de este punto.

#### 1.2 Pasividad.

No es de extrañar que, en estructuras debidamente diseñadas y elaboradas, las varillas de acero se conserven intactas en el concreto<sup>{2}</sup>, pues en dicho medio el conjunto de condiciones es tal, que el acero resulta protegido contra la corrosión por pasivación.

Esta pasivación se atribuye a una capa superficial de óxido submicroscópica y libre de poros, que impide casi totalmente la reacción anódica de oxidación<sup>{3}</sup> <sup>{4}</sup>. Contrariamente, la buena conductividad electrónica de dicha capa, permite que el proceso catódico de reducción de oxígeno se realice sin grandes impedimentos cinéticos.

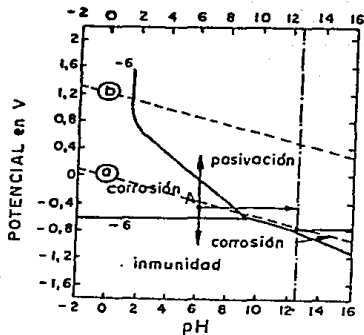


FIGURA No. 1 CONDICIONES TEORICAS DE CORROSION, INMUNIDAD Y PASIVACION DEL SISTEMA HIERRO-AGUA A 25°C

De la figura 1 se puede observar que, al pH propio del concreto, los estados posibles del acero son el de inmunidad o el de pasivación, si bien el normal, a los potenciales que exhiben las armaduras es este último. Normalmente la alta alcalinidad del concreto inhibe la corrosión del acero embebido. En la práctica, la corrosión se inicia cuando la alcalinidad del concreto se reduce y la capa de óxido se deteriora, por ejemplo debido al bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ); o en la presencia de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), aún cuando la alcalinidad se mantenga relativamente alta.

Si se tiene un metal susceptible de pasivarse en el medio considerado, pero en condiciones tales como las del punto (a) de la figura. las formas de protegerlo contra la corrosión, además de la de aislarlo del medio con recubrimientos adecuados, se reduce a tres :

- a) Reducir su potencial hasta situarlo en la zona de inmunidad.



- b) Elevar su potencial hasta la zona de pasivación y,
- c) Aumentar el pH de la solución hasta alcanzar la zona de pasivación.

El primer caso corresponde a la protección catódica, el segundo a la protección anódica y el tercero es el tipo de protección que ofrece el concreto a las varillas de acero embebidas. En general, para evitar la corrosión en las varillas de acero, aparte de los métodos anteriormente mencionados, existen diferentes métodos suplementarios de protección, tales como el uso de aditivos inhibidores, resinas epóxicas, galvanización, etc. Ninguno de ellos está sancionado por una larga práctica ni son aplicables a todas las circunstancias y atmósferas. Es pues necesario conocer muy bien las particularidades de cada caso desde el punto de vista teórico, antes de recomendar alguno en particular<sup>(5)</sup>.

Es un hecho perfectamente conocido que un concreto correctamente dosificado y ejecutado, garantiza la pasividad de las varillas y con ello, su durabilidad<sup>(6)</sup>.

### 1.3 Factores Desencadenantes de la Corrosión.

Existen circunstancias bajo las cuales, las películas pasivantes se rompen localmente o en amplias zonas, provocando un deterioro acelerado de las estructuras. Para que este riesgo potencial se convierta en real, es imprescindible la presencia de algún factor "desencadenante" de la corrosión, capaz de provocar la transición pasividad-actividad en las varillas. Los factores desencadenantes de la corrosión se definen como aquellos que son capaces de generar sobre el metal, zonas con una diferencia de potencial tal que: la corriente provocada pueda romper la capa pasiva que normalmente lo recubre. Existen varios factores desencadenantes

tales como:

- . Defectos superficiales del acero.
- . Microestructura del acero.
- . Pilas de pH o aireación diferencial.
- . Corrientes parásitas.
- . Pilas galvánicas.
- . Descenso del pH habitual del concreto.
- . Cantidad crítica de  $O_2$  y humedad.
- . Dosis suficientes de iones despasivantes; en particular  $SO_4^{2-}$  y  $S^{2-}$ .

Los responsables de la inmensa mayoría de las fallas son: La presencia, en cantidad suficiente de iones despasivantes, esencialmente los cloruros capaces de destruir localmente la película pasivante y la carbonatación del concreto que disminuye el pH (7).

#### 1.4 Factores Acelerantes de la Corrosión.

Ahora bien, el que la corrosión se desencadene no significa que progrese a una velocidad peligrosa, la cinética de ataque resulta decisivamente condicionada por los factores "acelerantes", que no pueden por sí solos (en ausencia de los factores desencadenantes) provocar el fenómeno de ruptura, pero que lo controlan cuando se produce debido a que influyen sobre la velocidad del proceso de corrosión, como se mencionó anteriormente. Los factores acelerantes por excelencia son:

- El oxígeno disuelto que se encuentra presente en la fase líquida de los poros, y,
- La humedad que garantiza la presencia de dicha fase.

Sin la presencia simultánea de oxígeno y humedad en el concreto, no es termodinámicamente posible la corrosión de las armaduras y, sin sobrepasar una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle a una velocidad apreciable<sup>(7)</sup>.

Los factores desencadenantes y acelerantes son los necesarios para que se desarrolle el proceso de corrosión, pero además, existen los factores intrínsecos de cada una de las partes del sistema ACERO/CONCRETO/MEDIO DE SERVICIO, que también contribuyen en el tiempo total del proceso de corrosión.

#### 1.5 Mecanismo de la Corrosión.

En las estructuras de concreto armado, donde los refuerzos se encuentran previamente pasivados, el tipo de corrosión que se puede presentar es el localizado, ya sea por picaduras o bajo esfuerzo. Para que aparezca éste último tipo de corrosión se tiene que conjuntar un metal susceptible a sufrir este tipo de ataque y un medio específico, como por ejemplo, los aceros de alta resistencia en concreto presforzado sujetos a una elevada tensión mecánica y un medio agresor específico (en este caso el concreto).

El daño del concreto resulta de un esfuerzo residual debido al incremento de volumen ocupado por el refuerzo al corroerse, ya que los productos de corrosión del acero ocupan mayor volumen que el del acero del que provienen, provocando el agrietamiento y fractura del concreto.

Ahora bien, si el pH del concreto disminuye por una neutralización, entonces la capa pasiva del acero desaparece y se manifiesta una corrosión generalizada.

Las reacciones que se verifican en el proceso de corro -

sión de una varilla de acero embebido en concreto pueden es -  
quematzarse de la siguiente manera :

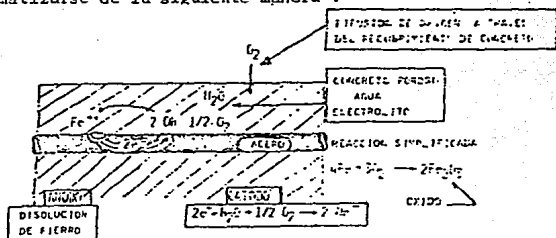


FIGURA No. 2 MODELO SIMPLIFICADO DE LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO.

Y si se representan estas reacciones en un diagrama de Evans, resultaría un diagrama como el de la figura 3.

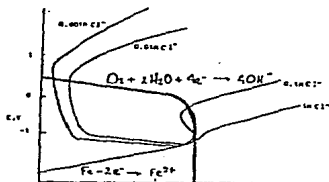


FIGURA No. 3 DIAGRAMA DE EVANS ESQUEMATICO PARA LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN CONCRETO.

El proceso de corrosión del refuerzo de acero embebido en estructuras de concreto, debe contemplarse con una visión en conjunto de todos los factores que conforman el sistema ya que, aún en los casos más simples, es extremadamente complicado y está fuertemente influenciado por numerosos factores de pendientes del concreto, del refuerzo metálico y del medio de servicio :

**FACTORES DEPENDIENTES DEL CONCRETO.**

**FACTORES DEPENDIENTES DEL REFUERZO METALICO**

**FACTORES DEPENDIENTES DEL MEDIO DE SERVICIO.**

Permeabilidad.  
(relación a/c,  
c/arena; compac-  
tación; curado).

Naturaleza química del  
refuerzo (composición)

Humedad relativa.

Porosidad

Naturaleza física del  
refuerzo (microestruc-  
tura).

Degradación bio-  
lógica.

Espesor del  
recubrimiento.

Condición superficial  
del refuerzo (tipo de  
óxido superficial).

Acción de diversas  
sustancias como:  
 $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $O_2$   
y  $CO_2$ .

Tipo de cemento.

Solicitaciones mecáni-  
cas en el refuerzo -  
(tensión, compresión  
y torsión).

Corrientes pará-  
sitas.

Agregados.

Aditivos.

Puesta en obra.

## 2.- CORROSION POR CLORUROS Y POR CARBONATACION.

### 2.1 Corrosión por Cloruros.

Como se mencionó con anterioridad, uno de los factores desencadenantes de la corrosión del acero es el ión cloruro. Los cloruros son los agentes agresivos más peligrosos para las varillas en el concreto. Su presencia en cantidad suficiente, produce la rotura local de la capa pasiva que el acero desarrolla en la elevada alcalinidad aportada por el cemento (8).

El contenido del ión cloruro, en la masa del cemento - armado y pretensado, está limitado rigurosamente por las normas de los distintos países. A pesar de ello, el estudio de sus efectos sigue estando de actualidad entre los especialistas del concreto, por su capacidad de penetración a través de la red de poros de concretos situados en ambientes marinos (9,11).

Los iones cloruro pueden introducirse al concreto dentro de las materias primas (12) :

- 1) Como aditivo del concreto, ya que es uno de los más conocidos acelerantes del fraguado y generalmente es agregado en forma de  $\text{CaCl}_2$  (cloruro de calcio) hasta un porcentaje del 2% en peso de cemento. Los cloruros también pueden estar presentes en otros tipos de aditivos como los reductores de agua.
- 2) Como contaminante del agua de amasado, ya que algunos tipos de agua pueden contener gran cantidad de cloruros. En algunos lugares se utiliza agua de mar para amasar el concreto.

- 3) Con los agregados porosos, ya que éstos pueden contener grandes cantidades de cloruros.

También pueden encontrarse presentes porque penetren desde el exterior :

- 4) Los cloruros pueden provenir de las sales de deshielo usadas en los caminos y carreteras, salmueras industriales, brisa marina, agua de mar, niebla o vapores y difundir desde el exterior a través del sistema capilar del concreto.

Existen tres teorías modernas para explicar los efectos del ión cloruro en la corrosión del acero <sup>(13)</sup>:

#### Teoría de la Adsorción.

Los iones cloruro son adsorbidos en la superficie metálica en competencia con el  $O_2$  disuelto y los iones  $OH^-$ . Los iones cloruro promueven la hidratación de los iones metálicos facilitando así la disolución del metal.

#### Teoría de la Capa de Óxido.

Esta teoría postula que los iones cloruro penetran la capa de óxido protector sobre el acero a través de algunos poros o defectos en ella, mucho más fácilmente que otros iones de mayor tamaño como por ejemplo: Los iones  $SO_4^{2-}$ . Como consecuencia, los iones cloruro pueden dispersar coloidalmente la capa de óxido, haciéndola más fácilmente penetrable.

#### Teoría del Complejo Transitorio.

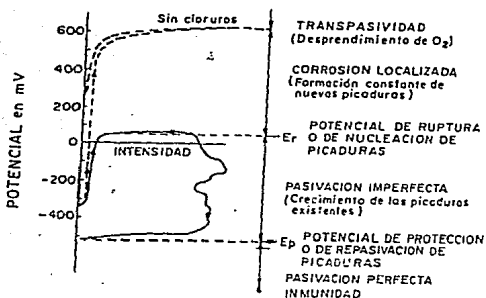
De acuerdo con esta teoría, los cloruros compiten con los hidróxidos por los iones ferrosos producidos por la corrosión.

sión, formándose un complejo soluble de hierro-cloruro. Este complejo puede difundir lejos del ánodo, destruyendo la capa protectora de óxido y permitiendo que la corrosión continúe. A cierta distancia del electrodo, el complejo se destruye, precipitando  $Fe(OH)_2$  (hidróxido de hierro) y el ión cloruro queda libre para transportar más iones ferrosos del ánodo.

Si la corrosión no es controlada, cada vez más iones ferrosos continúan migrando hacia el concreto desde los sitios donde se lleva a cabo la corrosión, y al reaccionar con el  $O_2$  se forman óxidos de hierro superiores, que dan como resultado un incremento de cuatro veces el volumen del metal disuelto, provocando esfuerzos internos que eventualmente fracturan al concreto <sup>(12)</sup>.

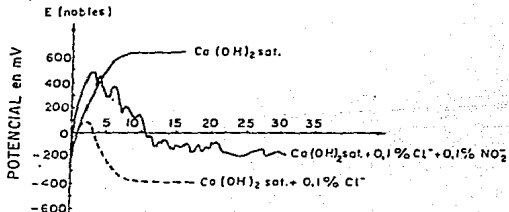
El efecto de los cloruros se estima normalmente por ensayos electroquímicos, siendo los más frecuentes, aparte de la simple medida de potencial, el trazado de las curvas de polarización potenciodinámicas y de las curvas potencial-tiempo bajo una densidad de corriente constante (ensayos galvanostáticos). En el primer tipo de curvas se revela la influencia de los cloruros por un aumento brusco de la densidad de corriente antes de alcanzar el potencial correspondiente al desprendimiento de oxígeno, apareciendo un potencial crítico denominado de ruptura  $E_r$ , cuando la capa de pasivación se destruye localmente <sup>(14)</sup>. Para proteger un electrodo que se está picando es preciso hacer descender su potencial por debajo del llamado potencial de protección  $E_p$ .





**FIGURA No. 4** COMPORTAMIENTO CARACTERISTICO DEL ACERO EN DISOLUCION SATURADA DE HIDROXIDO CALCICO CON Y SIN CLORUROS.

En las curvas galvanostáticas la ruptura se pone de manifiesto por un máximo, evolucionando luego el potencial hacia un valor cercano a  $E_p$ . En ausencia de cloruros, la ruptura no se produce y crece el potencial hasta que alcanza el valor al que comienza el desprendimiento de oxígeno. Estos dos tipos de comportamiento quedan reflejados en la figura - 5 (15).



**FIGURA No. 5** METODO GALVANOSTATICO; COMPORTAMIENTO TIPO.

Las técnicas electroquímicas mencionadas, permiten fijar el umbral de concentraciones de cloruros necesarios para

que se produzca la corrosión por picaduras de las armaduras.

## 2.2 Efecto Inhibidor de los $\text{NO}_2^-$ .

Si a una masa de concreto, que contenga cloruros, se añaden nitritos, se tendrá como resultado una reducción considerable de ataque por corrosión y un mayor tiempo de servicio de la estructura<sup>(5)</sup>. Los  $\text{NO}_2^-$  son de los inhibidores más estudiados porque no alteran significativamente las propiedades físico-químicas del concreto (resistencia mecánica, tiempo de fraguado, etc.). Además como inhibidores anódicos, sus características han sido estudiadas ampliamente; tanto en medios neutros como alcalinos<sup>(5)</sup>.

Cuando los nitritos se encuentran presentes en el concreto, junto con los iones cloruro, la inhibición total del ataque o su disminución depende de la relación  $\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$ . Relaciones de  $\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$  inferiores a 1/1 no son efectivas en condiciones de elevada humedad relativa donde la resistividad del concreto es baja y la corrosión puede progresar fácilmente. Para conseguir una segura y completa inhibición, se ha sugerido<sup>(5)</sup> una relación de  $\text{Cl}^-/\text{NO}_2^-$  mayor o igual a 1/1.5.

Por otro lado, es una idea bastante difundida que la corrosión en estado activo en las estructuras de concreto, es gobernada por la difusión de oxígeno hasta las armaduras. Sin embargo, ciertos hechos experimentales parecen demostrar, que este tipo de control es mucho menos frecuente de lo que se cree<sup>(6)(16)(17)</sup>. En presencia de cloruros, es la resistividad del medio y no la difusión del oxígeno, el parámetro que controla la cinética de corrosión.

En la literatura se reportan datos cuantitativos que pa-  
recen apoyar la existencia de un control anódico del proceso  
de corrosión, al menos bajo condiciones de abundante oferta  
de oxígeno <sup>(13)</sup>. Más recientemente, Page y Havdahl <sup>(14)</sup>, al  
analizar las relaciones entre  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$  en pastas de ce-  
mento con adiciones de sílice, llegaron también a la conclu-  
sión de que es la disolución anódica del hierro y no la re-  
ducción catódica del oxígeno, la etapa controlante del proce-  
so de corrosión.

Si la reducción del oxígeno fuera el único proceso cató-  
dico posible, al romperse la pasividad de las varillas, cual-  
quiera que fuese la causa, la velocidad límite de corrosión  
vendría fijada por la velocidad de acceso del oxígeno hasta  
ellas. Bajo condiciones que destruyan la pasividad de las  
armaduras, la resistividad del concreto, pasa a desempeñar,  
al menos en las condiciones experimentales, un papel determi-  
nante en el control de la cinética del proceso.

El control por resistencia en el estado activo, explica  
la ausencia de deterioro apreciable de las estructuras de  
concreto armado en ambientes secos, aún en el caso de que el  
material de construcción esté carbonatado o contenga cantida-  
des considerables de cloruros. En atmósferas suficientemen-  
te secas, la resistividad del medio puede suponer un impedi-  
mento a la corrosión, comparable al representado por las ca-  
pas pasivantes. Las estructuras de concreto armado no pre-  
sentan problemas de corrosión cuando las condiciones de ser-  
vicio son tales que su resistividad exceda de  $50-70 \cdot 10^3 \Omega \text{cm}$ ,  
valores normales para un grado de saturación del concreto -  
del 40% aproximadamente.

En presencia de cloruros, los ciclos de  $i_{corr}$  y de la  
resistencia compensada son como imágenes especulares uno de

otro, poniendo en evidencia una proporcionalidad inversa entre ambos parámetros. En cambio, en ausencia de cloruros, cuando las armaduras permanecen en el estado pasivo, la velocidad de corrosión parece totalmente independiente de la resistividad del medio<sup>(6)</sup>, esto se aprecia más claramente en las siguientes figuras :

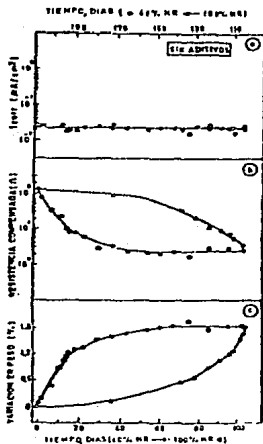


FIGURA No. 6

VARIACIONES PROVOCADAS POR CICLOS DE HUMEDAD EN LA  $i_{corr}$  DE LAS ARMADURAS Y EN LA RESISTIVIDAD Y PESO DE PROBETAS DE UN MORTERO SIN  $Cl^-$ .

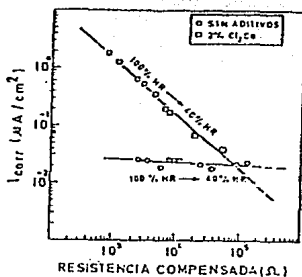


FIGURA No. 7

VARIACION DE LA  $i_{corr}$  DE ARMADURAS DE ACERO CON LA RESISTENCIA OHMICA COMPENSADA ENTRE LOS ELECTRODOS DE TRABAJO Y REFERENCIA.

Las adiciones de cloruros actúan disminuyendo la resistividad del mortero. No obstante, el efecto cuantitativo de este factor es de importancia secundaria, en comparación con el efecto de la humedad ambiental (o grado de saturación de los poros), variable que parece ser la de mayor influencia en la resistividad del mortero. Ver figuras 8 y 9.

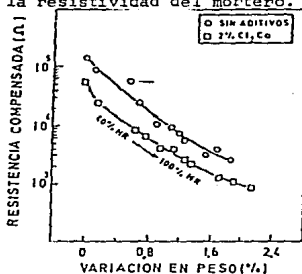


FIGURA No. 8 INFLUENCIA DE LAS ADICIONES DE  $Cl^-$  Y DE LA ADSORCIÓN DE HUMEDAD POR LOS POROS DEL CONCRETO SOBRE LA RESISTIVIDAD DEL MISMO.

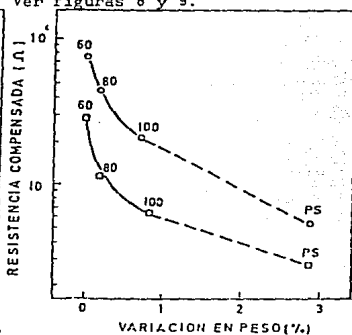


FIGURA No. 9 VALORES DE LA RESISTIVIDAD DEL MORTERO EN ATMÓSFERAS DE DIFERENTES HUMEDADES RELATIVAS Y EN CONDICIONES DE INMERSIÓN PARCIAL (PS)

El oxígeno que alcanza la superficie del acero por difusión se convierte en el factor controlante del ataque en las estructuras sumergidas, con la red de poros totalmente saturada de agua y resistividades comparativamente muy bajas. Esto explica el hecho, frecuentemente comprobado, de una disminución de la  $i_{corr}$  al pasar de exposición en atmósferas muy húmedas a probetas totalmente sumergidas, con menores ofertas de oxígeno y mayor resistencia a su difusión<sup>[6]</sup>

En general, los cloruros solubles inducen la corrosión,

mientras que los combinados tienen poco efecto sobre el proceso. Esto trae como consecuencia que los límites de cloruros en los códigos de cada país varíen ampliamente<sup>[13]</sup>, dependiendo de las materias primas empleadas en la fabricación del concreto, el proceso de fabricación de éste y la agresividad del medio donde se encuentra la estructura, entre otros factores.

En el presente estado del conocimiento, el Comité 222 del ACI<sup>[13]</sup> sugiere las siguientes concentraciones máximas del cloruro totales para minimizar el riesgo de corrosión inducida por cloruros :

- Concreto Preesforzado 0.08% por peso de cemento.
- Concreto Reforzado 0.20% por peso de cemento.

Dicho Comité, recomienda tener buen juicio al aplicar estos límites, teniendo en mente que otros factores son siempre necesarios para la corrosión en el concreto.

### 2.3 Corrosión debida a la Carbonatación del Concreto.

Si se exceptúa la corrosión causada por los cloruros, se acepta, generalmente, que la carbonatación del concreto es la condición esencial para la corrosión de las armaduras en bebidas en él.

A partir de la superficie del concreto pueden actuar sobre él, los agentes atmosféricos, reduciendo su alcalinidad. Los responsables de éste fenómeno son los constituyentes ácidos de la atmósfera, particularmente el  $CO_2$  y el  $SO_2$ . La parte esencial del proceso la desempeña el  $CO_2$ , por lo que aquel recibe el nombre de Carbonatación. Lo más característico de éste proceso es la aparición de una estrecha banda

que separa dos zonas con valores de pH muy diferentes, por lo general una de pH 9 y otra de pH 12<sup>(16)</sup> .

Debido a ésto, la carbonatación del recubrimiento del concreto por el CO<sub>2</sub> atmosférico induce a una disminución del pH de la fase acuosa contenida en sus poros hacia valores próximos a la neutralidad. A éste pH el acero pierde su pasividad y se corroe de forma generalizada y homogénea<sup>(5)</sup> .

Afortunadamente, la carbonatación es un proceso lento que sólo se hace patente después de años o decenios. En él hay que distinguir<sup>(2)</sup> :

1. Un proceso químico consistente en la reacción del CO<sub>2</sub> con el hidróxido cálcico de la solución contenida en los poros del hormigón o concreto, y/o con los componentes hidratados del mismo; debido a la alta alcalinidad del cemento Portland hidratado.
2. La difusión del CO<sub>2</sub> a través del concreto ya carbonatado.
3. La difusión del agua formada en la primera etapa.

La etapa 1 ocurre muy rápidamente y son las etapas 2 y 3 las que determinan la velocidad de avance de la carbonatación.

Dado que los procesos de difusión tienen lugar a través de los poros del concreto, es evidente la importancia del volumen ocupado por los mismos. Dentro del margen práctico de relaciones agua/cemento (0.4-0.7), siempre existe en el concreto más agua que la que se puede combinar químicamente con el cemento y es conocido que esto determina, como se verá más adelante, la porosidad del concreto fraguado, lo que a su vez condiciona la resistencia del mismo a la carbonatación. La ex

perencia demuestra que es posible producir concreto prácticamente no carbonatable, recurriendo a relaciones agua/cemento muy bajas.

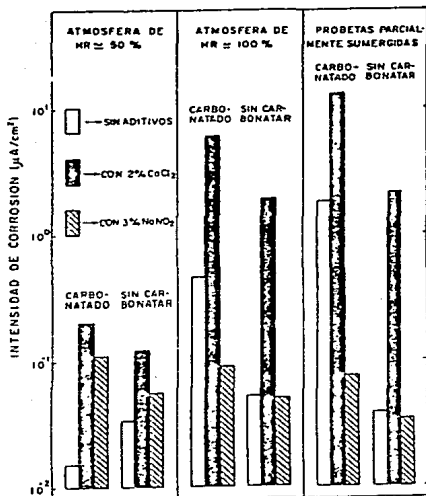
Sobre el proceso influyen también otros factores internos pero, en general, puede afirmarse que el progreso de la carbonatación está determinado más por la porosidad del concreto, que por su composición.

Aparte de los factores internos, la carbonatación depende también de las variables medio, esencialmente de la humedad, adquiriendo un desarrollo máximo para humedades medias, del orden del 50% <sup>(20)</sup>, siendo su avance extremadamente lento cuando los poros del concreto están llenos de agua. No obstante, para tener lugar, la carbonatación exige un mínimo de humedad, puesto que la reacción (etapa 1) presupone la presencia de agua; pero es dudoso que en la práctica se presente realmente esta limitación <sup>(21)</sup>.

La carbonatación no puede ser considerada como causa suficiente para que se produzca la corrosión <sup>(16)</sup>. La práctica informa que en un ambiente interior seco no se producen, por lo regular, daños por corrosión aunque el recubrimiento de concreto esté carbonatado. Los casos característicos de corrosión de las varillas de acero con agrietamiento del concreto, suelen estar asociados con la carbonatación de concretos húmedos.

En la figura siguiente se refleja la influencia decisiva de la humedad sobre la velocidad de corrosión de redondos de acero embebidos en concretos con y sin aditivos, carbonatados y sin carbonatar. Resulta sorprendente comprobar cómo un descenso de la humedad relativa del medio ambiente, limita la cinética de ataque, incluso cuando concurre con la carbonatación del concreto la presencia de iones cloruros en el mismo.





**FIGURA No. 10** EFECTO DE LOS ADITIVOS EMPLEADOS Y DE LAS CONDICIONES DE EXPOSICION SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSION.

En este caso, nuevamente, la adición de nitritos contrasta las altas velocidades de corrosión, causadas por la carbonatación<sup>(5)</sup>

Uno de los puntos de mayor controversia en el uso de  $\text{NO}_2^-$  en concreto, es la duración de su acción inhibitoria, ya que algunos autores mencionan que se oxida a  $\text{NO}_3^-$  dentro del concreto. En éste aspecto es importante señalar que el  $\text{NO}_2^-$  en éstos medios alcalinos actúa sobre el acero como un oxidante y por lo tanto, él mismo se reduce a otra especie (tal vez  $\text{NH}_3$ )<sup>(5)</sup>.

Tanto el  $\text{NO}_2$  como otras sustancias químicas, tales como los cloruros y muchas otras, se combinan con las fases del cemento ( $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ ) por lo que su cantidad efectiva en el concreto es menor que la añadida al agua de amasado. Este es otro aspecto, motivo de especulación y controversia, ya que no es fácil analizar  $\text{NO}_2$  en concreto y no hay casi, trabajos sobre este punto.

En general, puede afirmarse que las armaduras o varillas, embebidas en el concreto carbonatado, no se corroerán si las condiciones ambientales son tales que no se ataca un acero sin protección, corroyéndose en cambio, de forma generalizada, bajo condiciones capaces de resultar agresivas para el acero desnudo<sup>(21)</sup>.

La determinación más precisa de la profundidad de la capa carbonatada, es la realizada bajo observación microscópica<sup>(2)</sup>. Con nicoles cruzados, la zona no afectada, aparece oscura, mientras el carbonato de calcio aparece claro. No obstante, no se suele recurrir a este método, puesto que se llega a determinaciones suficientemente exactas; atomizando una disolución alcohólica al 1% de fenolftaleína sobre una fractura reciente del concreto, debido al acusado cambio de pH que lleva aparejado el fenómeno, la capa carbonatada permanece incolora, mientras que la que no lo está, se colorea fuertemente de rojo.

#### 2.4 Dosificación de Cemento.

La composición y dosificación de los distintos componentes del concreto incluyen decisivamente en las características del producto final.

La protección conferida a los aceros por los cementos tipo Portland es más adecuada que la aportada por los demás tipos de cemento, como consecuencia de la mayor reserva alcalina de los primeros, que hacen que posean, también, una superior capacidad de autoregeneración de la capa pasivante, ante daños eventuales de la misma <sup>(1)</sup>.

Cualquiera que sea el tipo de cemento, según se ha expuesto ya, la carbonatación del concreto o la presencia de ciertas sustancias como los cloruros, al impedir o romper la pasividad de las armaduras, hacen posible su corrosión en estado activo y un mínimo de humedad y de oxígeno disponible pueden acelerar notablemente la cinética del proceso.

Puede decirse, que la cantidad de cloruros presente en la capa más superficial del concreto, depende fundamentalmente de la relación cemento/arena y no parece existir una relación directa con la porosidad y/o relación agua/ cemento. Así mismo, existe una relación entre porosidad y permeabilidad a los cloruros, si bien no hay proporcionalidad cuantitativa <sup>(2)</sup>.

La no proporcionalidad entre porosidad y permeabilidad puede tener uno de sus orígenes, en la diferente proporción de microporos y macroporos que se dan entre dos morteros con idéntica porosidad total, pero con distinto contenido en cemento. Un mayor contenido en cemento supone, además de una mayor proporción de microporos (barrera física), posibilidades mayores de interacción química o fisicoquímica (adsorción) del ión cloruro, preferentemente con los aluminatos del cemento <sup>(3)</sup>.

De esto, puede deducirse, que existen dosificaciones que retrasan la penetración de los cloruros de forma bastante eficaz, y que es posible, por lo tanto, proyectar concre-

tos poco permeables como para que los cloruros no lleguen a la armadura en cantidad suficiente para despasivar el acero (umbral crítico de  $\text{Cl}^-$ ), al menos durante el período de vida para el que se proyecta la estructura. Es precisamente la relación agua/cemento = 0.4 con dosificaciones ricas en cemento, una de las recomendaciones que acertadamente recogen las normas de algunos países<sup>(22)</sup>, para concretos situados en ambientes marinos.

Así pues, la penetrabilidad del ión cloruro, a igualdad de espesor de recubrimiento (de lo que se hablará posteriormente), es dificultada de forma decisiva por altos contenidos en cemento, relaciones agua/cemento cercanas a 0.4 y compactación adecuada con baja porosidad total resultante<sup>(8)</sup>.

Para largas permanencias en ambientes marinos, donde no se pueda garantizar una eficaz y total impermeabilidad del concreto, las varillas de acero galvanizadas muestran un comportamiento mejor, presentando menores corrientes de corrosión a igualdad de proporción de cloruros, o lo que es lo mismo, el galvanizado soporta un umbral de cloruros superior al que soporta el acero convencional. El umbral crítico de  $\text{Cl}^-$  no se puede expresar como único y de forma general, sino que es preciso definirlo para cada tipo de acero, de cemento y proporción de éste en el concreto.

Son pues la permeabilidad y el umbral de cloruro, las variables que es necesario conjugar para conseguir un concreto, que en conjunto, proporcione durabilidad a la varilla de acero.

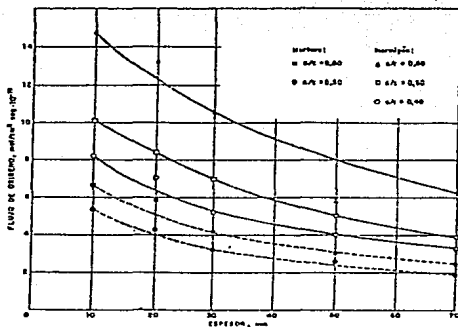
La presencia de los cloruros, la carbonatación del concreto y la composición y dosificación de los distintos componentes del concreto (principalmente el cemento), son las va-

riables principales, mas no son los únicos factores de corrosión a considerar. Cualquier heterogeneidad del metal o del medio, crean pilas locales que, en combinación con los cloruros, pueden ser causa suficiente de corrosión.

Incluso factores puramente físicos, como el espesor del recubrimiento de concreto sobre las varillas, o la existencia y tamaño de grietas, pueden condicionar decisivamente el comportamiento de una estructura frente a la corrosión.

## 2.5 Espesor de Recubrimiento.

Un factor considerado como muy importante por los investigadores sobre el tema, es el espesor del recubrimiento de concreto, para el que todas las normalizaciones fijan valores mínimos, dependientes de la calidad del concreto y las condiciones de exposición. Sin embargo, ésta barrera física tiene una eficacia relativamente moderada frente a los factores acelerantes de la corrosión de las varillas de acero: Las disponibilidades de agua y oxígeno. En la figura 11 puede observarse que al pasar de recubrimientos de 1 cm. a otros de 7 cm, el flujo de oxígeno se reduce sólo por un factor inferior a 3 <sup>(6)</sup>.



**FIGURA No. 11** EFECTO DE LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO DE CONCRETO EN LA DIFUSION DEL OXIGENO A TRAVES DE EL, SEGUN GJORV (24).

La permeabilidad al agua es todavía mayor, favorecida por fenómenos de capilaridad, que hacen que la red de poros se comporte como una esponja. Además, la inercia del concreto a secarse es mucho menor que a humectarse, por lo que, a profundidades de muy pocos centímetros, suele permanecer húmedo la mayor parte del tiempo, a no ser que el ambiente exterior permanezca constantemente seco.

Tampoco debería influir apreciablemente en la velocidad de corrosión el espesor del recubrimiento cuando se rompe la pasividad y se produce un control por resistencia. Sin embargo, las exigencias de las normas están plenamente justificadas, porque el escudo o barrera física adquiere toda su razón de ser con los factores desencadenantes de la corrosión. Respecto de la carbonatación puede afirmarse que los concre-

tos bien dosificados, densos y correctamente ejecutados son prácticamente incarbonatables <sup>(10)</sup>. Asimismo, combinando adecuadamente la penetrabilidad del concreto y el espesor del recubrimiento puede impedirse el acceso de cloruros a nivel de la varilla, en cantidad suficiente para romper la pasividad, durante períodos muy prolongados de tiempo, retrasando la iniciación de la corrosión lo suficiente para garantizar la vida en servicio exigida en proyecto <sup>(21)</sup>. Esto explica, por ejemplo, la importancia decisiva del espesor y calidad del recubrimiento de concreto en las estructuras marinas.

En realidad, los espesores exigibles deberían ser función de las diferentes calidades del hormigón, pues todos los autores concuerdan en que un espesor menor de un concreto denso es mucho más deseable que otro mayor de un concreto ligero o mal compactado. Por esta razón, en los concretos pretensados de gran calidad, hechos en taller, con materiales, ejecución y control muy cuidadosos, se alcanzan compactaciones tales que permiten espesores de recubrimiento bastante menores que en el caso del concreto armado. <sup>(4)</sup>

En relación con el espesor deben considerarse también las fisuras o grietas, ya que reducen el espesor efectivo del recubrimiento protector y facilitan, aunque solo sea localmente, el acceso de los agentes agresivos hasta las varillas. Sin que puedan apuntarse datos de validez general, las dimensiones críticas de las grietas aceptadas en la práctica son de 0.3 mm de anchura en el concreto normal y de 0.2 mm en un concreto ligero <sup>(25)</sup>; pero incluso la definición y medida del ancho característico de una grieta es conflictivo. Parece ser, que las grietas, son un factor decisivo en la corrosión de las varillas de estructuras sumergidas <sup>(26)</sup>, aunque esta indicación se refiere a tamaños de grieta bastante por encima de los valores críticos acabados de citar, concretamente de 0.5 - 1.5 mm.

### 3.- FORMAS DE EVALUAR LA CORROSION DE LAS ARMADURAS.

#### 3.1 Métodos Electroquímicos y Artificiales de Envejecimiento.

Como ya se aludió anteriormente, los parámetros básicos que gobiernan la durabilidad de las estructuras son los relacionados con la penetración de humedad y de los gases atmosféricos en el concreto. Son pues estas propiedades las que deberían medirse, y hay en efecto, varios métodos para estimar la porosidad, permeabilidad, profundidad de carbonatación, etc..

Normalmente, sin embargo, no se mide la penetrabilidad a los fluidos, sino el comportamiento de las armaduras en medios que, en ocasiones, no reproducen más que lejanamente, las condiciones a que están sometidas en el concreto.

Los tipos de ensayos que existen para evaluar la corrosión en armaduras son 2 :

Ensayos Acelerados de Corrosión. A este tipo de ensayos corresponden :

- a) Métodos artificiales de envejecimiento.
- b) Métodos electroquímicos.

Los primeros implican la observación de probetas embebidas en concreto después de un tiempo relativamente corto de envejecimiento acelerado, que puede consistir en ciclos alternativos de humidificación y secado, por ejemplo. Los métodos electroquímicos van desde la simple medida de los potenciales de electrodo hasta la medida de las velocidades instantáneas de corrosión por el método de la resistencia de polarización<sup>{27}</sup> y al trazado de las curvas potencial-densi-



dad de corriente, pasando por los métodos potenciocinético y galvanostático de determinación de los potenciales de ruptura.

Los ensayos acelerados no permiten predecir la durabilidad de las estructuras, sino únicamente revelar ciertas tendencias a la corrosión, bajo condiciones bien definidas. La realización de predicciones requeriría conocer con seguridad las leyes que gobiernan la cinética de corrosión en el concreto, lo que desgraciadamente no es el caso real para muchas condiciones prácticas.

Medición de la Velocidad Instantánea de Corrosión. Estimaciones de esta velocidad en armaduras embebidas en probetas de concreto semisumergidas o expuestas a la atmósfera, realizadas por el método de resistencia de polarización<sup>(28)</sup> han permitido predicciones de la cuantía del ataque.

Este método ha sido raramente utilizado en el concreto armado quizá por las dificultades inherentes a su aplicación en un medio de tan elevada resistividad, pero ahora los potenciostatos con posibilidad de compensar la caída óhmica entre los electrodos de trabajo y referencia, eliminan dichas dificultades<sup>(30)</sup>

### 3.2 Medidas Protectoras.

Los métodos van desde la aplicación de recubrimientos impermeables en la superficie del concreto, hasta la protección catódica de las armaduras o varillas. Aquel procedimiento no ha llegado a tener una gran aceptación, achacándosele que puede acelerar la corrosión, cuando se aplica después de que las sustancias agresivas hayan penetrado ya en el conre

to (14) .

La forma más difundida de protección; consiste en el uso de recubrimientos orgánicos o inorgánicos aplicados sobre las varillas mismas. Recubrimientos tales como pinturas, lacas, resinas, plásticos, fosfatos, aceites y recubrimientos metálicos como el zinc, han sido sugeridos y parecen haber dado resultados satisfactorios bajo condiciones específicas, aunque ninguno de ellos proporciona la solución ideal del problema (2) .

Puede concluirse afirmando que la protección eficaz de las armaduras del concreto contra la corrosión, no requiere la adopción de medidas especiales, obteniéndose por sí sola cuando se observan cuidadosamente las sencillas normas de fabricación del concreto, conocidas desde hace mucho tiempo. En efecto, mediante la adopción de una relación agua/cemento reducida, la aplicación de un espesor suficiente de concreto cuidadosamente compactado, exento de cloruros y con elevada reserva alcalina, es posible proteger las armaduras durante períodos que satisfacen plenamente las exigencias de la industria de la construcción (2) .

#### 4. - CORROSION BAJA ESFUERZO

##### 4.1 Antecedentes.

Cuando actúa una sollicitación mecánica sobre un metal o aleación que se halle en un medio corrosivo, puede originarse el agrietamiento del material metálico y posteriormente su rotura <sup>[2]</sup>.

La sollicitación mecánica puede ser debida a tensiones residuales o a tensiones externas, en cuyo caso puede tener lugar el agrietamiento por corrosión bajo tensión; o bien tratarse de esfuerzos alternados, dándose entonces, el fenómeno de fatiga por corrosión. Tanto en el agrietamiento por corrosión bajo tensión como en la fatiga con corrosión, la corrosión, expresada en metal disuelto, es muy escasa, mientras que los efectos causados pueden ser extraordinariamente espectaculares <sup>[2]</sup>.

El agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo es un fenómeno conjunto. Requiere de una acción de tensión y la presencia de un medio corrosivo específico. La remoción de alguno de ellos puede prevenir la iniciación del agrietamiento o de tiene las grietas anteriormente propagadas <sup>[32]</sup>.

La corrosión bajo esfuerzo se puede definir como el agrietamiento ocasionado por la acción combinada de esfuerzos de tensión y medios corrosivos; se trata de un fenómeno común en aleaciones expuestas a esfuerzos de extrema tensión y corrosión del medio o ambiente. Esto sucede también bajo circunstancias menos severas, en combinación con la acción de la tensión residual y un medio ambiente específico enfrentado durante servicio. Esto se ha manifestado como

un defecto mecánico debido a circunstancias adscritas al agrietamiento, donde, en ausencia de la corrosión, no sería factible vislumbrar un defecto (31) .

La corrosión bajo tensión se da en ciertos medios que suelen ser típicos para cada material metálico y en los cuales el metal permanece pasivo, pasividad que puede romperse cuando la tensión actuante, adquiere un cierto valor.

Aunque la lista de ambientes que promueven el agrietamiento de corrosión bajo esfuerzo o por tensión en aceros continúa desarrollándose, el concepto de especificidad de solución permanece o mantiene que no todos los ambientes iniciarán o sustentarán el agrietamiento. Los poderes descriptivos de ciertas soluciones para promover la corrosión bajo tensión de aceros al carbón, quedan como uno de los enigmas del fenómeno y tiene una considerable importancia práctica.

#### 4.2 Agrietamiento de Corrosión Bajo Esfuerzo.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión puede ser intergranular o transgranular, según que la propagación siga los bordes de grano o transcurra a través de ellos, respectivamente. Sin embargo, en muchos casos, ambos tipos de propagación pueden coexistir en una misma grieta, otras veces las grietas se inician de una forma para propagarse luego de otra.

El fenómeno se encuentra generalmente en aleaciones, aunque se han citado casos de fallas de corrosión bajo esfuerzo en metales puros; éstos pueden explicarse con referencia a impurezas residuales. El agrietamiento frecuentemente se presenta sin que haya ningún otro daño por corrosión causante del agrietamiento; es altamente específico para cada aleación y una lista de éstos se muestra en la tabla siguiente.

ALGUNOS EJEMPLOS COMÚNES DE SISTEMAS DE  
CORROSIÓN BAJO TENSION O ESFUERZO ( 32)

<u>ALEACION</u>	<u>MEDIO</u>	<u>TIPO DE AGRIETAMIENTO</u>
18Cr-8Ni	Cl <sup>-</sup>	Transgranular
Aceros	OH <sup>-</sup>	Intergranular
70Cu-30Zn	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Transgranular en bajo pH
	algunas aminas	Intergranular en sol. neu tras.
Al-7% Mg aleaciones	Cl <sup>-</sup>	Intergranular
Al-4% Cu aleaciones	Cl <sup>-</sup>	En regiones adyacentes a el límite de grano.
Mg: aleaciones	Cl <sup>-</sup>	Trans. o intergranular
Ti: aleaciones	Cl <sup>-</sup>	Trans. o intergranular
Acero	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Intergranular
	OH <sup>-</sup>	Intergranular
Cu-P, Cu-Al	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Intergranular
Metales	Cl <sup>-</sup>	Transgranular
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Intergranular
Cu <sub>3</sub> Au	FeCl <sub>3</sub>	Intergranular

4.3 Formas de Propagación de la Corrosión Bajo Esfuerzo.

Existen dos teorías principales de la corrosión bajo tensión en medios acuosos :

- I) Mecanismo Electroquímico Continuo (CE). La propaga -  
ción tiene lugar únicamente por ataque anódico continuo  
del metal a lo largo del frente de avance de la grieta

(42 43) esto es, puede existir en la aleación una susceptibilidad para promover la corrosión junto con más o menos tres perfiles, como por ejemplo, las reacciones de -sarrrolladas en los granos del material. Esta susceptibilidad se presenta cuando la estructura interna de la aleación es microscópicamente heterogénea y la fase formada de las trayectorias continuas es anódica, en el medio corrosivo específico a las áreas, constituyendo la mayor parte de la estructura.

II) Mecanismo Electroquímico-Mecánico Periódico (PEM). La propagación se realiza por ciclos alternados de ataque anódico lento y de fractura mecánica rápida<sup>(44 45)</sup>. Puede existir una corrosión de alta fuerza actuando en una dirección, tendiendo a separar el metal de las trayectorias continuas.

Si éstas dos condiciones existen simultáneamente, el metal es sujeto a un medio corrosivo produciendo las relaciones específicas de potencial. La corrosión empezará a lo largo de las trayectorias anódicas, esto producirá una concentración de esfuerzos en el fondo de las hendiduras formadas. A medida que las fuerzas se incrementan, las fisuras comenzarán a desarrollarse destruyendo cualquier película protectora, exponiendo así material anódico fresco al medio corrosivo. La corrosión avanzará rápidamente y al mismo tiempo en las zonas de esfuerzo, su tasa de incremento se acelerará, especialmente si el material está sujeto a una alta carga externa<sup>(46)</sup>.

Estas acciones aceleradas continuarán su tendencia creciente hasta que el material se agriete. Esta teoría explica el porqué el agrietamiento se observa en un medio corrosivo específico, y ya que ha sido bien sustentada por

el agrietamiento intergranular de aleaciones de aluminio, - probablemente también explique a otros sistemas de aleaciones.

Existen otras trayectorias continuas a través de los metales, además de las fronteras o los límites de grano; por ejemplo; planos deslizados y planos de constituyentes precipitados; así, la teoría puede aplicarse al esfuerzo residual de agrietamiento transcristalino.

Otra teoría es la de la precipitación (teoría general de precipitación) que difiere de la anterior en cuanto a que en este caso, las fuerzas locales o zonas de esfuerzos, son las causantes de acelerar la precipitación por medio de celdas galvánicas; los agrietamientos entonces crecen por disolución de material anódico nuevamente formado. En el caso del acero dúctil se dice que el material precipitado puede ser hierro o níquel, en el caso del acero inoxidable se postula un producto de descomposición martensítico. La teoría de la precipitación también sirve para acomodar el hecho de que la corrosión bajo esfuerzo depende en gran medida del ambiente existente.

El tiempo requerido para el agrietamiento puede variar; de minutos hasta años, con algunas aleaciones hay un período de incubación, durante el cual, se dan cambios estructurales (precipitación); como en el caso de la aleación Al-Mg (6% Mg), ya que esta aleación se vuelve susceptible a la corrosión bajo esfuerzo y el que lo sea, va a depender de su proceso de fabricación, composición, tratamiento térmico, etc.

La forma tradicional para estudiar la susceptibilidad de la corrosión por tensión de un material, en un medio ambiente dado, está basada en el tiempo requerido para causar

la falla de especímenes mellados sujetos a diferentes niveles de tensiones. El tiempo de acercamiento a la falla como el de acercamiento tradicional S/N a la fatiga, combina el tiempo requerido para iniciar una grieta y el tiempo requerido para propagar la grieta a dimensiones críticas. La necesidad para separar el agrietamiento de corrosión por tensión dentro de la iniciación y propagación de las fases, fué enfatizado por resultados experimentales para aleaciones de titanio.

Esos resultados indican que algunos materiales que parecen ser inmunes a la corrosión por tensión en la prueba tradicional de especímenes suaves, pueden ser altamente susceptibles al agrietamiento por corrosión bajo tensión cuando se les prueba bajo las mismas condiciones usando especímenes pre-agrietados. El comportamiento de algunos materiales se atribuyó a su inmunidad a la iniciación de la grieta - - (pitting) y a su alta susceptibilidad intrínseca para el agrietamiento por corrosión bajo tensión.

Remedios contra la Corrosión Bajo Esfuerzo. Son tres los remedios para hacer frente a la corrosión bajo esfuerzo:

- . Eliminación de tensiones.
- . Modificación del medio.
- . Cambio del material.

La aplicación de uno y otro dependerá básicamente de las condiciones de servicio y los requerimientos de fabricación de los componentes.



**CAPITULO II**  
**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

La parte experimental de éste trabajo, se divide en tres grandes secciones :

- I) Estudio de la capa pasiva por medio de Voltametría Cíclica en solución saturada de hidróxido de calcio -  $(\text{CaOH}_2)$
- II) Estudios Potenciodinámicos en hidróxido de calcio saturado.
- III) Estudios Potenciodinámicos ensayados en sistemas reales de refuerzos metálicos embebidos en concreto.

#### 1. Material Ensayado.

El material utilizado en todos los casos fué; varilla de acero alta resistencia baja aleación (Norma B-457), con la composición química siguiente<sup>(40)</sup> :

0.24%C, 1.28%Mn, 0.31%Si, 0.014%P  
0.03%S, 0.04%V y 0.04%Nb.

Las propiedades de éste acero son<sup>(40)</sup> :

- . Límite elástico = 46 Kgf/mm<sup>2</sup>
- . Elongación de fractura = 19%
- . Dureza Rockwell B = 100
- . Resistencia a la tensión = 42 Kgf/mm<sup>2</sup>

Para el desarrollo del experimento se cortaron 20 cm. de una de las varillas; maquinándose posteriormente para elimi -

minar completamente la superficie corrugada y dejar una estructura cilíndrica perfectamente lisa.

Con el fin de realizar las dos primeras partes del experimento, se cortaron 2 rodajas del refuerzo metálico que se preparó anteriormente y posteriormente se maquinaron para dar como resultado, dos pequeñas estructuras de 0.5 cm. de diámetro por 1 cm. de espesor. Estas estructuras se prepararon montándose en baquelita en primer lugar y posteriormente, lijando la superficie metálica hasta un grado de lija - 600.

A las probetas se les hizo una perforación que llegaba hasta el acero (utilizando una broca de 5/64 de pulg. y un machuelo de 3/32 de pulg.), para poder introducir una varilla delgada que tuviera contacto con el metal y el exterior, permitiendo realizar las pruebas deseadas en contacto completo con medios diferentes.

Para la tercera parte del experimento, fué necesario cortar 9 rodajas (de la varilla maquinada inicialmente) de 0.5 cm. de espesor; éstas rodajas, se cortaron en 4 partes y cada parte fué preparada de la misma manera que como se prepararon las dos probetas utilizadas en la primera y segunda parte, obteniéndose 36 probetas que también, fueron perforadas hasta contacto con el acero.

Debido al gran número de probetas, se elaboraron 36 varillas con electrodos de soldadura; a las que después de quitarles la capa de fundente, se les cortó en secciones de 6 cm. de largo y, finalmente, se les hizo rosca en uno de sus extremos por medio de una tarraja de 3/32 de pulg.. Estas varillas se introdujeron en las probetas con el fin de que desde la superficie se tuviera contacto con el refuerzo

metálico, ya que éste, estuvo en contacto completo con diferentes medios que impedían poder trabajar sobre la superficie exterior del acero.

Las muestras separadas, se colocaron en grupos de 6 en moldes redondos de plástico que tenían en el centro una varilla de grafito; se coló el concreto en cada molde, dejándolo se fraguar por 24 horas.

Finalmente, se sacaron las probetas de los moldes de plástico; las dimensiones de las probetas de concreto fueron: 10 cm. de diámetro y 4.5 cm. de espesor.

Cabe mencionar, que todas las muestras tenían área superficial conocida.

En general, la varilla de acero a estudiar, recibió la misma preparación inicial y las diferencias, como se verá más tarde, se debieron al medio al que se sometieron durante los diferentes ensayos.

## 2. Medios Empleados.

Debido a que este trabajo se dedica a caracterizar las condiciones químicas y electroquímicas (Potenciales electroquímicos críticos, concentraciones de agentes agresivos como cloruros, etc.) en las cuales el fenómeno de Corrosión Bajo Esfuerzo en refuerzos pretensados embebidos en concreto toma lugar, se utilizaron dos diferentes medios :

- 1) Solución Acuosa de Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) Saturado. Este medio se preparó con diferentes concentraciones de cloruro de calcio ( $0\% \text{Cl}^-$ ,  $0.3\% \text{Cl}^-$ ,  $1.0\% \text{Cl}^-$  y

2.0%Cl<sup>-</sup>). Se utilizó este medio por que simula de ma  
nera satisfactoria las condiciones reales que se presen  
tan cuando una varilla de acero se encuentra embebida  
en concreto.

II) Concreto.- Este medio se preparó de la siguiente manera:

Para este caso, el cemento utilizado fué el Portland 3,  
debido principalmente, a su fraguado rápido y alta alca  
linidad. La relación agua/cemento utilizada fué de  
0.5 y la relación cemento/arena fué de 0.3. Por otro  
lado, este medio también se sometió a la acción del  
cloruro de calcio, utilizándose éste en diferentes con  
centraciones (0%Cl<sup>-</sup>, 1.0%Cl<sup>-</sup> y 2.0%Cl<sup>-</sup>) al introducír  
se en el agua de amasado.

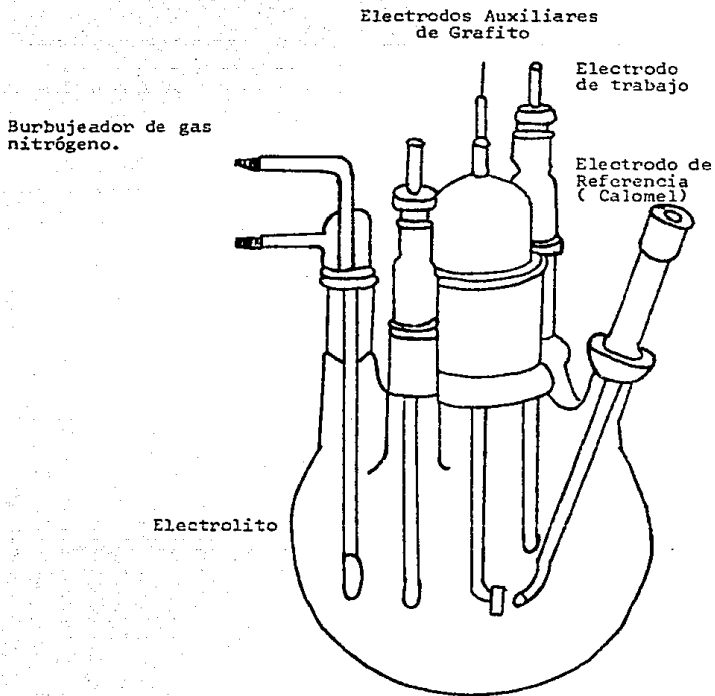
Para preparar el concreto se agregó al agua de amasado  
(con la cantidad de cloruros requerida) al cemento  
Portland 3, se batió por 30 segundos, se agregó la are-  
na, se batió 2 minutos más, se dejó reposar la mezcla  
por 3 minutos; posteriormente se procedió a colarlo al  
molde ocupado por las probetas de acero.

El hidróxido de calcio saturado se utilizó para las pri  
meras dos partes del experimento, y el segundo medio se  
empleó en la última parte, en donde se establecieron  
las condiciones reales a las que se somete un refuerzo  
metálico embebido en concreto.

La colocación del sistema para utilizar el primer medio  
consistió en vaciar el hidróxido de calcio saturado (pa  
ra las diferentes concentraciones de cloruros) en una  
celda de corrosión de 5 bocas; en 2 de las bocas se co  
locaron electrodos de grafito como auxiliares, en otra  
el electrodo de referencia (Calomel); en la cuarta boca

un burbujeador de gas nitrógeno con el fin de eliminar el oxígeno disuelto en la solución de trabajo y, por la boca del centro, se colocó la probeta a estudiar. Todo esto se conectó directamente al Potenciostato con el fin de realizar los ensayos.

FIGURA No. 12 . CELDA ELECTROLITICA



Celda de Corrosión de 5 bocas.

Para la tercera parte del desarrollo experimental, se utilizaron 6 probetas de concreto que contenían, cada una de ellas, 6 muestras del acero a estudiar. Estas probetas de acero fueron conectadas al Potenciostato como electrodos de medición, la varilla de grafito del centro de la probeta de concreto, fué utilizada como electrodo auxiliar; se colocó el electrodo de Calomel en la superficie de la probeta de concreto; entre el electrodo auxiliar y el de medición y fué conectado al Potenciostato como electrodo de referencia.

### 3. Técnicas Utilizadas.

En la primera parte, concerniente al estudio de la Ca pa Pasiva por medio de Voltametría Cíclica en hidróxido de calcio saturado bajo diversas condiciones de temperatura y concentración de iones agresivos (cloruros), se trata de obtener mayor información de la formación y ruptura de las capas pasivas formadas sobre el sustrato metálico embebido en concreto, el medio de ensayo empleado aquí, es el de hidróxido de calcio saturado, el cual simula las condiciones químicas del líquido existente dentro de los poros de concre to.

En la segunda parte, donde se realizó un estudio Potenciodinámico en hidróxido de calcio saturado, la finalidad fué conocer los potenciales críticos necesarios para que el proceso de Corrosión Bajo Esfuerzo proceda. Además fué para tener un conocimiento de la conducta de dichos sistemas bajo diversos parámetros experimentales de Temperatura y Con centración de iones agresivos.

La tercera parte se basó en los Estudios Potenciodinámicos ensayados en sistemas reales de refuerzos metálicos embe



bidos en concreto. Con el fin de evaluar los cambios físico-químicos producidos por las reacciones de hidratación del concreto, con respecto al tiempo, se diseñaron experimentos a 3 meses en los cuales se analizaría periódicamente la susceptibilidad de refuerzos metálicos a fallar por este tipo de corrosión.

Como se puede observar, hubo una variación de parámetros, tales como tiempo, temperatura, humedad relativa y concentración de iones agresivos a lo largo de los experimentos.

Durante el estudio de la Capa Pasiva, por medio de la técnica electroquímica de Voltametría Cíclica, se realizaron ensayos a temperatura ambiente (25°C) y a 70°C. En total se realizaron 8 ensayos, ya que cada solución trabajada se sometió a las dos temperaturas anteriormente mencionadas, abarcando un rango de potencial de -1,500 mV a 1,000 mV.

Los estudios potenciodinámicos, se realizaron igualmente a 25°C y a 70°C para cada solución, sólo que, en este caso, se efectuaron a dos diferentes velocidades de barrido: 0.1 mV/seg y 100 mV/seg, abarcando un rango de potencial de -1,000 a 400 mV para el caso de la primera velocidad y de -1,500 a 400 mV para la segunda, realizándose entonces, 4 mediciones en cada solución trabajada; 2 mediciones a temperatura de 25°C a 0.1 y 100 mV/seg y 2 más a 70°C, también para la velocidad de barrido lenta y para la velocidad de barrido alta.

Finalmente, los estudios potenciodinámicos realizados en las probetas de concreto se efectuaron periódicamente: cada 15 días a lo largo de 3 meses.

De las 6 probetas de concreto preparadas anteriormente

2 contenían una cantidad de 2% de cloruro de calcio, 2 más se prepararon con 1.0% de éste cloruro y las 2 últimas fueron preparadas sin agregarles cloruro de calcio.

Tres probetas, cada una de diferente concentración de cloruros, se sometieron al 100% de humedad relativa a 25°C constantes y las otras 3 a 70°C también constantes al 100% de humedad relativa.

Las 2 probetas correspondientes a una cantidad determinada de cloruros fueron sometidas a los siguientes ensayos:

- La que se mantuvo a 25°C se sometió, en una de sus probetas metálicas a una prueba rápida (velocidad de barrido de 100mV/seg) y a una lenta (0.1 mV/seg); lo mismo ocurrió con la trabajada a 70°C.
- Después de pasados 15 días, en otra probeta metálica (que no sea la utilizada anteriormente) se realizaron las pruebas anteriores y se siguió este método, cambiando las probetas metálicas, a lo largo de 3 meses.

Para las pruebas realizadas a 100 mV/seg, el rango de potencial barrido fué de -1,500 a 400 mV y para las realizadas a 0.1 mV/seg, el intervalo trabajado fué de -1,000 a 400 mV. En total, cada probeta de concreto, fué sometida a 12 ensayos o pruebas.

Con las probetas que se encontraban a 25°C no existieron problemas en el momento de realizar las pruebas, ya que el interior de la cámara donde se encontraban almacenadas, estaba a una temperatura casi igual a la temperatura ambiente; las probetas trabajadas a 70°C se encontraban en una cámara de humedad con un refrigerante, con el objeto, éste úl-

timo, de evitar que el recipiente se fracturara ya que éste, contenía en su interior una parte de agua (a 70°C) y las probetas de concreto. El recipiente se mantuvo a 70°C por medio de una mantilla de calentamiento accionada por medio de un termostato, el agua evaporada, se condensaba por medio del refrigerante evitando pérdidas de humedad.

Para realizar las pruebas y que las probetas se mantuvieran a 70°C, se colocaban éstas, al momento de hacer el ensayo, en un baño de agua a la temperatura de trabajo (70°C) y se mantenía así, durante toda la prueba, después de ésta, se regresaban rápidamente a su recipiente de humedad relativa.

#### 4. Equipo y Accesorios.

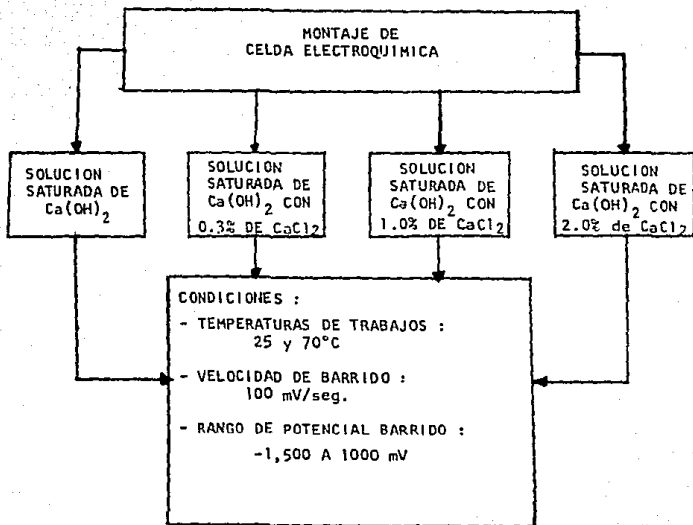
- Potenciostato/Galvanostato EG & G Applied Research, modelo 273, con sistema de cómputo anexo.
- Celda de corrosión de 5 bocas.
- 2 Electrodo auxiliares de grafito.
- Electrodo de Calomel como referencia.
- Graficador X-Y.
- Impresora / Graficadora.
- Discos Floppy.
- Computadora con impresora.
- 2 reactores de vidrio con mantilla de calentamiento.
- Refrigerante.
- Baño de agua con termostato.
- 2 Termómetros.
- Mesa de madera para soporte del baño.
- Goteros.
- 5 Matraces Erlenmeyer de 1 litro.
- Gas nitrógeno.
- Tapones de hule.

- . Manguera de hule latex.
- . Tubos de plástico de 12 cm. de diámetro.
- . Broca de 5/64".
- . Tarraja de 3/32".
- . Mezcladora.
- . Cámara de fraguado.
- . Moldes de plástico redondos.

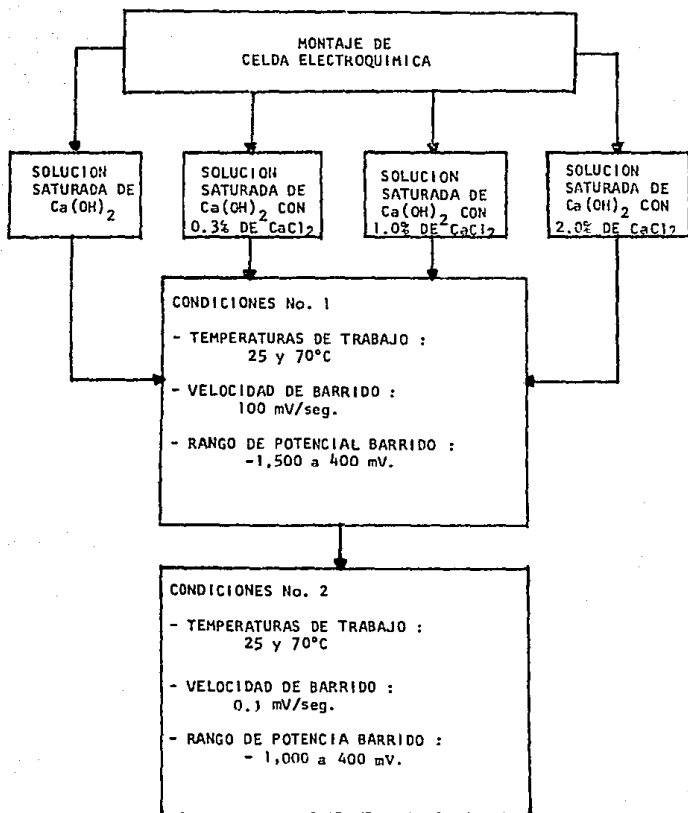
5. Sustancias Químicas.

- . Hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  saturado, grado: Reactivo analítico.
- . Cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$  grado: Reactivo analítico.
- . Pirogalol (solución).
- . Alcohol etílico.
- . Acetona.
- . Cemento Portland 3.
- . Arena.
- . Agua bidestilada.
- . Acido clorhídrico concentrado.
- . Agua corriente.
- . Pegamento.
- . Varillas de grafito.

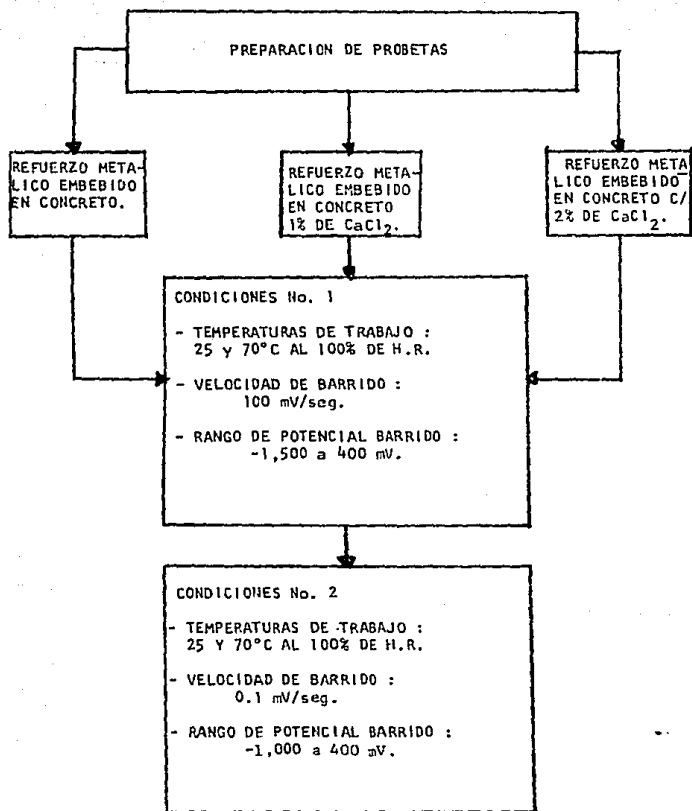
# 1.- ESTUDIO DE LA CAPA PASIVA POR VOLTAMETRIA CICLICA.



11) ESTUDIO POTENCIODINAMICO EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

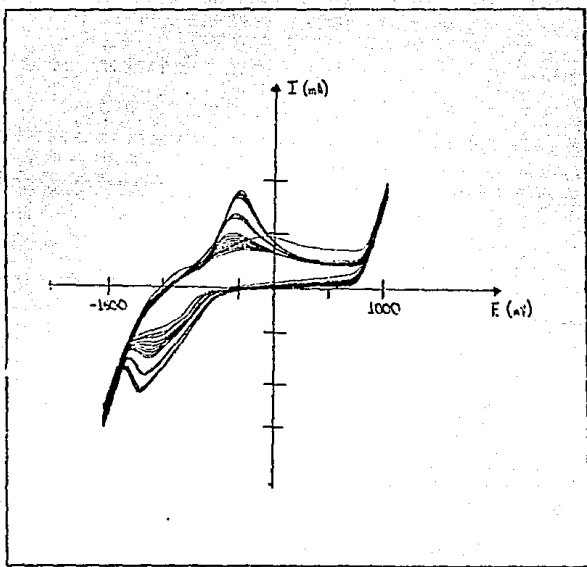


111) ESTUDIO POTENCIODINAMICO EN REFUERZOS METALICOS EMBEBIDOS EN CONCRETO.

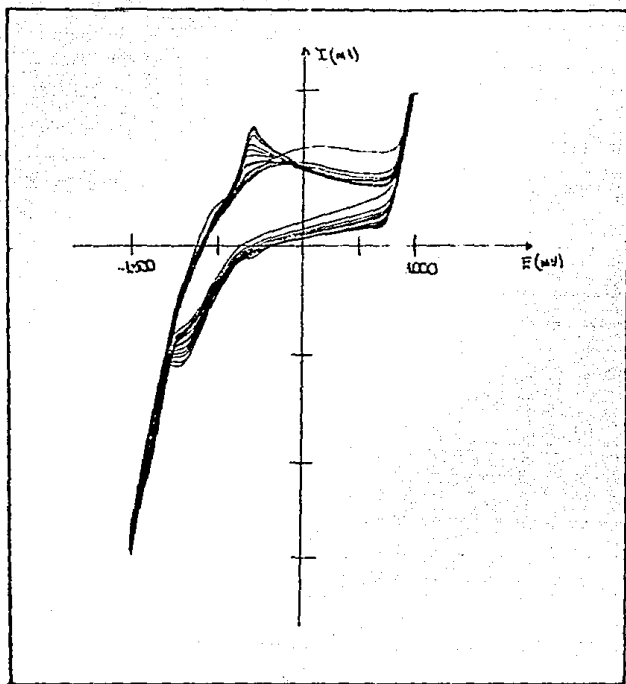


**CAPITULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSION**



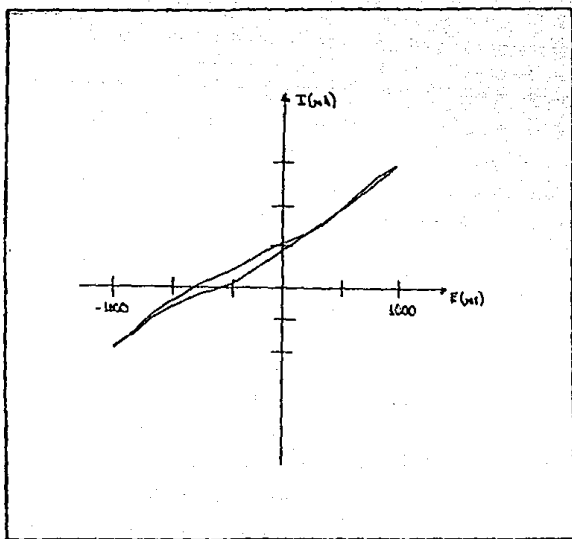


GRAFICA No. 1  
VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  SATURADA A  
25°C. VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.



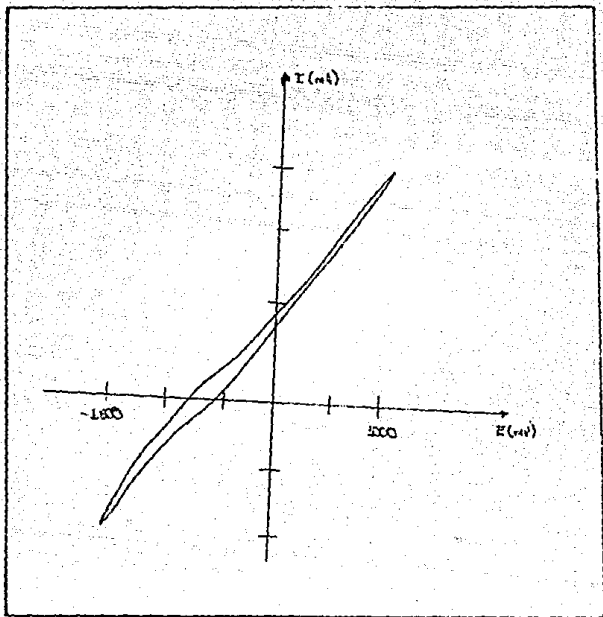
GRAFICA No. 2

VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUREZO  
 EN SOLUCION DE  $\text{Ca(OH)}_2$  SATURADO A  
 70°C. VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.



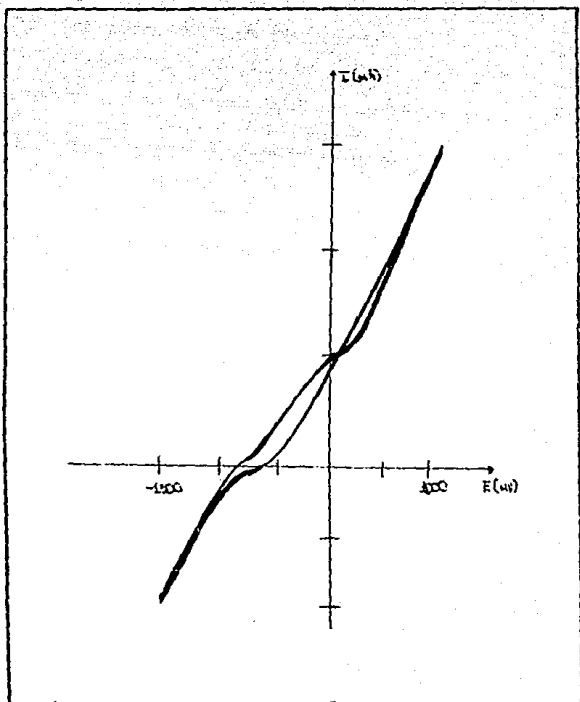
GRAFICA No. 3

VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CON 0,3% DE  $\text{CaCl}_2$   
A 25°C. VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.



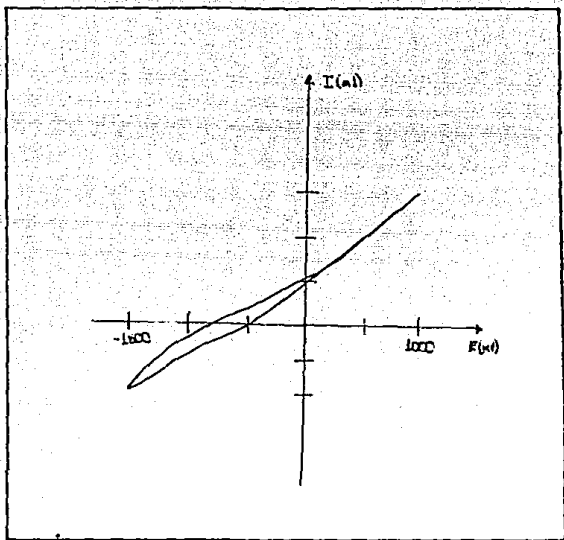
GRAFICA No. 4

VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CON 0.3% DE  $\text{CaCl}_2$   
A  $70^\circ\text{C}$ , VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.

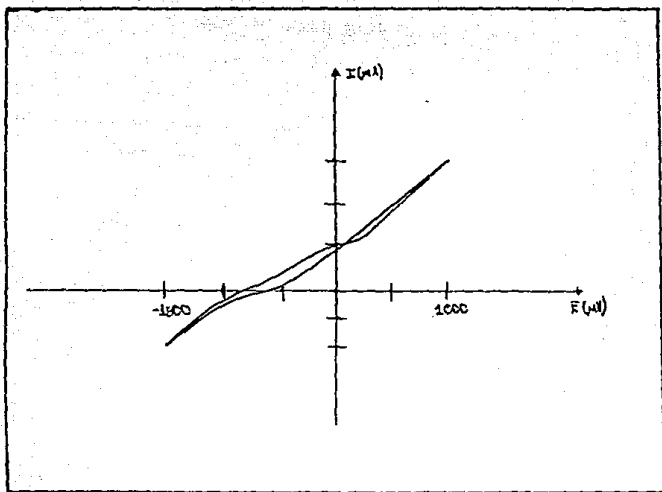


GRAFICA No. 5

VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca(OH)}_2$  CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$   
A  $70^\circ\text{C}$ . VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.

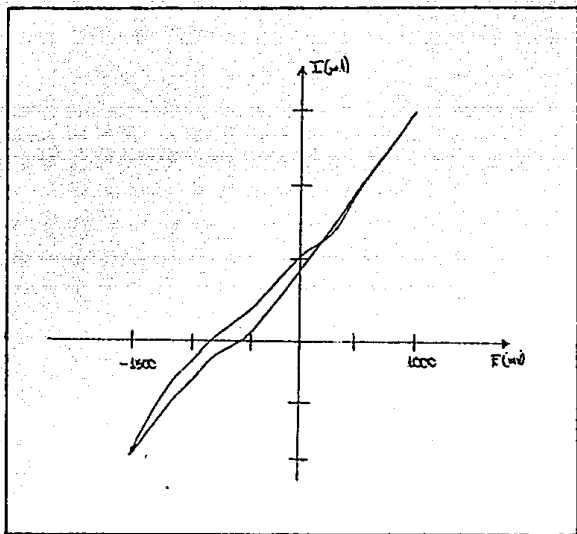


GRAFICA No. 6  
 VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
 EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$   
 A 70°C. VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.



GRAFICA No. 7

VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$   
A 25°C. VELOCIDAD DE BARRIDO DE 100 mV/seg.



GRAFICA No. 8  
VOLTAMETRIA CICLICA PARA ACERO DE REFUERZO  
EN SOLUCION SATURADA DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$   
A  $70^\circ\text{C}$ . VELOCIDAD DE BARRIDO 100 mV/seg.



A continuación se presentan las curvas obtenidas de los experimentos correspondientes a la segunda parte del actual trabajo; éstos son los Estudios Potenciodinámicos en Hidróxido de Calcio Saturado. Las diferentes condiciones a las que fué sometida la probeta de acero microaleado se marcan en cada experimento y se dan en la siguiente Tabla :

TABLA NO. 1

GRAFICA	%CaCl <sub>2</sub>	t(°C)	VELOCIDAD DE BARRIDO (mV/seg)
9	-	25	100
10	0.3	25	100
11	1.0	25	100
12	2.0	25	100
13	-	70	100
14	0.3	70	100
15	1.0	70	100
16	2.0	70	100
17	-	25	0.1
18	0.3	25	0.1
19	1.0	25	0.1
20	2.0	25	0.1
21	-	70	0.1
22	0.3	70	0.1
23	1.0	70	0.1
24	2.0	70	0.1

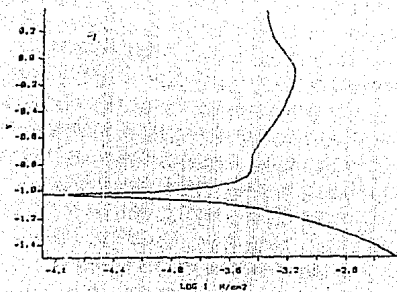
Como se observa de la Tabla No. 1, las curvas 9, 10, 11 y 12, fueron obtenidas bajo las mismas condiciones de temperatura y velocidad de barrido (25°C y 100 mV/seg) y lo que se varió fué la concentración de iones agresivos (CaCl<sub>2</sub>).

De la gráfica 13 a la 16 se vuelve a observar una variación en la concentración de CaCl<sub>2</sub>, mientras que la temperatura y la velocidad de barrido permanecen iguales para todos los experimentos; sólo que en éste caso la temperatura fué modificada, trabajándose a 70°C.

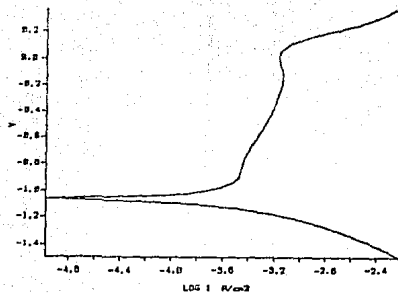
Para las gráficas 17, 18, 19 y 20, aparte de la variación en concentración de  $\text{CaCl}_2$ , se tiene una variación en la velocidad de barrido; ahora esta es disminuida a 0.1 mV/seg. para todos los casos y la temperatura de trabajo fué 70°C.

Finalmente, las curvas 21, 22, 23 y 24 que también son como en los casos anteriores, para diferentes concentraciones de iones agresivos, fueron obtenidas al trabajar a 70°C y 0.1 mV/seg.

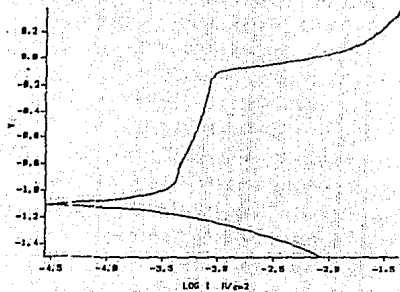
En general, se observa que para una concentración determinada de  $\text{CaCl}_2$  se realizaron 4 experimentos: 2 de ellos a 25°C con 100 y 0.1 mV/seg y los otros 2, a 70°C, también utilizando las 2 velocidades de barrido anteriormente mencionadas, dando un total de 16 experimentos para las 4 diferentes concentraciones de iones agresivos (0.0.3, 1.0 y 2.0% de  $\text{CaCl}_2$ ).



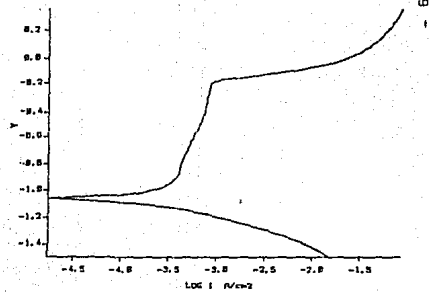
GRAFICA No. 9



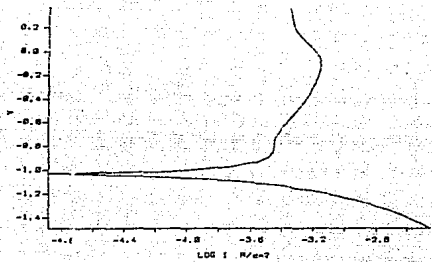
GRAFICA No. 10



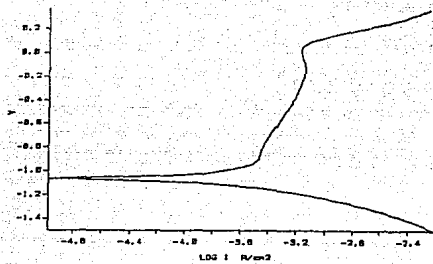
GRAFICA No. 11



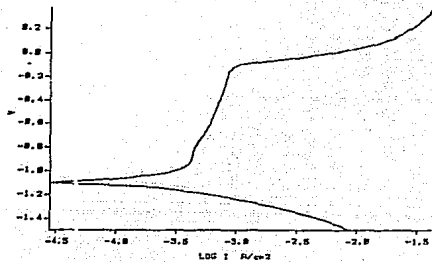
GRAFICA No. 12



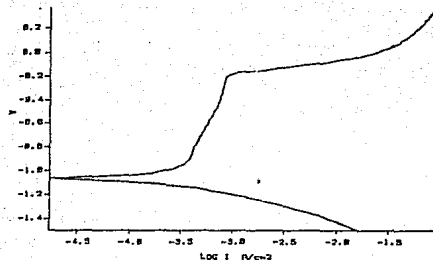
GRAFICA No. 9



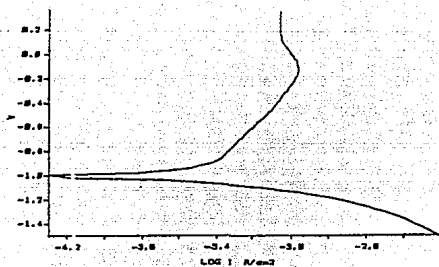
GRAFICA No. 10



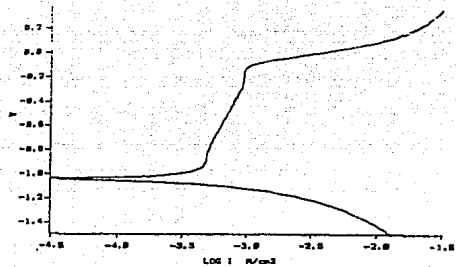
GRAFICA No. 11



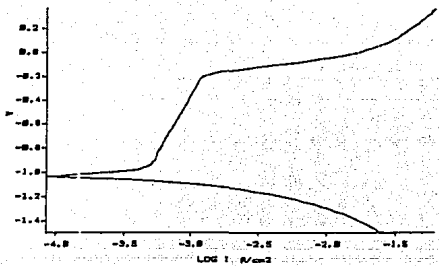
GRAFICA No. 12



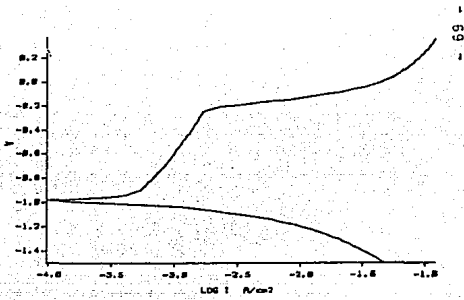
GRAFICA No. 13



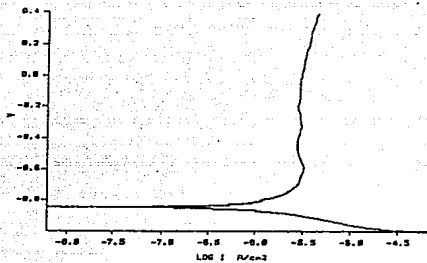
GRAFICA No. 14



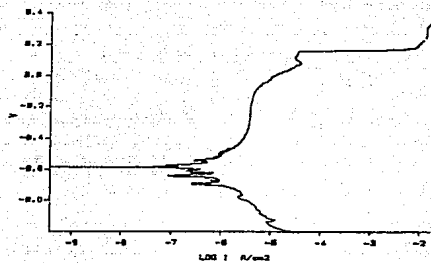
GRAFICA No. 15



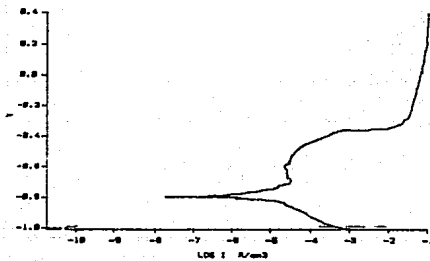
GRAFICA No. 16



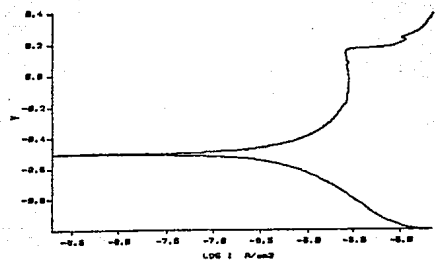
GRAFICA No. 17



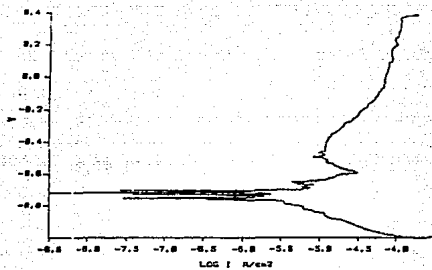
GRAFICA No. 18



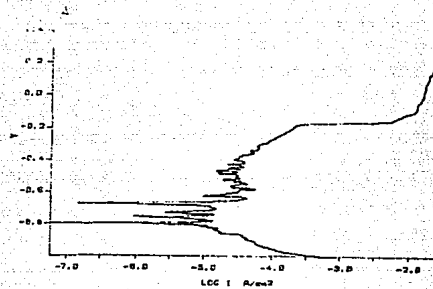
GRAFICA No. 19



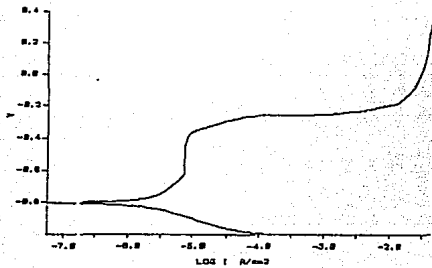
GRAFICA No. 20



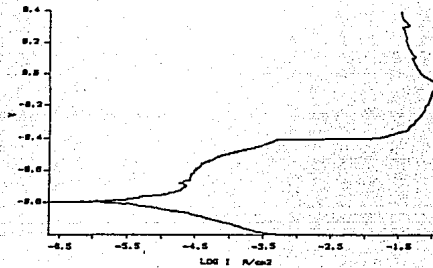
GRAFICA No. 21



GRAFICA No. 22



GRAFICA No. 23



GRAFICA No. 24

Para la tercera parte del desarrollo experimental del presente trabajo, correspondiente a los Estudios Potenciográficos en Sistemas de "Concreto Armado", se realizaron los experimentos mostrados en las siguientes 3 Tablas :

TABLA No. 2 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO CON 0%CaCl<sub>2</sub>

GRAFICA	T(°C)	VELOCIDAD DE BARRIDO (mV/seg)	t(DIAS)
25	25	100	15
26	25	100	30
27	25	100	45
28	25	100	60
29	25	100	75
30	25	100	90
31	70	100	15
32	70	100	30
33	70	100	45
34	70	100	60
35	70	100	75
36	70	100	90
37	25	0.1	15
38	25	0.1	30
39	25	0.1	45
40	25	0.1	60
41	25	0.1	75
42	25	0.1	90
43	70	0.1	15
44	70	0.1	30
45	70	0.1	45
46	70	0.1	60
47	70	0.1	75
48	70	0.1	90

De ésta tabla se observa que las 6 primeras curvas - (25-30) fueron obtenidas al realizar los experimentos a 25°C y 100 mV/seg, durante períodos cortos de 15 días, hasta completar 3 meses.

De la gráfica 31 a la 36 se tiene una variación en la

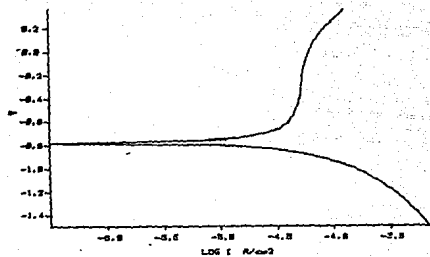


temperatura de trabajo, aumentándola a 70°C y manteniendo la velocidad de barrido a 100 mV/seg. Igual al caso anterior, se realizaron las respectivas mediciones cada 15 días por un espacio de 3 meses.

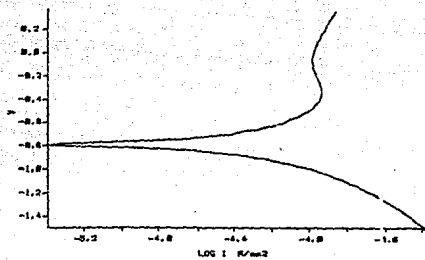
Para las gráficas que van de la 37 a la 42 se observa que los experimentos realizados fueron de igual manera que en los casos anteriores, sólo que en éste caso la temperatura de trabajo fué 25°C y la velocidad de barrido 0.1 mV/seg.

Las últimas 6 gráficas (43-48) fueron obtenidas al trabajar a 70°C, con la misma velocidad de barrido que las anteriores y durante el mismo período de tiempo que en los otros casos.

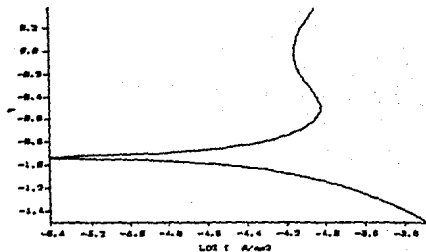
En general, se obtuvieron para el sistema de concreto armado en ausencia de  $\text{CaCl}_2$  24 curvas, resultado de variar temperatura, velocidad de barrido y tiempo de realización del experimento. Las gráficas correspondientes se presentan en seguida.



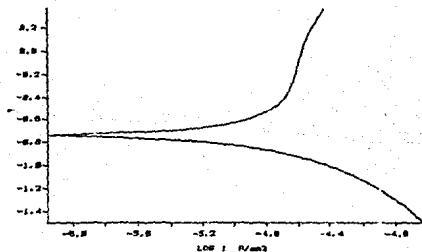
GRAFICA No. 25



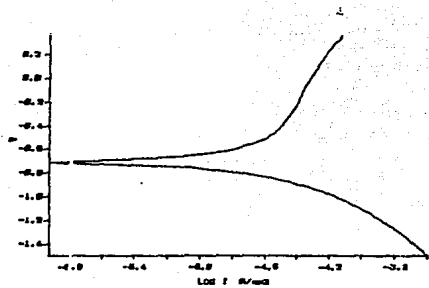
GRAFICA No. 26



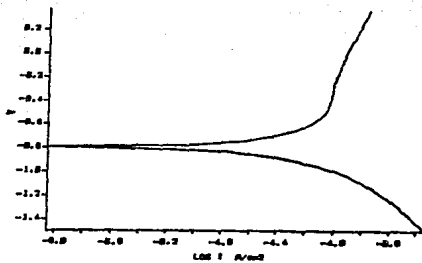
GRAFICA No. 27



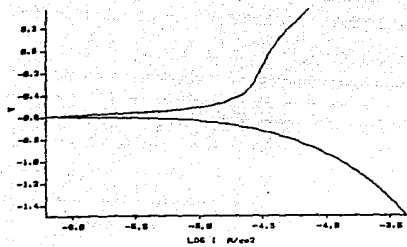
GRAFICA No. 28



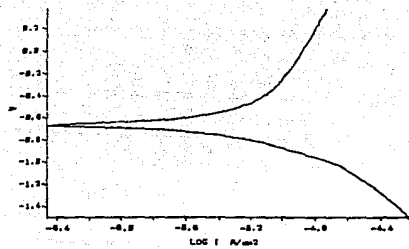
GRAFICA No. 29



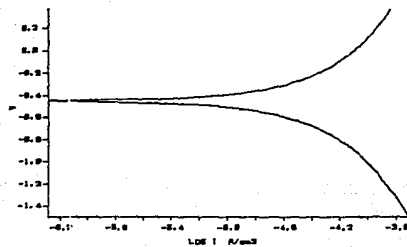
GRAFICA No. 30



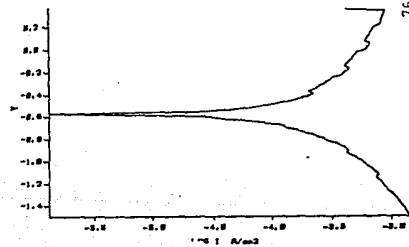
GRAFICA No. 31



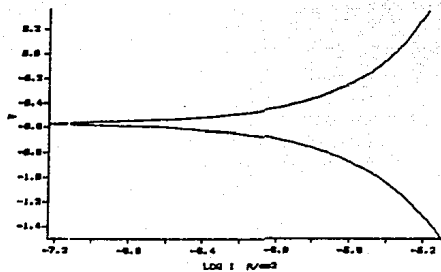
GRAFICA No. 32



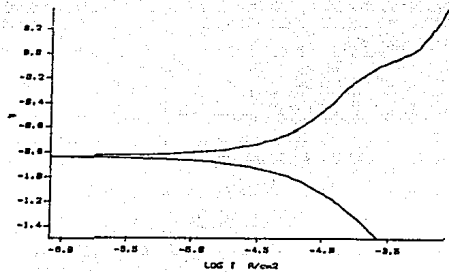
GRAFICA No. 33



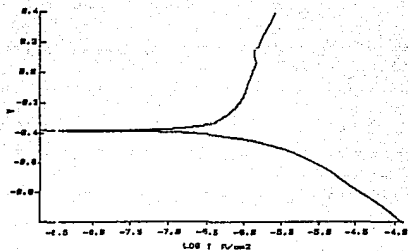
GRAFICA No. 34



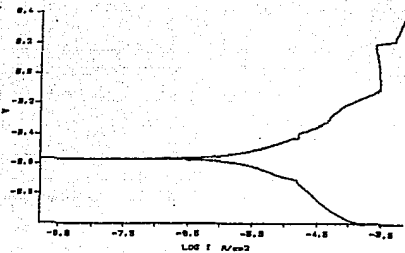
GRAFICA No. 35



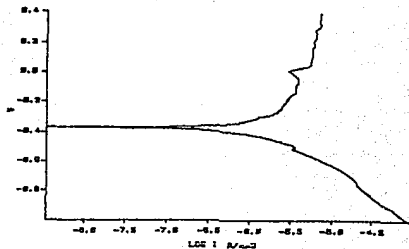
GRAFICA No. 36



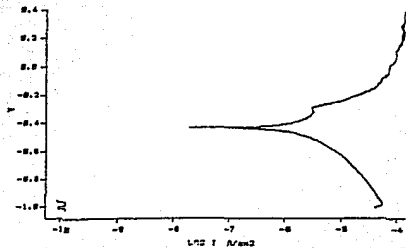
GRAFICA No. 37



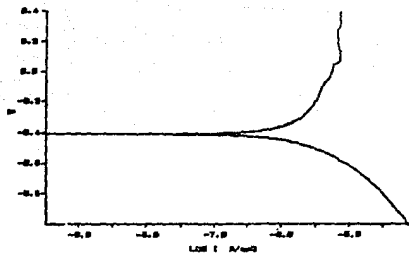
GRAFICA No. 38



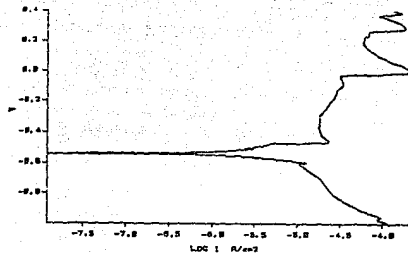
GRAFICA No. 39



GRAFICA No. 40

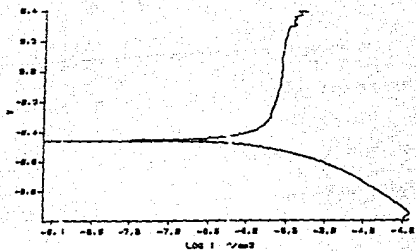


GRAFICA No. 41

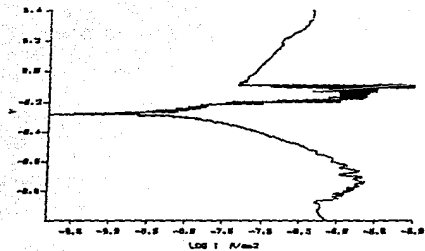


GRAFICA No. 42

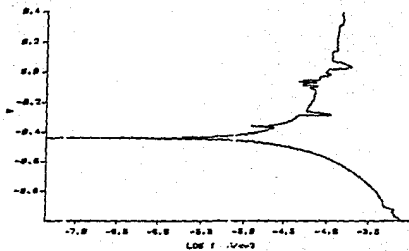
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



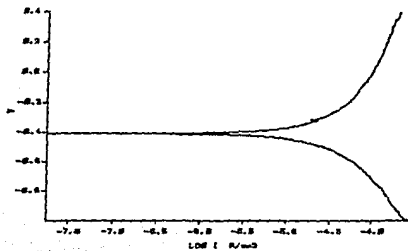
GRAFICA No. 43



GRAFICA No. 44

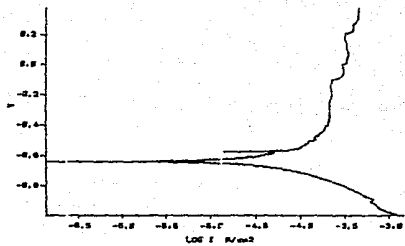


GRAFIC. No. 45

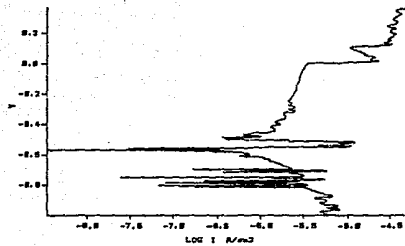


GRAFICA No. 46





GRAFICA No. 47



GRAFICA No. 48

TABLA No. 3 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO CON 1.0%CaCl<sub>2</sub>

GRAFICA	T(°C)	VELOCIDAD DE BARRIDO (mV/seg)	t(DÍAS)
49	25	100	15
50	25	100	30
51	25	100	45
52	25	100	60
53	25	100	75
54	25	100	90
55	70	100	15
56	70	100	30
57	70	100	45
58	70	100	60
59	70	100	75
60	70	100	90
61	25	0.1	15
62	25	0.1	30
63	25	0.1	45
64	25	0.1	60
65	25	0.1	75
66	25	0.1	90
67	70	0.1	15
68	70	0.1	30
69	70	0.1	45
70	70	0.1	60
71	70	0.1	75
72	70	0.1	90

De ésta Tabla se observa que las 6 primeras gráficas (49-54) se obtuvieron al trabajar la probeta de concreto a 25°C y 100 mV/seg durante 3 meses con mediciones periódicas, cada 15 días.

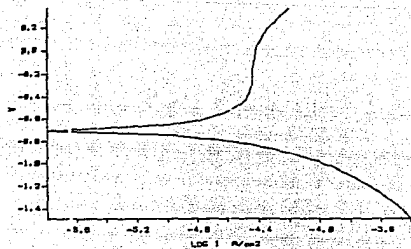
El siguiente paquete de 6 gráficas (55-60) corresponde a los experimentos de 3 meses realizados a 70°C y la misma velocidad de barrido que en el caso anterior.

De la gráfica 61 a la 66 se observa una variación en la velocidad de barrido, ya que fué disminuída a 0.1 mV/seg, la temperatura utilizada fué 25°C y de igual manera a los casos

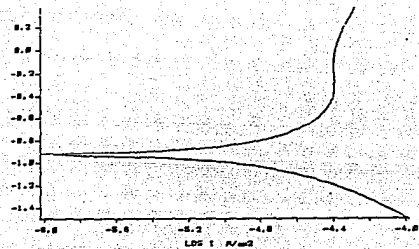
anteriores y a todo lo que constituye la 3a. parte del Desarrollo Experimental, el experimento duró 3 meses con mediciones sucesivas cada 15 días.

Finalmente, las últimas gráficas (67-72) se trabajaron a 70°C y 0.1 mV/seg, por tres meses.

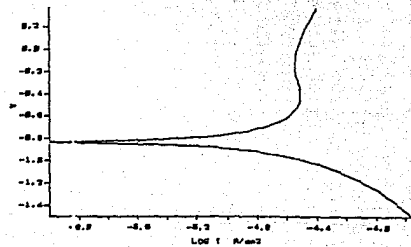
Se realizaron 24 experimentos, dividiéndose en paquetes de 6 en los cuales se mantuvo constante la temperatura y la velocidad de barrido y sólo se vió el efecto del tiempo a lo largo de 3 meses. Esta sistematización como podrá comprobarse, se realizó a lo largo de todos los estudios potenciodinámicos, en sistemas de varillas pretensadas embebidas en concreto.



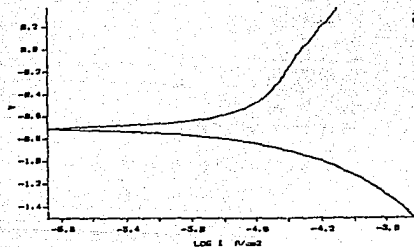
GRAFICA No. 49



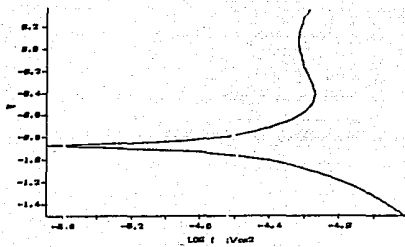
GRAFICA No. 50



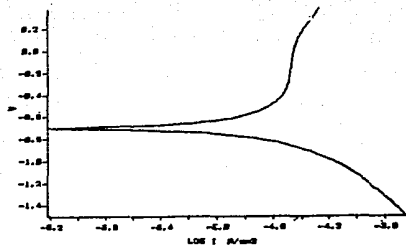
GRAFICA No. 51



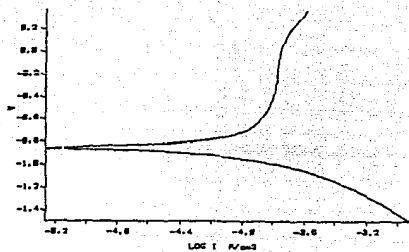
GRAFICA No. 52



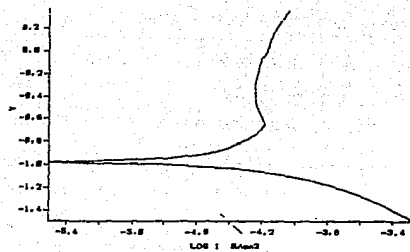
GRAFICA No. 53



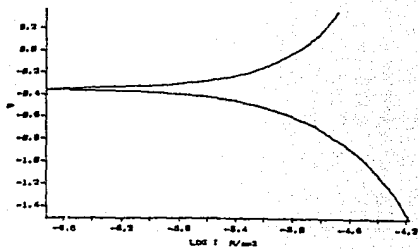
GRAFICA No. 54



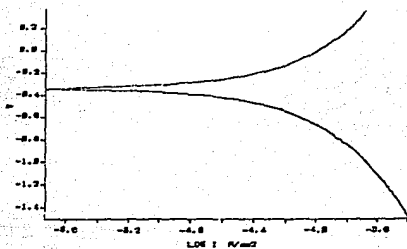
GRAFICA No. 55



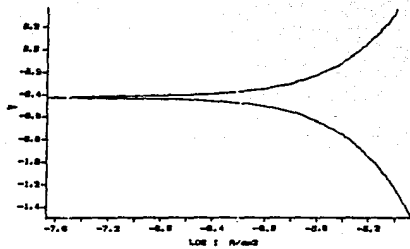
GRAFICA No. 56



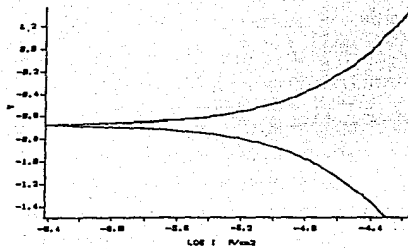
GRAFICA No. 57



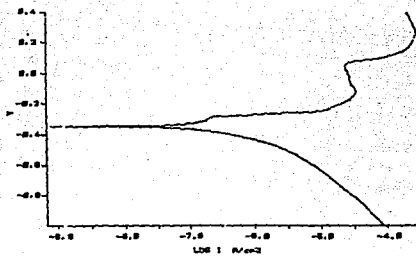
GRAFICA No. 58



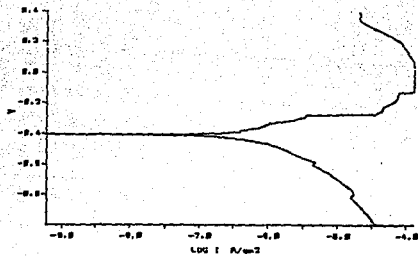
GRAFICA No. 59



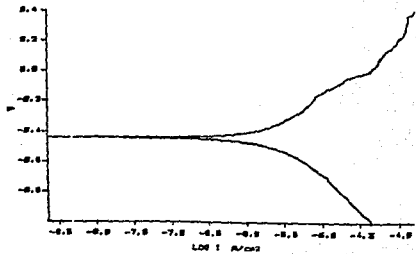
GRAFICA No. 60



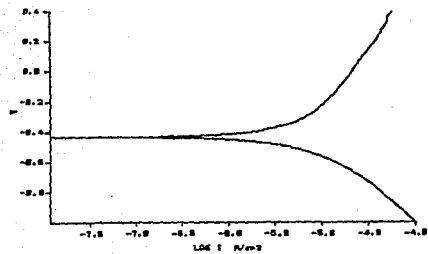
GRAFICA No. 61



GRAFICA No. 62

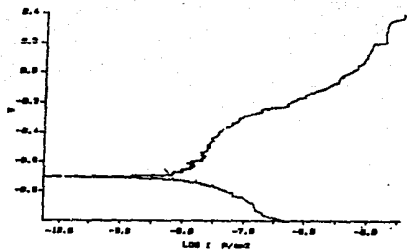


GRAFICA No. 63

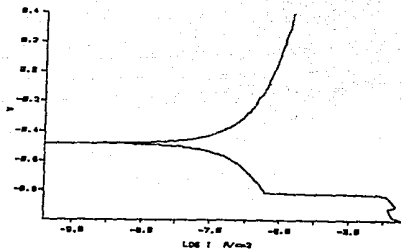


GRAFICA No. 64

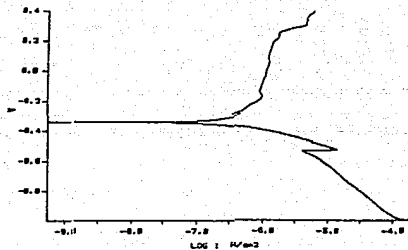




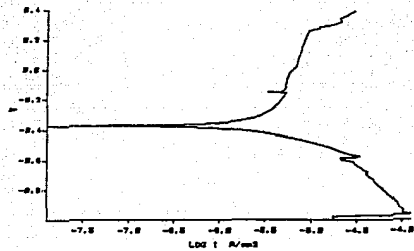
GRAFICA No. 65



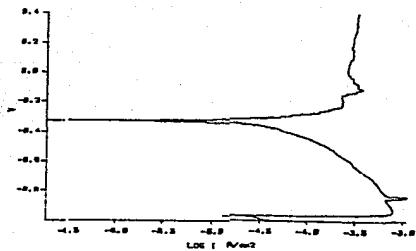
GRAFICA No. 66



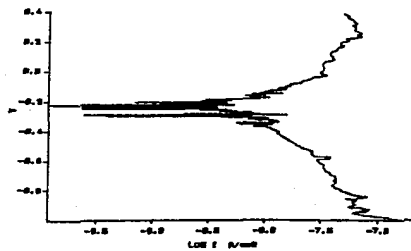
GRAFICA No. 67



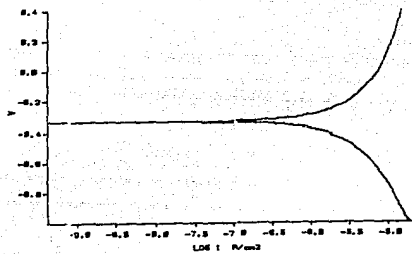
GRAFICA No. 68



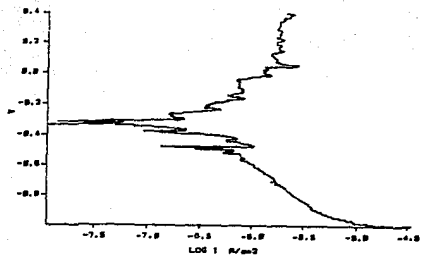
GRAFICA No. 69



GRAFICA No. 70



GRAFICA No. 71



GRAFICA No. 72

TABLA No. 4 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$

GRAFICA	T(°C)	VELOCIDAD DE BARRIDO (mV/seg)	t(DIAS)
73	25	100	15
74	25	100	30
75	25	100	45
76	25	100	60
77	25	100	75
78	25	100	90
79	70	100	15
80	70	100	30
81	70	100	45
82	70	100	60
83	70	100	75
84	70	100	90
85	25	0.1	15
86	25	0.1	30
87	25	0.1	45
88	25	0.1	60
89	25	0.1	75
90	25	0.1	90
91	70	0.1	15
92	70	0.1	30
93	70	0.1	45
94	70	0.1	60
95	70	0.1	75
96	70	0.1	90

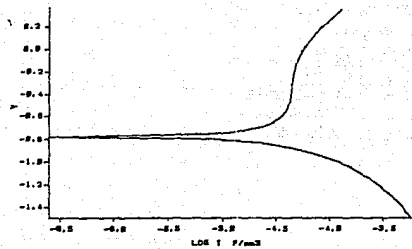
De la gráfica 73 a la 78 se observa que la temperatura de trabajo fué 25°C y la velocidad de barrido utilizada fué de 100 mV/seg.

Para las gráficas siguientes (79-84) la velocidad de barrido fué la misma que la utilizada para los experimentos anteriores y la temperatura se aumentó a 70°C.

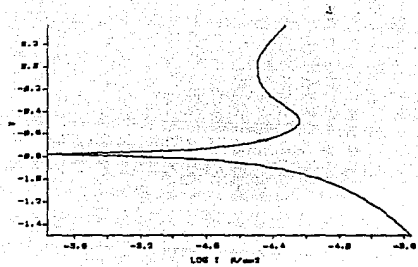
En el caso de las gráficas que van de la 85 a la 90, la temperatura de trabajo fué 25°C y la velocidad de barrido con la que se trabajó fué de 0.1 mV/seg.

Finalmente, las últimas 6 gráficas (91-96), se obtuvieron al trabajar a 70°C y la misma velocidad de barrido que en el caso anterior (0.1 mV/seg.)

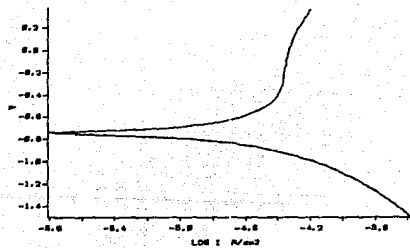
De la misma manera que cuando se realizaron los experimentos con las probetas de concreto armado, que contenían 0 y 1.0% de  $\text{CaCl}_2$ , el tiempo de duración de los experimentos para éste caso fué de 3 meses con mediciones cada 15 días y se obtuvieron en total 24 curvas diferentes.



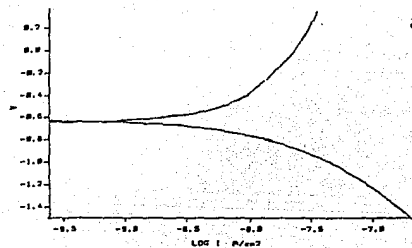
GRAFICA No. 73



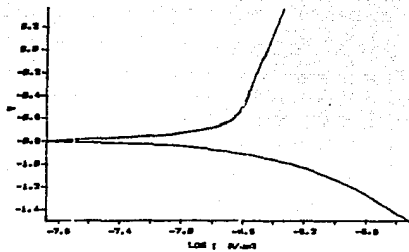
GRAFICA No. 74



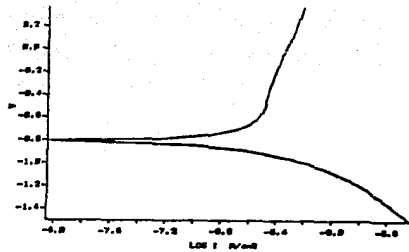
GRAFICA No. 75



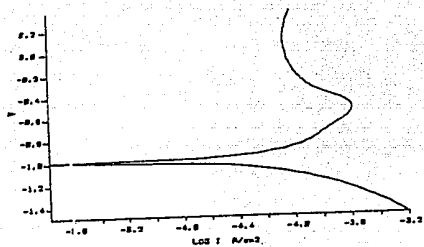
GRAFICA No. 76



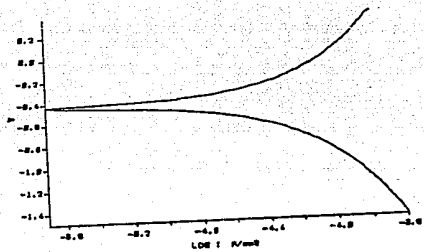
GRAFICA No. 77



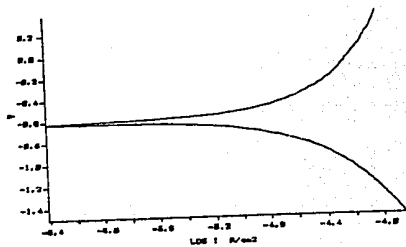
GRAFICA No. 78



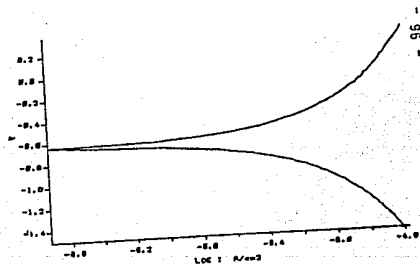
GRAFICA No. 79



GRAFICA No. 80

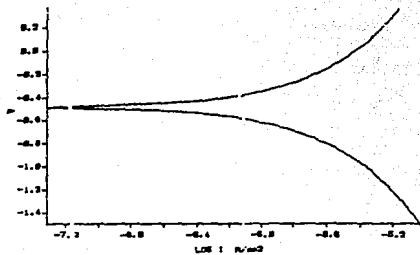


GRAFICA No. 81

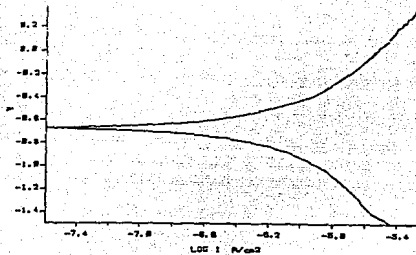


GRAFICA No. 82

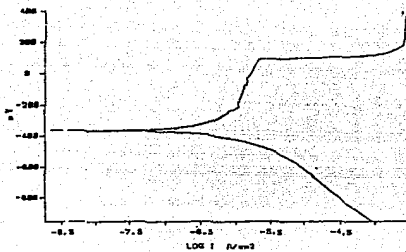




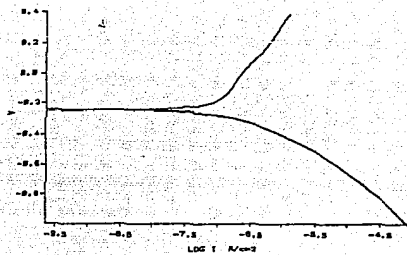
GRAFICA No. 83



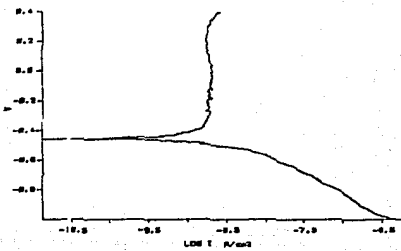
GRAFICA No. 84



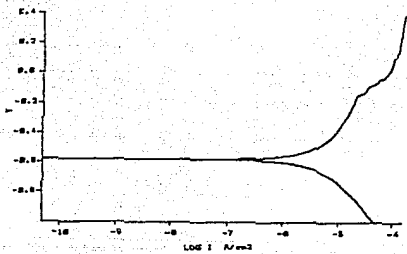
GRAFICA No. 85



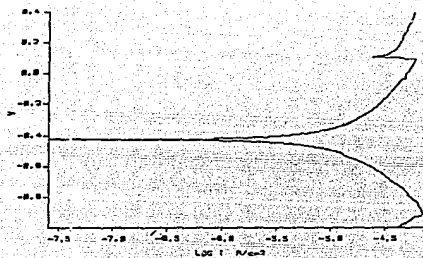
GRAFICA No. 86



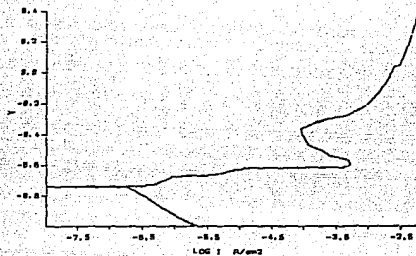
GRAFICA No. 87



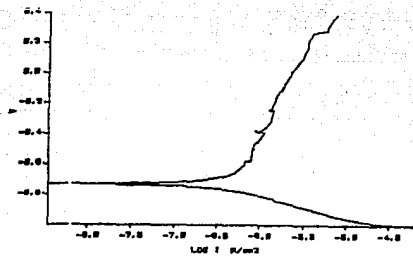
GRAFICA No. 88



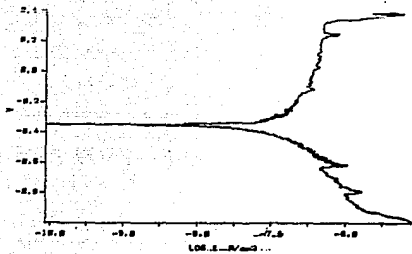
GRAFICA No. 89



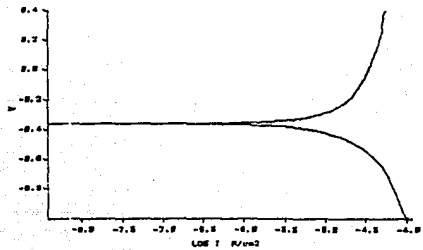
GRAFICA No. 90



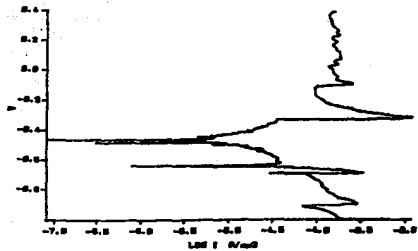
GRAFICA No. 91



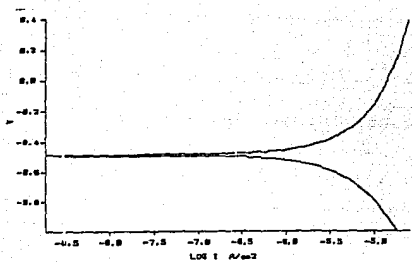
GRAFICA No. 92



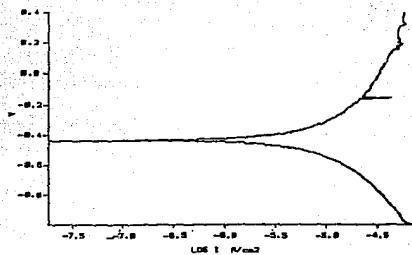
GRAFICA No. 93



GRAFICA No. 94



GRAFICA No. 95



GRAFICA No. 96

Debido a la gran cantidad de parámetros manejados en esta parte del desarrollo experimental, y para mejor entendimiento de los sucesos ocurridos durante los experimentos, así como su interrelación mutua, se construyeron diferentes gráficas en las que aparecen varias curvas que al relacionar las entre sí, nos dan una mayor información acerca del comportamiento del sistema de concreto armado.

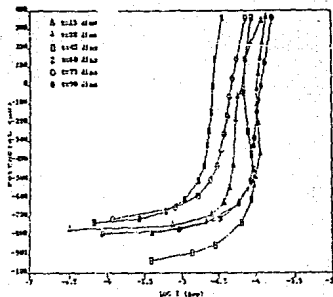
Las gráficas 97, 98 y 99 muestran las curvas obtenidas cada 15 días a lo largo de 3 meses; éstas curvas se obtuvieron al trabajar a 25°C y 100 mV/seg.; lo mismo ocurre con las gráficas 100, 101 y 102 sólo que aquí, la temperatura de trabajo fué 70°C.

Para las gráficas 103, 104 y 105 se observan de igual manera que en el caso anterior, 6 curvas correspondientes a mediciones realizadas cada 15 días, pero ahora a velocidad de barrido baja (0.1 mV/seg) y 25°C. En las gráficas 106, 107 y 108 la única variación con respecto a las anteriores, es que la temperatura de trabajo fué aumentada a 70°C.

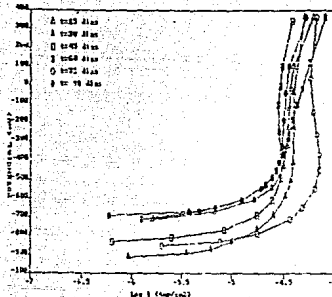
En las gráficas que van de la 109 a la 117 se observan 2 curvas; cada una de ellas a diferente velocidad de barrido. Se construyeron 3 gráficas para cada concentración de  $\text{CaCl}_2$ ; éstas gráficas corresponden a diferentes tiempos a lo largo de los 3 meses trabajados; todas ellas a 25°C. Para las gráficas que van de la 118 a la 126 se hizo lo mismo; la diferencia es que en éste caso se utilizaron las curvas obtenidas a 70°C. En total se construyeron 6 gráficas para cada concentración de  $\text{CaCl}_2$ .

Finalmente, se construyeron 4 gráficas (127-130) en donde se grafican, en cada una de ellas 3 curvas correspondientes a las diferentes concentraciones de  $\text{CaCl}_2$  con una veloci-

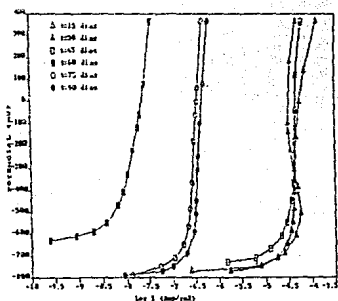
dad de barrido de 0.1 mV/seg. Las gráficas 127 y 128 son para 25°C y la 129 y 130 para 40°C; la diferencia entre cada par de gráficas es que en el primer caso, las curvas son las correspondientes al inicio del experimento y en el segundo, al final del mismo.



GRAFICA No. 97  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100 mV/seg. y 25°C

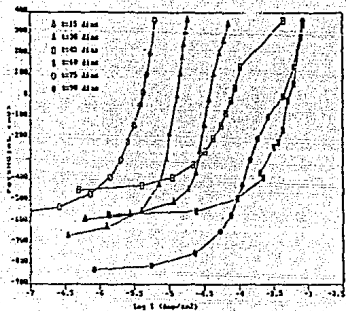


GRAFICA No. 98  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100 mV/seg. y 25°C.

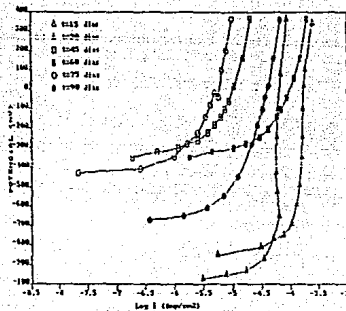


GRAFICA No. 99  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100 mV/seg. y 25°C.

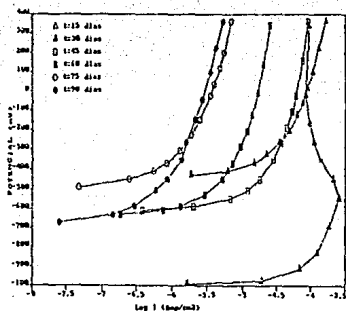




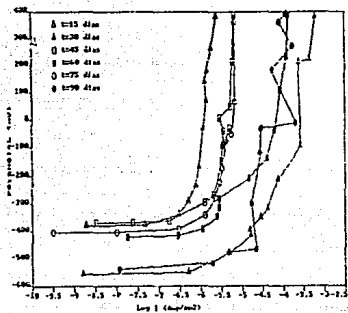
GRAFICA No. 100  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 0.2 DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100mV/seg. y 70°C.



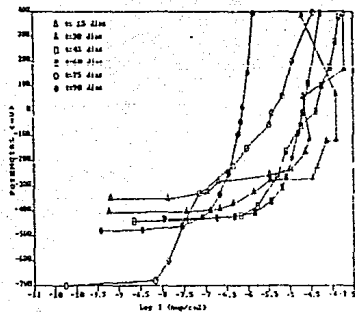
GRAFICA No. 101  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100mV/seg. y 70°C.



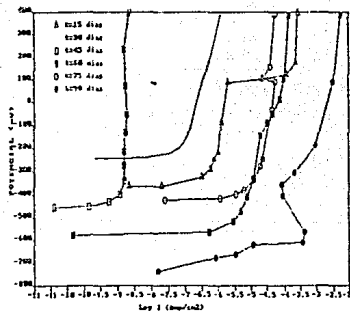
GRAFICA No. 102  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 100mV/seg. y 70°C.



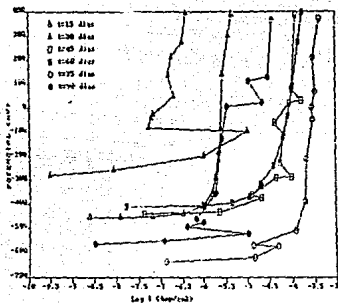
GRAFICA No. 103  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1mV/seg. Y 25°C.



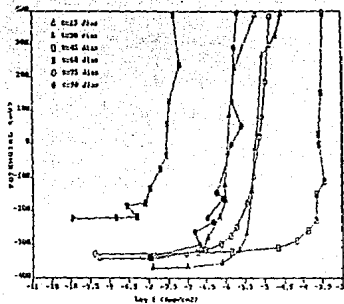
GRAFICA No. 104  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1mV/seg. Y 25°C.



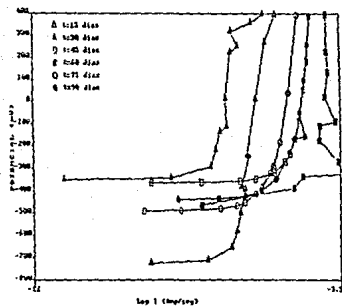
GRAFICA No. 105  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1mV/seg. Y 25°C.



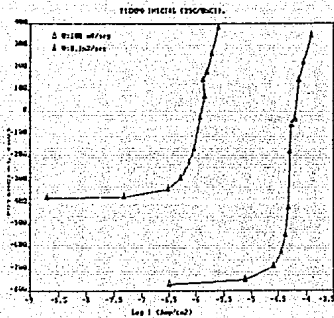
GRAFICA No. 106  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1 mV/seg. Y 70°C.



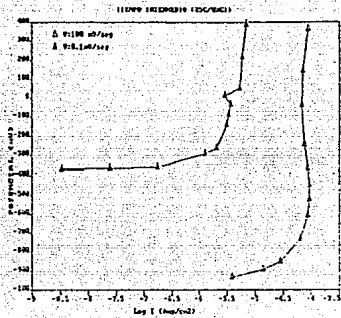
GRAFICA No. 107  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 1.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1 mV/seg. Y 70°C.



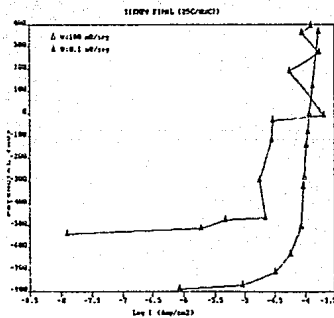
GRAFICA No. 108  
 SISTEMA DE CONCRETO ARMADO  
 CON 2.0% DE  $\text{CaCl}_2$  Y ESTUDIADO A  
 0.1 mV/seg. Y 70°C.



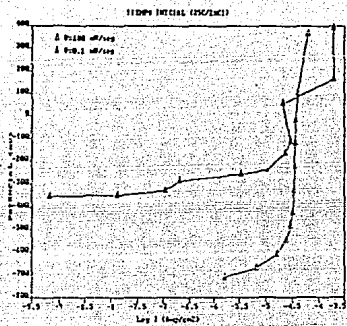
GRAFICA No. 109



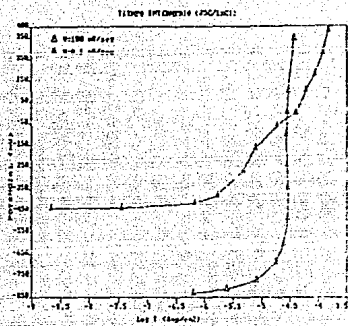
GRAFICA NO. 110



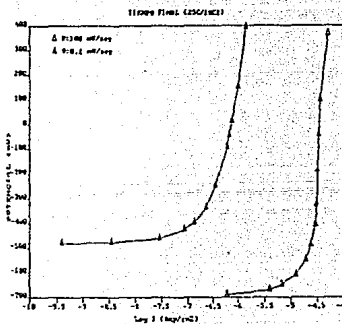
GRAFICA No. 111



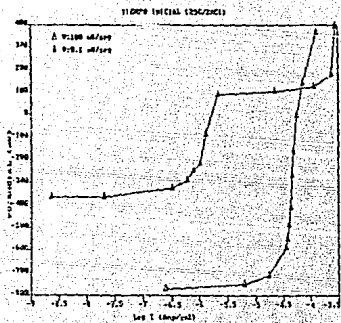
GRAFICA NO. 112



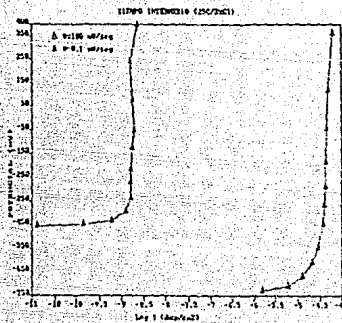
GRAFICA NO. 113



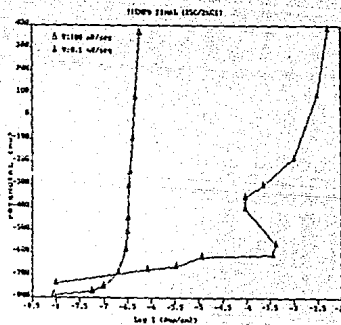
GRAFICA No. 114



GRAFICA No. 115

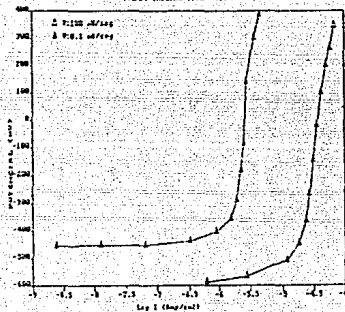


GRAFICA No. 116



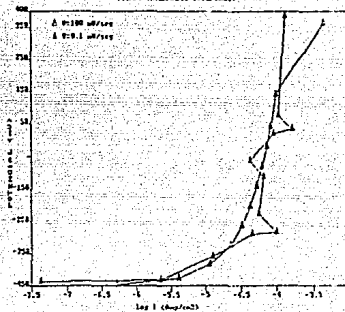
GRAFICA No. 117

TIEMPO INICIAL (INICIAL)



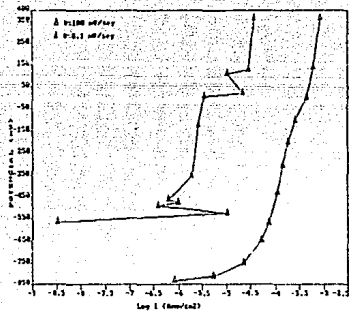
GRAFICA No. 118

TIEMPO INTERMEDIO (INTERMEDIAS)

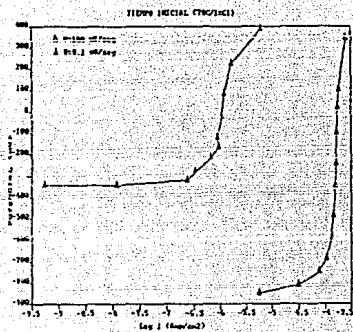


GRAFICA No. 119

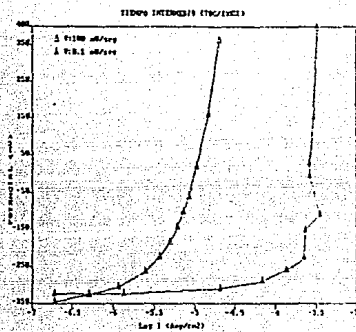
TIEMPO FINAL (FINAL)



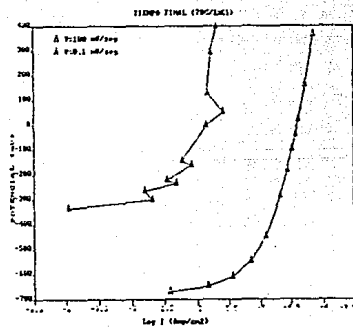
GRAFICA No. 120



GRAFICA No. 121

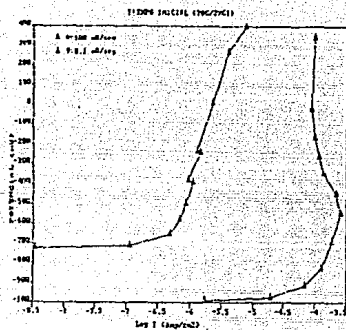


GRAFICA No. 122

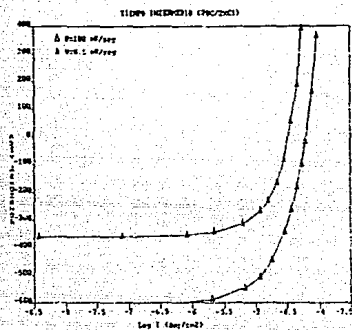


GRAFICA No. 123

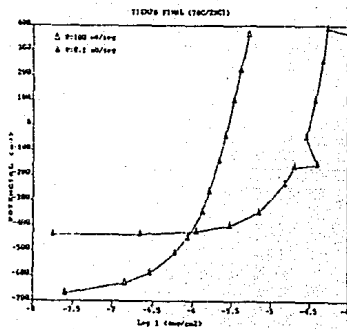




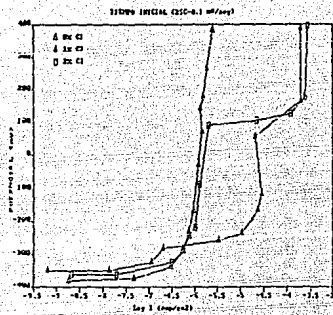
GRAFICA No. 124



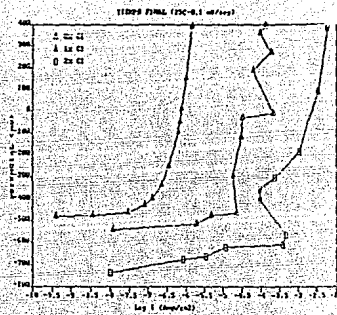
GRAFICA No. 125



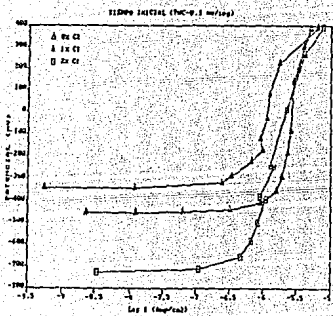
GRAFICA No. 126



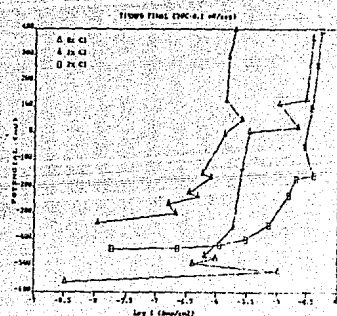
GRAFICA No. 127



GRAFICA No. 128



GRAFICA No. 129



GRAFICA No. 130

Los resultados encontrados durante el desarrollo experimental del presente trabajo, se muestran en las gráficas de la 1 a la 130, de éstos, se observan las tendencias seguidas por el refuerzo metálico al variar ciertos parámetros, como velocidad de barrido, temperatura, tiempo y concentración de iones cloruro.

De los resultados se observa que el material es un medio sin cloruros a 25°C y velocidad de barrido baja, presenta una transición activo-pasivo que indica un comportamiento normal<sup>(2)</sup>. Al incrementar la velocidad de barrido la curva muestra una doble transición, una de las cuales se mantiene a aproximadamente el mismo potencial de la encontrada a velocidad lenta (gráficas 17 y 9). Cuando se aumenta la temperatura, independientemente de la velocidad de barrido, aparecen las transiciones correspondientes, manteniéndose el potencial constante en relación al encontrado a 25°C (gráficas 13 y 21). La transición presente a 70°C se define mejor a medida que decrece la velocidad de barrido, incrementándose la corriente.

Al adicionar cloruro de calcio al medio, el comportamiento general se modifica; desapareciendo la transición activo-pasivo y apareciendo una corriente límite independientemente de temperatura o velocidad de barrido. La presencia de ésta corriente límite se mantiene en los mismos valores. Independientemente de concentración de cloruros, esto se puede apreciar en las gráficas 14, 15 y 16.

Cuando el medio contiene cloruro de calcio, se observan variaciones bruscas de corriente, las cuales son más marcadas a 70°C y velocidad de barrido lento (Gráfica 16). Estas variaciones de corriente podrían asociarse a rompimientos de ca

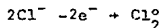
pas pasivas, los cuales son debidos a la presencia de iones cloruro y no son detectados, lo mismo que la variación de corriente, a velocidad de barrido alta, posiblemente por razones de sensibilidad del método.

Entre mayor sea la velocidad de barrido, menores serán los cambios en la concentración del electrolito y de la morfología de la superficie<sup>(51)</sup>. Cuando la velocidad de barrido es 0.1 mV/seg., no se enmascaran aspectos importantes de la curva de polarización, mostrando, entre otras cosas, que la corriente alcanzada es mucho menor que para cuando se trabaja a 100 mV/seg (Gráficas 109 y 110) con las mismas condiciones de concentración y temperatura.

En general, en ausencia de agentes agresivos como el cloruro de calcio, las capas pasivas protegen al metal dando como resultado, velocidades de corrosión pequeñas; contrario a esto, y de los resultados obtenidos, se observa una destrucción mayor de las capas pasivas para concentraciones de cloruros cada vez más altos. El rompimiento de películas o capas pasivas en este caso; puede explicarse por dos condiciones básicas:

- 1) La ocurrencia de una reacción de oxidación del cloruro a cloro, la cual se corrobora por la presencia del potencial de transición activo-pasivo (Potencial de Flande) a un valor constante.

La ocurrencia de la reacción de oxidación de cloruro:



sería responsable de la aparición de la corriente límite, la cual desaparece al dominar la reacción de oxidación de fierro, y se favorece a velocidad de barrido lenta e

independientemente de la temperatura.

Esta barrera se observa claramente en las gráficas 10 y 18, construídas a diferente velocidad de barrido. Por otro lado, el desprendimiento de cloro, tiene lugar con menor sobrepotencial, a menor temperatura.

Además, el incremento continuo de corriente que se da debido a la reacción de oxidación antes mencionada, indica que la reacción continúa por largo período de tiempo, tal y como se puede observar en la Gráfica 23.

- 2) Por la adsorción del ión  $\text{Cl}^-$  en la superficie de la muestra metálica o varilla de refuerzo.

Esta reacción de adsorción es comprobada y se muestra en las gráficas 1 a la 8, en donde los resultados obtenidos por Voltametría Cíclica indican que al aumentar el número de ciclos, tanto el potencial como la corriente se mantienen constantes<sup>(49)</sup>.

En las muestras sin cloruro de calcio la capa pasiva se mantiene y a medida que se incrementa la concentración de cloruro, se observa una condición despasivante y una despolarización del sistema, la cual se invierte al llegar a 2% de Cloruro de Calcio; éste comportamiento no se puede explicar, debido a que las reacciones de oxidación y reducción se enmascaran con la reacción de adsorción.

En general, es posible decir que en ausencia de cloros al aumentar la temperatura; se favorece la reacción general de reducción, disminuye el sobrepotencial de reducción de agua, es necesaria mayor cantidad de corriente para mantener pasivado el sistema a 70°C.

Del proceso anódico se puede mencionar que la pasivación es mejor a 25 que a 70°C.

Del análisis físico realizado a las varillas de refuerzo embebidas en concreto, se tienen las siguientes fotografías :



FOTOGRAFIA No. 1



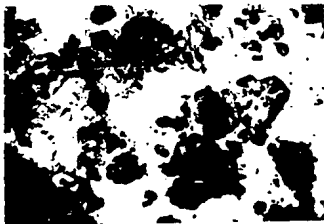
FOTOGRAFIA No. 2



FOTOGRAFIA No. 3



FOTOGRAFIA No. 4



FOTOGRAFIA No. 5

La fotografía 1, muestra una capa oxidada de volumen considerable sobre la muestra metálica, la cual llega inclusive a penetrar el concreto. (Fotografía 2).

En la fotografía 3, se muestra agrietamiento del concreto después de períodos de tiempo superiores a un mes aproximadamente, el cual es debido a un incremento de esfuerzos, resultado del mayor volumen ocupado por los productos de corrosión.

La posibilidad de que el agrietamiento ocurriera primero, lo cual permitiría infiltración del medio hacia la muestra metálica parece poco probable, ya que las curvas indican que la corrosión avanza continuamente desde tiempos tan cortos como 24 horas después del fraguado, hasta 3 meses que es el máximo tiempo de trabajo. (Gráficas 25-96).

En la fotografía 4, se observan agrietamientos en la varilla de refuerzo, agrietamientos del tipo transgranular que indican la posibilidad de una falla por corrosión bajo esfuerzo<sup>(42)</sup>, la cual se inicia en regiones con picaduras (corrosión por cloruros) tales como los que se muestran en la fotografía 5.



## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES**

1. El sistema de concreto armado no funciona, debido a una oxidación constante, ocasionada por la adsorción de cloruro que impide la formación de películas pasivas.
2. Aparentemente es la presencia del ión cloruro y no su cantidad la responsable de la activación del sistema.
3. La velocidad de barrido alta (100 mV/seg), no da información del mecanismo presente; es más adecuado trabajar éstos sistemas a velocidades de barrido bajas.
4. Al incrementar la temperatura, el sistema se activa y esto se refleja en un aumento en la densidad de corriente.
5. Los productos de corrosión del sistema, al ocupar mayor volumen, ocasionan un incremento de esfuerzos, los que provocan el agrietamiento del concreto, coadyuvaría a la ocurrencia de un proceso cíclico.

**CAPITULO V**  
**BIBLIOGRAFIA**

- 1) Lankard, D.R. Cement and Concrete Technology for the Corrosion Engineer. Materials Performance 15(8), 24-37 (1976).
- 2) González Fernández, José A. Teoría y Práctica de la Lucha contra la Corrosión. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. 183-215, Madrid 1984.
- 3) Kaesche H., Archiv. Eisenhüttenwesen. 36(1965), 911.
- 4) Calleja, J. Mat. Const. Ultimos Avances. No. 150-151 (1973), 153.
- 5) Andrade C., Alonso C. y González J.A., Materiales de Construcción. Vol. 34, No. 195, 41-49, Julio/Agosto/Septiembre (1984).
- 6) Molina A., Andrade C., Alonso C. y González, J.A. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 8, No. 2 (1985) 9-15.
- 7) Andrade C, Materiales de Construcción. No. 172, Oct/Nov/Dic. (1978).
- 8) Andrade, C., Jauregui G., y González J.A. Materiales de Construcción. No. 183 (1981) 44-52.
- 9) Gjörv, O.E. y Vennesland Ø. Cement and Concrete Res. 1979, 9, 229.
- 10) Beeby A.W. Int. Symposium on the Behaviour of Offshore Concrete Structures. Brest, France, Oct. 1980.
- 11) Hartt W.A., Voshardt B.A. y Rosenberg A.M. NACE. Meeting, Canada, April 1981.
- 12) Miranda Hernández, Margarita y López González, Walter.

Estudio de la Velocidad de Corrosión de los Refuerzos Metálicos en Estructuras de Concreto. Tesis UNAM. 1989.

- 13) Corrosion of Metals in Concrete. American Concrete Institute. Detroit. (1985).
- 14) González, J.A., Vargas R. y Andrade, C. Rev. Met. CENIM: 13 (1977), 94.
- 15) Andrade, M.C. y González, J.A. Materiales de Construcción, No. 168 (1977).
- 16) 12-CRC Committee. Materiaux et Constructions, 9(1976), 187.
- 17) Page, C.L. y Treadaway K.W. Nature, 297, No. 5862 (1982) 109.
- 18) González, J.A., Algaba S. y Andrade, C. Br. Corros. J. 15(3) (1980), 135.
- 19) Page, C.h. y Havdahl, J. Materials and Structures.
- 20) Venvat M. Recontres CEFACOR 77 ITBTP-CATE D. París, 25-29, Octubre, 1977.
- 21) Stolte, E. y Bohnenkamp K. Korrosion on Korrosionsschutz Metallischer Werkstoffe in Hoch- und Ingenieurbau. Ed. Verlag Stahleisen MBH. Düsseldorf P.(1976), pág. 117-127
- 22) Fédération Internationale de la Précontrainte. Recommendations for the design and construction of concrete sea structures. July 1977, Third Edition.
- 23) Tuuti, K. Swedish Cement and Concrete Institute. The Norwegian Institute of Technology. Report STF F 79069.
- 24) Gjorv O. Nordisk Betong. 2-4 (1982), 147.

- 25) Biczók, I. La Corrosión del Hormigón y su Protección. Ed. URM0, Bilbao (1972), págs. 280-89, 388-96 y 481-92.
- 26) Duffaut, P., Duhoux, L. y Heuze, L.D. Annales de L'ITBTP; No. 305, pág. 103, mayo 1973.
- 27) Andrade, M.C. y González, J.A. 1er. Cong. Nac. de Corr. y Prot.; Madrid, junio 1972, No. Extr. de Corr. y Prot. (1972), 201.
- 28) Andrade, M.C. y González, J.A. Cuaderno de Investigación del IET, cc, No. 33, Junio 1978.
- 29) Govda, W.K., Shater, M.A. y Mikhail, R.S.H. Cement and Concrete Research. 5(1975), 1.
- 30) González, J.A. y Follea, J. Corr. y Prot. 5(5) (1974), 273.
- 31) West John M. Basic Corrosion and Oxidation. Ellis Horwood-Publishers. 277 pp. 145-158.
- 32) Scollly Maphd, J.C. The Fundamentals of Corrosion. AIM Leeds University 194 pp. 156-165 (1966).
- 33) West John M. Corrosion y Oxidación Fundamentos. Ed. Limusa, México 1986.
- 34) Corrosion Basics and Introduction an Official. NACE. Publication 353-pp.11-113.
- 35) Olick, R. Evans. The Corrosion and Oxidation of Metals. Scientific Principles and Practical Applications. Ed - ward Arnold (Publishers) LTS. 665-687. London 1960.
- 36) Advances in Corrosion Science and Technology. Volume 1, Edit by Mars G. Fontana and Roger W. Stachle. Plenum Press New York - London 1970. 1-43.

- 37) Corrosion Basics on Introduction an Official. NACE Publication. 203-215.
- 38) Ulick, R. Evans, An Introduction to Metallic Corrosion. 3er. Edition. Ed. Edward Arnold. American Society for Metals. 64-87.
- 39) Greene Norbert, D. Corrosion Engineering. Second Edition. Mars, G. Fontana. International Book Company. 117-156.
- 40) Magallán, G. Estévez, F., Orozco, E., Mendoz, A. y Martínez, L. Exploring Alternative Materials for Construction in the Mexican Sismic Zones, enviado a Earthquake Spectro.
- 41) Albarrán, J.L., Campillo, B., Legorreta, J.A., y Martínez, L. Caracterización de los Aceros de Refuerzo, fabricados en México. Instituto de Física. Cuernavaca. 1988.
- 42) Graf, L. y Springe, G. Proceedings of Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking. R.W. Stoeble y D. Van Roogen Editores. NACE (1969), 335.
- 43) Engell, H.J. y Bœmel, A.: Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture. Ed. I.N.N. Rhodin, p. 341. Interscience Publishers. Nueva York (1959).
- 44) Eckel, J.F. Corrosión, 18 (1962), 270t.
- 45) Barmartt, h. Corrosión. 18(1962), 3226.
- 46) Electrochemical Corrosion Testing. ASTM Special technical Publication 727. ASTM, Philadelphia, 1981.
- 47) Martínez, L. Albarrán, J.L. and Furentes, J. Lessons

in Welding from the 1985. México City Earthquake. Welding Journal. March 1987, 23-31.

- 48) American Society for Testing and Materials, Low Alloy Steel Bars from Concrete Reinforcing, ASTM-A706-84a. Filadelfia, 1984.
- 49) Kissinger, Peter, T and Heineman William R. Cyclic Voltammetry. Journal of Chemical Education. Volume 60, Number 9. September 1983. 702-706.
- 50) Avila M. Javier y Genescá, Ll. Joan. Cinética y Termodinámica de la Corrosión. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. México 1985.
- 51) Cano, Castillo Ulises y Mendoza Flores, Juan. Efecto del Oxido superficial sobre la Pasividad de Estructuras de Acero embebidas en Concreto. Tesis U.N.A.M. 1988.