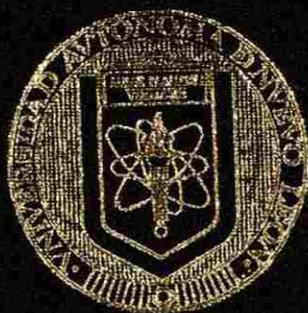


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DETERMINACION DE PROPIEDADES DE
RESISTENCIA A LA CORROSION DE ACEROS
ALEADOS AL SILICIO EMBEBIDOS EN MORTERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO

CIUDAD UNIVERSITARIA JULIO DE 1999

TM
Z5853
.M2
FIME
1999
e68

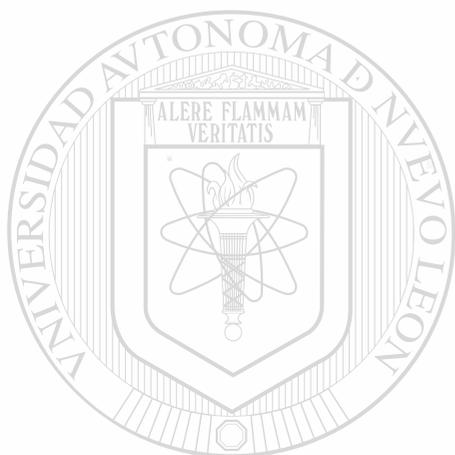
1999

DETERRMINACION DE PROPIEDAD DE
RESISTENCIA A LA CORROSION DE
ALBAIDOS AL SILICIO EMBERTO

OC
OC
JA



1020126385



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DETERMINACION DE PROPIEDADES DE
RESISTENCIA A LA CORROSION DE ACEROS
ALEADOS AL SILICIO EMBEBIDOS EN MORTERO

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA

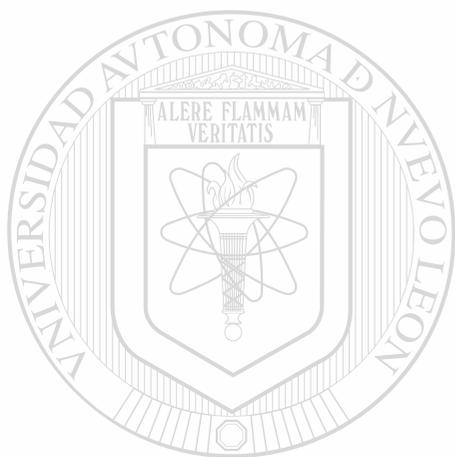
OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO

CIUDAD UNIVERSITARIA

JULIO DE 1999

TM
Z5853
.M2
+IME
199
68

0131-50560



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE ACEROS
ALEADOS AL SILICIO EMBEBIDOS EN MORTERO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**PRESENTA
OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO**

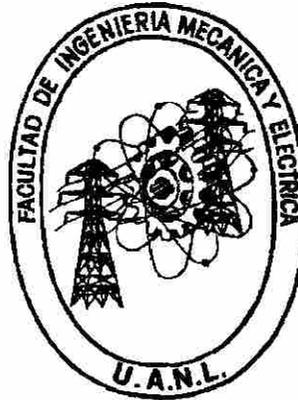
CIUDAD UNIVERISTARIA

JULIO DE 1999.

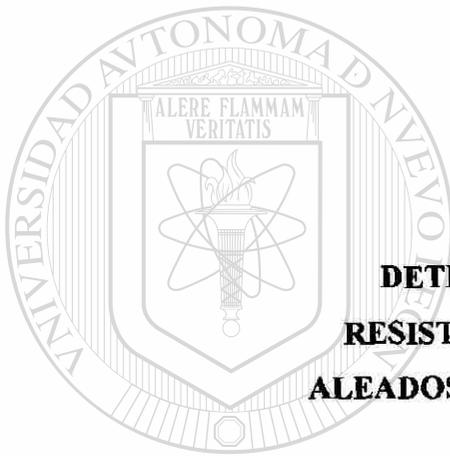
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE ACEROS
ALEADOS AL SILICIO EMBEBIDOS EN MORTERO**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

T E S I S

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

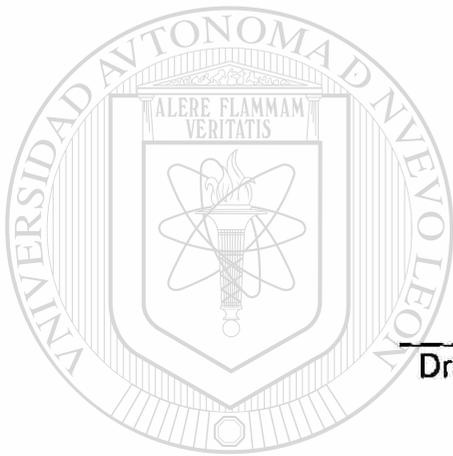
**PRESENTA
OCTAVIO COVARRUBIAS ALVARADO**

CIUDAD UNIVERISTARIA

JULIO DE 1999.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “*Determinación de propiedades de resistencia a la corrosión de aceros aleados al silicio embebidos en mortero*” realizada por el Ing. Octavio Covarrubias Alvarado, con matrícula 787547 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.



El comité de tesis

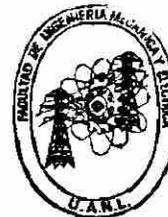
Dra. Patricia Rodríguez López
Asesora

Dr. Alberto Pérez Unzueta
Coasesor

Dr. Rafael Colás Ortiz
Coasesor

Vo. Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza SUBDIRECCION
División de Estudios de Postgrado



San Nicolás de los Garza, N.L., Junio de 1999.

AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias...

A Dios, por todas las oportunidades que me ha dado.

A mis Padres y a mis hermanos, por el apoyo para la terminación de esta etapa y la paciencia que me han tenido.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (Universidad Autónoma de Nuevo León), gran parte de lo que soy se lo debo a ella.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo para la realización de mis estudios de maestría.

Al Doctorado en Ingeniería de Materiales (DIMAT).

A la Dra. Patricia Rodríguez López, por su apoyo, consejos y paciencia.

Al Dr. Alberto Pérez Unzueta, por su apoyo y asesoría.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por sus indicaciones, consejos y asesoría.

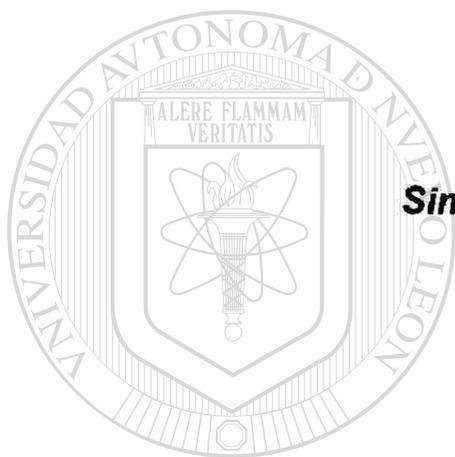
Al Dr. Ignacio Álvarez Elcoro, por el apoyo para la terminación de este estudio.

A todas las personas que de algún modo contribuyeron a la realización de este documento.

A mis maestros, compañeros y amigos del DIMAT.

A toda mi familia y amigos.

A todos los mexicanos responsables que pagaron sus impuestos para que pudiera continuar con mis estudios.



Sinceramente, muchas gracias.

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

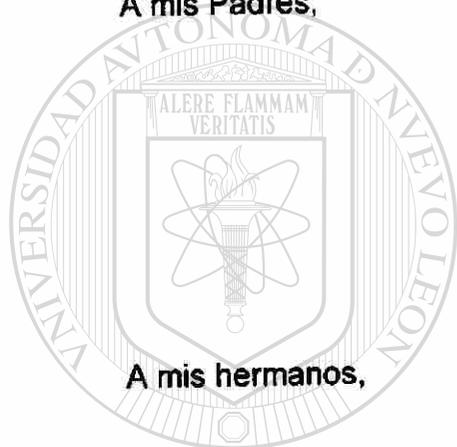


DEDICATORIA

A mis Padres,

Octavio Covarrubias García

Adela Alvarado Muñoz



A mis hermanos,

Elizabeth y Rafael

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

A las personas que quiero y respeto,

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



A toda mi familia

A todos mis amigos y amigas

Octavio.

PRÓLOGO

Desde hace algún tiempo, los fenómenos de corrosión dentro de la industria de la construcción han llamado la atención de algunos investigadores, puesto que antiguamente las construcciones no presentaban problemas de deterioro por haber desarrollado algún proceso de corrosión.

En la actualidad, si una obra de construcción no está hecha en función de ciertas especificaciones y tomando en cuenta fines prácticos de servicio y utilidad para la que es edificada, puede sufrir un grave deterioro y en consecuencia una destrucción parcial o total de su estructura. Este deterioro es resultado de un fenómeno de corrosión que se desarrolla in-situ.

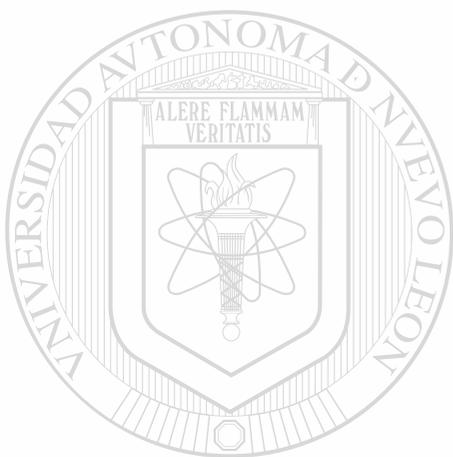
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Es por ello, que es importante tener un conocimiento preciso que englobe los principales parámetros que se relacionan con los fenómenos de corrosión, para de esta manera, enfrentar este problema, el cual una vez que se ha desarrollado, implica fuertes gastos económicos en la reparación y mantenimiento de las estructuras de concreto que han sido afectadas por dichos fenómenos de corrosión.

Por tal motivo, este trabajo de investigación se orienta a uno de los parámetros relacionado con los fenómenos de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, en este caso, evaluar una nueva familia de aceros que

garanticen una alta resistencia a desarrollar un fenómeno de corrosión y, en consecuencia, que puedan ser utilizados en la industria de la construcción.

Dra. Patricia Rodríguez López.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE

Agradecimientos.	i
Dedicatoria.	iii
Prólogo.	iv
Resumen.	viii
Capítulo 1: Generalidades.	
1.1 El concreto reforzado.	1
1.2 Reacciones de hidratación en el cemento	3
1.3 La corrosión.	4
1.4 Celdas de corrosión electrolyticas.	6
1.5 La pasividad.	8
1.6 El concreto como protección de las armaduras de acero embebidas.	9
1.7 Corrosión de la armadura metálica en estructuras de concreto reforzado.	11
1.7.1 Efecto de la carbonatación.	14
1.7.2 Corrosión por ataque de cloruros.	16
1.8 Vida útil de las estructuras de concreto reforzado.	20

Capítulo 2: Aceros aleados al Silicio.

2.1 El acero.	23
2.2 El silicio como elemento de aleación en el acero.	24
2.3 Aceros doble-fase aleados al silicio (Dual-Phase Ferritic Martensitic steels).	25
2.4 Aceros aleados al silicio resistentes a la corrosión.	28
Familia de aceros aleados al silicio.	31
2.6 Caracterización metalográfica de los aceros de la familia de aceros al silicio.	34
2.6.1 Grados de acero después del proceso de laminado.	35
2.6.2 Familia de aceros grado A	36
2.6.3 Familia de aceros grado B.	37
2.6.4 Familia de aceros grado C.	38
2.6.5 Familia de aceros grado D.	39
2.6.8 Defectos encontrados en las aleaciones evaluadas.	40

Capítulo 3: Ensayos de corrosión para familia de aceros aleados al silicio.

3.1	Introducción.	44
3.2	Pruebas de corrosión acelerada.	45
3.3	3.2.1 Justificación del ensayo.	46
	3.2.2 Descripción del ensayo.	49
	3.2.3 Resultados de los ensayos de corrosión acelerada.	63
3.4	Medición de potenciales de corrosión (E_{corr}).	66
3.5	3.3.1 Justificación del ensayo.	75
	3.3.2 Descripción del ensayo.	
	3.3.3 Resultados de la medición de potenciales de corrosión (E_{corr}).	

Capítulo 4: Análisis y discusión de resultados.

4.1	Tratamiento térmico y composición química.	85
4.2	Ensayos de corrosión acelerada (Solución 1).	91
	4.2.1 Aceros grado A (Solución 1).	92
	4.2.2 Aceros grado B (Solución 1).	93
	4.2.3 Aceros grado C (Solución 1).	94
	4.2.4 Aceros grado D (Solución 1).	96
	4.2.5 Aceros grado A (Solución 2).	97
	4.2.6 Aceros grado B (Solución 2).	98
	4.2.7 Aceros grado C (Solución 2).	99
	4.2.8 Aceros grado D (Solución 2).	100
4.3	Medición de potenciales de corrosión.	

Capítulo 5: Conclusiones.

117

Capítulo 6: Recomendaciones.

119

Referencias bibliográficas.

121

Índice de figuras.

127

Índice de tablas.

134

RESUMEN

Uno de los problemas más serios que se presentan en la industria de la construcción es el deterioro prematuro en las estructuras de concreto reforzado u hormigón debido a fenómenos de corrosión. Este problema afecta en mayor o menor grado a gran parte de las estructuras que han sido construidas utilizando este material.

Aunque este problema se ha enfrentado buscando mejores métodos para la preparación y colado de las mezclas de concreto, los resultados obtenidos no han sido lo suficientemente satisfactorios para asegurar que una estructura de concreto reforzado será resistente a presentar fenómenos de corrosión en su interior bajo condiciones determinadas.

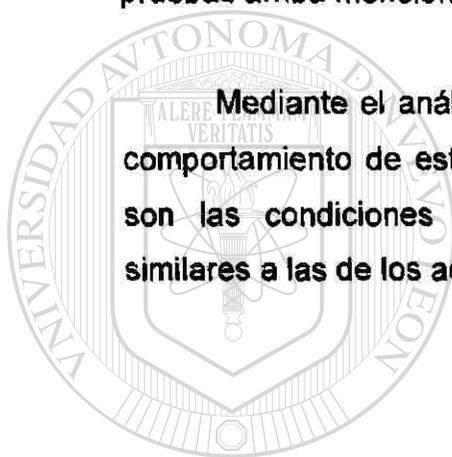
Otra línea de investigación que se ha desarrollado para buscar una solución a esta problemática, se enfoca en la búsqueda de aleaciones ferrosas que puedan utilizarse para fabricar varilla de refuerzo, que no sólo resista los fenómenos de corrosión más comunes, sino que también cumpla con los requerimientos estructurales y, que pueda producirse de manera económica.

El objetivo de esta evaluación es el de conocer las características de resistencia a la corrosión de una familia de aceros al silicio, a fin de determinar

qué acero es el más adecuado para utilizarse como varilla de refuerzo en estructuras de concreto reforzado.

En el presente trabajo se hace una exposición de los resultados obtenidos en una familia de aceros al silicio al ser sujeta a mediciones de potencial de corrosión. Esta evaluación incluye una caracterización metalográfica de cada uno de los aceros involucrados, pruebas de corrosión acelerada y pruebas electroquímicas de corrosión, con el fin de relacionar sus características microestructurales con el comportamiento observado en las pruebas arriba mencionadas.

Mediante el análisis de la información obtenida se determina cuál es el comportamiento de estos aceros cuando son embebidos en mortero y cuáles son las condiciones necesarias para obtener aceros con características similares a las de los aceros doble – fase ferrítico martensíticos.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 El concreto reforzado.

A pesar de que la utilización de los distintos materiales cementicios dentro de la construcción se remonta a los inicios de la civilización, cuando el hombre unía piedra con piedra mediante estos materiales, el concepto del concreto reforzado es relativamente reciente.

En efecto, es hacia 1855 que Lambot y luego en 1861 que Coignet[®] exponen el concepto del refuerzo metálico embebido en el concreto^[1,2]. Esta combinación de materiales se basa en el hecho de que el concreto es un material frágil, aunque relativamente fuerte a la compresión. Por otro lado, la varilla de acero es un material resistente a la tensión y muy dúctil, así al combinar estos dos componentes en una estructura, el acero de refuerzo absorberá las cargas a tensión y el concreto soportará las cargas a compresión, ver figura 1.1.

Una definición del concreto reforzado puede obtenerse al considerar los elementos que lo forman. El concreto de uso común se obtiene al mezclar

cemento, agua y otros agregados determinados como arena y grava, también se suelen utilizar otros aditivos. El concreto reforzado se presenta cuando además se introduce un armazón de material metálico a la estructura que está siendo construida con el concreto, ver figura 1.2.

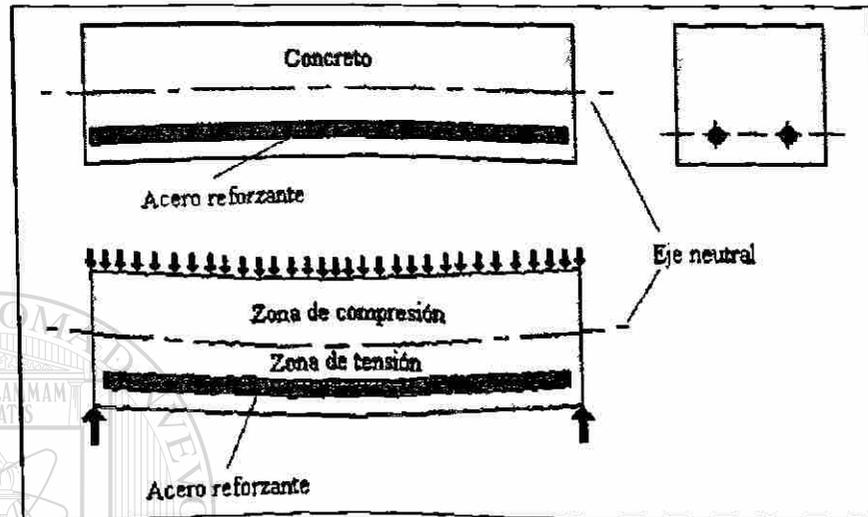


Figura 1.1: Efecto exagerado de una carga sobre una viga construida con concreto reforzado.

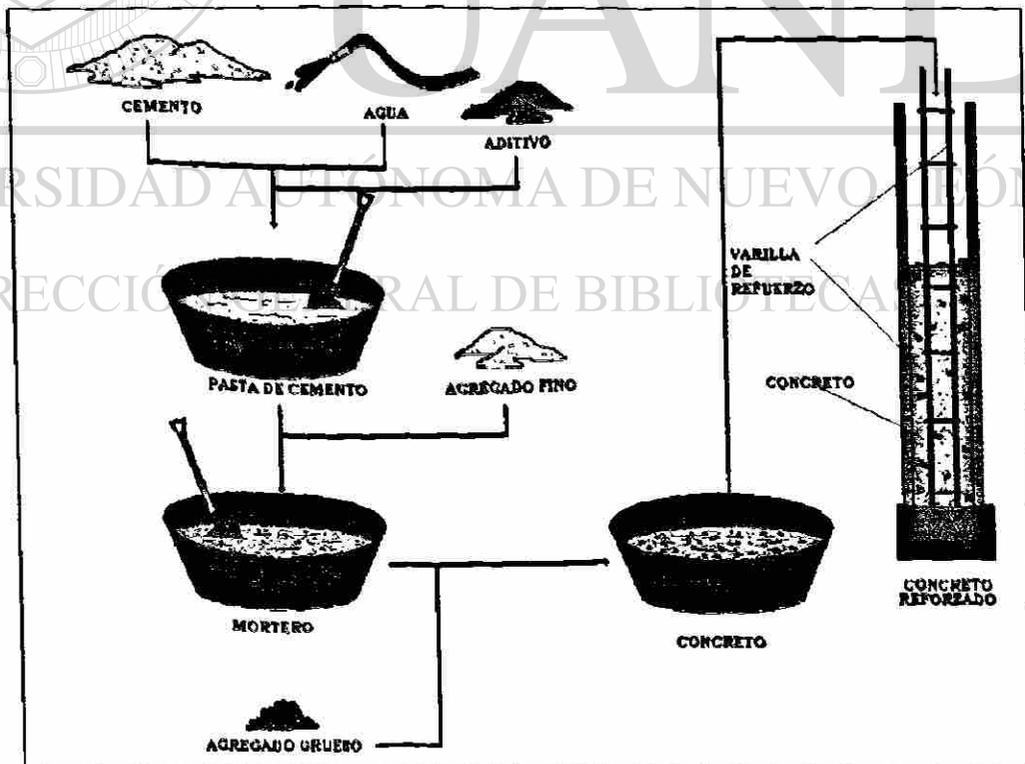
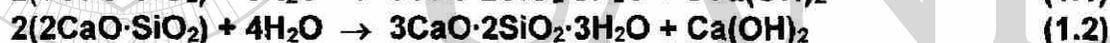


Figura 1.2: Esquema que muestra la constitución del concreto reforzado.

1.2 Reacciones de hidratación en el cemento.

El cemento es un material que se fabrica para obtener un producto polvoso, con un tamaño de grano muy fino y que actúa como conglomerante hidráulico^[3], esto quiere decir que cuando el cemento se mezcla con agua se vuelve un material pastoso, que puede fraguar al aire o bajo el agua para endurecer hasta adquirir una consistencia pétreo. Existen muchos tipos de cementos, siendo el más utilizado el cemento Portland.

El cemento Portland está constituido por cuatro componentes básicos, la caliza (CaO), la sílice (SiO₂), la alúmina (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃), los cuales deben combinarse en proporciones adecuadas^[4]. Estos componentes reaccionan con el agua para propiciar el endurecimiento del cemento. Dichas reacciones se conocen como "reacciones de hidratación", de las cuales las más importantes son:



estas reacciones además de propiciar nuevos compuestos, liberan calor, que caracteriza al fraguado del cemento. Así, el fraguado del cemento mezclado con agua se presenta cuando esta mezcla se vuelve una pasta viscosa y, el desarrollo completo de endurecimiento generalmente se presenta al cabo de 28 días. Sin embargo, el cemento endurecido seguirá presentando transformaciones durante meses e incluso años hasta lograr su estabilidad^[3].

Desde el punto de vista de la corrosión de la varilla de refuerzo embebida en el concreto, interesa particularmente la formación del hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) en las reacciones arriba mencionadas, ya que su presencia en la masa de concreto permite que dicha varilla permanezca prácticamente inalterable y sin corroerse.

Una característica particular del concreto es que al endurecer no se conforma como un material completamente compacto, sino más bien poroso. Esto es debido al exceso de agua que se utiliza para su mezcla y manejo, propicia la formación de burbujas de distintos tamaños en la masa de concreto. Cuando el concreto solidifica estas burbujas forman una red de poros en el concreto, cuyo tamaño puede variar en un intervalo de entre unos pocos amstrongs hasta milímetros de diámetro^[5]. Una representación de esto se muestra en la figura 1.3.

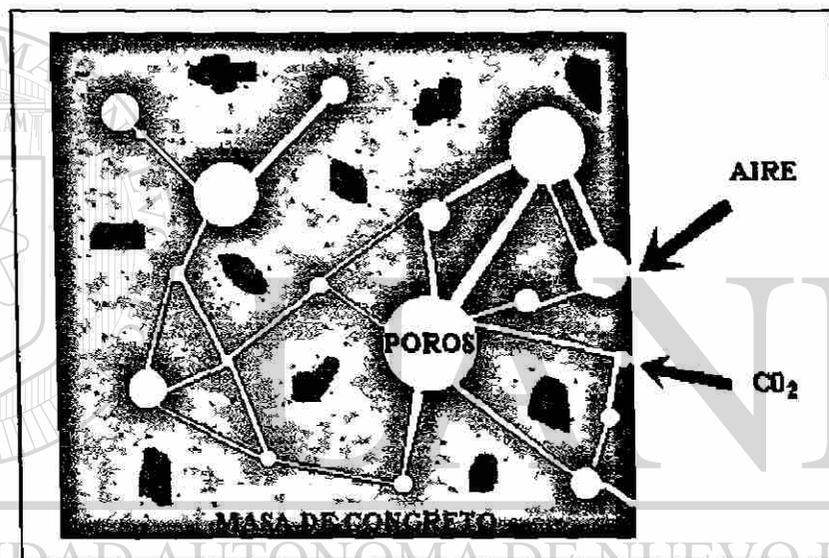


Figura 1.3: Esquema que muestra un sistema de poros en el concreto.

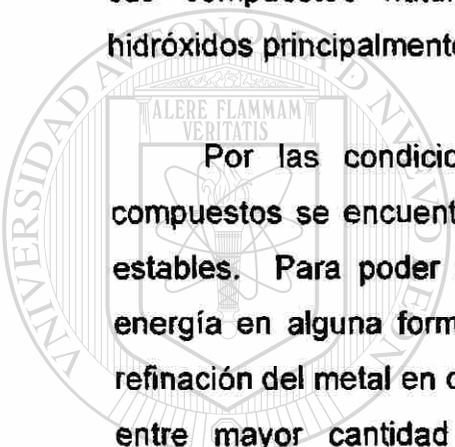
Esta red de poros permite que agentes externos, como la humedad, el aire u otros componentes, puedan penetrar la masa de concreto desde el exterior de la estructura.

1.3 La corrosión.

Es posible definir a la corrosión como el deterioro de un material como consecuencia de reacciones con su entorno^[6]. Estas reacciones pueden

involucrar fenómenos químicos, electroquímicos o metalúrgicos cuya velocidad dependerá de diversos factores, entre los cuales se pueden citar la temperatura, la humedad relativa del ambiente, condiciones marinas, etc.

El hombre en su desarrollo tecnológico ha utilizado los materiales que la naturaleza le provee. En ocasiones se ha visto obligado a cambiar muchas de las propiedades de estos materiales para obtener de ellos un mayor provecho. En el caso de los metales y más específicamente del hierro, se han descubierto y mejorado distintos procesos pirometalúrgicos para extraer este elemento de sus compuestos naturales (compuestos que forman óxidos, sulfatos e hidróxidos principalmente).

Por las condiciones que se presentan en nuestro planeta, estos compuestos se encuentran en estado de equilibrio, es decir, son compuestos estables. Para poder extraer el metal de los mismos, es necesario utilizar energía en alguna forma. Esta energía que es utilizada en los procesos de refinación del metal en cuestión, aleja de su estado de equilibrio a dicho metal y entre mayor cantidad de energía se haya empleado, mayor tendencia presentará el metal para volver a su estado de equilibrio, es decir, a formar nuevamente compuestos como óxidos, sulfatos o hidróxidos. Este fenómeno que ha sido conceptualizado se define como "principio de Le Chatelier"^[7]. 

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Así, la principal causa para que un material, y en este caso un metal, se corra es la inestabilidad que presenta en su forma refinada, por lo que su tendencia natural a estados originales de equilibrio se realizará a través de procesos de corrosión^[8].

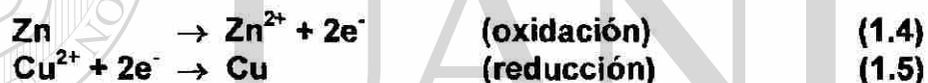
Estos procesos de corrosión involucran reacciones químicas en las que también existe transferencia de electrones, por lo que se recurre a la electroquímica, entre otras ciencias, para estudiarlos. Así, desde un punto de vista electroquímico, las reacciones de corrosión son reacciones de oxidación -

reducción en las cuales un material (o un metal) es atacado por alguna sustancia agresiva y lo convierte en un compuesto diferente al material base.

Para que la corrosión se presente en un sistema determinado es necesario que uno de los elementos que lo forman desarrolle reacciones de "oxidación", mientras que otro de los elementos desarrollará reacciones de "reducción". La oxidación se define como la pérdida de electrones que presenta un elemento, mientras que la reducción es la ganancia de electrones que se ocurre en otro elemento, por ejemplo, al considerar la reacción del zinc en una solución que contiene iones Cu^{2+} :



esta reacción principal puede descomponerse en dos reacciones medias o semirreacciones de la siguiente manera



Como se puede observar el número de electrones perdidos en la media reacción de oxidación debe ser igual al número de electrones ganados en la media reacción de reducción^[9]. En cualquier proceso de corrosión electroquímica es necesaria la presencia de las dos semirreacciones, ya que la ausencia de cualquiera de ellas detendrá dicho proceso

1.4 Celdas de corrosión electrolíticas.

Como antes se había mencionado, los fenómenos de corrosión pueden presentarse mediante procesos químicos, electroquímicos o metalúrgicos. Debido a alcance del presente estudio, únicamente se hará una descripción de

la corrosión electroquímica, ya que es ésta la que se presenta en las estructuras de concreto reforzado.

Para que se desencadene la corrosión electroquímica en un sistema determinado, es necesario que éste se encuentre en presencia de un medio acuoso. Si tal proceso se presenta, indicará la existencia de una zona anódica, una zona catódica, un contacto eléctrico entre estas dos y un electrolito (solución acuosa) en el sistema.

En este sistema la zona anódica es la que sufrirá deterioro o corrosión y se define como el "ánodo". Debido a que el ánodo es la zona que libera electrones, el elemento que la forme quedará cargado positivamente y dará lugar a iones de esta misma carga eléctrica, los cuales serán disueltos en el electrolito. El término de "cátodo" se aplica a la zona del sistema en la que los electrones del ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito^[11].

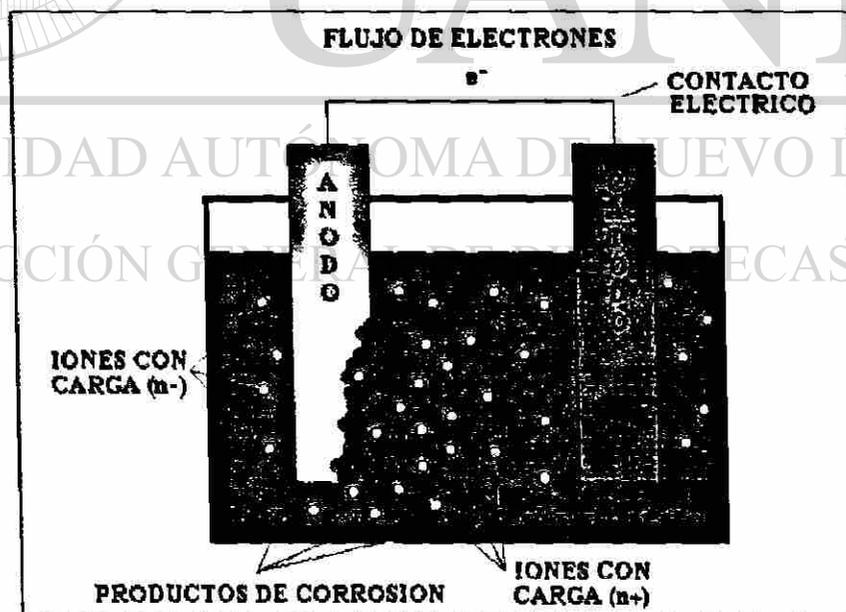


Figura 1.4: Diagrama que muestra la disposición de una celda electroquímica de corrosión. Los productos de corrosión son resultado de la reacción de los iones con carga positiva (provenientes del ánodo) con los iones de carga negativa (disueltos en el electrolito).

Una manera de visualizar el sistema de una celda electrolítica de corrosión es mediante la figura 1.4 en la que se encuentran el ánodo, el cátodo, un contacto eléctrico entre estos dos y un electrolito. Si cualquiera de estos cuatro elementos llegase a faltar, el proceso de corrosión electroquímica se detendrá.

1.5 La pasividad.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, los fenómenos de corrosión son susceptibles en la mayoría de los metales y aleaciones que se utilizan en la actualidad, por lo que se han tenido que diseñar distintos métodos de protección para evitar el deterioro prematuro de dichos metales y aleaciones [9,10,11].

Bajo ciertas condiciones algunos metales y aleaciones son capaces de autoprotgerse, formando una capa aislante sobre su superficie para constituir una interfase que los separa del medio agresivo. Dicha interfase está formada por productos de una primera fase de reacciones de corrosión que al constituirse en la superficie expuesta, inhibe o evita reacciones posteriores. Esta interfase actúa como una capa aislante que evita el contacto entre el metal o aleación y el medio agresivo. Algunos metales y aleaciones que presentan este comportamiento son el aluminio, el níquel, el titanio y el acero inoxidable entre otros^[6].

Así, se puede decir que cuando un material presenta fenómenos de corrosión se encuentra en estado "activo". Si el mismo material ya no presenta fenómenos de corrosión o estos son insignificantes, se dice que este material se halla en estado "pasivo" o "pasivado". Todos los procesos fisicoquímicos que tienen lugar cuando un material pasa del estado activo al pasivo, se conocen como "pasivación"^[12] (ver figura 1.5).

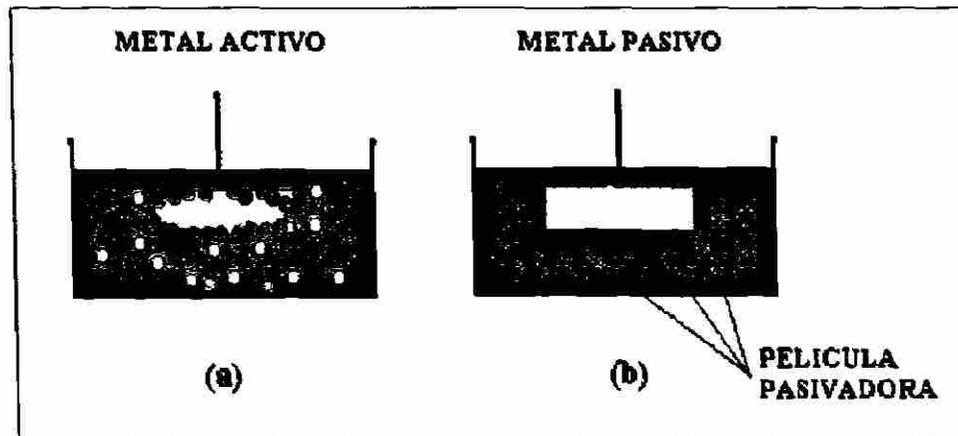


Figura 1.5: Comportamiento de dos metales (a) y (b) en una solución determinada. El metal (a) es disuelto por la solución, mientras que el metal (b) forma una capa pasiva a su alrededor, la cual protege el metal del resto de la solución.

1.6 El concreto como protección de las armaduras de acero embebidas.

El concreto tiene la característica particular de proteger de manera natural y efectiva a las varillas de acero que son embebidas en el mismo, contra fenómenos de corrosión electrolíticos, y las justificaciones son las siguientes^[2,14,15]:

- 1) Para que se genere una celda de corrosión electrolítica en el concreto es necesaria la presencia de un electrolito, lo cual es posible únicamente cuando la estructura es construida en un ambiente que pueda proporcionar la suficiente humedad, esto permitiría la formación de una solución acuosa en el interior de los poros que contiene la masa de concreto; cuando se presentan estas condiciones, al concreto se le considera como el electrolito del sistema. Además se necesita que exista un gran suministro de oxígeno al sistema para que se produzcan las reacciones químicas del proceso. La sola falta de la humedad o del oxígeno es suficiente para inhibir cualquier fenómeno de corrosión electrolítico.

- 2) Como anteriormente se había expuesto, durante las reacciones de hidratación del cemento se liberan grandes cantidades de hidróxido de calcio, que aunadas a la presencia de otras sales alcalinas, permiten que la masa de concreto presente un alto nivel de basicidad o alcalinidad (índice pH), que al entrar en contacto con la humedad permite la formación de una solución en el interior de los poros con valores de entre 12.5 y 13.5 de la escala de pH. Bajo estas condiciones, los primeros productos de corrosión electrolítica del acero de refuerzo son formados por una capa de óxido férrico, la cual actúa como una delgada película aislante (capa pasivante) que protege al resto del metal de una corrosión posterior. Esta película tiene la capacidad de preservar al acero por periodos indefinidos, aún cuando existan altos niveles de humedad y de suministro de oxígeno en la estructura.
- 3) En una estructura de concreto reforzado, el concreto actúa como una protección física para el metal de refuerzo contra el ambiente externo que pudiera contener compuestos causantes de fenómenos de corrosión en el acero.

Así, los principales factores que determinan la eficacia del concreto como medio de protección a las varillas de acero, están relacionados con la calidad[®] con que fue realizada la mezcla, las condiciones de solidificación y el espesor de la masa de concreto que envuelve a la varilla de refuerzo.

Por otro lado, los fenómenos de corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado son debidos a la ruptura o desintegración de la capa pasivante que lo envuelve y esta destrucción es debida a dos causas principales:^[2]

- a) La disminución de la basicidad o alcalinidad del concreto cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente, o cuando reacciona

con el CO_2 que contiene el aire que le rodea (fenómeno que se conoce como “carbonatación del concreto”).

- b) La presencia de cloruros en el concreto, añadidos durante la mezcla de cemento y sus adiciones, o por la penetración de los mismos desde el exterior una vez que la estructura ha sido construida.

1.7 Corrosión de la armadura metálica en estructuras de concreto reforzado.

Los fenómenos de corrosión en las estructuras de concreto reforzado presentan características particulares. Incluso estos fenómenos no son iguales para todas las estructuras, ya que dependiendo del lugar de construcción, las velocidades de corrosión pueden variar decenas e incluso centenares de veces los valores obtenidos en unos lugares con respecto a otros sitios geográficos^[13].

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias que afectan la vida útil de las estructuras de concreto reforzado:

- 1) Por efecto de la corrosión se pierde metal base de las varillas de acero (el metal perdido se convierte en productos de corrosión), lo cual merma la adherencia del concreto a la varilla y hay un detrimento en las propiedades mecánicas de la estructura en su conjunto.
- 2) Los productos de corrosión tienen un volumen que es varias veces superior al del metal base que le da origen. Este aumento de volumen no lo puede absorber el concreto, por lo que tienden a generarse esfuerzos internos en éste último, agrietándolo e incluso desprendiéndolo totalmente del resto de la estructura, ver figura 1.6.

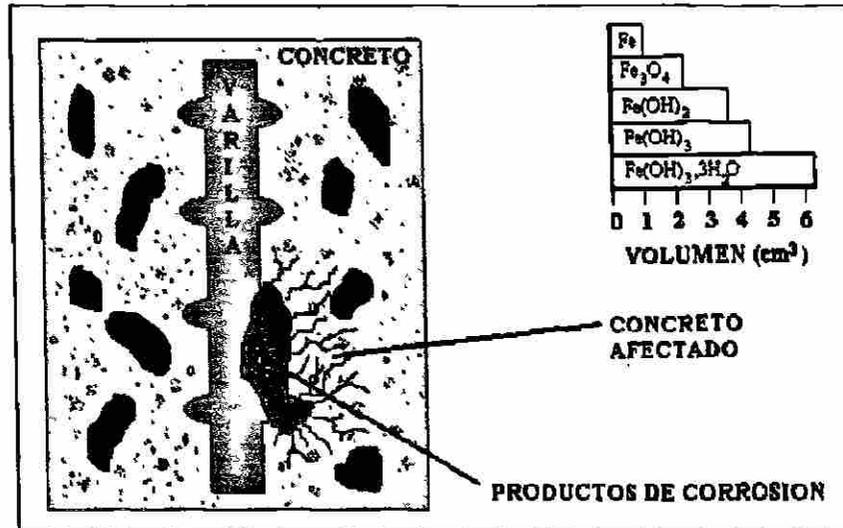


Figura 1.6: Productos de corrosión del acero embebido en el concreto y su efecto en el mismo.

La mayoría de los casos de corrosión en estructuras de concreto reforzado ocurren por procesos electroquímicos que involucran flujos de electrones, generados a partir de celdas electrolíticas creadas por diferencias de potencial electroquímico a lo largo de las propias varillas de acero^[15]. Esta situación puede visualizarse por medio de la figura 1.7, en la que se tienen todos los elementos para formar una celda electrolítica de corrosión.

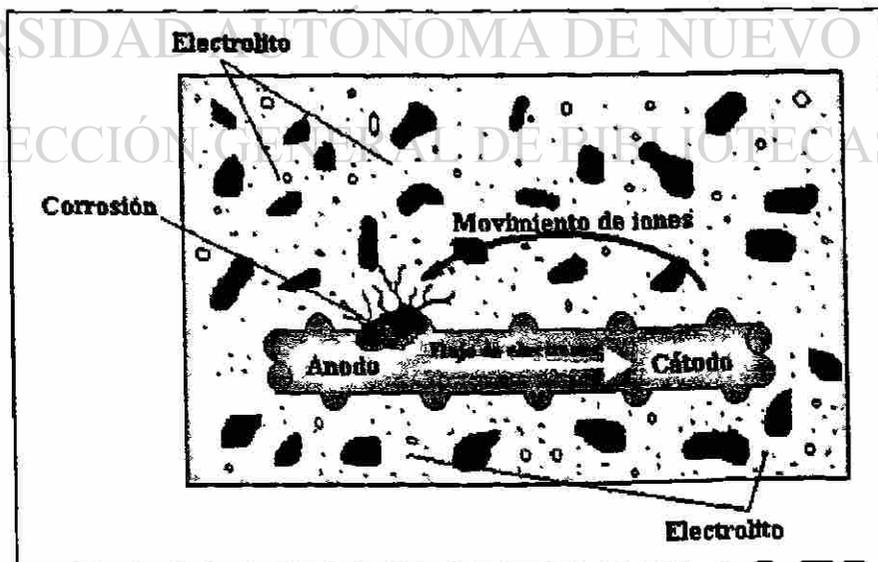
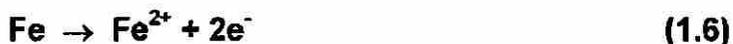


Figura 1.7: Figura que ilustra la representación esquemática de una celda de corrosión electrolítica en el concreto reforzado. Esta situación es comparable a la mostrada en la figura 1.4.

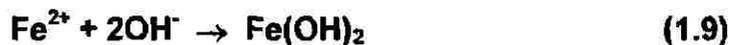
En la figura 1.7 se pueden identificar los elementos que forman la pila de corrosión. Como ya se había mencionado antes, en el ánodo o zona anódica de la superficie del acero se llevarán a cabo las reacciones de disolución del hierro o reacción de oxidación:



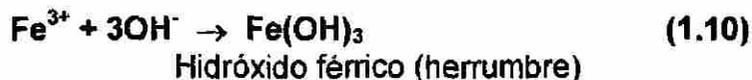
Esta reacción libera electrones que fluyen a través de la varilla de refuerzo, que constituye el contacto metálico, hacia el cátodo o zonas catódicas en donde estos electrones se consumen en reacciones de reducción, las cuales dependen de la cantidad de oxígeno disponible y del valor de pH de la solución acuosa contenida en los poros de la masa del concreto:



El circuito de la celda de corrosión se cierra con el electrolito, constituido por la solución acuosa contenida en los poros del concreto, por medio de la cual se presenta el movimiento de los iones hidroxilo (OH^-) y ferrosos (Fe^{2+}). En las zonas anódicas de la varilla queda iones ferrosos cargados positivamente que al combinarse con los iones hidroxilo cargados negativamente dan por resultado las siguientes reacciones:



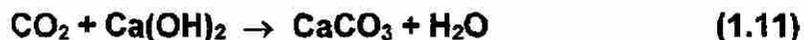
Hidróxido ferroso



Los productos de estas reacciones dan por resultado la formación de algunos de los productos de corrosión que se presentan en las estructuras de concreto reforzado, de acuerdo a la figura 1.6 ^[2,11,15].

1.7.1 Efecto de la carbonatación.

La carbonatación del concreto es un fenómeno que se presenta cuando el bióxido de carbono (CO_2) contenido en el aire entra en contacto con un constituyente del cemento hidratado. La carbonatación puede explicarse de la siguiente manera: cuando el CO_2 externo en forma gaseosa penetra el concreto a través de la red de poros, se combina con la humedad contenida en éstos últimos para formar ácido carbónico, reaccionando así con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se libera durante las reacciones de hidratación del cemento, para dar a la formación de compuestos carbonatados:



En el caso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, los productos de reacción son el carbonato de calcio (CaCO_3) y se libera agua. El resultado de este tipo de reacciones tiene dos consecuencias:

- a) Por un lado, la conversión del hidróxido de calcio a carbonato disminuye la alcalinidad del concreto de manera gradual. Esta afectación de la masa de concreto avanza desde la superficie expuesta al medio hacia el interior de la estructura.

- b) La extracción de agua del hidróxido propicia una disminución del volumen del concreto, que se conoce como contracción por carbonatación, la cual afecta negativamente las propiedades de resistencia mecánica de toda la estructura.

La existencia de hidróxido de calcio en el concreto tiene la función de hacer de éste un medio favorable para la formación de la película pasiva que envuelve la superficie del acero de refuerzo, evitando así que éste pueda presentar fenómenos de corrosión (figura 1.8). Mientras el concreto conserve el contenido normal de hidróxido de calcio que propicia una alcalinidad superior al

valor 12 de la escala pH, la película pasiva del acero se desarrollará y permanecerá inalterable (tomando en cuenta que el potencial del hierro es de -0.44 V)^[6.12.16]

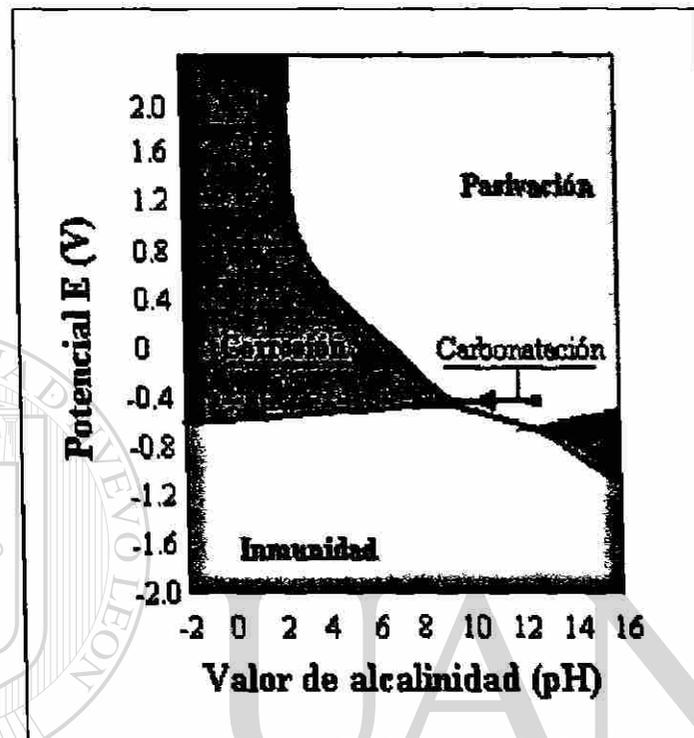


Figura 1.8: Diagrama de Pourbaix simplificado para el hierro a 25 °C.

La principal consecuencia de la carbonatación es la disminución del valor pH de la solución acuosa contenida en el poro, formando una zona de carbonatación que avanza progresivamente desde la superficie del concreto hasta el área donde se localiza la varilla de refuerzo. La carbonatación disminuye la alcalinidad del concreto a valores pH de 9.0 y menores, volviendo inestable o rompiendo la capa pasiva del acero embebido, lo cual permite el inicio de procesos de corrosión en el mismo^[14]. Este tipo de corrosión se caracteriza por ser de tipo generalizado, es decir, como si el metal estuviese expuesto al medio ambiente y sin ninguna protección, esta varilla al estar en un medio húmedo y en presencia de oxígeno, genera productos de corrosión y óxidos, disminuyendo la sección transversal de la varilla y generando esfuerzos

internos en la estructura como se explicó en la sección 1.7. Esta situación se representa en la figura 1.9.

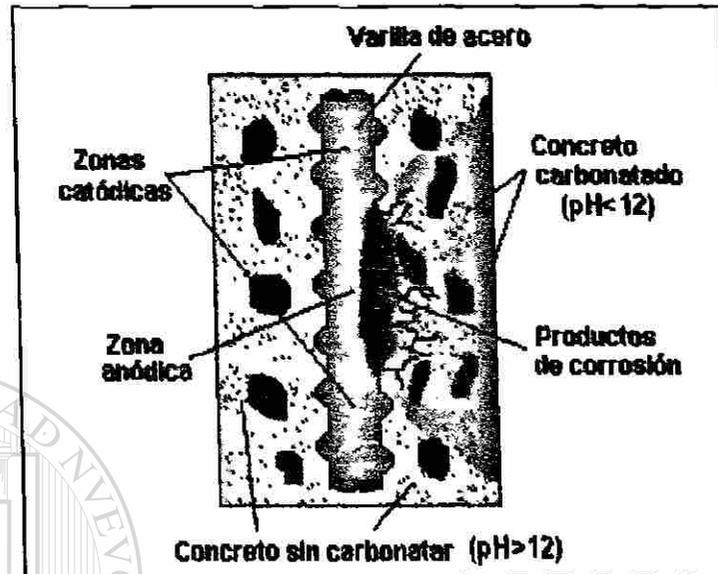


Figura 1.9: Corrosión en la armadura metálica debida a concreto carbonatado.

La carbonatación es un proceso relativamente lento, que puede agravarse por la presencia de grietas en el recubrimiento de concreto o cuando éste tiene un espesor delgado. Este proceso no puede desencadenarse sin una humedad relativa mayor al 50%, sin embargo, cuando el concreto sólido presenta demasiada humedad en la red interna de poros, la carbonatación no progresa ya que la difusión de CO_2 a través de la solución del poro es extremadamente lenta^[14].

1.7.2 Corrosión por ataque de cloruros.

Los cloruros o iones cloruro, son sales inorgánicas que pueden encontrarse en los componentes del concreto y en las aguas y suelos que tienen contacto con las estructuras construidas. El ion cloruro (Cl^-) es un

agente impulsor de fenómenos de corrosión en la varilla de acero embebida en concreto. Los efectos de la presencia de cloruros son básicamente 2:

- 1) Cuando la solución de poro contenida en los poros del concreto que actúa como electrolito presenta cloruros, se incrementa la conductividad del mismo y facilita el movimiento de iones hidroxilo (OH^-) entre la zona catódica y la zona anódica de una varilla.
- 2) Cuando el contenido de cloruros tiene una alta concentración en la solución de poro, se producen reacciones químicas entre ésta y el metal de refuerzo que originan puntos de deterioro en la película pasivadora, los cuales al funcionar como ánodos dan lugar a la formación de celdas de corrosión. Este tipo de corrosión se conoce como corrosión por picadura^[9,15].

La presencia de cloruros en el concreto puede originarse por vías internas o externas. La primera situación se presenta cuando al elaborar el concreto se utilizan aguas de mezclado con alto contenido de cloruros. Existen algunos aditivos que presentan cloruros en su composición, que al utilizarse en la mezcla de concreto, contaminan a la misma. La segunda situación se presenta cuando la estructura construida está en contacto con un medio externo (suelo, aire o agua) que contiene un alto nivel de cloruros, los cuales penetran a través de la red de poros u otras discontinuidades de la masa de concreto hasta llegar a zonas inmediatas a la varilla metálica.

Cuando los cloruros son adicionados a la mezcla de concreto durante los procesos de mezclado, éstos tendrán acceso directo al acero de refuerzo e inmediatamente comenzarán a actuar para desencadenar procesos de corrosión en condiciones de humedad y de suministro de oxígeno que favorezcan éste proceso. Los contenidos máximos de cloruros que pueden permitirse en el concreto endurecido y antes de entrar en servicio se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Contenidos máximos de cloruros en el concreto para minimizar el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo, según el Instituto Americano del Concreto (ACI) [17,18,19]

Concreto reforzado bajo condiciones de exposición	Contenido máximo tolerable de iones cloruro (Cl ⁻) en el concreto, expresado como porcentaje en peso del cemento, según el Instituto Americano del Concreto (ACI).		
	ACI 201 ^(a)	ACI 222 ^(b)	ACI 318 ^(a)
Concreto en condiciones que representen riesgo de corrosión.	—	0.20	—
Concreto expuesto a la penetración de cloruros externos.	0.10	—	0.15
Concreto expuesto a humedad, sin cloruros.	0.15	—	0.30
Concreto en condición permanentemente seca.	Sin límite	—	1.00

Notas: (a) Cloruros solubles en agua.

(b) Cloruros solubles en ácido nítrico.

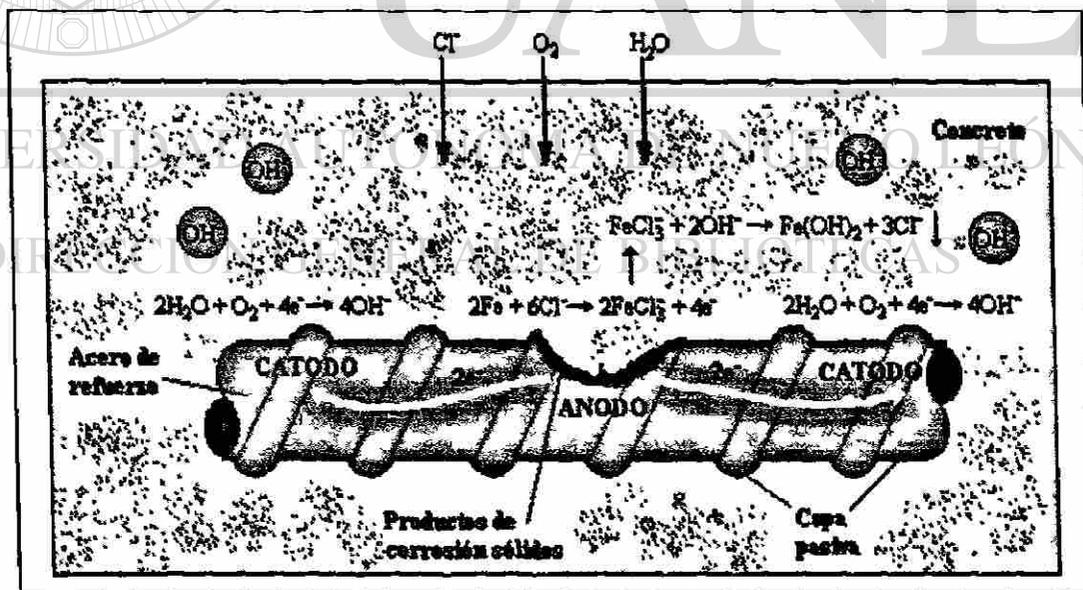


Figura 1.10: Corrosión por picadura de la varilla de acero embebida en concreto por acción de iones cloruro (Cl⁻). Los cloruros rompen la capa pasiva que envuelve al acero, promoviendo la formación de celdas de corrosión electroquímicas.

Por otro lado, los cloruros pueden penetrar a través de la masa de concreto mediante varios mecanismos, siendo los más importantes la difusión (que es un mecanismo relativamente lento) y la fuerza capilar (mecanismo propio de ambientes marítimos). Sea cual fuere la causa de la presencia de los cloruros en el concreto, una vez que éstos entran en contacto con la varilla de acero, pueden destruir la capa pasiva de ésta última iniciando procesos de corrosión localizada, ver figura 1.10.

A pesar de que aún no es muy claro cómo los iones cloruro rompen la capa pasiva del acero, se acepta la teoría de la formación de compuesto^[2], la cual propone que los cloruros libres que ingresan a la masa de concreto forman un compuesto soluble con los iones de hierro en las zonas anódicas:



Las moléculas del compuesto soluble difunden hacia otras zonas donde el pH y la concentración de oxígeno son elevados. Luego, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro y liberando nuevamente los iones cloruro:



Como los cloruros no se agotan y existe un alto contenido de hierro en la vecindad del acero, el proceso continuará por sí mismo, así al emigrar los iones de hierro que reaccionan con el oxígeno y los hidroxilos presentes, formarán óxidos o hidróxidos de hierro. En consecuencia, los puntos de corrosión continúan en las zonas anódicas sin que se propaguen en toda la superficie del acero, propiciando la formación de picaduras profundas en dichas zonas.

Algunas variables que pueden influir en el proceso de corrosión arriba descrito son la temperatura del medio, el contenido de humedad en el sistema varilla - concreto, concentración de iones y la permeabilidad de la masa de concreto.

1.8 Vida útil de las estructuras de concreto reforzado.

Por lo anteriormente expuesto, se puede considerar a la corrosión de las estructuras construidas con concreto reforzado como un problema que no puede ser fácilmente enfrentado. Los costos relacionados con el mantenimiento y la reparación de dichas estructuras alcanzan los miles de dólares por metro cuadrado y en ciertas ocasiones es preferible demoler la estructura afectada y volverla a construir, que continuar con su mantenimiento.

Es difícil predecir cuál será la vida útil de una estructura determinada, ya que es necesario considerar variables tales como: calidad del cemento, aditivos y agregados utilizados en la mezcla del concreto, métodos de construcción, ambiente que rodea a la estructura, estado inicial de la superficie de la varilla, humedad relativa en la masa de concreto, acceso de oxígeno y otros agentes externos al concreto, temperatura ambiental, etc.^[6,15,21]. Los diseños de estas estructuras buscan que la vida útil de las mismas alcancen de 80 a 100 años de servicio, sin embargo, las tendencias actuales en los diseños involucran una vida útil de por lo menos 140 años^[21,22].

Una manera de representar la vida útil de una estructura de concreto reforzado puede hacerse mediante el diagrama de la figura 1.11^[2,5,15]. En dicha figura se ilustra de manera simplificada cómo puede evolucionar el deterioro por corrosión de la armadura metálica de una estructura de concreto reforzado en función del tiempo. Esta gráfica se conoce como el "modelo de Tutti".

En este modelo se presentan dos etapas:

- 1) Durante un periodo de tiempo t_1 los agentes o mecanismos que desencadenan procesos de corrosión penetran la masa de concreto hasta llegar a la varilla de acero, lo cual ocurre al terminar t_1 , para iniciar luego la destrucción de la película de pasivación.
- 2) En un segundo lapso t_2 inicia propiamente el proceso de corrosión en el refuerzo metálico a una velocidad tal que, al término del periodo t_2 se alcanza un grado de daño tal en la estructura que es necesario efectuar reparaciones.

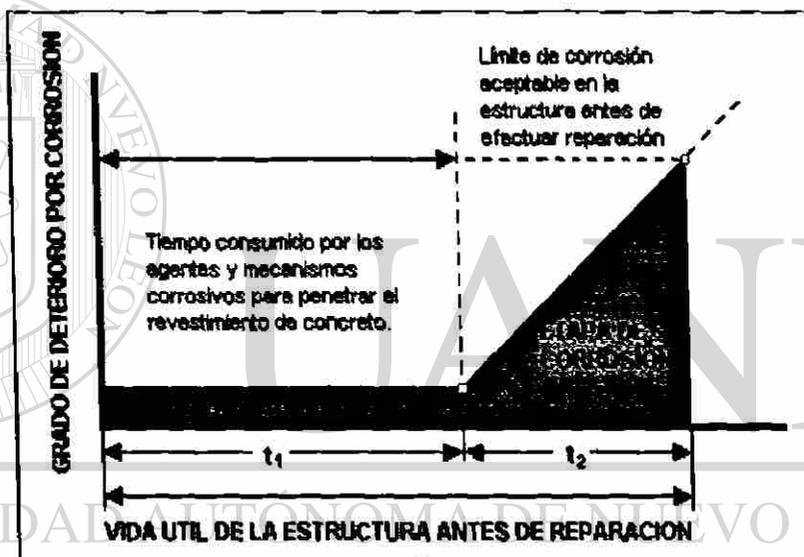


Figura 1.11: Modelo de vida útil de una estructura de concreto reforzado.

De la figura 1.11 podemos deducir que entre mayor sea el periodo t_1 , mejor expectativa de vida útil tendrá la estructura. Dicho periodo de tiempo dependerá de la calidad con que se llevó a cabo la construcción de la estructura, mientras que el periodo t_2 es impredecible por el número de variables a considerar.

Por lo anteriormente expuesto, es posible resumir lo siguiente:

- a) El concreto reforzado destaca como una combinación de materiales, ampliamente utilizado en la construcción de estructuras y obras civiles de muy variados tipos y funciones.
- b) Los fenómenos de corrosión involucrados en las estructuras de concreto reforzado están en función de un sinnúmero de variables, que van desde la calidad de los materiales utilizados en la construcción de la obra, hasta variables que involucran las características ambientales del lugar donde se construyó dicha obra.
- c) Los fenómenos de corrosión en las estructuras fabricadas con concreto reforzado, son un problema que afectan las propiedades mecánicas, y en consecuencia, la vida útil de las mismas.
- d) Es necesario encontrar mecanismos o procesos que permitan extender la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, cuando éstas se encuentran ante un medio que presente riesgos de desencadenar reacciones de corrosión en la varilla de refuerzo.

CAPÍTULO 2

ACEROS AL SILICIO

2.1 El acero.

Las aleaciones de metales se han empleado exitosamente para impulsar el desarrollo de la tecnología, esto debido a que el hombre ha sabido aprovechar las diferentes propiedades que se pueden obtener de un metal aleado al modificar su composición química y estructura. Una aleación metálica puede ser una solución en estado sólido, obtenida generalmente en el estado líquido por la fusión de sus elementos, los cuales se conocen como constituyentes, componentes o aleantes^[23].

El acero es una solución sólida, fabricada a base de hierro que puede contener de manera sustitucional o intersticial otros elementos, generalmente carbono, silicio y manganeso. Un acero aleado se define como cualquier acero cuyas propiedades más significativas son debidas a la adición de algún elemento diferente del carbono durante los procesos de fusión^[8].

Un acero cualquiera puede ser clasificado tomando en cuenta el método de fabricación, su aplicación o su composición química, para lo cual existen un número de organismos que han propuesto diferentes clasificaciones^[8,24,25,26].

2.2 El silicio como elemento de aleación en el acero.

El silicio es un elemento de características metaloides, siendo uno de los elementos más abundantes en la naturaleza. Aunque no se le encuentra en estado libre, se combina con otros elementos para formar óxidos (cuarzo y amatista), además de silicatos de hierro, magnesio, sodio, aluminio y calcio, diseminándose éstos en la corteza terrestre^[27].

El silicio y sus compuestos tienen muchas aplicaciones industriales, siendo una de las principales el mejorar algunas de las propiedades de los aceros durante los procesos siderúrgicos. Ya desde principios de siglo se conocían algunos de los efectos del silicio en el acero^[28]. Generalmente el silicio es utilizado como un desoxidante del acero líquido, ya que detiene la reacción entre el carbono grafitico y el óxido de hierro y, la evolución de gases contribuyendo así a mejorar la calidad del producto final^[29]. Otro efecto del silicio en los aceros fundidos, es que conforme aumenta el contenido de este elemento en la aleación, el diagrama Fe-Fe₃C se modifica, desplazando hacia arriba las líneas Ac1 y Ac3 de dicho diagrama, lo cual puede observarse mediante el gráfico de la figura 2.1^[31]. Los contenidos de silicio en el acero dependerán del tipo de aleación que se desea producir y pueden variar desde valores mínimos de 0.2% hasta contenidos de 3.3%.

Otro de los usos del silicio en la industria siderúrgica, es en la fabricación de aceros para aplicaciones magnéticas o eléctricas, esto debido a que el silicio es un elemento que incrementa la resistividad eléctrica del acero, reduciendo

así la formación de corrientes parásitas cuando se presentan fenómenos de magnetización por corrientes alternas. Sin embargo uno de los efectos negativos del silicio en el acero es que tiende a reducir la conductividad térmica del acero, haciendo lento y difícil su recalentamiento^[29,30].

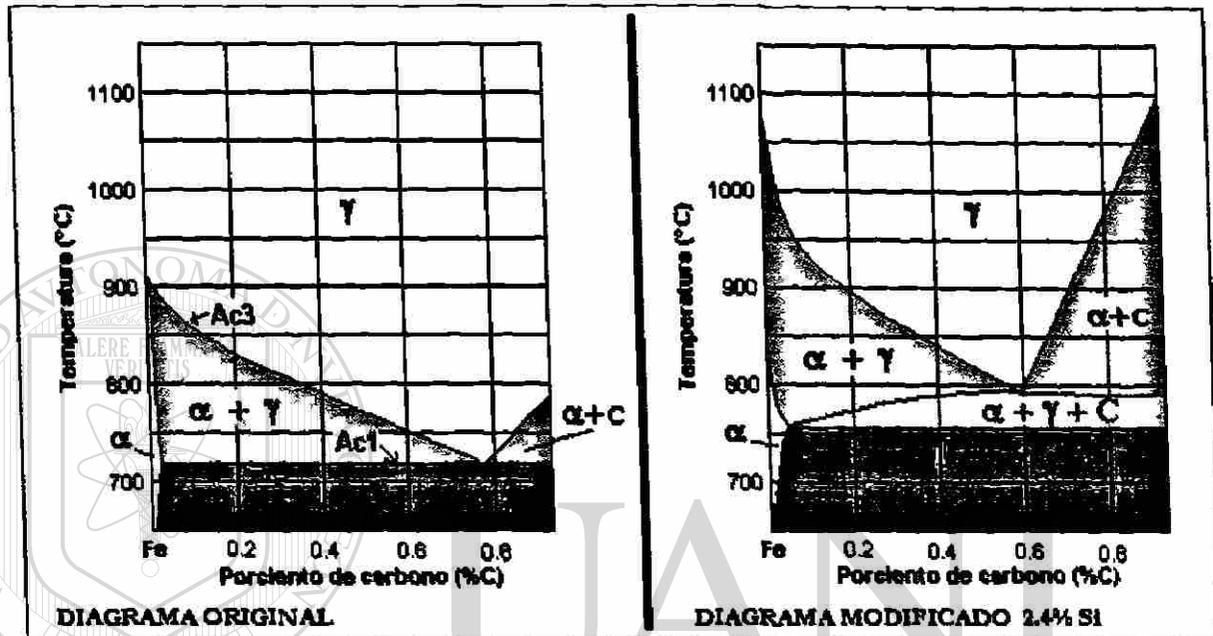


Figura 2.1: Sección de diagrama de fase que muestran la modificación del diagrama Fe-Si-C al adicionar 2.4% de silicio en peso a la aleación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

2.3 Aceros doble - fase aleados al silicio.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los aceros doble-fase ferrítico martensíticos (Dual-phase Ferritic Martensitic steels) comenzaron a ser desarrollados e investigados a finales de la década de 1970, cuando existía una necesidad por desarrollar aleaciones ferrosas que tuviesen una gran capacidad de deformación, que fuesen económicas y además ligeras, necesidades de la industria automotriz de esos años. Estas investigaciones han mostrado que los aceros doble-fase pueden desarrollar mayores resistencia tensil, resistencia al impacto, ductilidad y resistencia a la fatiga que los aceros convencionales^[32].

Los aceros doble - fase ferrítico martensíticos se caracterizan por tener una microestructura metalográfica consistente en una matriz de ferrita poligonal de grano fino (80% de la microestructura), en la que se encuentra dispersa una segunda fase de pequeñas islas de martensita (ver figura 2.2), aunque también pueden presentarse mínimas cantidades de perlita, bainita o austenita retenida. Esta microestructura en el acero puede obtenerse por medio de un tratamiento térmico de temple desde una temperatura dentro de la región $\alpha + \gamma$ de los diagramas de fase (ver figura 2.1)^[36,37,38].

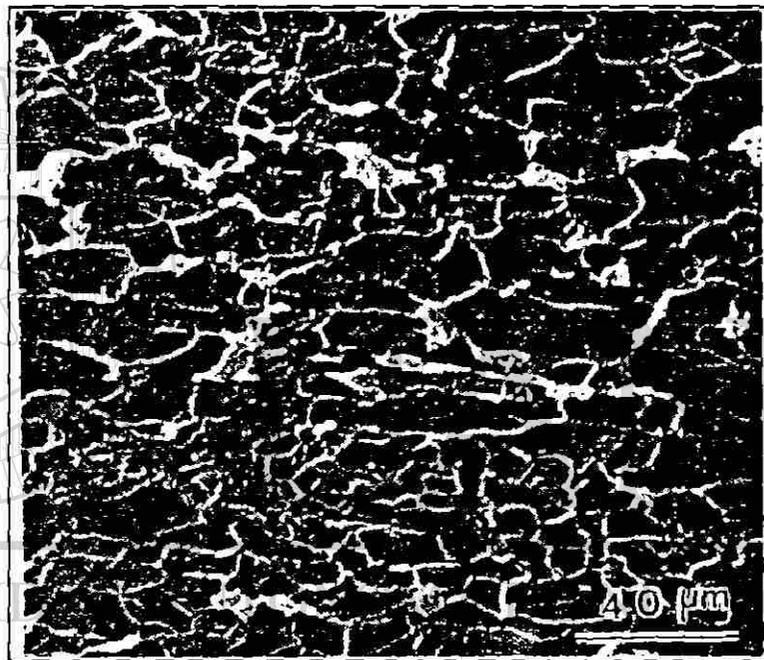


Figura 2.2: Microestructura característica de un acero doble fase. En la misma se observa una matriz de ferrita (color oscuro), además de una segunda fase de martensita (color claro), formando islas.

Es a esta microestructura a la que se le relacionan las propiedades mecánicas de los aceros doble-fase. Se ha observado que la matriz de ferrita es responsable de la ductilidad, mientras que la función de la martensita es la de aumentar la resistencia del acero doble-fase. Por ello, la resistencia y la ductilidad de estos aceros debe regularse al controlar las fracciones volumétricas de ferrita y martensita. Sin embargo, se ha encontrado que las

propiedades óptimas de estos aceros se logran cuando la presencia de martensita es de alrededor del 20% de la microestructura^[36,37].

A fin de poder obtener la microestructura antes descrita, es necesario evitar la formación de carburos de cementita en el acero, los cuales tienden a disminuir la templeabilidad del mismo. Los elementos de aleación para lograr tal propósito son el manganeso, el silicio, el molibdeno y el vanadio, siendo el silicio un importante elemento que retrasa la formación de la cementita en el acero^[36,38]. Así, al incrementar la cantidad de silicio en el acero, la probabilidad de poder formar martensita en el acero aumenta, dando por resultado un incremento en las propiedades mecánicas del mismo^[37], lo cual puede observarse mediante la figura 2.3:

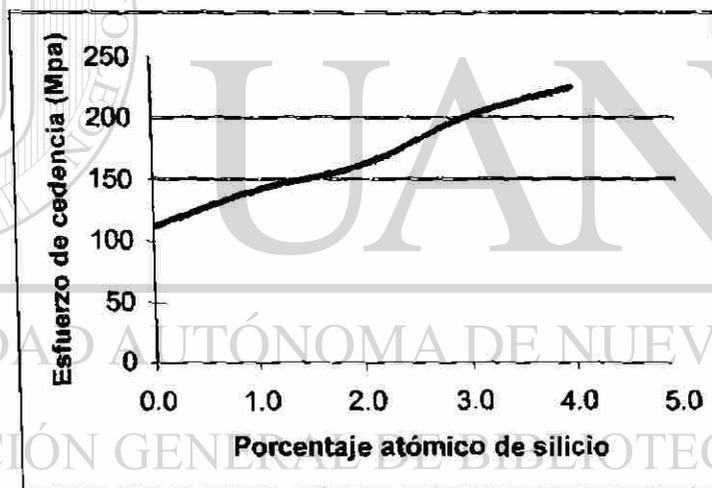


Figura 2.3: El esfuerzo de cedencia como función del contenido de silicio en el acero.

Es importante señalar que al presentarse deformación en estos aceros, la presencia del silicio tiene una fuerte tendencia a elevar el índice de endurecimiento por deformación^[36], lo cual es deseable para materiales que se utilizan en elementos y estructuras sujetos a esfuerzos que pudieran ocasionar deformación permanente.

2.4 Aceros aleados al silicio resistentes a la corrosión.

Además de los efectos del silicio en el acero arriba mencionados, se han desarrollado investigaciones para conocer cuál es la influencia del silicio en las propiedades de resistencia a la corrosión de distintos aceros. Los resultados de una de estas investigaciones se resumen mediante la gráfica de la figura 2.4^[25], en la que se observa que al incrementar el contenido de silicio en los aceros involucrados, también se eleva su resistencia a la corrosión ante un ambiente determinado.

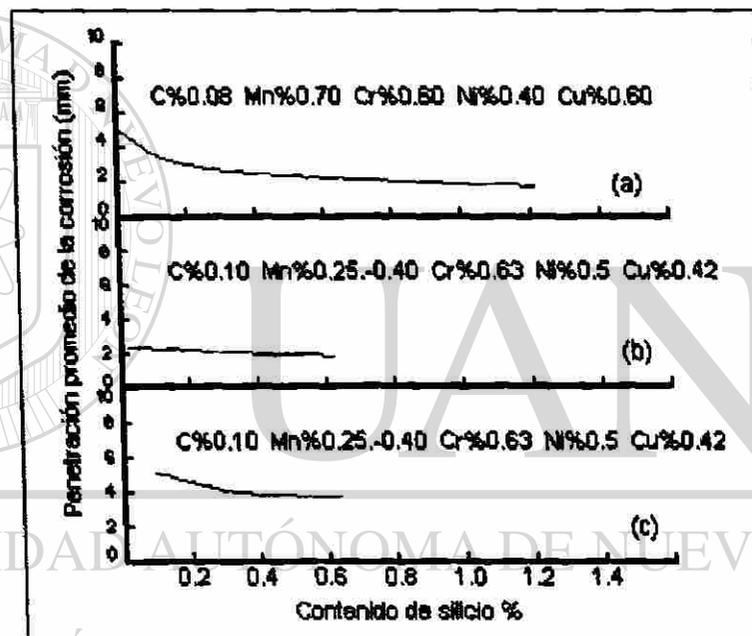


Figura 2.4: Comportamiento de aceros a ambientes corrosivos: (a) y (b) ambiente industrial, (c) atmósfera marina.

Otras investigaciones se centran en el estudio de los denominados aceros doble – fase ferrítico martensíticos (DFM steels), los cuales sirvieron como antecedente para la realización del presente estudio^[31,32]. Como ya se mencionó, se trata de aceros convencionales que se pueden obtener al enfriar por temple desde la temperatura de la mezcla de fases $\alpha + \gamma$.

Investigaciones realizadas con estos aceros han demostrado que los aceros doble-fase son capaces de resistir fenómenos de corrosión cuando son embebidos en concreto, aún y cuando se permite la presencia de iones cloruro (Cl⁻) en el sistema acero-concreto bajo condiciones de laboratorio. Algunos de los resultados obtenidos en estas investigaciones se muestran en la gráfica de la figura 2.5^[31,32].

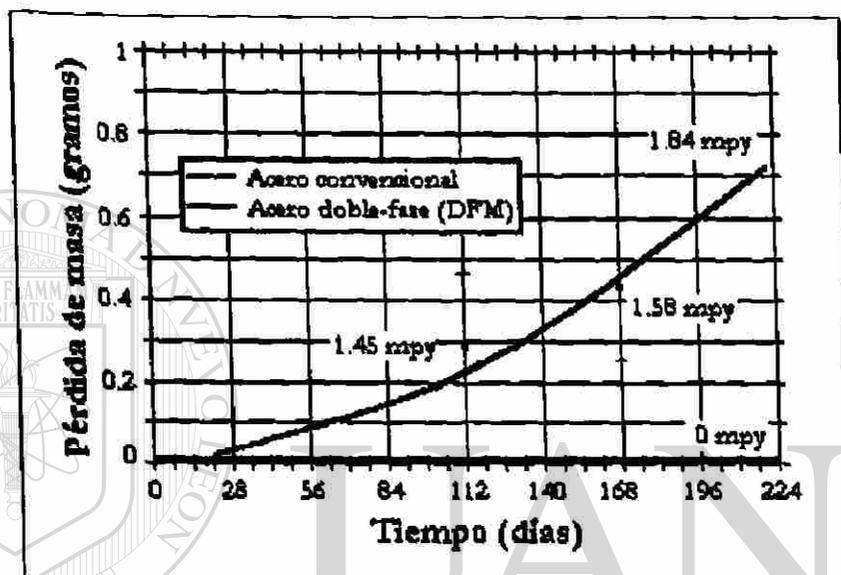


Figura 2.5: Gráfico que muestra los resultados de pruebas de corrosión en aceros convencionales y aceros doble fase, de acuerdo a norma ASTM-G1.

En la figura 2.5 se puede observar que, para las condiciones de experimentación en laboratorio, los aceros doble-fase involucrados fueron capaces de no presentar ningún fenómeno de corrosión después de permanecer 60 semanas embebidos en concreto^[31,32]. Esto indica que no se presentó ningún mecanismo de corrosión que involucrara corrosión por picadura o corrosión generalizada en la superficie de las barras de acero bajo prueba.

De acuerdo a los autores de estas investigaciones, los resultados obtenidos son atribuidos a las siguientes causas:

- a) Composición química de la aleación. El bajo contenido de carbono evita la formación de carburos, los cuales fomentan la formación de pares galvánicos con otras fases presentes en el acero.
- b) Distribución de fases. La microestructura obtenida después del tratamiento térmico de temple, permite la formación de una matriz de ferrita, que rodea a las islas de martensita. Esta distribución metalográfica permite mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión (ver figura 2.6).
- c) El alto contenido de silicio en el acero permite la formación de una capa pasiva superficial en el acero embebido, la cual estará compuesta de óxido de silicio (SiO_2)^[33].



Figura 2.6: Imagen de SEM que muestra la microestructura de un acero doble-fase (DFM steel). Se aprecia la matriz de ferrita en color oscuro, mientras que las islas de martensita son representadas por las zonas claras.

2.4 Familia de aceros al silicio.

Teniendo como referencia los estudios sobre resistencia a la corrosión de los aceros doble-fase (DFM steels), la empresa Hojalata y Lámina S.A. (HyLSA) produjo una familia de aceros con bajo contenido de carbono y aleados principalmente con silicio, donde este elemento varía para conocer las características de resistencia a la corrosión de las aleaciones obtenidas.

Además de variar el contenido de silicio en la aleación, cada uno de los aceros obtenidos sufrió también un tratamiento térmico intercrítico de temple, a fin de reproducir la estructura dual ferrita-martensita descrita en los aceros doble-fase. El objetivo de estos procedimientos fue el de encontrar el contenido óptimo de silicio y la temperatura de tratamiento térmico intercrítico para obtener las propiedades microestructurales, mecánicas y de resistencia a la corrosión, que permitieran obtener un acero viable para la fabricación de varilla de refuerzo en la industria de la construcción y, que además, pudiese adaptarse a los procesos de producción de varilla existentes.

Mediante la figura 2.7 se presenta el proceso de fabricación de la familia de aceros al silicio involucrada en la presente evaluación. La fabricación de esta familia de aceros se realizó en las instalaciones de la empresa arriba mencionada. Se procedió a la selección de chatarra de acero para luego efectuar los procesos de fusión en un horno de inducción tipo crisol con una capacidad de 1 tonelada. En este horno también se realizaron los procedimientos de ajuste y adición de ferroaleantes para obtener las composiciones químicas deseadas para cada grupo de aceros.

Una vez obtenida la aleación, se procedió a su vaciado en moldes diseñados para obtener barras sólidas de 10.16 cm de diámetro. Se utilizaron corazas metálicas revestidas interiormente con mangas refractarias de alúmina, uniéndose grupos de 6 piezas mediante un único alimentador. Una vez que las

barras de acero solidificaron, se cortó la alimentación o colada y las piezas obtenidas se prepararon para el siguiente proceso, el cual consistió en laminar las barras de acero para obtener barras cilíndricas sólidas con un diámetro de 5.8 cm. Esto se realizó en un molino Cross Country con una capacidad de 10 ton/hr.

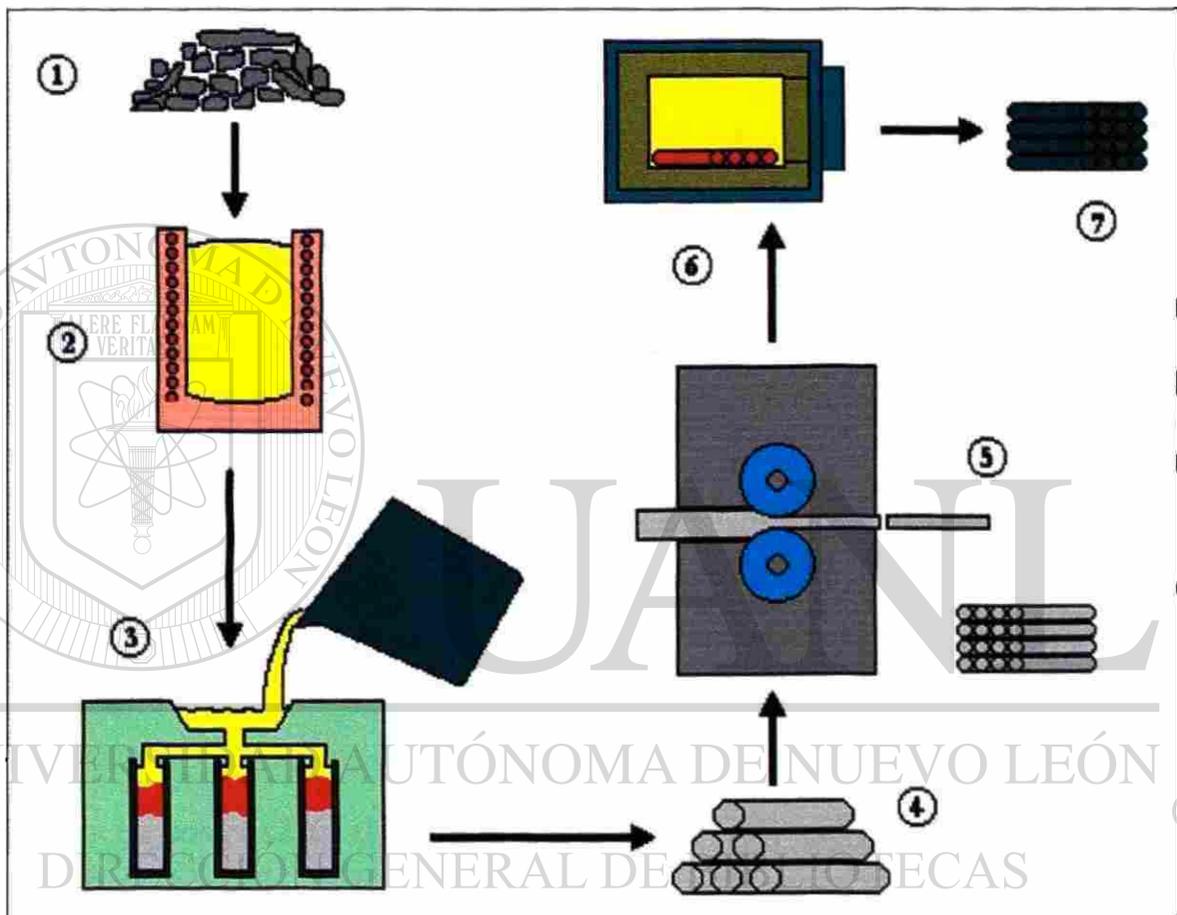


Figura 2.7: Figura que ilustra los procesos de fabricación de la familia de aceros al silicio involucrada en la evaluación: (1) Selección de materia prima; (2) fusión en horno de inducción y ajustes de aleación; (3) vaciado en moldes; (4) corte de coladas; (5) laminación de barras; (6) tratamiento térmico; (7) Clasificación de familia de aceros al silicio.

El último proceso que se realizó a las barras de acero fue un tratamiento térmico de temple para obtener la microestructura ferrita-martensita descrita para los aceros doble - fase (DFM steels). Este tratamiento térmico se efectuó

en un horno de calentamiento por resistencias y el temple se realizó en agua a temperatura ambiente (ver figura 2.8). De esta manera se produjo una familia de aceros aleados al silicio, en donde además de variar el contenido de silicio, se varió también la temperatura de tratamiento térmico de temple.

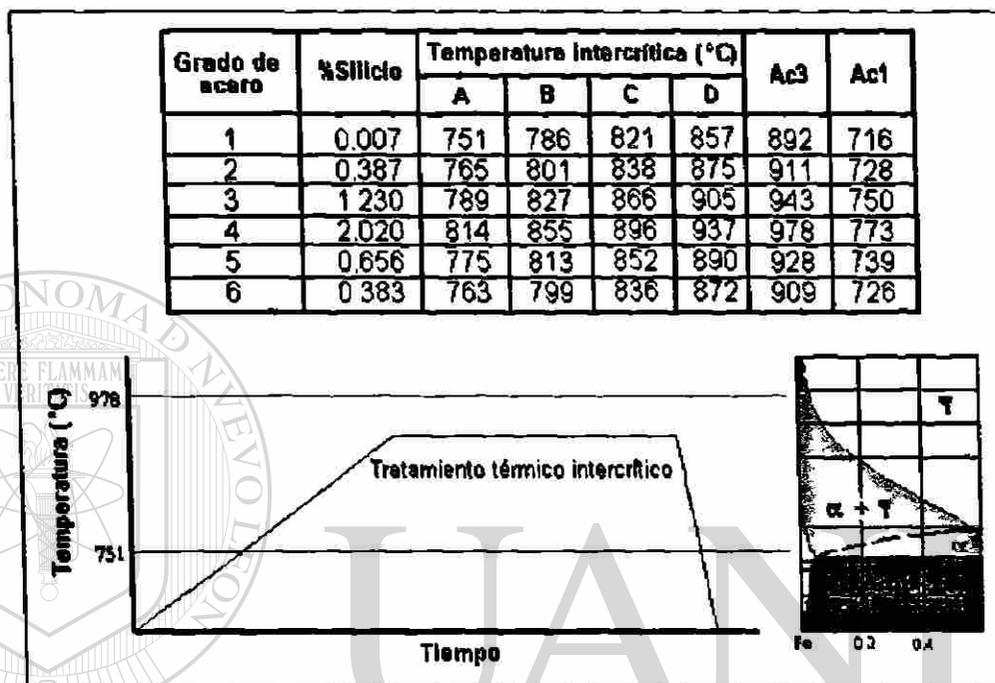


Figura 2.8: Tabla de los aceros en los que se efectuó el tratamiento intercrítico y gráfica del mismo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La composición química de los aceros al silicio se muestra en la Tabla 2.1^[35].

Tabla 2.1: Análisis químico de aceros al Silicio.

Grado de acero	Determinación (%)		
	Carbono	Silicio	Manganeso
1	0.133	0.0075	0.618
2	0.102	0.387	0.483
3	0.110	1.230	0.751
4	0.121	2.020	0.731
5	0.095	0.656	0.439
6	0.111	0.383	0.637

2.6 Caracterización metalográfica de la familia de aceros al silicio.

A continuación se presentan las estructuras metalográficas encontradas en los aceros de la familia al silicio. Todas las imágenes se obtuvieron a partir de muestras de cada uno de los aceros proporcionados por HyLSA sujetos a evaluación. La preparación y el análisis metalográfico de las muestras se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Todas las muestras de los aceros fueron atacadas con Nital al 2% para revelar la microestructura presente en las mismas^[39].

El procedimiento llevado a cabo va desde el corte, montaje y preparación metalográfica de las muestras, ataque químico y observación al microscopio. A fin de identificar las fases presentes en los aceros, además de la observación, se recurrió al uso de un microdurómetro Vickers para relacionar las propiedades de dureza encontradas en las fases con las de otros resultados publicados. Mediante la observación metalográfica y la determinación de la dureza es posible inferir el tipo de fase presente en la microestructura de un metal^[42,43].

Para conocer las variaciones en la morfología y distribución de las fases en los aceros, producto de las diferencias en composición y de los tratamientos térmicos efectuados, se utilizó un analizador de imágenes Leica *Quantimet 250*, mediante el cual se realizaron todas las mediciones correspondientes.

En las siguientes imágenes se diferencian las fases de la siguiente manera: ferrita en color claro, perlita y segunda fase en color oscuro.

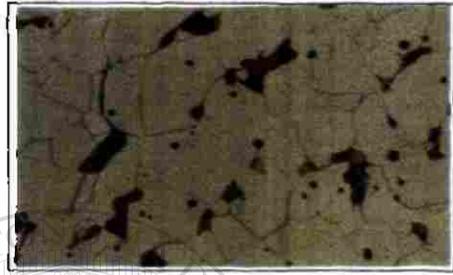
2.6.1 Grados de acero después del proceso de laminado.



20 μm

400X

Figura 2.9: Acero 1.
 Contenido de silicio: 0.0075
 Porcentaje de ferrita: 94.1%
 Porcentaje de perlita: 5.9%



20 μm

400X

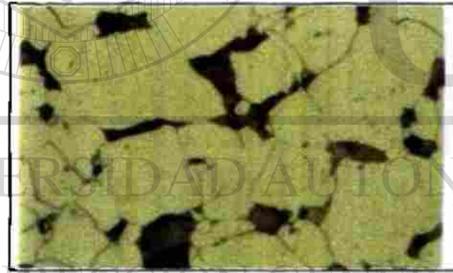
Figura 2.10: Acero 2.
 Contenido de silicio: 0.387
 Porcentaje de ferrita: 90.8%
 Porcentaje de perlita: 9.2%



20 μm

400X

Figura 2.11: Acero 3.
 Contenido de silicio: 1.230
 Porcentaje de ferrita: 90.8%
 Porcentaje de perlita: 9.2%



20 μm

400X

Figura 2.12: Acero 4.
 Contenido de silicio: 2.020
 Porcentaje de ferrita: 89.1%
 Porcentaje de perlita: 10.9%



20 μm

400X

Figura 2.13: Acero 5.
 Contenido de silicio: 0.656
 Porcentaje de ferrita: 93%
 Porcentaje de perlita: 7.0%



20 μm

400X

Figura 2.14: Acero 6.
 Contenido de silicio: 0.383
 Porcentaje de ferrita: 89.3
 Porcentaje de perlita: 10.7%

2.6.2 Familia de aceros grado A.

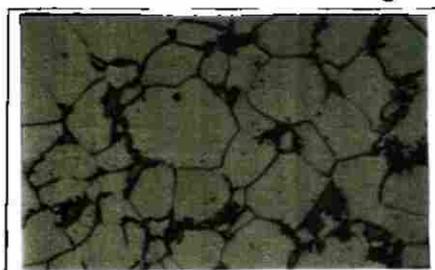


Figura 2.15: Acero A1.

Contenido de silicio: 0.0075

Porcentaje de ferrita: 91.8%

Porcentaje de segunda fase: 8.2%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 751 °C

Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm

400X

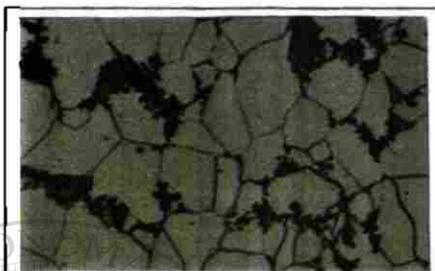


Figura 2.16: Acero A2.

Contenido de silicio: 0.387

Porcentaje de ferrita: 89%

Porcentaje de segunda fase: 11%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 765 °C

Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 µm

400X

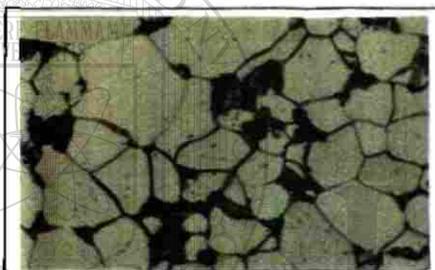


Figura 2.17: Acero A3.

Contenido de silicio: 1.230

Porcentaje de ferrita: 89.9%

Porcentaje de segunda fase: 10.1%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 789 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm

400X

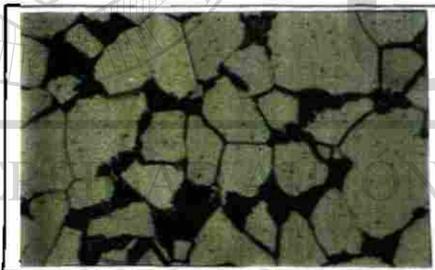


Figura 2.18: Acero A4.

Contenido de silicio: 2.020

Porcentaje de ferrita: 89.2%

Porcentaje de segunda fase: 10.8%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 814 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm

400X



Figura 2.19: Acero A5.

Contenido de silicio: 0.656

Porcentaje de ferrita: 88.5%

Porcentaje de segunda fase: 11.5%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 775 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 µm

400X



Figura 2.20: Acero A6.

Contenido de silicio: 0.383

Porcentaje de ferrita: 81%

Porcentaje de segunda fase: 19%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 763 °C

Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 µm

400X

2.6.3 Familia de aceros grado B.



Figura 2.21: Acero B1.

Contenido de silicio: 0.0075
 Porcentaje de ferrita: 91.8%
 Porcentaje de segunda fase: 8.2%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 787 °C
 Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X

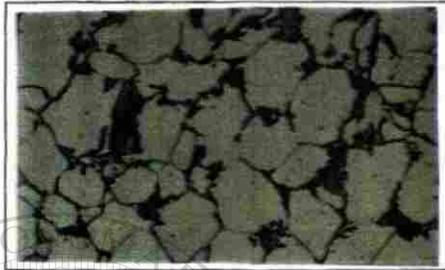


Figura 2.22: Acero B2.

Contenido de silicio: 0.387
 Porcentaje de ferrita: 87.1%
 Porcentaje de segunda fase: 12.9%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 802 °C
 Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X

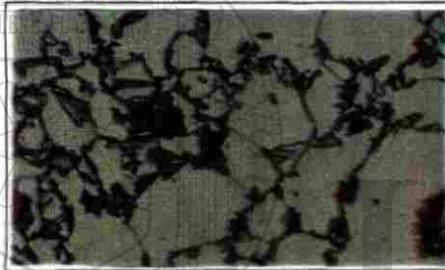


Figura 2.23: Acero B3.

Contenido de silicio: 1.230
 Porcentaje de ferrita: 86.8%
 Porcentaje de segunda fase: 13.2%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 827 °C
 Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 μm

400X

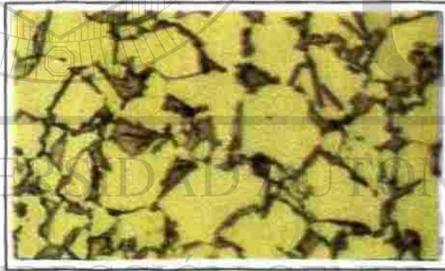


Figura 2.24: Acero B4.

Contenido de silicio: 2.020
 Porcentaje de ferrita: 82.5%
 Porcentaje de segunda fase: 17.5%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 855 °C
 Probabilidad de formar martensita: ~ 90%

20 μm

400X



Figura 2.25: Acero B5.

Contenido de silicio: 0.656
 Porcentaje de ferrita: 83.7%
 Porcentaje de segunda fase: 6.3%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 814 °C
 Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 μm

400X

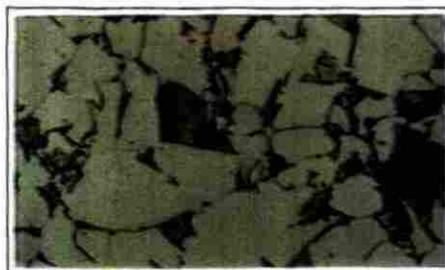


Figura 2.26: Acero B6.

Contenido de silicio: 0.383
 Porcentaje de ferrita: 85.6%
 Porcentaje de segunda fase: 14.4%
 Temperatura de tratamiento intercrítico: 800 °C
 Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X

2.6.4 Familia de aceros grado C.



Figura 2.27: Acero C1.

Contenido de silicio: 0.0075

Porcentaje de ferrita: 95%

Porcentaje de segunda fase: 5%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 822 °C

Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X

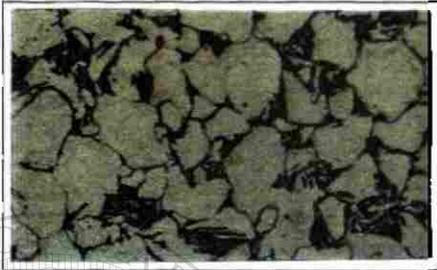


Figura 2.28: Acero C2.

Contenido de silicio: 0.387

Porcentaje de ferrita: 86.4%

Porcentaje de segunda fase: 14.6%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 839 °C

Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 μm

400X



Figura 2.29: Acero C3.

Contenido de silicio: 1.230

Porcentaje de ferrita: 84.3%

Porcentaje de segunda fase: 15.7%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 867 °C

Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X



Figura 2.30: Acero C4.

Contenido de silicio: 2.020

Porcentaje de ferrita: 83.1%

Porcentaje de segunda fase: 16.9%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 896 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 99.9%

20 μm

400X



Figura 2.31: Acero C5.

Contenido de silicio: 0.656

Porcentaje de ferrita: 84.4%

Porcentaje de segunda fase: 15.6%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 852 °C

Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X

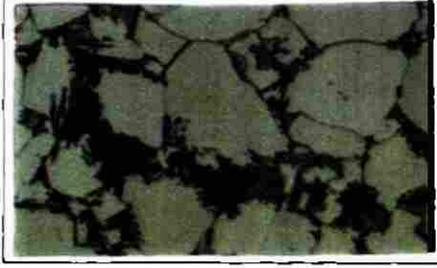


Figura 2.32: Acero C6.

Contenido de silicio: 0.383

Porcentaje de ferrita: 83.8%

Porcentaje de segunda fase: 16.2%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 836 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 90%

20 μm

400X

2.6.5 Familia de aceros grado D.



Figura 2.33: Acero D1.

Contenido de silicio: 0.0075

Porcentaje de ferrita: 90.1%

Porcentaje de segunda fase: 9.9%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 857 °C

Probabilidad de formar martensita: << 50%

20 μm

400X



Figura 2.34: Acero D2.

Contenido de silicio: 0.387

Porcentaje de ferrita: 87.8%

Porcentaje de segunda fase: 12.2%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 875 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 μm

400X



Figura 2.35: Acero D3.

Contenido de silicio: 1.230

Porcentaje de ferrita: 83.5%

Porcentaje de segunda fase: 16.5%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 905 °C

Probabilidad de formar martensita: < 90%

20 μm

400X

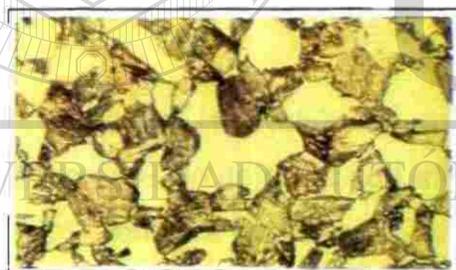


Figura 2.36: Acero D4.

Contenido de silicio: 2.020

Porcentaje de ferrita: 77%

Porcentaje de segunda fase: 23%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 937 °C

Probabilidad de formar martensita: > 90%

20 μm

400X



Figura 2.37: Acero D5.

Contenido de silicio: 0.656

Porcentaje de ferrita: 72.5

Porcentaje de segunda fase: 27.5%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 890 °C

Probabilidad de formar martensita: < 50%

20 μm

400X



Figura 2.38: Acero D6.

Contenido de silicio: 0.383

Porcentaje de ferrita: 81.5%

Porcentaje de segunda fase: 28.5%

Temperatura de tratamiento intercrítico: 873 °C

Probabilidad de formar martensita: ~ 50%

20 μm

400X

2.6.6 Defectos encontrados en las aleaciones evaluadas.

Desde un punto de vista estructural, la presencia de defectos en un material dará por resultado una disminución de sus propiedades mecánicas, ya que estos defectos actúan como concentradores de esfuerzos cuando dicho material es utilizado en una aplicación donde existan esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión, esfuerzos combinados, etc.

Desde el punto de vista de la corrosión, la presencia de defectos demerita las características de resistencia a la corrosión de los materiales al ser sujetos a un ambiente agresivo. La presencia de defectos en la superficie y en el interior de un material expuesto a un medio corrosivo, aumenta la posibilidad de que se presenten fenómenos de corrosión localizada, ya que estas imperfecciones pueden actuar como iniciadores de los mismos. La diferencia de composiciones o heterogeneidades en la estructura de un material, permite la formación de pares galvánicos que bajo condiciones determinadas pueden desencadenar fenómenos de corrosión localizada y generalizada^[8,9,11].

Durante la evaluación metalográfica de los aceros, se encontraron distintos tipos de defectos que afectan las propiedades de resistencia mecánica y de resistencia a la corrosión de los mismos. Los defectos más generalizados fueron:

- 1) Presencia de inclusiones debido a los procesos de vaciado.
- 2) Presencia de un anillo de ferrita superficial debida decarburaciones durante los procesos de laminación y de tratamiento térmico.
- 3) Presencia de grietas superficiales debidas al proceso de laminación.
- 4) Presencia de heterogeneidades en la distribución de fases del material.

En los casos de la presencia del anillo de ferrita y de las grietas superficiales, la presencia de este tipo de defectos en productos laminados en caliente, como la varilla para construcción, es permitida de acuerdo a ciertas

restricciones. Sin embargo, para la familia de aceros bajo estudio, los defectos encontrados van más allá de estas restricciones y, una varilla fabricada con este tipo de problemas y expuesta a un medio agresivo extremo, tendrá como resultado una vida útil reducida, debiéndose realizar operaciones de reparación prematuras.

A continuación se muestran se presentan imágenes de los defectos encontrados en los aceros aleados al silicio.



Figura 2.39: Fotomicrografía que muestra la presencia de inclusiones no metálicas en un acero A5. (100X)

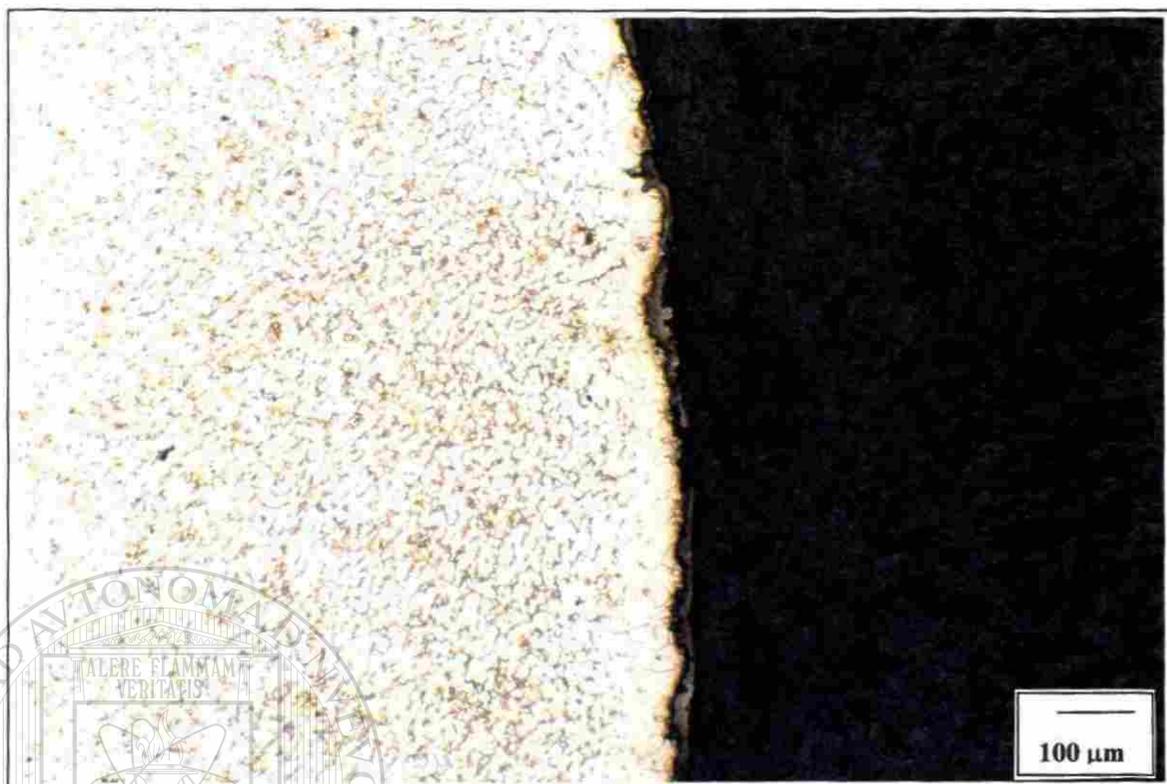


Figura 2.40: Fotomicrografía que muestra la presencia de un anillo de ferrita superficial en un acero A4. (100X)

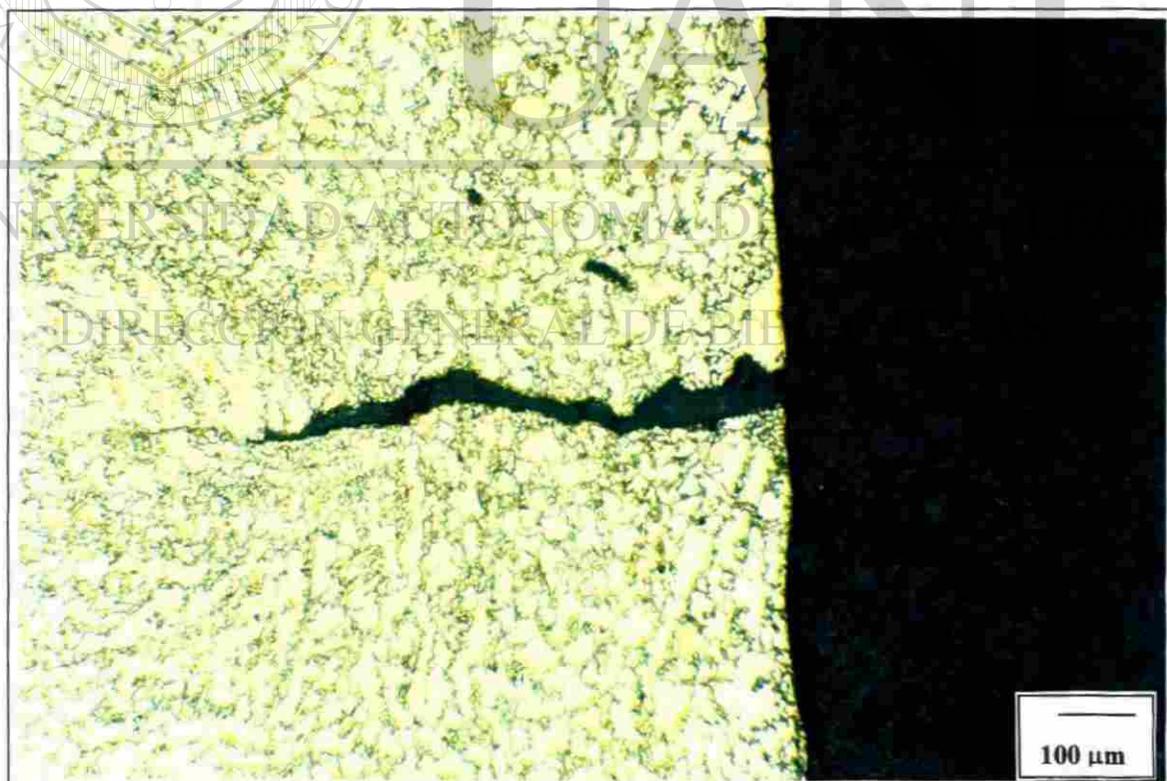


Figura 2.41: Fotomicrografía que muestra la presencia de una grieta superficial debida al proceso de laminación en un acero B3. (100X)

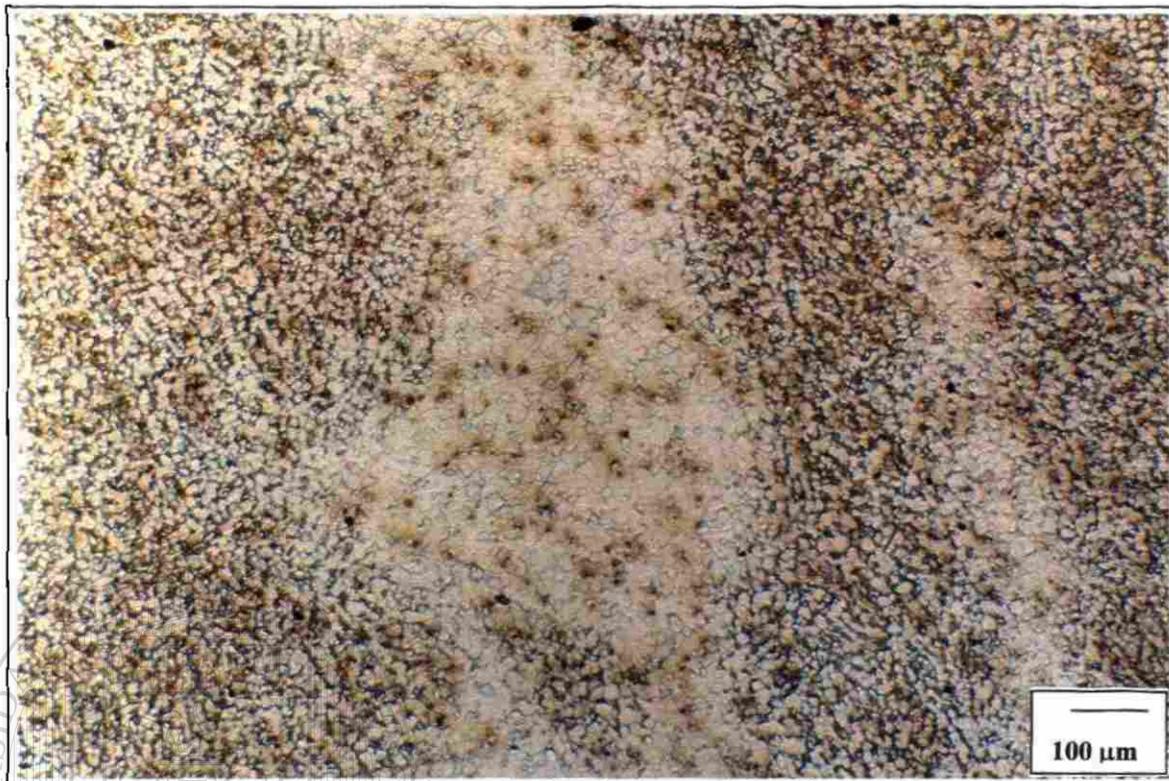


Figura 2.42: Fotomicrografía que muestra la presencia de heterogeneidad en la distribución de fases de un acero A4. (100X)

De lo anteriormente expuesto, es posible obtener las siguientes ideas principales:

- a) El silicio es un elemento de aleación que afecta las propiedades de fusión, resistencia mecánica y de resistencia a la corrosión del acero.
- b) La variación en el contenido de silicio produce cambios en la distribución y composición de las fases presentes de los aceros doble – fase bajo estudio.
- c) Los aceros que presentaron mayores probabilidades de formar la doble fase son: acero B4, acero C4, acero C6, acero D4 y acero D6
- d) Los aceros aleados al silicio evaluados presentan defectos en su estructura, tales como presencia de inclusiones no metálicas, grietas superficiales y heterogeneidad en la distribución de fases, defectos que pueden desencadenar procesos de corrosión en la varilla de una estructura de concreto reforzado.

Capítulo 3

Ensayos de corrosión para la familia de aceros aleados al silicio

3.1 Introducción.

Los ensayos realizados en el laboratorio tienen por objetivo imitar de las acciones atmosféricas o del medio que rodean a un sistema determinado^[40].

Debido a que no es posible reproducir el gran número de variables que se presentan en los fenómenos de corrosión de un sistema, las pruebas de laboratorio sólo toman en cuenta aquellos factores que afectan en mayor grado las condiciones reales de un sistema.

El comportamiento de la corrosión que se presente en un sistema, se puede considerar como la combinación de las propiedades del elemento o material que se deteriora y del medio agresivo que lo afecta, por lo tanto, no existen pruebas de corrosión universales que puedan considerar y controlar todas las variables y condiciones de todos los fenómenos de corrosión en metales y no metales^[41]. Sin embargo, se han desarrollado distintas

metodologías y técnicas que permiten realizar mediciones, estimaciones y análisis de estos comportamientos^[9,10,40].

Los mecanismos involucrados en los fenómenos de corrosión que se presentan en las estructuras de concreto reforzado, pueden durar hasta decenas de años, por lo que muchas veces no se puede dar un seguimiento continuo. Es por esta razón que se deben realizar pruebas a nivel laboratorio que no solo simulen o imiten las condiciones reales, sino que permitan obtener información y resultados en un tiempo razonable. Por ello, en este trabajo se recurrió a pruebas que permitieron evaluar las propiedades de resistencia a la corrosión de la familia de aceros involucrada de una manera práctica y relativamente rápida.

Los ensayos realizados incluyen pruebas de corrosión acelerada, en donde se busca determinar velocidades de corrosión (i_{corr}), y por otro lado, mediciones electroquímicas de potenciales de corrosión (E_{corr}), los cuales permiten estimar cual será el comportamiento de los aceros aleados al silicio si se utilizaran como varilla en las estructuras de concreto reforzado.

3.2 Pruebas de corrosión acelerada.

3.2.1 Justificación del ensayo.

Como se explicó en el capítulo 1, los fenómenos de corrosión que se presentan en el concreto reforzado se deben en gran medida a la presencia de una solución acuosa que se acumula en los poros del concreto. Esta solución actúa como una verdadera solución electrolítica que permite el movimiento de iones a través de la masa de concreto hasta llegar a la varilla de refuerzo. En dado caso de que estos iones sean agresivos se generarán entonces fenómenos de corrosión.

construida en zonas costeras, zonas donde se utilice la sal común como medio para derretir el hielo sobre carreteras construidas con concreto hidráulico, o para simular el uso de agua con altos contenidos de iones cloruro (Cl^-) al momento de preparar el concreto.

Se prepararon muestras representativas de cada una de las aleaciones de la familia de aceros al silicio. Esta preparación involucró el cortar las muestras en forma de rodajas de cada uno de los aceros, limpiar el óxido superficial de las mismas por medio de lija y por último, perforarlas cerca de la circunferencia exterior, para poder ser suspendidas, ver figura 3.1.



Figura 3.1: Secuencia de preparación de probetas para pruebas de corrosión acelerada.

Una vez que las muestras o probetas fueron perforadas, se procedió a lavarlas para limpiar cualquier rastro de suciedad o grasa sobre la superficie. A las probetas limpias y secas se le determinó su peso. Los pesos iniciales de las muestras se reportan en las Tablas 3.1 y 3.4.

A cada una de las muestras se les pasó un hilo nylon a través del agujero y por medio de un soporte de madera se suspendió cada muestra en el recipiente que contenía la Solución 1 y la misma operación se repitió para las probetas del recipiente de la Solución 2. Todas las muestras metálicas en ambas soluciones fueron sumergidas totalmente.

El tiempo que las muestras de los aceros al silicio permanecieron sumergidas fue de 30 días. Transcurrido este tiempo, las muestras fueron retiradas de las soluciones respectivas para ser limpiadas y vueltas a pesar para determinar un peso final y conocer la pérdida en peso del acero. Esta pérdida en peso es resultado de la exposición a cada una de las muestras a los medios acuosos descritos.

El procedimiento de limpieza que se efectuó, consistió en extraer las muestras de las respectivas soluciones y posteriormente lavarlas con una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10%. Después se enjuagaron las probetas en agua, para hacer un lavado con jabón a fin de eliminar cualquier rastro de la solución ácida en la muestra.

Este tipo de ensayo se repitió en dos ocasiones más, utilizando las mismas probetas y con soluciones similares. Los resultados de estos ensayos se muestran en las Tablas 3.2 a la 3.6. De esta manera, el tiempo total de exposición de las muestras a los medios acuosos fue de 90 días.

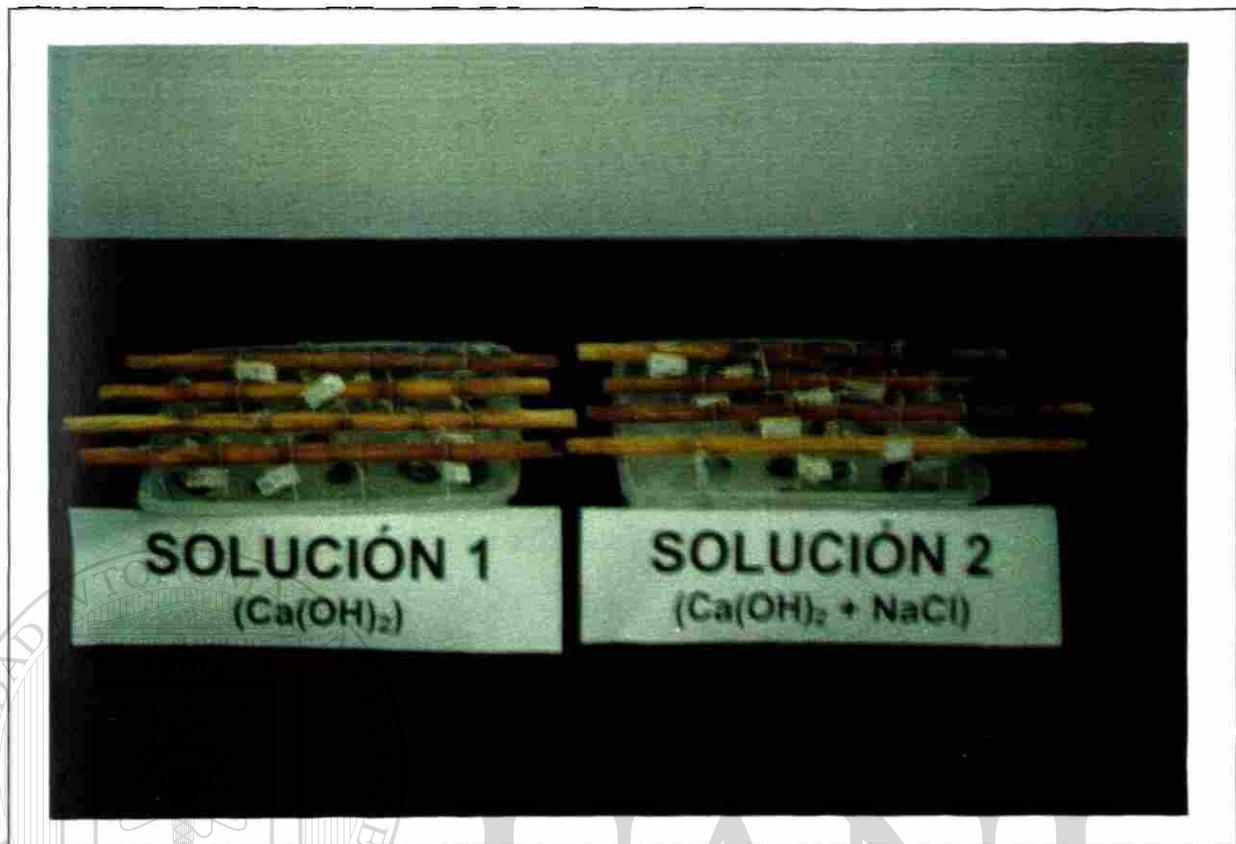


Figura 3.2: Disposición de las muestras de los aceros al silicio en cada una de las soluciones acuosas.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

3.2.3 Resultados de los ensayos de corrosión acelerada.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Mediante los ensayos de corrosión acelerada es posible inferir las velocidades de corrosión que presentarían los aceros al silicio al ser expuestos a un medio como el del concreto reforzado o a un medio agresivo.

La cantidad de metal corroído de un elemento que se comporte de manera anódica en un sistema de corrosión en la que existe una solución acuosa puede ser determinada mediante la siguiente ecuación^[6]:

$$\Delta w = \frac{(I)(t)(M)}{(n)(F)} \quad (3.1)$$

donde

Δw = peso del metal en gramos, corroído en una solución acuosa en un tiempo determinado en segundos.

I = flujo de corriente en Amperes.

M = masa atómica del metal corroído (g/mol).

n = número de electrones/átomo producido en el proceso de corrosión.

F = constante de Faraday equivalente a 96500 C/mol ó 96500 A·s/mol.

t = tiempo de exposición en segundos.

Para poder expresar la velocidad de corrosión en términos de densidad de corriente i (A/cm²), es necesario tomar en cuenta el área superficial expuesta del elemento corroído, por lo que la ecuación 3.1 se enuncia de la siguiente manera:

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)} \quad (3.2)$$

donde

i_{corr} = densidad de corriente (A/cm²).

A = área superficial en cm² del elemento corroído expuesta al medio agresivo.

Así, al llevar a cabo las conversiones correspondientes, se obtienen los resultados mostrados en las Tablas 3.1 a 3.6:

Tabla 3.1: Resultados obtenidos del primer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂).

acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm ²)	i_{corr} (A/cm ²)X10 ⁻⁶
A1	10.6093	10.6087	0.0006	10.17	0.0786
A2	14.8473	14.8445	0.0028	10.96	0.3405
A3	7.9353	7.9350	0.0003	9.73	0.0411
A4	10.6633	10.6619	0.0014	10.38	0.1798
A5	7.5617	7.5615	0.0002	9.68	0.0275
A6	9.1864	9.1852	0.0012	9.91	0.1614
B1	10.0948	10.0944	0.0004	10.18	0.0524
B2	7.5422	7.5421	0.0001	9.36	0.0142
B3	10.3232	10.3190	0.0042	10.40	0.5380
B4	13.3083	13.3076	0.0007	10.80	0.0834
B5	9.6725	9.6715	0.0010	10.24	0.1300
B6	9.8355	9.8333	0.0022	10.04	0.2921
C1	12.1309	12.1299	0.0010	10.33	0.1290
C2	14.0616	14.0601	0.0015	11.00	0.1818
C3	9.8361	9.8346	0.0015	10.12	0.1976
C4	11.1061	11.1038	0.0023	10.27	0.2984
C5	9.8765	9.8757	0.0008	9.65	0.1104
C6	7.5194	7.5192	0.0002	9.53	0.0280
D1	12.8270	12.8265	0.0005	10.75	0.0620
D2	11.8252	11.8235	0.0017	10.57	0.2143
D3	6.4662	6.4659	0.0003	8.99	0.0445
D4	15.6967	15.6946	0.0021	11.45	0.0244
D5	10.5452	10.5447	0.0005	10.23	0.0651
D6	16.6844	16.6823	0.0021	11.95	0.2343

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)}$$

- n = 2 electrones (Fe → Fe⁺² + 2e⁻).**
t = 30 días = 2.592 X 10⁶ s.
F = 96500 A·s/mol.
M = 55.85 g/mol (Fe).

1020126385

Tabla 3.2: Resultados obtenidos del segundo ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂).

Acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm ²)	i_{corr} (A/cm ²)X10 ⁻⁶
A1	10.6087	10.6083	0.0004	10.17	0.0524
A2	14.8445	14.8374	0.0071	10.96	0.8633
A3	7.9350	7.9344	0.0006	9.73	0.0821
A4	10.6619	10.6580	0.0039	10.38	0.5008
A5	7.5615	7.5609	0.0006	9.68	0.0826
A6	9.1852	9.1835	0.0017	9.91	0.2286
B1	10.0944	10.0926	0.0018	10.18	0.2356
B2	7.5421	7.5410	0.0011	9.36	0.1566
B3	10.3190	10.3122	0.0068	10.40	0.8710
B4	13.3076	13.3023	0.0053	10.80	0.6539
B5	9.6715	9.6703	0.0012	10.24	0.1562
B6	9.8333	9.8327	0.0006	10.04	0.0797
C1	12.1299	12.1289	0.0010	10.33	0.1290
C2	14.0601	14.0574	0.0027	11.00	0.3272
C3	9.8346	9.8300	0.0046	10.12	0.6060
C4	11.1038	11.1020	0.0018	10.27	0.2336
C5	9.8757	9.8741	0.0016	9.65	0.2209
C6	7.5192	7.5181	0.0011	9.53	0.1539
D1	12.8265	12.8236	0.0029	10.75	0.3594
D2	11.8235	11.8208	0.0027	10.57	0.3403
D3	6.4659	6.4653	0.0006	8.99	0.0889
D4	15.6946	15.6837	0.0109	11.45	1.2690
D5	10.5447	10.5426	0.0021	10.23	0.2735
D6	16.6823	16.6750	0.0073	11.95	0.8144

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)}$$

- n = 2 electrones (Fe → Fe⁺² + 2e⁻).**
t = 30 días = 2.592 X 10⁶ s.
F = 96500 A·s/mol.
M = 55.85 g/mol (Fe).

Tabla 3.3: Resultados obtenidos del tercer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂).

Acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm ²)	i_{corr} (A/cm ²)X10 ⁻⁶
A1	10.6083	10.6074	0.0009	10.17	0.1180
A2	14.8374	14.8368	0.0006	10.96	0.0730
A3	7.9344	7.9331	0.0013	9.73	0.1780
A4	10.6580	10.6572	0.0008	10.38	0.1027
A5	7.5609	7.5602	0.0007	9.68	0.0964
A6	9.1835	9.1828	0.0007	9.91	0.0942
B1	10.0926	10.0917	0.0009	10.18	0.1178
B2	7.5410	7.5401	0.0009	9.36	0.1282
B3	10.3122	10.3103	0.0019	10.40	0.2434
B4	13.3023	13.2975	0.0048	10.80	0.5922
B5	9.6703	9.6697	0.0006	10.24	0.0781
B6	9.8327	9.8313	0.0014	10.04	0.1859
C1	12.1289	12.1284	0.0005	10.33	0.0645
C2	14.0574	14.0568	0.0006	11.00	0.0727
C3	9.8300	9.8295	0.0005	10.12	0.0659
C4	11.1020	11.0978	0.0042	10.27	0.5450
C5	9.8741	9.8731	0.0010	9.65	0.1380
C6	7.5181	7.5174	0.0007	9.53	0.0979
D1	12.8236	12.8214	0.0022	10.75	0.2726
D2	11.8208	11.8203	0.0005	10.57	0.0630
D3	6.4653	6.4643	0.0010	8.99	0.1482
D4	15.6837	15.6805	0.0032	11.45	0.3725
D5	10.5426	10.5416	0.0010	10.23	0.1302
D6	16.6750	16.6744	0.0006	11.95	0.0669

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)}$$

- n = 2 electrones (Fe → Fe⁺² + 2e⁻).**
t = 30 días = 2.592 X 10⁶ s.
F = 96500 A·s/mol.
M = 55.85 g/mol (Fe).

Tabla 3.4: Resultados obtenidos del primer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) y sal común (NaCl).

acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm ²)	i_{corr} (A/cm ²)X10 ⁻⁶
A1	12.5304	12.5253	0.0051	10.25	0.6633
A2	19.7195	19.7123	0.0072	11.29	0.8497
A3	13.8691	13.8625	0.0066	10.77	0.8167
A4	16.9353	16.9288	0.0065	12.53	0.6912
A5	19.9254	19.9172	0.0082	11.10	0.9849
A6	17.5597	17.5524	0.0073	11.64	0.8356
B1	18.2222	18.2152	0.0070	11.89	0.7846
B2	15.8822	15.8755	0.0067	11.45	0.7799
B3	17.6121	17.6020	0.0101	12.08	1.1150
B4	14.7594	14.7516	0.0078	11.49	0.9049
B5	15.6786	15.6705	0.0081	11.15	0.9679
B6	13.8180	13.8113	0.0067	10.85	0.8230
C1	13.7640	13.7571	0.0069	10.88	0.8449
C2	13.5888	13.5825	0.0063	10.95	0.7668
C3	10.7569	10.7509	0.0060	10.31	0.7745
C4	9.0804	9.0738	0.0066	9.93	0.8856
C5	14.4698	14.4640	0.0058	10.98	0.7041
C6	9.3464	9.3400	0.0064	9.77	0.8733
D1	15.5186	15.5098	0.0088	11.34	1.0340
D2	10.9985	10.9925	0.0060	10.22	0.7824
D3	13.2961	13.2888	0.0073	10.88	0.8939
D4	12.6229	12.6168	0.0061	10.75	0.7560
D5	12.8870	12.8813	0.0057	10.29	0.7383
D6	11.7596	11.7463	0.0133	10.51	1.6870

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)}$$

n = 2 electrones (Fe → Fe⁺² + 2e⁻).

t = 30 días = 2.592 X 10⁶ s.

F = 96500 A·s/mol.

M = 55.85 g/mol (Fe).

Tabla 3.5: Resultados obtenidos del segundo ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) y sal común (NaCl).

Acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm ²)	i_{corr} (A/cm ²)X10 ⁻⁶
A1	12.5253	12.5191	0.0062	10.25	0.8064
A2	19.7123	19.6905	0.0218	11.29	2.5730
A3	13.8625	13.8443	0.0182	10.77	2.2520
A4	16.9288	16.9134	0.0154	12.53	1.6380
A5	19.9172	19.9102	0.0070	11.10	0.8407
A6	17.5524	17.5397	0.0127	11.64	1.4540
B1	18.2152	18.2074	0.0078	11.89	0.8743
B2	15.8755	15.8658	0.0097	11.45	1.1290
B3	17.6020	17.5902	0.0118	12.08	1.3020
B4	14.7516	14.7230	0.0286	11.49	3.3180
B5	15.6705	15.6645	0.0060	11.15	0.7170
B6	13.8113	13.8017	0.0096	10.85	1.1790
C1	13.7571	13.7509	0.0062	10.88	0.7592
C2	13.5825	13.5761	0.0064	10.95	0.7790
C3	10.7509	10.7343	0.0166	10.31	2.1450
C4	9.0738	9.0631	0.0107	9.93	1.4360
C5	14.4640	14.4506	0.0134	10.98	1.6270
C6	9.3400	9.3307	0.0093	9.77	1.2690
D1	15.5098	15.4986	0.0112	11.34	1.3160
D2	10.9925	10.9870	0.0055	10.22	0.7172
D3	13.2888	13.2778	0.0110	10.88	1.3470
D4	12.6168	12.6045	0.0123	10.75	1.5240
D5	12.8813	12.8744	0.0069	10.29	0.8937
D6	11.7463	11.7350	0.0113	10.51	1.4330

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)}$$

- n = 2 electrones (Fe → Fe⁺² + 2e⁻).**
t = 30 días = 2.592 X 10⁶ s.
F = 96500 A·s/mol.
M = 55.85 g/mol (Fe).

Tabla 3.6: Resultados obtenidos del tercer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y sal común (NaCl).

Acero	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Δw (g)	Area (cm^2)	i_{corr} (A/cm^2) $\times 10^{-6}$
A1	12.5191	12.5133	0.0058	10.25	0.7543
A2	19.6905	19.6770	0.0135	11.29	1.5930
A3	13.8443	13.8360	0.0083	10.77	1.0270
A4	16.9134	16.9031	0.0103	12.53	1.0950
A5	19.9102	19.8966	0.0136	11.10	1.6330
A6	17.5397	17.5276	0.0121	11.64	1.3850
B1	18.2074	18.1991	0.0083	11.89	0.9303
B2	15.8658	15.8580	0.0078	11.45	0.9079
B3	17.5902	17.5772	0.0130	12.08	1.4350
B4	14.7230	14.7109	0.0121	11.49	1.4040
B5	15.6645	15.6500	0.0145	11.15	1.7330
B6	13.8017	13.7948	0.0069	10.85	0.8475
C1	13.7509	13.7403	0.0106	10.88	1.2980
C2	13.5761	13.5710	0.0051	10.95	0.6208
C3	10.7343	10.7269	0.0074	10.31	0.9563
C4	9.0631	9.0582	0.0049	9.93	0.6575
C5	14.4506	14.4420	0.0086	10.98	1.0440
C6	9.3307	9.3217	0.0090	9.77	1.2280
D1	15.4986	15.4847	0.0139	11.34	1.6340
D2	10.9870	10.9791	0.0079	10.22	1.0300
D3	13.2778	13.2634	0.0144	10.88	1.7630
D4	12.6045	12.5895	0.0150	10.75	1.8590
D5	12.8744	12.8631	0.0113	10.29	1.4640
D6	11.7350	11.7265	0.0085	10.51	1.0780

$$i_{\text{corr}} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)}$$

$n =$ 2 electrones ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2e^-$).

$t =$ 30 días = 2.592×10^6 s.

$F =$ 96500 A·s/mol.

$M =$ 55.85 g/mol (Fe).

Para visualizar los resultados obtenidos en las pruebas de corrosión acelerada para la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{HO})_2$), se presentan los siguientes gráficos:

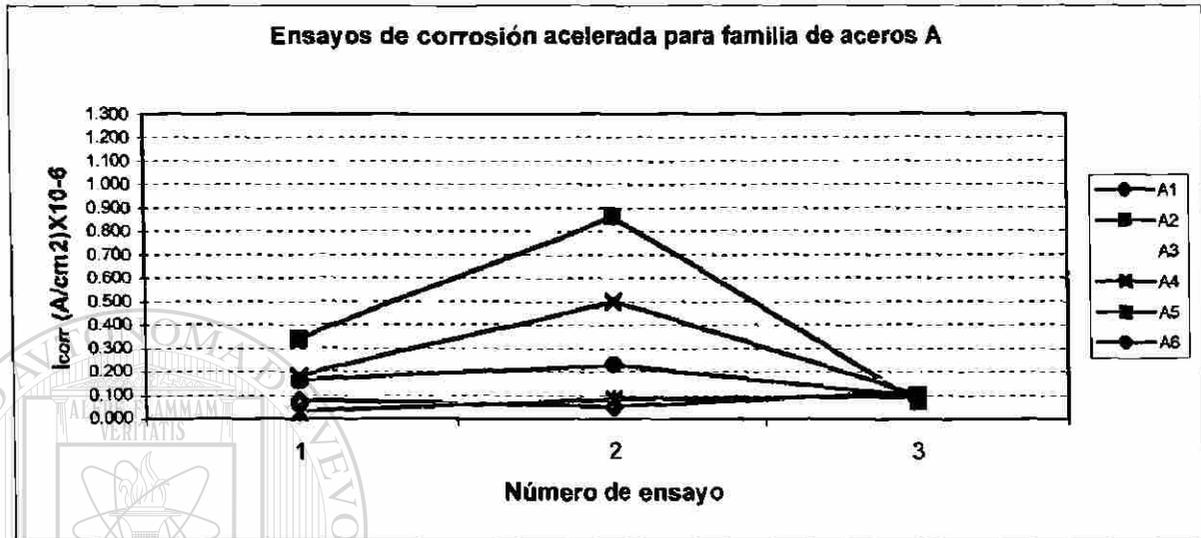


Figura 3.3: Comportamiento de la familia de aceros grado A durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

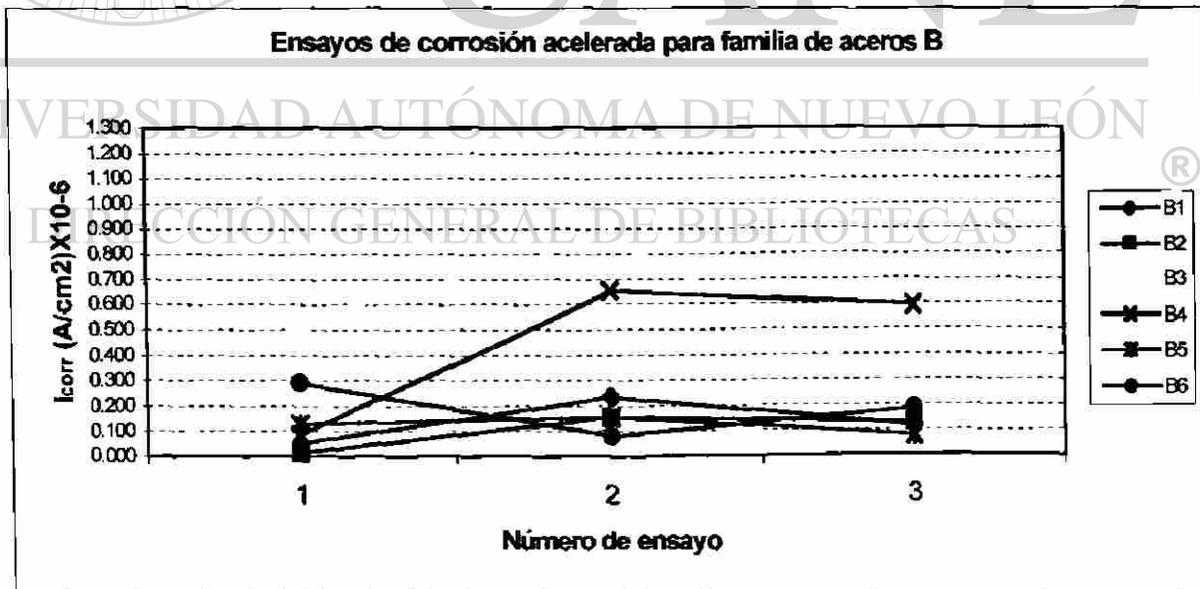


Figura 3.4: Comportamiento de la familia de aceros grado B durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

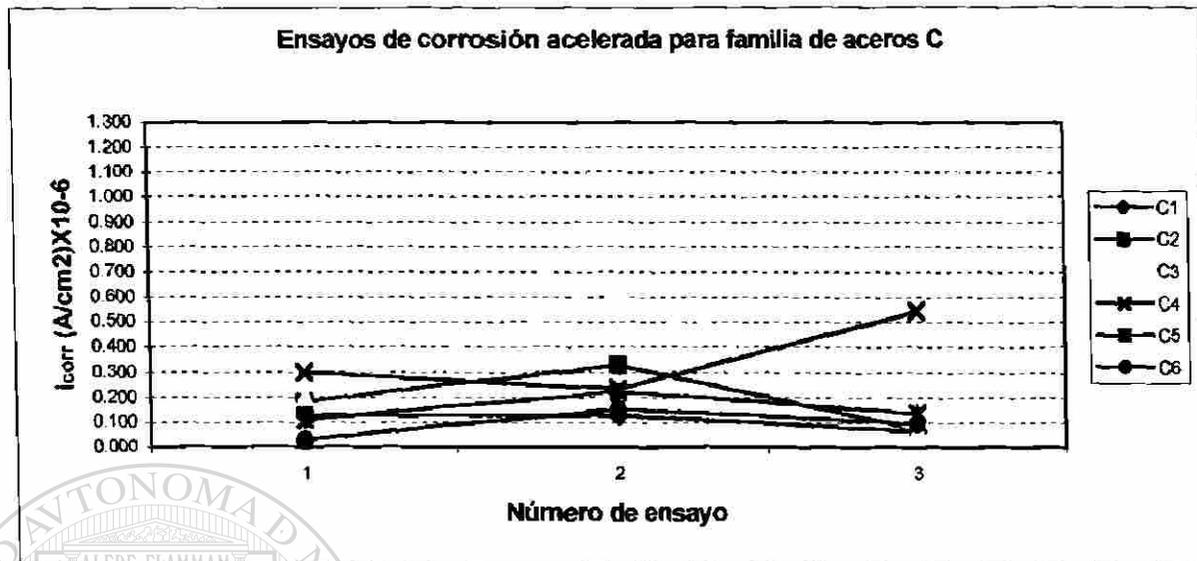


Figura 3.5: Comportamiento de familia de aceros grado C durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

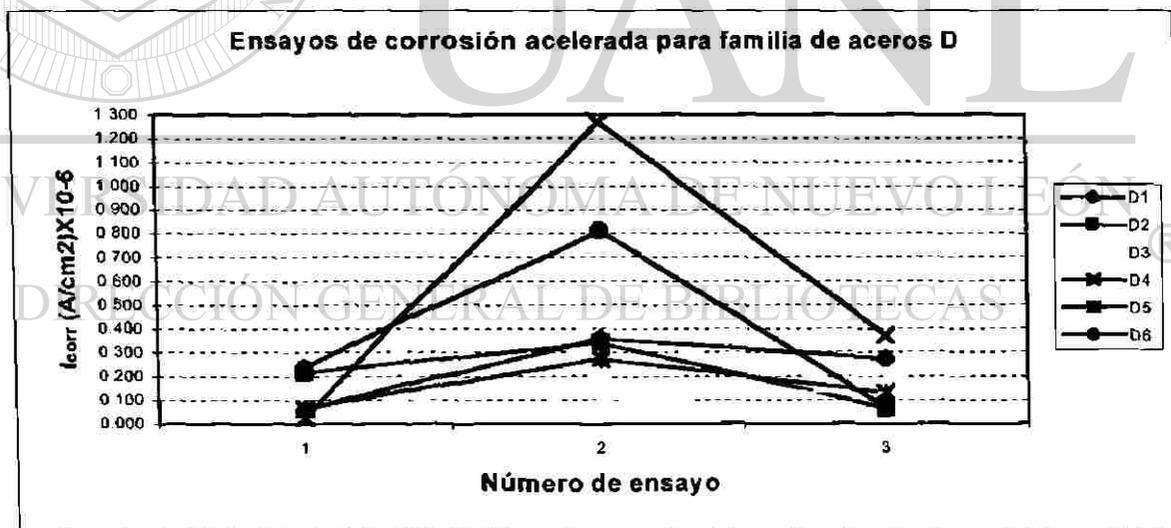


Figura 3.6: Comportamiento de familia de aceros grado D durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En las siguientes gráficas se presentará la evolución de las cuatro familias de aceros para los ensayos efectuados en la Solución 2 ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$).

En estos gráficos se observarán velocidades de corrosión mayores para los distintos aceros. Este aumento en las velocidades de corrosión es debido a la presencia del ion cloruro (Cl^-) de la sal común (NaCl), el cual actúa como un agente agresivo contra la superficie del metal, desencadenando procesos de corrosión.

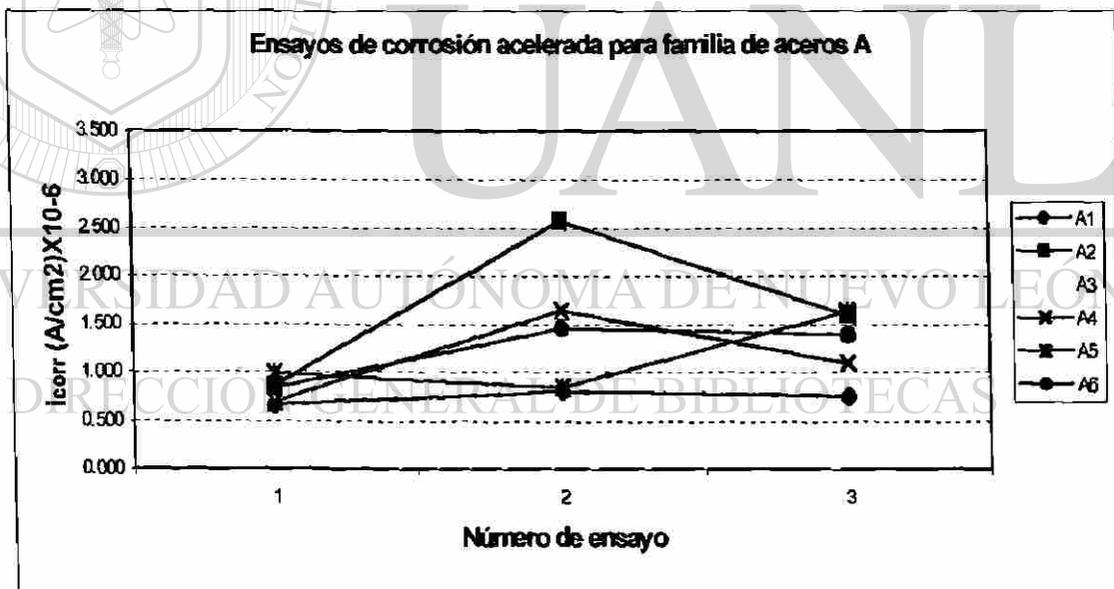


Figura 3.7: Comportamiento de la familia de aceros grado A durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.

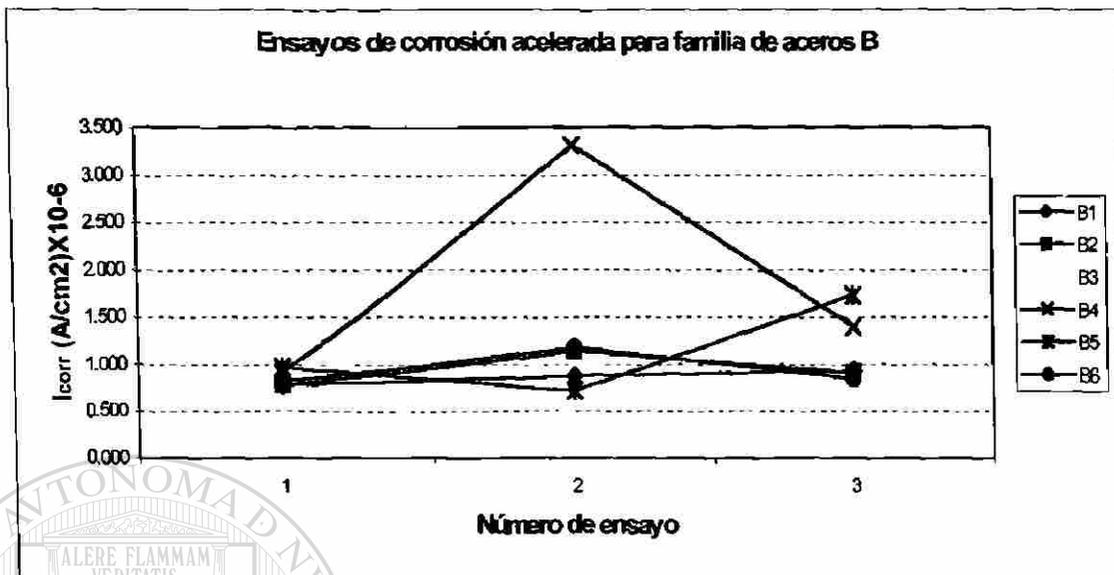


Figura 3.8: Comportamiento de la familia de aceros grado B durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.

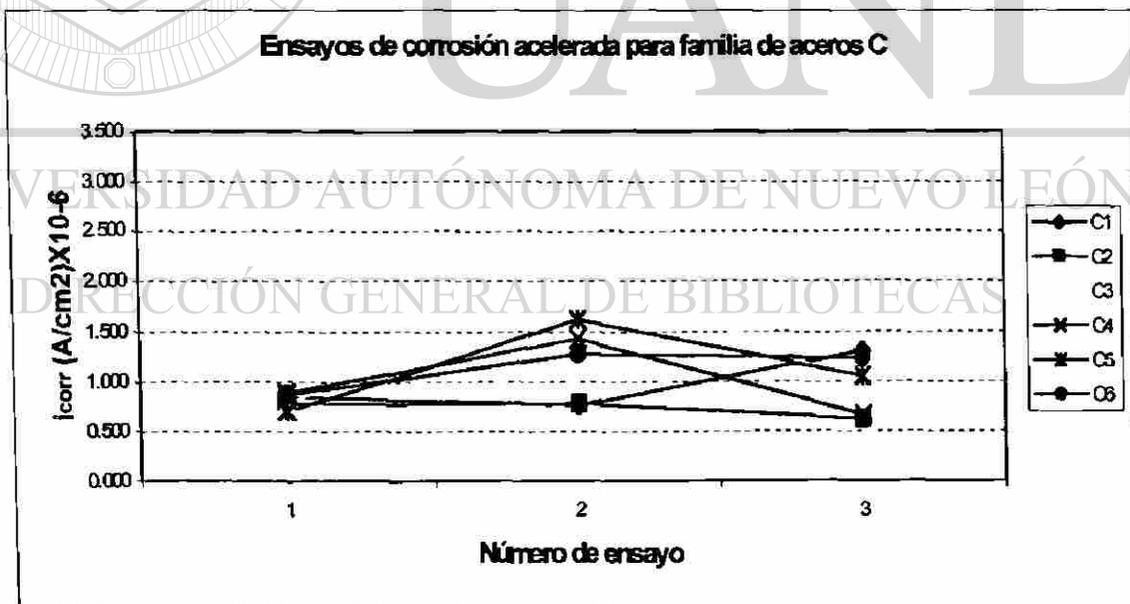


Figura 3.9: Comportamiento de la familia de aceros grado C durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.

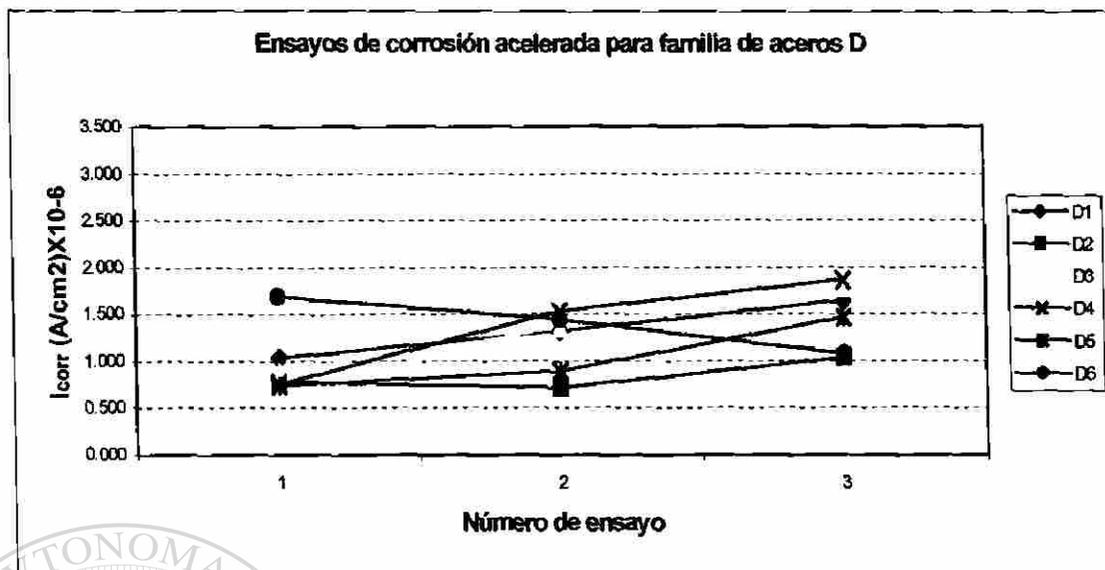


Figura 3.10: Comportamiento de la familia de aceros grado D durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.

Se observó la presencia de picaduras en las muestras de metal expuestas en la Solución 2, lo cual indica que el tipo de corrosión que se presenta en estos aceros es corrosión por picadura, la cual es grave, sobre todo para los aceros que se utilizan para la fabricación de varilla de refuerzo a utilizarse en estructuras de concreto.

Se realizaron análisis metalográficos para observar estas picaduras y tratar de determinar si existía algún comportamiento que indicara cuál es el mecanismo de formación. Al analizar las muestras, se encontró que las picaduras se inician en las zonas donde se presentan inclusiones no metálicas y después la picadura se desarrolla a lo largo de las fronteras de grano.

En las siguientes figuras se presentan algunas de las imágenes obtenidas.

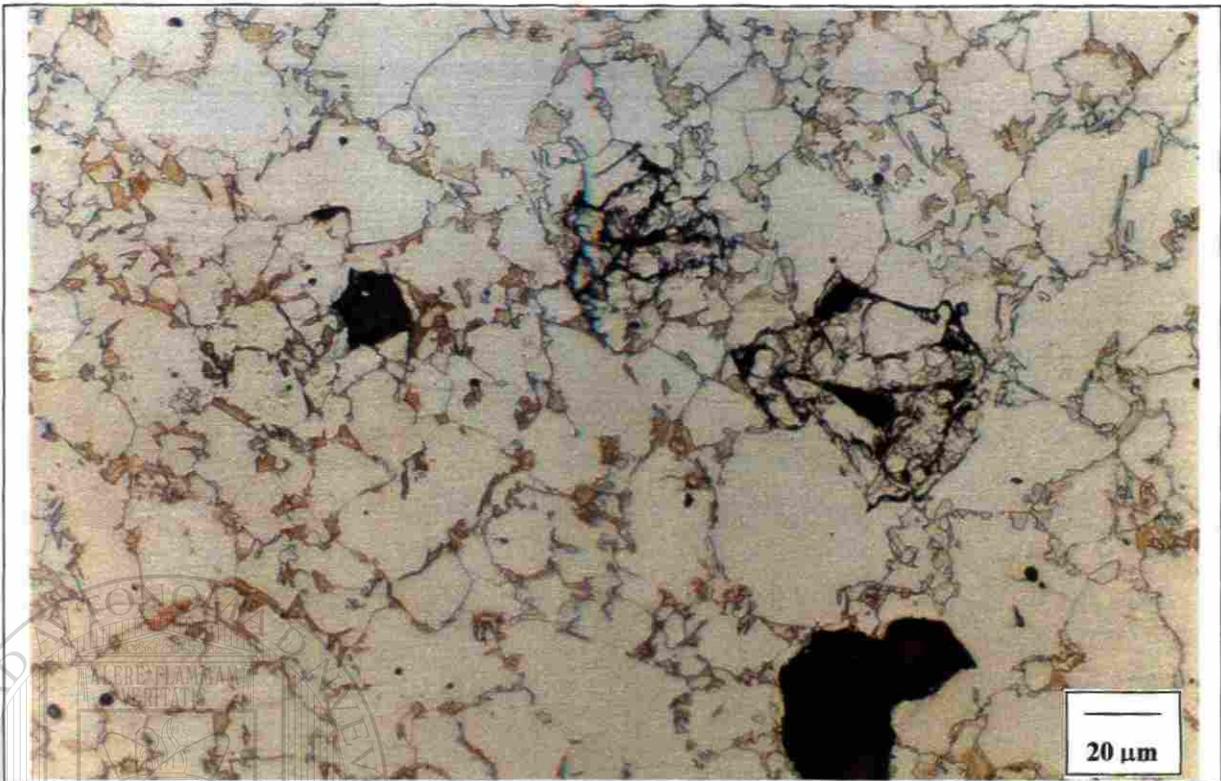


Figura 3.11: Muestra de acero B3 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2. (400X)



Figura 3.12: Muestra de acero C6 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2 (400X).

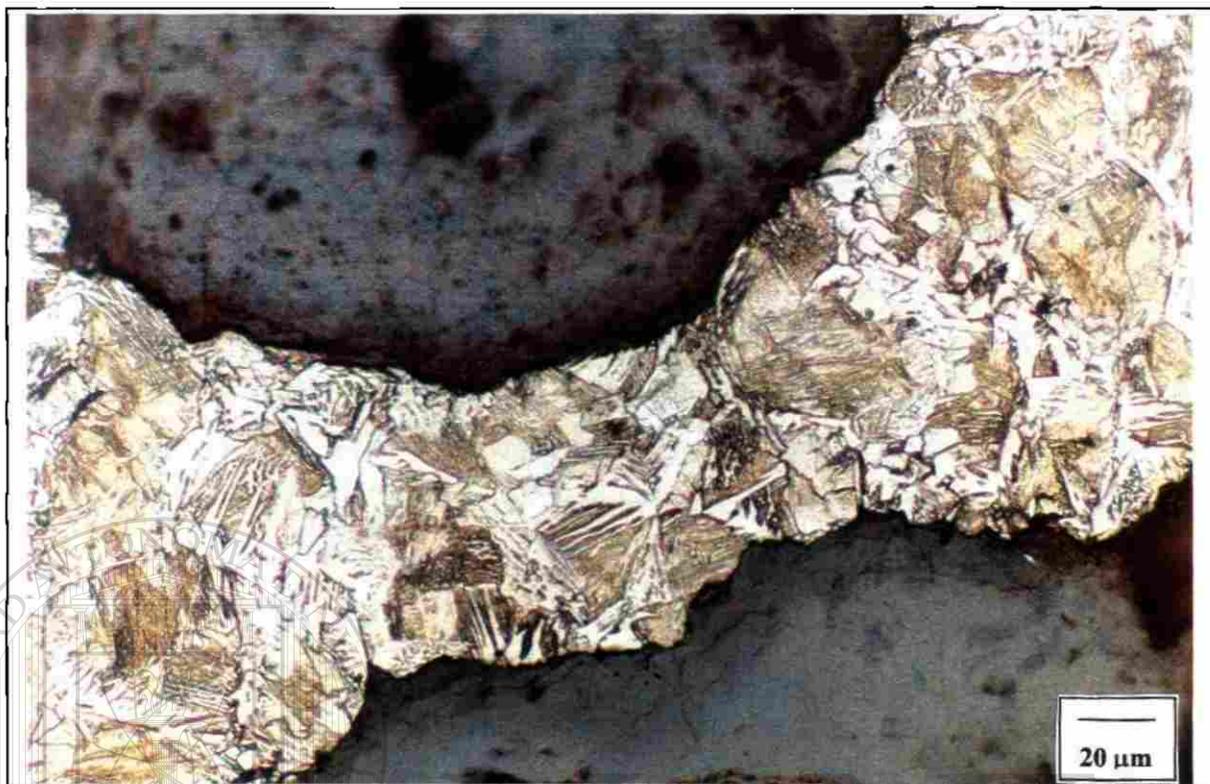


Figura 3.13: Muestra de acero D6 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2 (400X).

3.3 Medición de potenciales de corrosión (E_{corr}).

3.3.1 Justificación del ensayo.

Prácticamente todas las técnicas de electroquímica destinadas a la investigación de fenómenos de corrosión se basan en la utilización del potencióstato, el cual es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica que esté expuesta a un medio conductor (electrolito), un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia^[11].

Por medio de estos equipos es posible conocer cuál es el comportamiento de un sistema en el cual se presenten fenómenos de corrosión. Por un lado, de

una manera cualitativa ya que es posible detectar cuál es el potencial de reposo o potencial de corrosión (E_{corr}) de un metal al compararlo con el potencial de una referencia conocida. Por otro lado, de una manera cuantitativa existen diferentes técnicas electroquímicas que permiten conocer la velocidad o cinética (i_{corr}) con la que un sistema desarrolla procesos de corrosión.^[44,45,46,47,48,49]

Debido a que el concreto envuelve a la varilla en las estructuras de concreto reforzado, es difícil conocer cuál es el grado de deterioro en una estructura de este tipo. Esta es la principal limitante que existe para estudiar estos fenómenos, ya que no es posible destruir una sección de la estructura para efectuar los análisis correspondientes. Otra limitante son los extensos periodos de tiempo en los cuales se desarrollan los fenómenos de corrosión.

Así, nuevamente se plantea la necesidad de simular los sistemas acero - concreto y de acelerar el proceso para inferir el comportamiento del sistema. Por medio de la utilización de los potenciostatos y de celdas mortero - acero es posible predecir el comportamiento de un sistema bajo condiciones de deterioro que es posible establecer y controlar.

Como ya se mencionó anteriormente, las reacciones de corrosión en la varilla de refuerzo de las estructuras de concreto armado suceden espontáneamente bajo ciertas condiciones. Esto indica que se libera energía en estas reacciones y, termodinámicamente, esta energía puede definirse como energía libre (ΔG), la cual puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$-\Delta G = W \quad (3.3)$$

donde $-\Delta G$ es el cambio de energía libre (o energía de Gibbs) de una reacción espontánea y W es el trabajo efectuado. Cuando ocurre un proceso de corrosión en el hierro, intervienen intercambios de carga eléctrica (ecuación 1.6) debido a las diferencias de potencial que se presentan entre las zonas anódicas

y las zonas catódicas. Estas diferencias de potencial presentes en el sistema se conocen como potenciales de celda^[50].

Para que se presente la transferencia de cargas en las reacciones de corrosión es necesario efectuar un trabajo, el cual podemos denominar trabajo eléctrico y cuya ecuación es:

$$\text{Trabajo eléctrico} = (n)(F)(\Delta E) \quad (3.4)$$

donde

n = número de electrones transportados en la reacción.

F = constante de Faraday.

ΔE = diferencia de potencial del sistema.

Al no existir otro tipo de trabajo en el sistema la ecuación 3.3 puede escribirse como:

$$-\Delta G = (n)(F)(\Delta E) \quad (3.5)$$

Es posible determinar la tendencia termodinámica de un metal a corroerse mediante la medición de sus potenciales de celda^[9,11,50]. La ecuación 3.5 es una relación básica entre el potencial de una celda electroquímica y el cambio en la energía de Gibbs que acompaña a la reacción de corrosión involucrada.

En esta relación puede observarse que la diferencia de potencial de la celda es proporcional a la disminución en energía de Gibbs de la reacción de celda por número de electrones transferidos. De esta manera, la diferencia de potencial de una celda de corrosión será una propiedad intensiva del sistema, es decir, que esta diferencia de potencial no dependerá del tamaño de la celda, sino de la reacción electroquímica que se genere, la cual indicará el número de electrones que están siendo transferidos. Para conocer cuál es la tendencia de

un sistema determinado a presentar fenómenos de corrosión, se puede seguir el criterio mostrado en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Criterio para determinar la espontaneidad o no espontaneidad de un sistema para presentar fenómenos de corrosión.

Energía ΔG	Potencial E	Reacción de celda
-	-	Espontánea
+	+	No espontánea
0	0	En equilibrio

Al presentarse una reacción de corrosión en un sistema, se estará llevando a cabo un cambio en la energía de Gibbs, la cual es una medida directa de la capacidad de trabajo o del potencial eléctrico de un sistema determinado. Así, si el cambio de energía que acompaña la transición de un sistema de un estado de mayor energía a otro estado de menor energía es negativo, indica una pérdida de su nivel de energía y por lo tanto una reacción espontánea (una reacción de corrosión en el hierro, por ejemplo), por lo que si no existen fuerzas externas que actúen sobre el sistema, éste tenderá a un estado de mínima energía (formando herrumbre en el caso del hierro).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



3.3.1 Descripción del ensayo.

Se realizó una serie de pruebas para medir el potencial de corrosión (E_{corr}) de algunos de los aceros aleados al silicio que forman parte de la familia. A fin de realizar un seguimiento efectivo del comportamiento de los aceros al estar embebidos en concreto, se seleccionaron 9 aceros para realizar una primera etapa de mediciones electroquímicas.

Los aceros seleccionados se muestran en la figura 3.14.

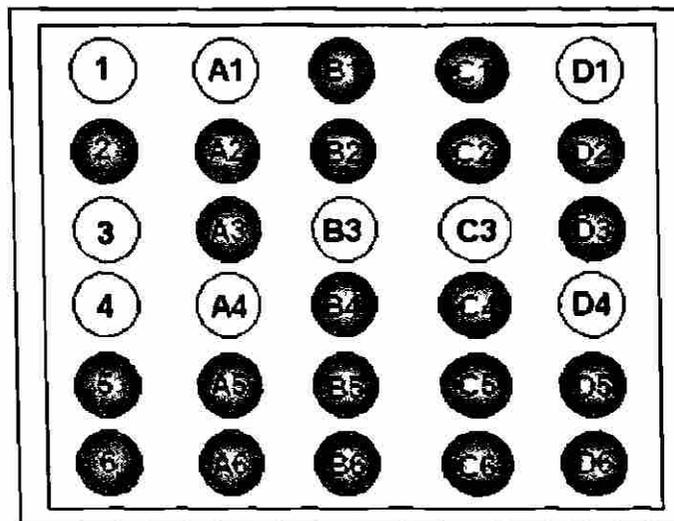


Figura 3.14: Aceros seleccionados (indicados en amarillo) para efectuar pruebas electroquímicas de medición de potencial de corrosión (E_{corr}).

Esta primer etapa de mediciones que involucró a los aceros 1, 3, 4, A1, A4, B3, C3, D1 y D4, indicaría de una manera general, cual es la tendencia de la familia de aceros a presentar fenómenos de corrosión en un sistema en el que éstos estuviesen inmersos en concreto.

Una vez seleccionados los aceros, se procedió a realizar la preparación de las probetas. Esta preparación se realizó de tal manera que simulara las condiciones presentes en las zonas marítimas, que es donde los fenómenos de corrosión en el concreto reforzado son más drásticos. Para ello fue necesario agregar sal común (NaCl) al mortero durante su elaboración.

Dicha elaboración se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 188-72^[51]. Para asegurar la repetibilidad en la preparación de las probetas acero – mortero se utilizó una máquina revolvedora y de una báscula para pesar las porciones de materiales a utilizarse. La preparación del mortero en el cual serían embebidas las barras de acero se llevó a cabo de acuerdo a las proporciones mostradas en la Tabla 3.8:

Tabla 3.8: Proporciones de constituyentes utilizados en la fabricación de mortero para probetas:

Constituyentes	Proporción
Cemento / Agua (c/a)	3/1
Agua / Cemento (a/c)	0.5
Ion cloruro (Cl ⁻) / Cemento	3% de la masa de cemento

La elaboración de las probetas acero – mortero se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1) Pesar porciones de cemento, arena (SiO_2), agua y sal.
- 2) Preparar lechada de agua y cemento (en la misma proporción que la utilizada para el mortero) y fin de recubrir las paredes de la revolvedora y compensar cualquier pérdida de cemento que pudiera adherirse a las paredes de la máquina al preparar el mortero. Luego se procede a extraer la lechada que haya en exceso.
- 3) El agua y la sal deben mezclarse y diluirse previamente en un contenedor hasta formar una salmuera o solución salada.
- 4) Con la máquina revolvedora apagada se deposita la salmuera y posteriormente se adiciona el cemento. Es necesario esperar 1 minuto antes de encender la revolvedora a fin de que el cemento se humedezca.
- 5) Se acciona la máquina revolvedora durante un minuto para que el cemento y el agua comiencen a mezclarse.
- 6) Transcurrido este primer periodo de tiempo, se comienza a adicionar la arena. El objetivo es agregar toda la porción de arena en un periodo de tres minutos y dejar que la mezcla sea homogénea después de otros 5 minutos de operación.
- 7) Luego la mezcla se vacía en cada uno de los moldes, mientras se acomodan las barras de metal y el electrodo de grafito en el mortero. Se

7) Luego la mezcla se vacía en cada uno de los moldes, mientras se acomodan las barras de metal y el electrodo de grafito en el mortero. Se utilizó una máquina vibradora para facilitar esta operación y asegurar que burbujas de aire grandes no quedaran atrapadas en el interior del molde.

Al agregar el ion cloruro (Cl^-) en el mortero se busca simular las condiciones marítimas, reproduciendo así las condiciones más agresivas a las que una estructura ordinaria puede ser expuesta. A excepción de los aceros 1 y 3, los aceros 4, A1, A4, B3, C3, D1 y D4 se colocaron por duplicado en cada probeta a fin de asegurar la repetibilidad de las mediciones. En la figura 3.15 se muestra una de las probetas elaboradas y en la figura 3.16 un diagrama de las mismas.

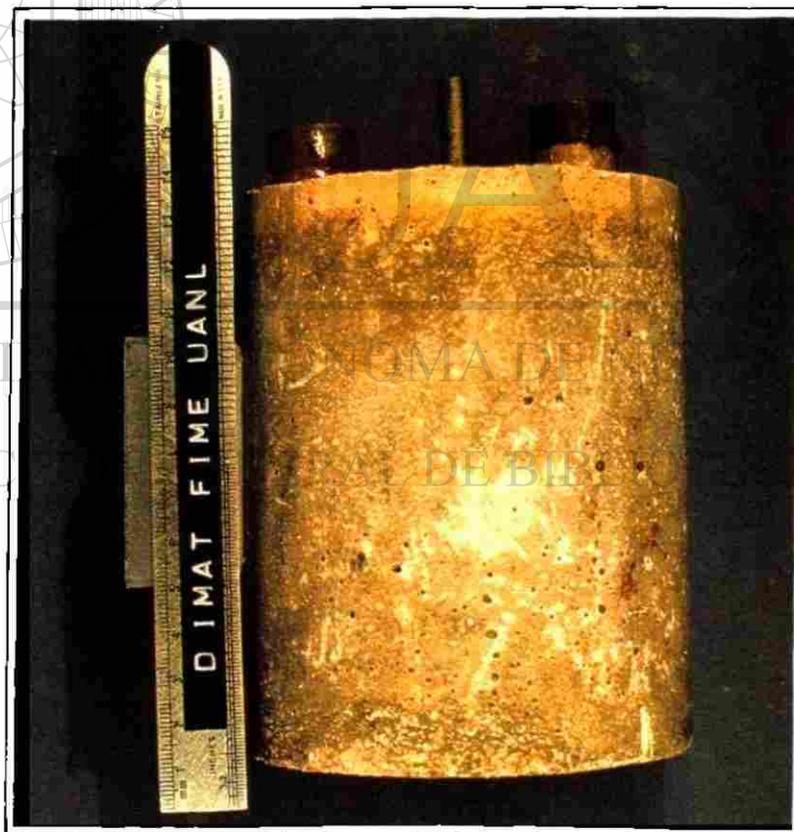


Figura 3.15: Probeta de mortero utilizada en las pruebas electroquímicas de medición de potenciales de corrosión.

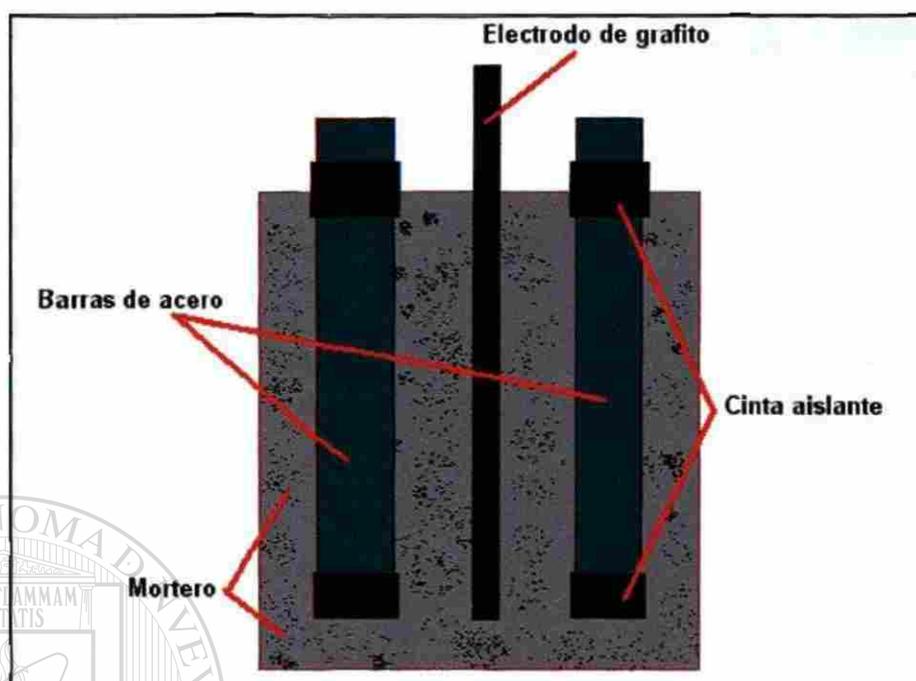


Figura 3.16: Diagrama que muestra los elementos de las probetas de mortero.

Una vez coladas las probetas, se dio un tiempo de curado de 24 horas y posteriormente todas las probetas fueron parcialmente sumergidas en agua y así evaluar la tendencia de los aceros a corroerse o a pasivarse, ver figura 3.17.

Se utilizó como electrodo de referencia un electrodo de Calomel saturado para efectuar las mediciones de potencial de corrosión (E_{corr}). Es necesario el uso de un electrodo de referencia debido a que es imposible conocer el valor absoluto del potencial de cualquier sistema metal - electrolito y es necesario utilizar una segunda terminal para cerrar el circuito de medida^[11]. Sin embargo, se puede utilizar como base de comparación un sistema del cual conocemos su valor de potencial, que es el electrodo de referencia. Este electrodo servirá para cerrar el circuito de medición y los valores a obtenerse del sistema que se desea estudiar tendrán un valor más significativo.

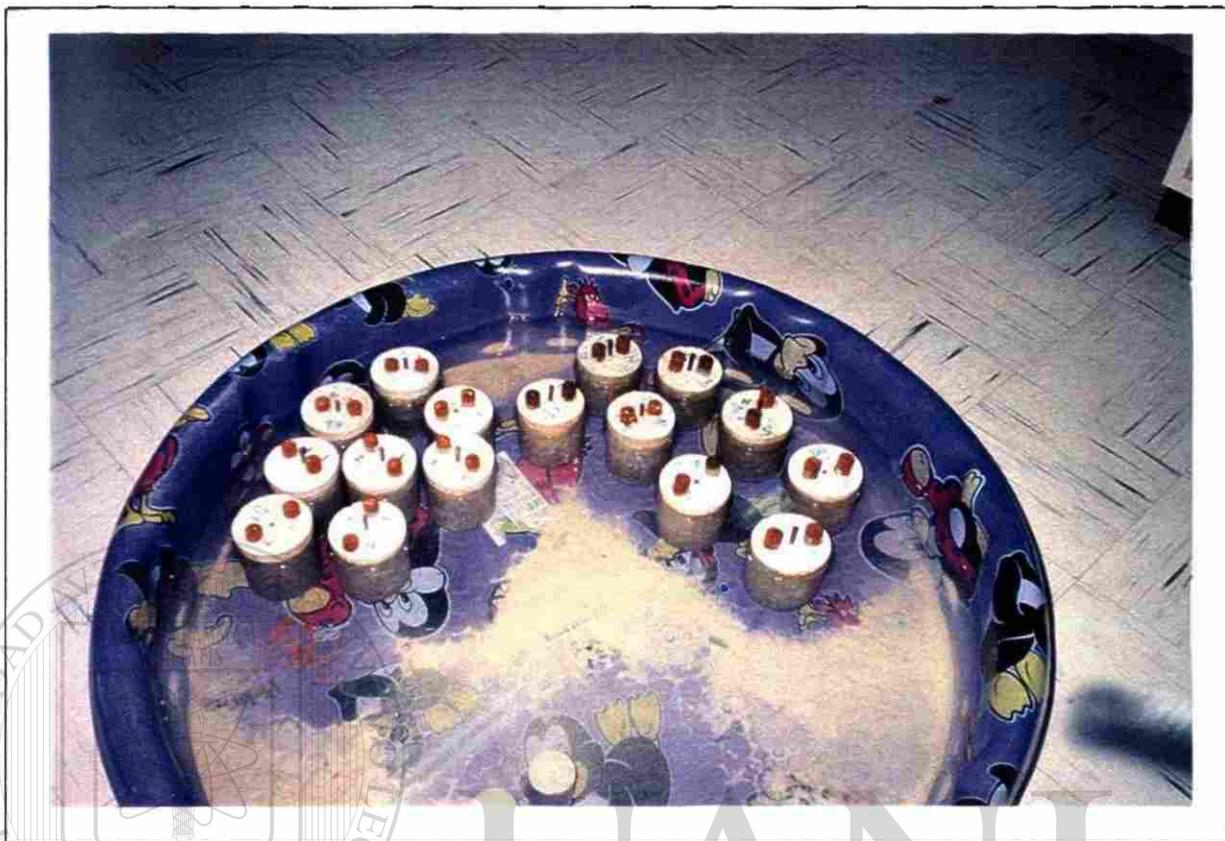
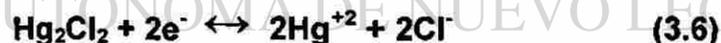


Figura 3.17: Disposición de probetas de mortero sumergidas parcialmente en agua.

A nivel laboratorio el electrodo más utilizado es el Calomel saturado y su reacción es:



siendo su potencial estándar $E^\circ = 0.240 \text{ V}$ ^[52]. La función del electrodo de grafito es asegurar el contacto eléctrico entre el sistema metal – mortero y el electrodo de referencia.

El potencióstato utilizado es un Potencióstato - Galvanostato marca VIMAR modelo PG-5EV y las mediciones se efectuaron en el laboratorio del Doctorado en Ingeniería de Materiales de la FIME. La disposición del equipo y las probetas acero – mortero se ilustra en la figura 3.18, mientras que en la figura 3.19 se presentan las conexiones necesarias para efectuar las mediciones en dichas probetas.

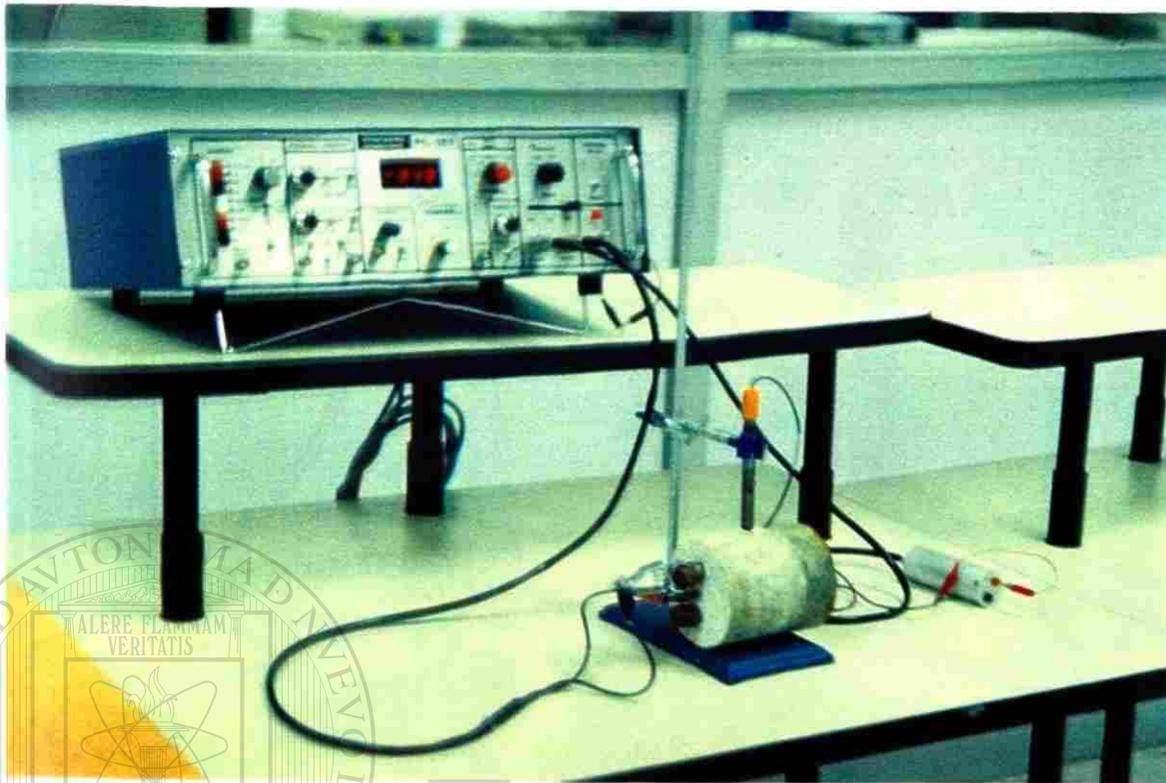


Figura 3.18: Disposición del equipo del Potenciostato - Galvanostato para efectuar las mediciones de potencial en las probetas de mortero.

Las mediciones de potencial se realizaron diariamente durante los primeros 3 meses de exposición de las probetas al medio acuoso y, posteriormente las mediciones se realizaron cada tercer día en los siguientes 5 meses.

De esta manera se evaluó el comportamiento de los aceros involucrados en esta primera etapa de mediciones, la cual abarcó un total de 260 días, durante los cuales se obtuvieron mediciones que permitieron conocer el comportamiento de estas aleaciones e inferir los mecanismos de corrosión que se presentaron.

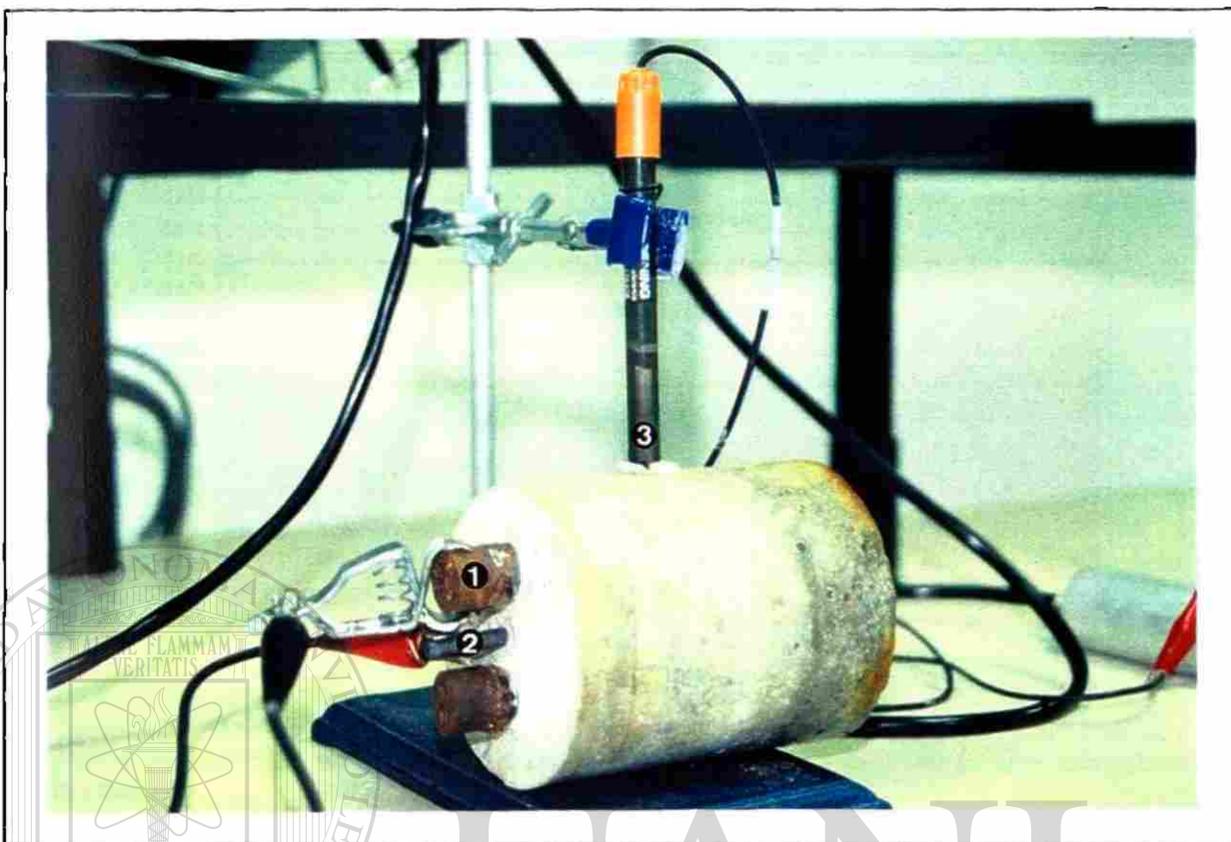


Figura 3.19: Imagen que muestra las conexiones a realizarse para efectuar mediciones de potencial en las probetas de mortero. 1) Electrodo de trabajo; 2) contra-electrodo de grafito; 3) Electrodo de referencia para cerrar el circuito de medición.

Dentro de la industria de la construcción de una manera general, es posible determinar el grado de corrosión que presenta el acero convencional de refuerzo en una estructura de concreto armado, esto a partir de la medición de los potenciales de corrosión del componente metálico. Esta determinación puede comprenderse mejor al observar la figura 3.20, en donde se presentan los intervalos de potencial en los cuales el acero convencional presenta fenómenos de corrosión que pueden clasificarse de la siguiente manera^[52]:

- Corrosión incipiente, en la que un 5% de la varilla metálica sufre fenómenos de corrosión y los daños a la estructura son mínimos.
- Corrosión moderada, en la que un 50% del refuerzo metálico desarrolla fenómenos de corrosión y los daños a la estructura son considerables.
- Corrosión grave, en la que un 95% del material metálico ha desarrollado procesos de corrosión que causan daños severos a la estructura.

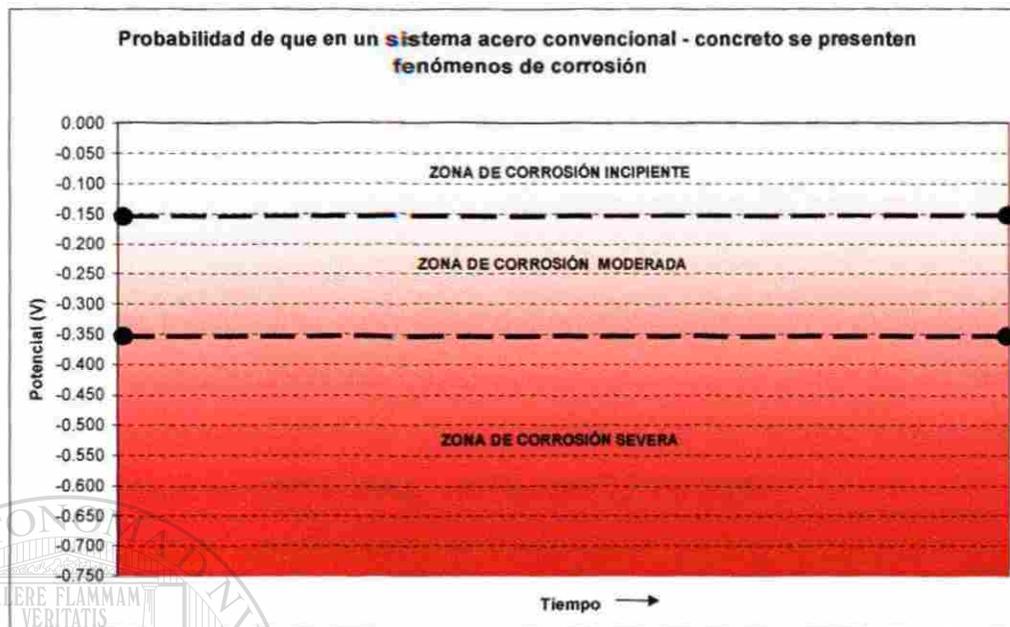


Figura 3.20: Gráfico que muestra los potenciales en los cuales se desarrollarán distintos grados de corrosión en un acero convencional de refuerzo embebido en una estructura de concreto.

De la gráfica 3.20, se observa que cuando en una estructura de concreto reforzado se presentan potenciales mayores a -0.150 V, los fenómenos de corrosión involucrados son relativamente insignificantes y los daños a la estructura también serán de poca o ninguna consideración.

Cuando se presentan potenciales de corrosión en un intervalo de -0.150 a -0.350 V, los procesos de corrosión en el acero de refuerzo son considerados como moderados y sus efectos comienzan a tener una influencia importante en las características estructurales de la obra de concreto armado.

Por último, cuando el sistema acero – concreto presenta potenciales menores a los -0.350 V, se están presentando procesos de corrosión severos que ponen en peligro las propiedades mecánicas y de servicio de la estructura de concreto reforzado involucrada.

Partiendo de esta información, a continuación se presentan las gráficas obtenidas en la primer etapa de mediciones electroquímicas del potencial de corrosión (E_{corr}) de los aceros estudiados.

3.3.2 Resultados de la medición de potenciales de corrosión (E).

Con las mediciones obtenidas después de 8 meses de exposición de las probetas al medio acuoso, se construyeron gráficas de potencial vs. tiempo y que sirvieron para describir el comportamiento de los aceros involucrados en esta primer etapa de mediciones, ver figuras 3.21 a 3.29.

Debido a la cantidad extensa de datos que se obtuvieron para cada probeta, se presentan gráficos en donde se reportan los datos equivalentes a una medición por semana. Sin embargo, estos gráficos describen el comportamiento general de los aceros. Algunas de estas gráficas serán analizadas con mayor detalle en el capítulo 4.

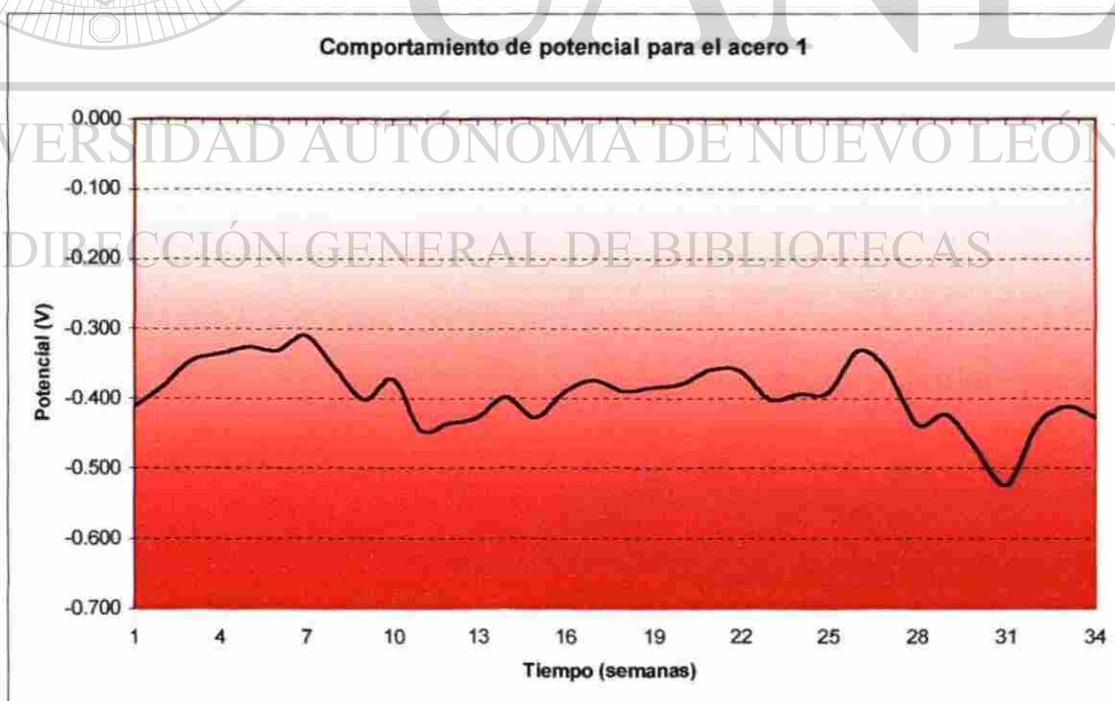


Figura 3.21: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 1.

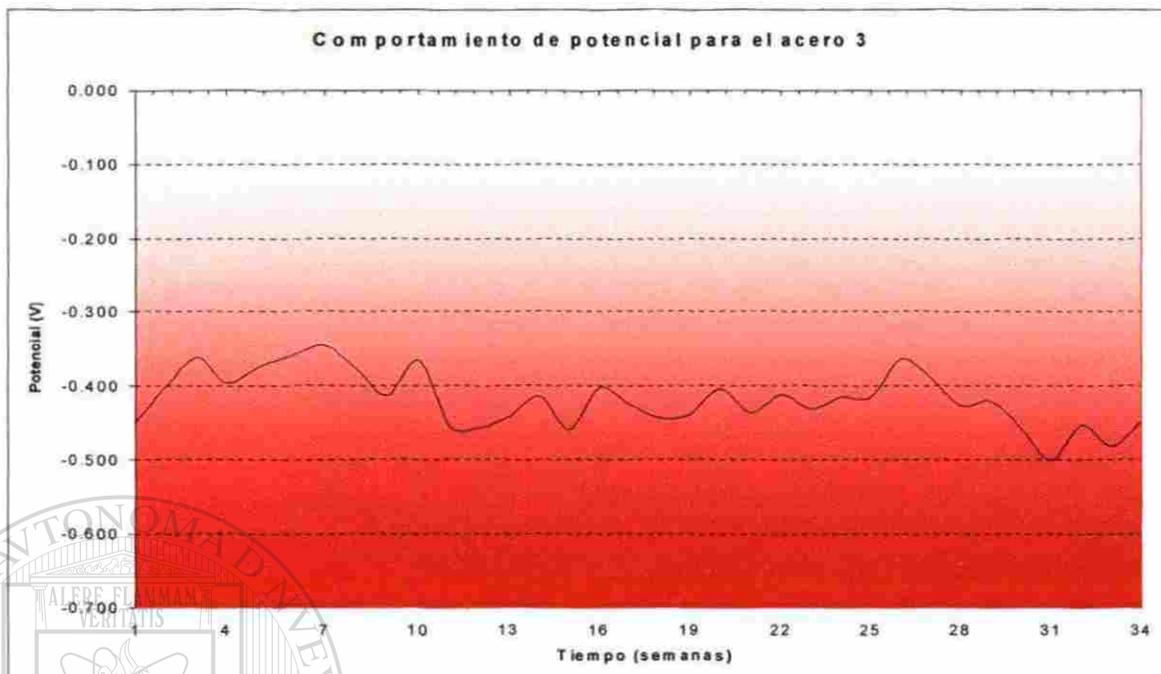


Figura 3.22: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 3.

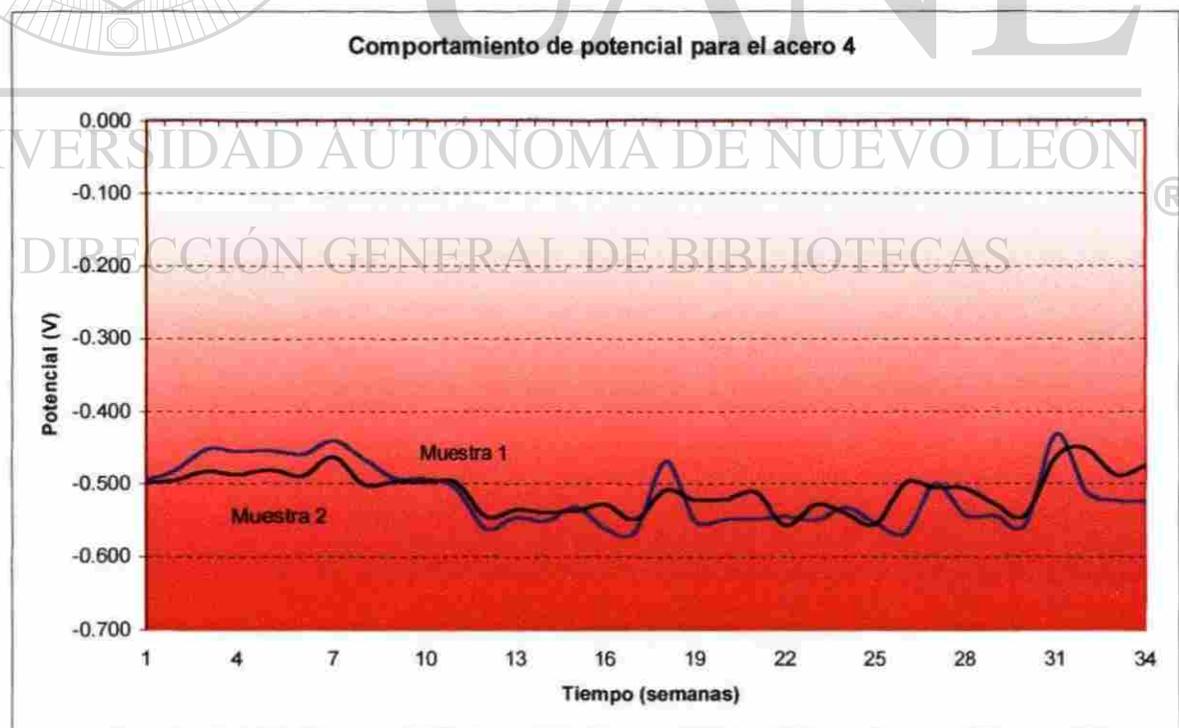


Figura 3.23: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 4.

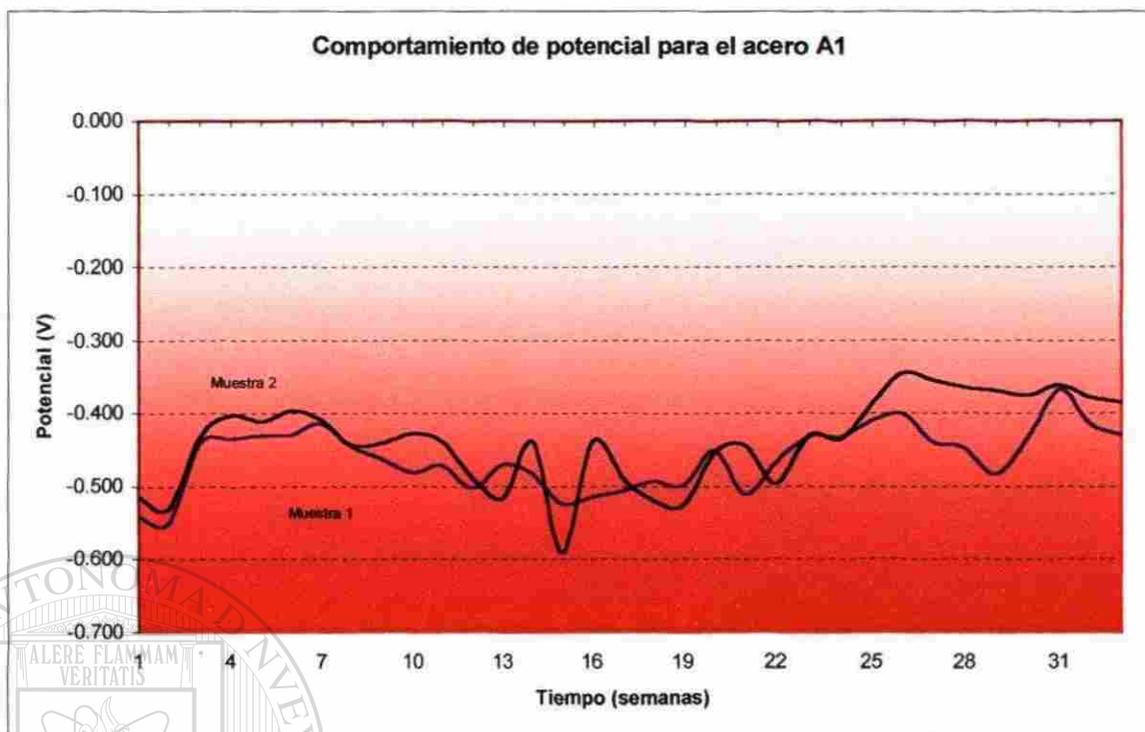


Figura 3.24: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero A1.

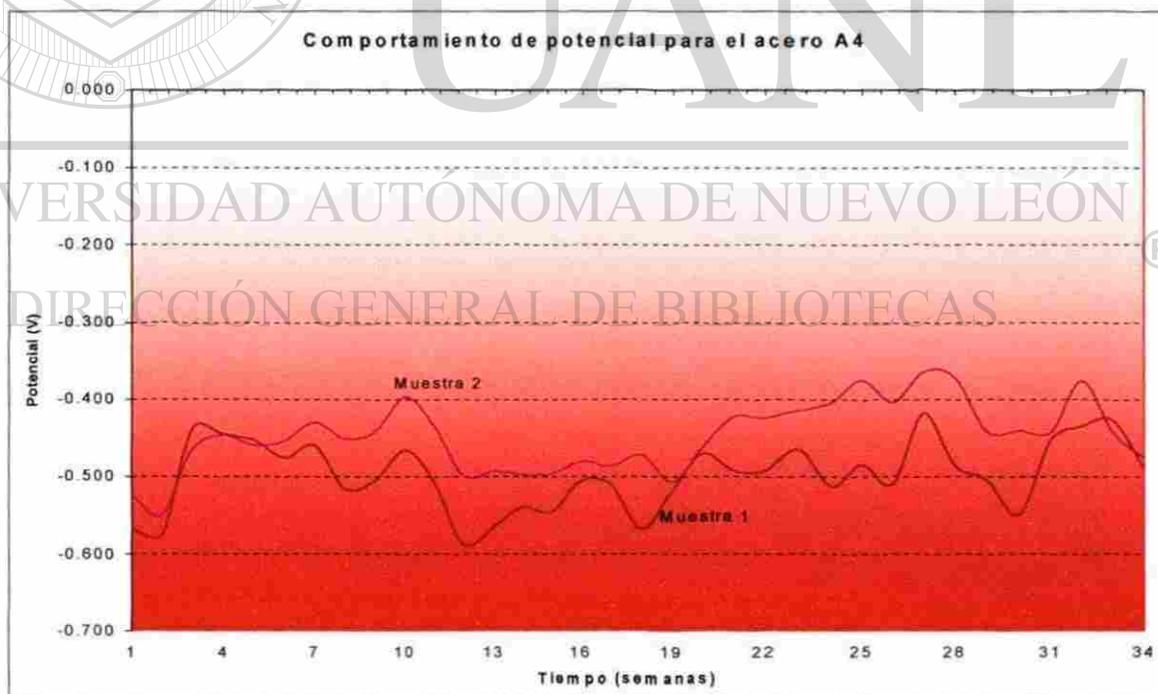


Figura 3.25: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero A4.

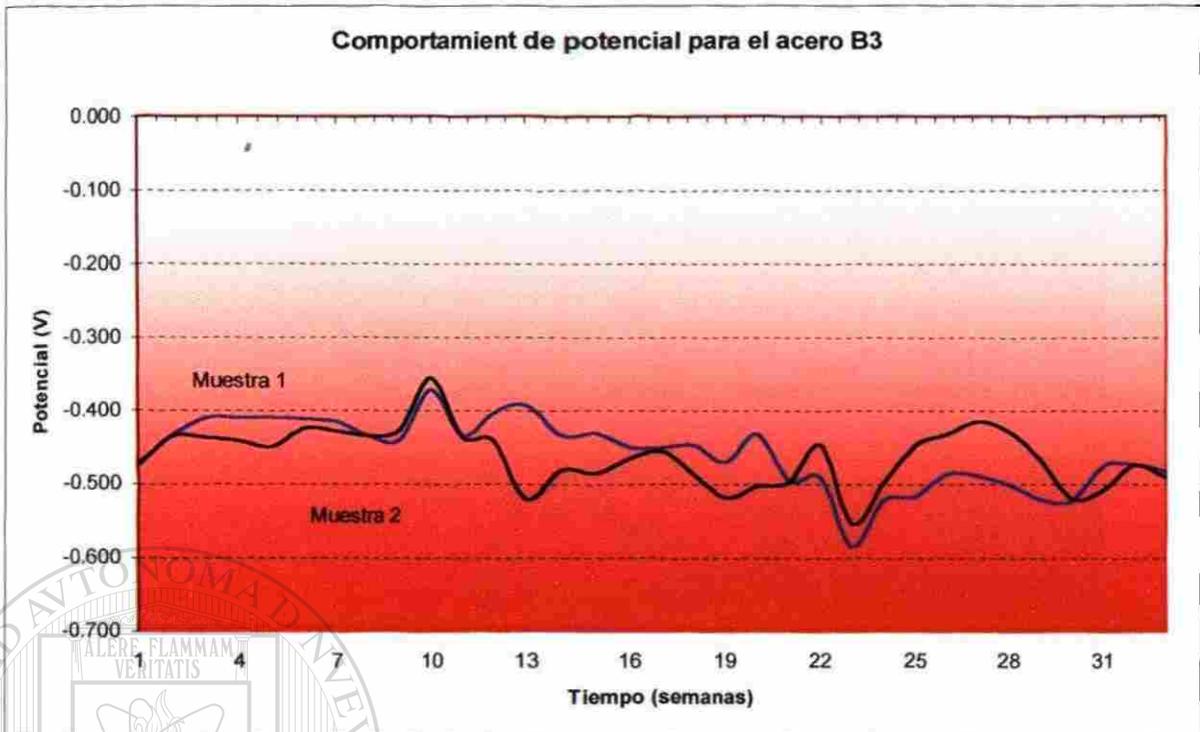


Figura 3.26: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero B3.

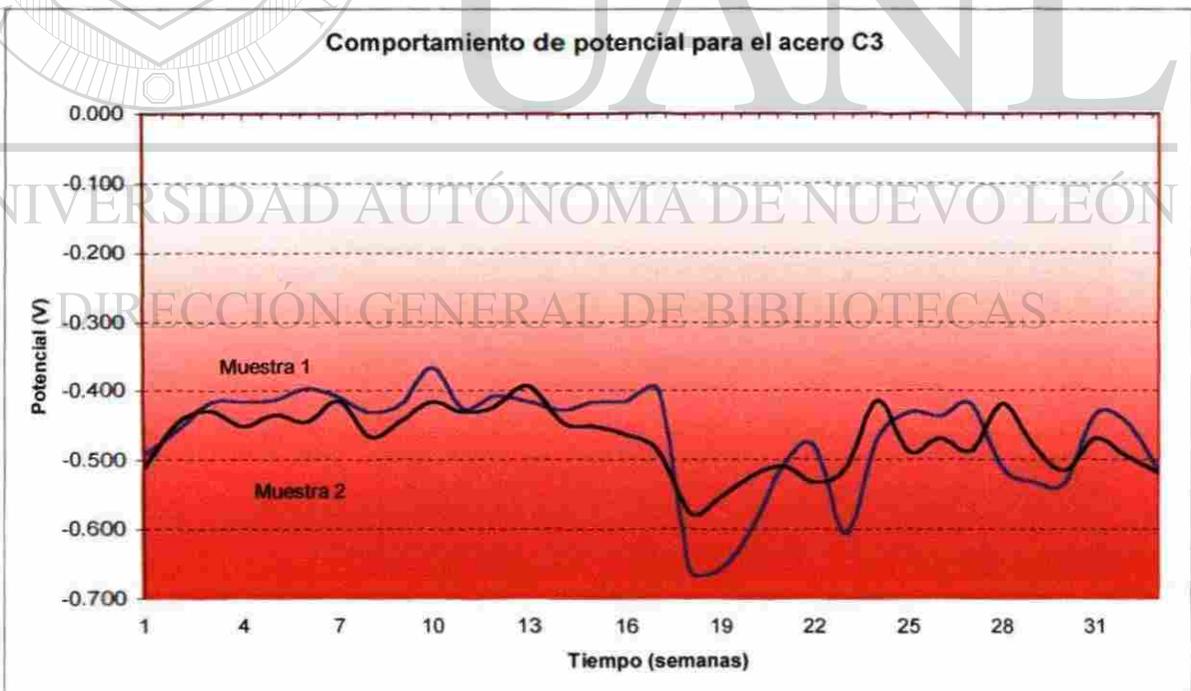


Figura 3.27: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero C3.

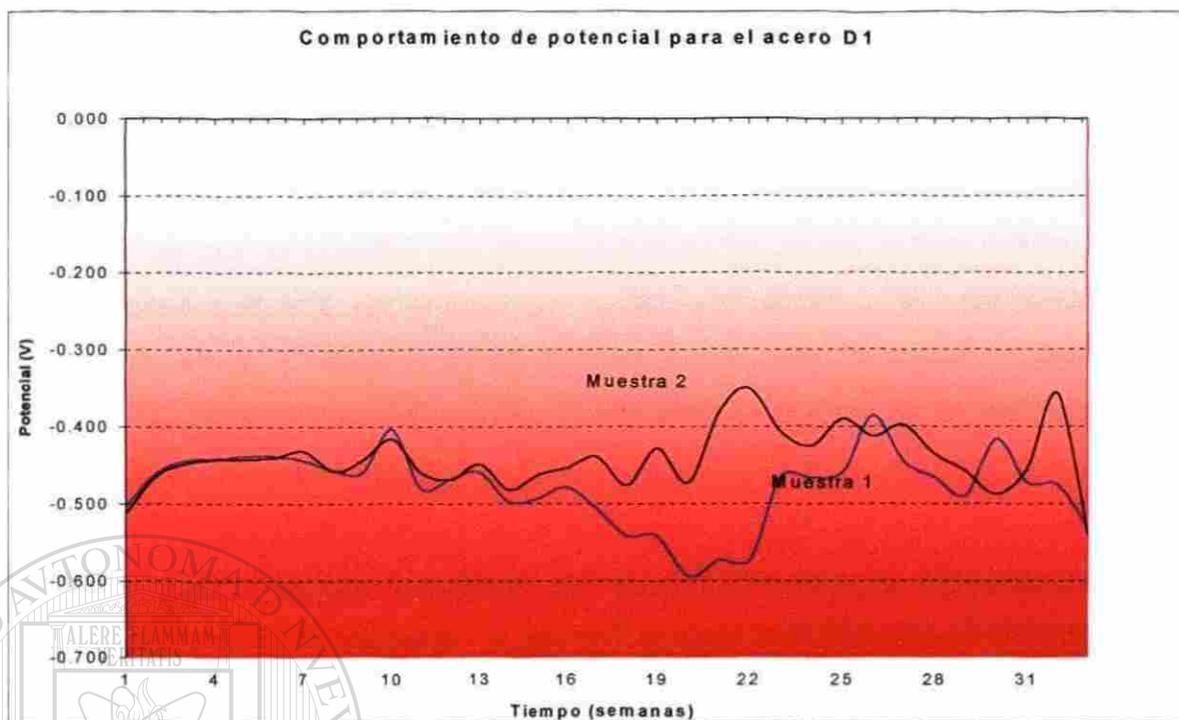


Figura 3.28: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero D1.

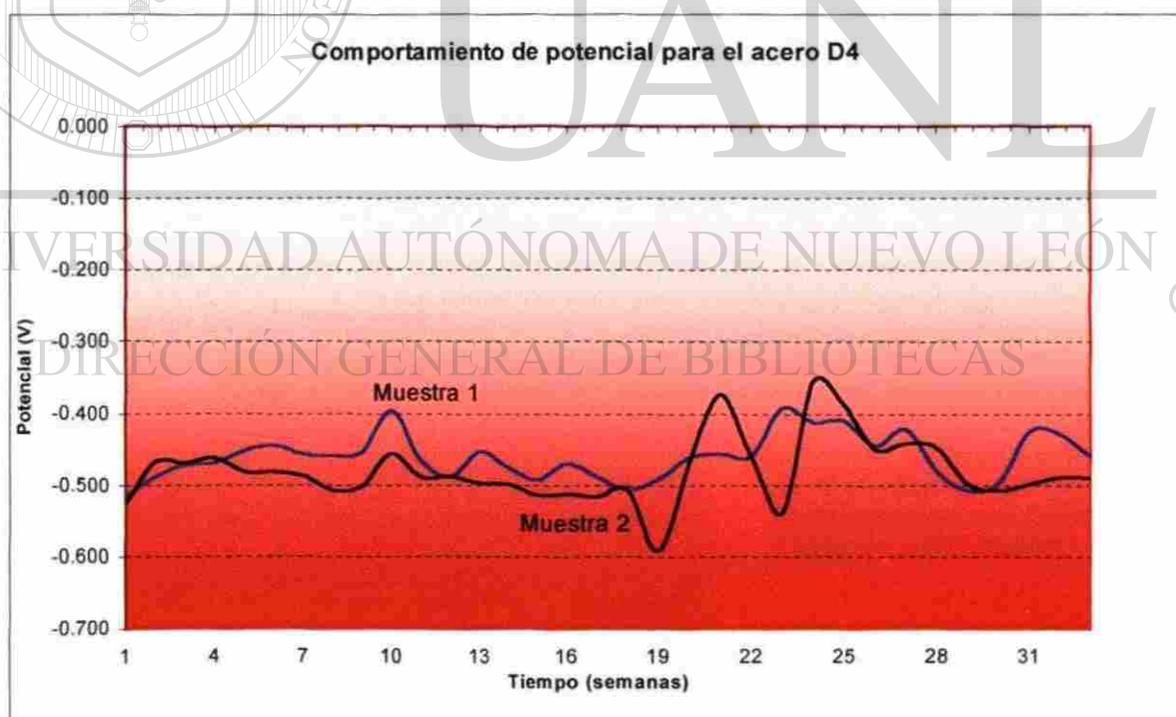


Figura 3.29: Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero D4.

Una segunda parte de las mediciones electroquímicas involucró modificar al acero grado 3 (1.23% de silicio) a fin de obtener una microestructura ferrita – martensita, para luego embeber estas muestras en mortero bajo diferentes condiciones y seguir su comportamiento. La elección de este acero se basó en el hecho de que se contaba con mayor información de los aceros grado 3. El primer paso consistió en realizar un tratamiento térmico de normalizado a dichas muestras. El tratamiento de normalizado se efectuó a una temperatura de 950 °C durante dos horas, para luego extraer las muestras del horno y permitir su enfriamiento al aire.

El objetivo de este tratamiento de normalizado es el de homogeneizar la microestructura de la muestra. El siguiente paso fue efectuar un tratamiento térmico intercrítico a dichas muestras para obtener la estructura ferrita - martensita. Se realizaron varias pruebas para obtener la temperatura de tratamiento térmico adecuada, la cual es de 820 °C para los aceros con 1.23% de Si. El tiempo de permanencia de los especímenes en el horno fue de 15 minutos a esta temperatura. Una vez transcurrido este intervalo de tiempo, las muestras fueron extraídas del horno y se templaron en agua a temperatura ambiente (25 °C). En las siguientes figuras se presentan las metalografías que describen la evolución de estos procedimientos en la microestructura de las muestras de metal involucradas.



Figura 3.30: Acero grado 3 previo al tratamiento térmico de normalizado. La ferrita se presenta en un color claro y la perlita en color oscuro

20µm

400X



Figura 3.31: Acero grado 3 después del tratamiento térmico de normalizado. Se observa un crecimiento del tamaño de grano ferrítico (áreas claras) y del tamaño de las zonas perlíticas (áreas oscuras), las cuales presentan una perlita fina-

20 μ m

400X

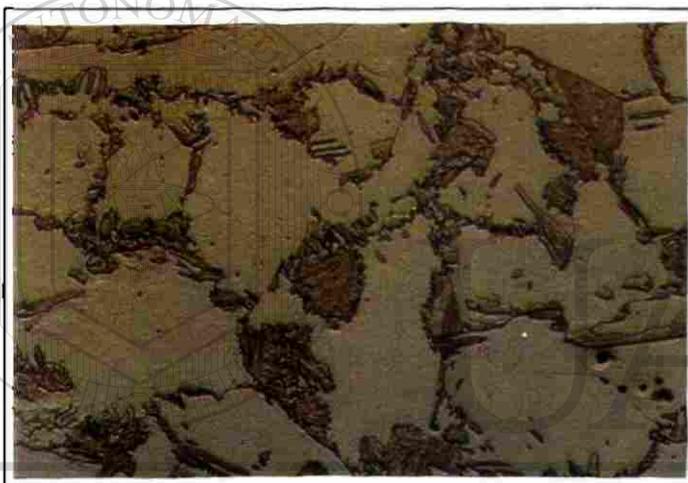


Figura 3.32: Acero grado 3 después del tratamiento térmico intercrítico. Se observa que las zonas perlíticas han transformado a martensita y existen trazas de bainita. El tamaño de grano ferrítico no sufre cambios.

20 μ m

400X



Figura 3.33: Acero grado 3 después del tratamiento térmico intercrítico. Se presentan las huellas de indentación de microdurómetro Vickers en ferrita y en zona de transformación. De acuerdo a estas lecturas, se obtuvo una dureza 50 Rc, lo que indica una probabilidad de formar martensita de 99.9%.

20 μ m

400X

Una vez obtenidas las muestras tratadas térmicamente, se procedió a realizar un maquinado superficial de desbaste, a fin de remover la capa de ferrita debida a la decarburación superficial que presentaron las barras después de los tratamientos arriba descritos. El espesor del material removido es igual a 1 mm de profundidad.

Estas barras maquinadas sirvieron para construir tres probetas de mortero (ver figura 3.34), con el objetivo de realizar mediciones de potencial para estos aceros modificados. La fabricación de estas probetas fue siguiendo el mismo procedimiento antes descrito.

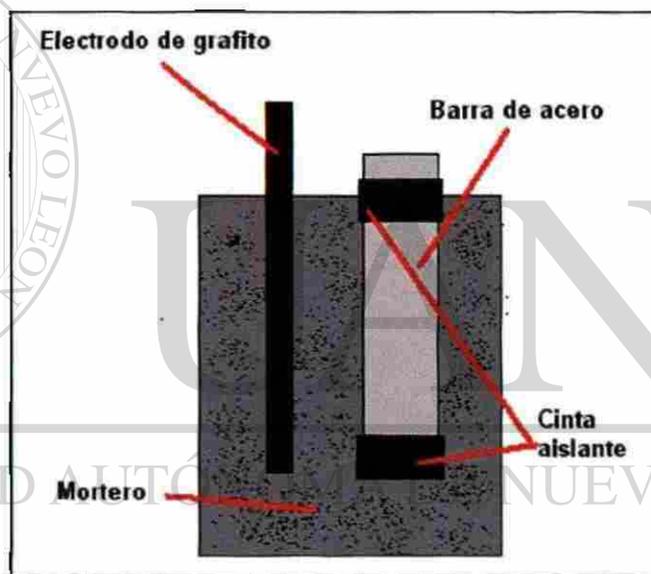


Figura 3.34: Diagrama de probeta acero – mortero para muestras de acero modificadas.

Con las muestras de los aceros modificados, se construyeron tres probetas para simular tres condiciones de agresividad diferentes. El mortero de la primer probeta se construyó sin agregar sal al mortero y se expuso a un medio formado únicamente por agua potable.

El mortero de la segunda probeta se fabrico sin agregar sal, para luego exponerla a un medio de sal disuelta en agua, la sal se disolvió de tal manera a obtener una concentración equivalente a un 3% del ion cloruro (Cl^-).

Al mortero de la tercer probeta se le agregó sal y se expuso a un medio agua potable, similar a las probetas de mortero de la primer etapa de mediciones.

Las tres probetas de mortero estuvieron expuestas en sistemas independientes. Los resultados de las mediciones de potencial se presentan en el gráfico 3.35

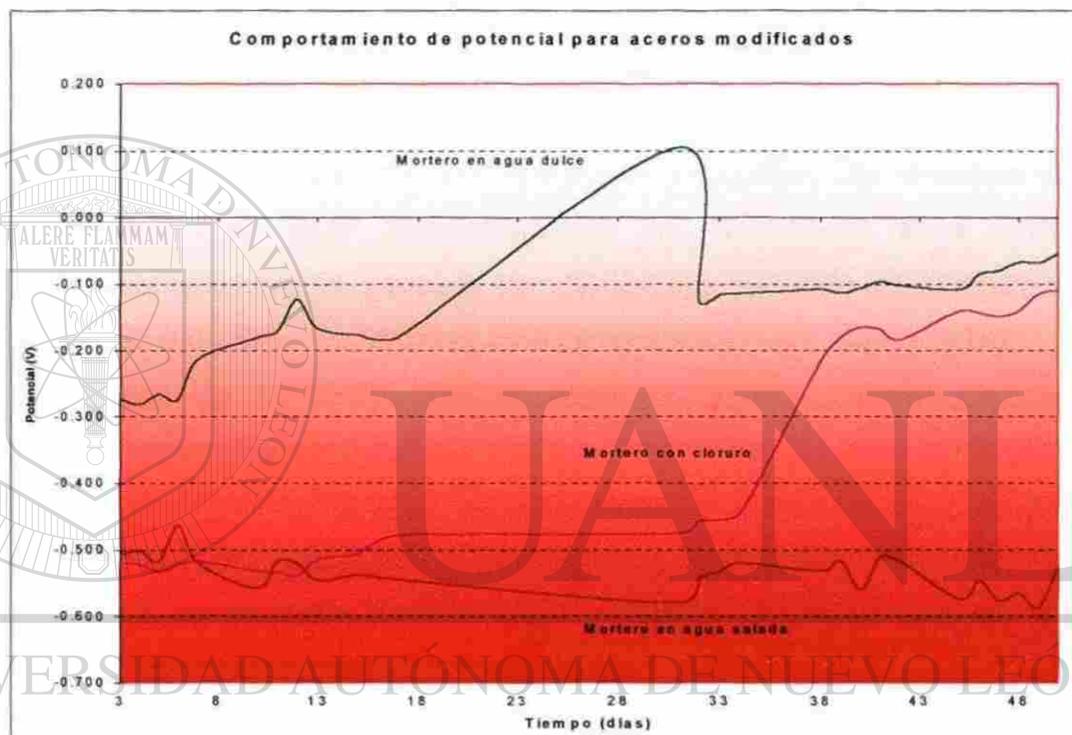


Figura 3.35: Comportamiento de los aceros modificados expuestos a diferentes sistemas agresivos.

Por lo anteriormente expuesto, se pueden obtener siguientes ideas principales:

- a) Debido a que los fenómenos de corrosión que se presentan en el acero de refuerzo de las estructuras de concreto reforzado se desarrollan a lo

largo de periodos de tiempo extensos, es necesario realizar ensayos a nivel laboratorio que en un tiempo razonable permitan obtener información del comportamiento de estas estructuras en sistemas simulados que representen a los sistemas reales.

b) Los ensayos de corrosión acelerada permiten conocer en tiempos relativamente reducidos el comportamiento de un material ante un medio agresivo. Por medio de la medición del peso perdido por un material expuesto a un medio agresivo, es posible obtener velocidades de corrosión en función de términos electroquímicos a través de las leyes de Faraday.

c) De los ensayos de corrosión acelerada efectuados, las muestras de los aceros que mejor comportamiento de resistencia a la corrosión presentaron fueron aquellos con contenidos de silicio en el intervalo de 0.383 a 0.387%, específicamente los aceros A1, B1, C2, D2 y D6.

d) El tipo de corrosión que se presenta en esta familia de aceros, corresponde a corrosión por picadura, la cual se considera como grave.

e) Por medio de la medición de potenciales de corrosión (E_{corr}), es posible inferir el comportamiento de resistencia a la corrosión de un acero en un medio de concreto. Los resultados obtenidos indican que los aceros embebidos en el mortero se corroen de manera severa.

f) Los aceros del grado 3 (1.23% de silicio) que fueron modificados mediante los tratamientos térmicos de normalizado, tratamiento térmico intercrítico y de maquinado superficial, presentan mejores comportamientos de resistencia a la corrosión cuando son embebidos en mortero y expuestos a diferentes medios agresivos.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Tratamiento térmico y composición química.

El objetivo del presente apartado es analizar la información obtenida durante la experimentación que ha involucrado la evaluación de la familia de aceros aleados al silicio.

Desde un punto de vista estructural se busca obtener en los aceros que forman esta familia, una microestructura ferrita - martensita como la descrita en diversas publicaciones sobre aceros doble - fase ferríticos martensíticos (DFM steels)^[31,32,36,37,38], la obtención de esta combinación de fases dependerá del tratamiento térmico efectuado y de la composición de la aleación.

A partir de la evaluación de las metalografías obtenidas de los aceros involucrados, es posible describir el efecto del silicio en la microestructura en éstos.

Partiendo de los aceros en su condición inicial, es decir, después de haber efectuado el laminado, es posible observar el efecto del silicio en las figuras 2.9 a 2.14, en donde se constata que al incrementarse el contenido de silicio en la aleación, hay una mayor formación de zonas perlíticas, lo cual puede visualizarse mediante el siguiente gráfico:

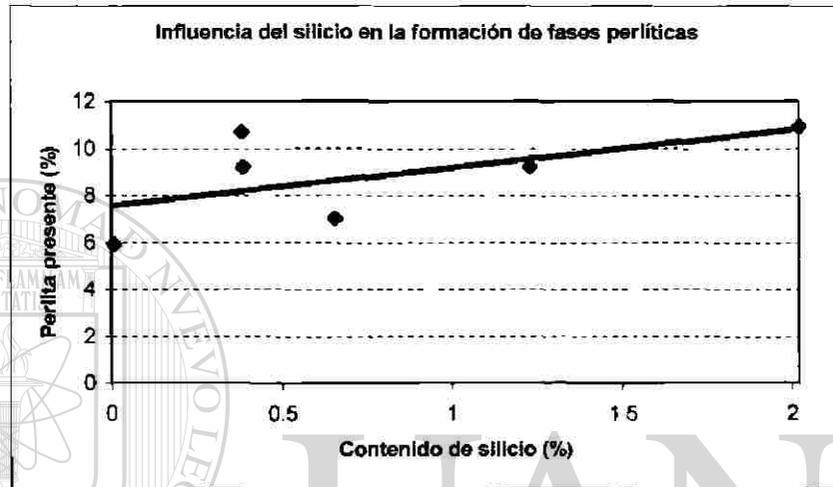


Figura 4.1: Efecto del silicio en la formación de perlita.

Este incremento en la presencia de zonas perlíticas dentro de la microestructura de la aleación, permitirá posteriormente incrementar la posibilidad de formar una zona de martensita al elevar la temperatura de la aleación a la zona $\alpha + \gamma$, ya que el contenido de carbono en las zonas perlíticas es mayor.

Este efecto del silicio permanece constante con las series de aceros tratados térmicamente, situación que puede constatarse de acuerdo al gráfico 4.2.

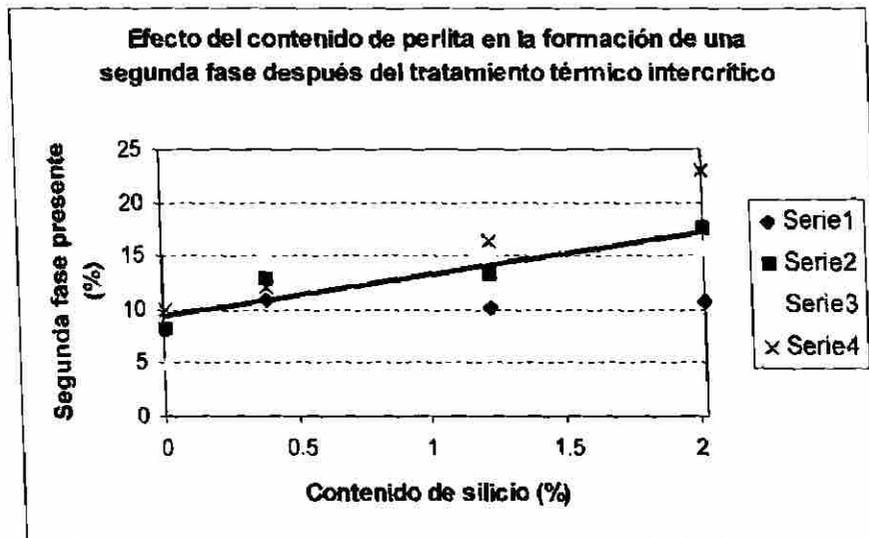


Figura 4.2: Efecto del silicio en la formación de segunda fase para aceros al silicio con tratamiento térmico intercrítico. Serie 1: 0.007% Si; Serie 2: 0.383% Si; Serie 3: 1.23% Si; Serie 4: 2.02% Si.

Del gráfico 4.2 se puede observar que, aunque existe cierta dispersión de los datos graficados, tiende a aumentar el porcentaje de la segunda fase formada por el tratamiento térmico intercrítico al incrementarse el contenido de silicio para todos los grados de acero.

Entonces puede esperarse que a mayores contenidos de silicio, y con una temperatura de tratamiento térmico intercrítico adecuada, las posibilidades de formar martensita como segunda fase del acero serán superiores.

El objetivo de realizar una amplia gama de tratamientos térmicos intercríticos a una familia de aceros con diferentes contenidos de silicio, es encontrar la composición química y la temperatura de tratamiento térmico intercrítico que mejore resultados y proporcione un acero doble fase ferrita – martensita, buscando una relación 80 – 20% respectivamente.

A continuación se hace un análisis de la información obtenida mediante la realización de las metalografías y de las pruebas de microdureza, a fin de

determinar que aceros cumplen con las condiciones para formar un acero doble fase ferrítico – martensítico.

Para la familia de aceros grado A (ver figuras 2.15 a 2.20), la temperatura para alcanzar la zona $\alpha + \gamma$, se regula entre los 751 a los 815°C, la cual aparentemente resulta insuficiente para lograr la transformación completa de las zonas perlíticas de los aceros, ya que se alcanzan a observar algunas trazas de perlita después de haber efectuado el tratamiento intercrítico (aceros A1, A2, A3, A4 y A5), mientras que para el acero A6 se observa una estructura de ferrita Widmanstätten y bainita, que puede indicar una velocidad de enfriamiento inadecuada para tratar de formar la martensita como segunda fase de la microestructura. Estas observaciones se corroboran mediante la medición de dureza de la segunda fase encontrada. Los valores de dureza indican que, para esta serie de aceros, la probabilidad de formar martensita es igual o menor a un 50%.

En el caso de la familia de aceros B (ver figuras 2.21 a 2.26), las temperaturas de tratamiento intercrítico están entre los 787 y los 855 °C. El objetivo de formar martensita como fase secundaria es menor al 50% para los aceros B1, B2, B3, B5 y B6. En estos aceros la temperatura para alcanzar la zona $\alpha + \gamma$ fue insuficiente para lograr la transformación y también se observan residuos de perlita y de bainita en la fase secundaria. Para el acero B4, se obtuvo una probabilidad de formar martensita cercana al 90% y la relación ferrita – martensita es de 82.5 a 17.5% respectivamente, lo cual es similar a la relación buscada. De acuerdo a esto, el acero B4 presenta las características metalográficas necesarias para catalogarse como un acero doble – fase ferrítico martensítico.

La familia de aceros grado C (ver figuras 2.27 a 2.32), presenta una respuesta al tratamiento térmico más efectiva para el acero C4. En el caso del acero C4, tratado a 896 °C, la microestructura presenta ferrita – martensita en

una relación de 83.1% y 16.9% respectivamente y, los valores de microdureza indican que la fase secundaria tiene una probabilidad superior al 99% de formar martensita. A pesar de que se obtuvieron valores de microdureza que indican un 90% de probabilidad de formar martensita, las metalografías indican residuos de perlita y de bainita para el acero C6. Para el resto de los aceros de este grado, aunque las temperaturas de austenitización se localizan entre los 822 y los 852 °C, las probabilidades de formar martensita son inferiores al 50%. En los aceros C1, C2 y C3 se observa bainita como segunda fase. Para el acero C5, se observa la formación de ferrita Widmanstätten y de bainita como segunda fase.

Los aceros grado D (ver figuras 2.33 a 2.38), son los que han sido sujetos a las temperaturas más elevadas, el intervalo de temperaturas va desde 857 °C hasta los 937 °C. Para los aceros D1, D2, D5 y D6 se presentan microestructuras de ferrita Widmanstätten y de bainita. De las evaluaciones metalográficas en esta serie de aceros, sólo los aceros D3 y D4 son los que presentan una estructura doble – fase de ferrita y martensita. De acuerdo a las mediciones de microdureza del acero D3 (con una temperatura de austenitizado igual a 905 °C) la probabilidad de formar martensita es cercana al 90% y la relación ferrita – martensita es de 83.5% y 16.5% respectivamente. El acero D4 también presenta martensita como segunda fase en una relación de un 23% aproximadamente. La temperatura de tratamiento para este acero fue de 937 °C y la velocidad de enfriamiento fue lo suficiente para permitir la formación de la doble fase ferrita martensita.

Sobre la base de estas observaciones, se puede deducir que la cantidad de silicio necesaria para formar la doble fase ferrita martensita para esta familia de aceros debe ser igual o mayor a 1.23%. Para menores cantidades de silicio, la formación de zonas perlíticas previas al tratamiento térmico intercrítico es limitada y, a pesar de que se alcance la temperatura para formar las fases $\alpha + \gamma$

durante el tratamiento térmico, la cantidad de carbono en estas zonas será insuficiente para lograr la transformación a martensita.

En los aceros que logran transformar sus zonas perlíticas a martensita, se emplearon temperaturas de tratamiento intercrítico superiores a los 814 °C, ya que para temperaturas inferiores no se logra transformar completamente la fase perlítica a martensita y en cambio se obtienen combinaciones de perlita, bainita y martensita.

Así, los aceros que logran cumplir con las condiciones metalográficas para ser catalogados como aceros doble fase (DFM steels) son los aceros B4, C4 y D4, los cuales presentan las dos condiciones de composición química y temperatura de tratamiento térmico arriba indicadas.

Como se indicó en el capítulo 2, durante la preparación metalográfica de las muestras de esta familia de aceros, se encontraron distintos defectos microestructurales que propician la formación de fenómenos de corrosión en los metales cuando son expuestos a un medio agresivo.

Los defectos encontrados en los aceros evaluados son inclusiones no metálicas, zonas heterogéneas y grietas superficiales. Como se observa en la figura 2.51, la cantidad de inclusiones en las barras de acero es relativamente alta. Las inclusiones no metálicas pueden actuar como zonas anódicas puntuales, desencadenando procesos de corrosión localizada en forma de picaduras. Desde un punto de vista estructural, la presencia de estas inclusiones disminuye las propiedades mecánicas de una varilla que se fabrique utilizando este tipo de acero. Esto debido a que las inclusiones presentes actuarán como concentradores de esfuerzos y la resistencia del elemento metálico se verá minada.

La presencia de zonas heterogéneas en la microestructura del material en forma de zonas decarburadas superficiales e internas propicia la formación de celdas galvánicas, desencadenando así fenómenos de corrosión localizada. La presencia de estas zonas heterogéneas también propicia que las propiedades mecánicas de la aleación no sean uniformes, favoreciendo concentraciones de esfuerzos en estas áreas que pudieran hacer fallar toda una estructura de concreto reforzado fabricada con varillas de acero de tales características.

Los defectos superficiales encontrados, grietas (debidas a los procesos de laminado) y un anillo de ferrita (presente debido a fenómenos de decarburación durante los tratamientos térmicos), tienen consecuencias graves desde el punto de vista de la corrosión. Por un lado, las grietas propician la formación de zonas anódicas puntales, desencadenando fenómenos de corrosión localizada. El anillo de ferrita, presente en todas las barras de acero evaluadas, permite la formación de celdas galvánicas que generen fenómenos de corrosión, agravando el efecto deteriorante debido a la presencia de las grietas.

Bajo condiciones de agresividad tales como ambientes marinos o atmósferas que propicien fenómenos de carbonatación en el concreto, la presencia de cualquiera de los defectos antes mencionados en una varilla de acero fomentará el desarrollo de fenómenos de corrosión localizada, que deben considerarse como graves, ya que este tipo de corrosión es el más difícil de diagnosticar y de reparar^[53]

4.2 Ensayos de corrosión acelerada.

Por medio de los ensayos de corrosión acelerada fue posible inferir cual es el comportamiento de estos aceros si se exponen a un sistema de mortero -

acero, el cual presenta además condiciones de agresividad severas debidas a la presencia de los iones cloruro (Cl^-), como las encontradas en ambientes marinos.

A continuación se analizan los resultados obtenidos de cada prueba de corrosión acelerada para cada grupo de aceros. Mediante este análisis se determina cuáles son las aleaciones que menor corrosión presentaron para esta familia de aceros al silicio. Se analizan primero los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión acelerada de las muestras sumergidas en la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y después los resultados de los ensayos efectuados a las muestras sumergidas en la Solución 2 ($\text{NaCl} + \text{Ca}(\text{OH})_2$).

4.2.1 Aceros grado A (Solución 1).

En la figura 3.3 se presentan los resultados de los tres ensayos de corrosión acelerada efectuados para el grupo de aceros A, expuestos a la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En este gráfico se puede observar que se presentan dos comportamientos diferentes. El primero de estos comportamientos, es el correspondiente a los aceros A1, A3 y A5, los cuales a pesar de presentar velocidades de corrosión pequeñas en los tres ensayos (menores a $0.200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)¹, tienen una tendencia a incrementar sus velocidades de corrosión a los posteriores ensayos. Este aumento sucesivo en las velocidades de corrosión indica que estos aceros tienden a perder sus propiedades de resistencia a la corrosión conforme transcurren los ensayos. Este comportamiento se puede explicar de la siguiente manera: las bajas velocidades de corrosión indican que las muestras fueron capaces de generar películas pasivadoras, sin embargo, estas capas tienden a ser menos efectivas conforme transcurre el tiempo.

¹ * El cálculo de las velocidades de corrosión se determina a partir de las leyes de Faraday^[6].

Por otra parte, los aceros A2, A4 y A6 presentan un comportamiento menos estable a lo largo de los tres ensayos de corrosión acelerada, ya que después del segundo ensayo las velocidades de corrosión son superiores incluso a los $0.800 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este comportamiento indica que estos aceros son capaces de formar películas pasivadoras sobre su superficie. Sin embargo, estas películas son poco estables, ya que el aumento en la velocidad de corrosión después de la segunda prueba de corrosión acelerada muestra que dichas películas protectoras sufrieron un deterioro.

A pesar de esta situación, estas películas son capaces de pasivar nuevamente la superficie de estos metales, situación que se observa después del tercer ensayo de corrosión acelerada, donde las velocidades de corrosión disminuyen a valores menores de $0.150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, siendo los aceros A2 y A6 los que presentan menores velocidades de corrosión.

De esta serie de aceros, el mejor comportamiento lo presentan los aceros A2 y A6, mientras que el peor comportamiento lo presentan los aceros A1, A3 y A5.

4.2.2 Aceros grado B (Solución 1).

En el caso de la familia de aceros B, mostrada en la figura 3.4, se presentan tres comportamientos diferentes a lo largo de los ensayos de corrosión acelerada. El primero de ellos se observa para el acero B4, el cual al cabo de los tres ensayos de corrosión presenta las mayores velocidades de corrosión (por encima de los $0.550 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), lo cual indica que la película pasivadora que se forma en el primer ensayo de corrosión acelerada, se deteriora en el segundo ensayo y no vuelve a restablecerse en el tercer ensayo.

Los aceros B1, B2, B3 y B5 presentan un segundo comportamiento a lo largo de los ensayos, en el que hay una velocidad de corrosión en el primer

ensayo que se incrementa durante el segundo ensayo de corrosión. En el tercer ensayo de corrosión acelerada, las velocidades de corrosión de estos aceros son menores a $0.100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (a excepción del acero B3, cuya velocidad de corrosión es ligeramente mayor). Este comportamiento indica que estos aceros son capaces de formar una película pasiva, la cual se deteriora durante el segundo ensayo de corrosión acelerada, para volver a restablecerse en el tercer ensayo de corrosión acelerada.

El tercer comportamiento observado corresponde al acero B6, el cual presenta una velocidad de corrosión de $0.300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el primer ensayo de corrosión, el cual disminuye a alrededor de $0.100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el segundo ensayo, para incrementarlo ligeramente en el tercer de corrosión de corrosión acelerada. Para este acero, la formación de películas pasivas sobre su superficie se presenta en el primer ensayo. Esta película pasiva sigue actuando a lo largo de la segunda prueba de corrosión acelerada, pero en la tercer prueba se deteriora ligeramente, dando lugar a velocidades de corrosión superiores.

Así, el mejor comportamiento para este grupo de aceros corresponde a los aceros B1, B2 y B5, mientras que el peor comportamiento lo desarrolla el acero B4.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2.3 Aceros grado C (Solución 1).

Para los aceros del grupo C expuestos a la Solución 1 (figura 3.5), se observan tres comportamientos diferentes a lo largo de los ensayos de corrosión. El primer comportamiento corresponde al acero C4, el cual presenta la mayor velocidad de corrosión en el primer ensayo (con $0.300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Después, en el segundo ensayo de corrosión acelerada, su velocidad de corrosión disminuye a $0.200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, para luego incrementarse a más de $0.500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el tercer ensayo de corrosión acelerada, siendo esta la velocidad de

corrosión más elevada para un acero de este grupo de aceros expuestos a la Solución 1. Este comportamiento indica que este tipo de acero genera una película pasivadora que logra proteger al metal en los primeros dos ensayos, pero que en el tercer ensayo se deteriora de manera importante por la velocidad de corrosión que se presenta.

Otro comportamiento se presenta para los aceros C2, C3, C5 y C6 el cual consiste en presentar velocidades de corrosión menores a los $0.250 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el primer ensayo de corrosión acelerada para luego tener un incremento en sus velocidades de corrosión después del segundo ensayo. Estas velocidades de corrosión disminuyen en el tercer ensayo sus valores a menos de $0.150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. De acuerdo a esta información, los aceros generan una capa pasiva que los protege en el primer ensayo de corrosión acelerada. Esta capa pasivante se deteriora ligeramente durante el segundo ensayo de corrosión acelerada, para luego estabilizarse en el tercer ensayo, presentando así menores velocidades de corrosión.

El tercer comportamiento lo presenta el acero C1, el cual después de cada ensayo tiende a presentar menores velocidades de corrosión. Es decir, este acero es capaz de generar una capa pasivante que limita la velocidad de corrosión del metal a aproximadamente $0.150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el primer ensayo. Esta capa pasivante se mantiene estable en el segundo y tercer ensayos de corrosión acelerada y disminuye así el deterioro del metal, con velocidades de corrosión menores a $0.100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Así, para este grupo de aceros, el mejor comportamiento lo presenta el acero C1 y el peor comportamiento lo presenta el acero C4.

3.2.4 Aceros grado D (Solución 1).

Para las muestras de aceros del grupo D expuestas a la Solución 1, se presentan dos comportamientos. El primero de ellos es en para los aceros D1, D2, D3, D5 y D6, que indica una velocidad de corrosión menor a los $0.250 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en la primer prueba de corrosión acelerada. En la segunda prueba de corrosión acelerada se presenta un aumento de la velocidad que alcanza hasta $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Posteriormente las velocidades de corrosión vuelven a disminuir a valores menores a los $0.400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en el tercer ensayo de corrosión durante el segundo ensayo, el cual disminuye al término del tercer ensayo de corrosión acelerada. Para este comportamiento, el acero D4 es el que presenta mayores velocidades de corrosión en todas las pruebas efectuadas bajo condiciones de exposición a la Solución 1. Para estos aceros, se observa que la formación de una capa pasiva superficial actúa durante el primer ensayo de corrosión, sin embargo, esta capa pierde su efectividad durante el segundo ensayo, provocando una mayor pérdida de metal en las muestras. En la tercer prueba de corrosión acelerada, la capa pasiva vuelve a formarse y en consecuencia, el metal queda protegido del medio, presentándose menores velocidades de corrosión para las muestras de los aceros.

El segundo comportamiento corresponde al acero D3, el cual presenta velocidades de corrosión pequeñas (menores a $0.200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a lo largo de las tres pruebas de corrosión acelerada, pero con un aumento en su velocidad de corrosión después de cada ensayo. De esta manera, se forma una capa pasiva en la superficie del metal, aislándolo del medio y evitando velocidades de corrosión elevadas. Sin embargo, esta capa pasiva pierde efectividad después de cada ensayo realizado, ya que se observa una tendencia del acero D3 a presentar mayores velocidades de corrosión.

Así los peores comportamientos corresponden a los aceros D3 y D4, mientras que el comportamiento de los aceros D2 y D6 es más aceptable.

Para las muestras de metal que fueron expuestas a la Solución 2 (NaCl + Ca(OH)₂), se presentaron los siguientes comportamientos.

3.2.5 Aceros grado A (Solución 2).

Para el grupo de aceros A expuesto al medio de NaCl y Ca(OH)₂ (figura 3.7), se presentan tres comportamientos. El primero corresponde al acero A1, el cual permite observar una velocidad de corrosión mínima para este grupo de aceros, la cual permanece prácticamente constante a lo largo de los tres ensayos de corrosión acelerada (menor a los 0.750 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Este comportamiento indica que la muestra del acero A1 sumergida en la Solución 2 fue capaz de formar una capa pasiva y de mantenerla a lo largo de las tres pruebas de corrosión acelerada.

El segundo tipo de comportamiento lo presentan los aceros A2, A3 y A4, los cuales muestran velocidades de corrosión menores a 1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Durante el segundo ensayo de corrosión acelerada para estos aceros se presenta un incremento en la velocidad de corrosión, presentando velocidades de corrosión de hasta 2.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. En el tercer ensayo de corrosión acelerada estos valores disminuyen a valores en donde las velocidades de corrosión son menores a los 1.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este comportamiento en los aceros de este grupo muestra la formación de una capa pasiva en el primer ensayo de corrosión que los protege del medio agresivo. Durante el segundo ensayo de corrosión acelerada, esta capa pasiva se rompe, desencadenando mayores velocidades de corrosión en los aceros. En la tercer prueba de corrosión acelerada hay una recuperación de esta capa pasivante y en consecuencia, las velocidades de corrosión disminuyen.

El tercer comportamiento dentro de este grupo de aceros corresponde a los aceros A5 y A6, el cual presenta un incremento en las velocidades de

corrosión después de cada ensayo. Sin embargo, estas velocidades de corrosión no sobrepasan los $1.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Para este grupo de aceros el mejor comportamiento lo presenta el acero A1, mientras que el peor comportamiento corresponde a los aceros A6 y A5.

3.2.6 Familia de aceros grado B (Solución 2).

De los aceros correspondientes al grupo B expuestos a la Solución 2 (figura 3.8), se observan tres comportamientos generales a lo largo de las tres pruebas de corrosión acelerada.

El primer comportamiento corresponde a los aceros B1, y B3, en el cual se presenta un aumento en la velocidad de corrosión de cada uno de los dos aceros después de cada ensayo de corrosión acelerada. Este comportamiento indica que la capa pasiva que se forma en la superficie de las muestras tiende a deteriorarse, dando por resultado mayores velocidades de corrosión al término de cada prueba.

El segundo comportamiento lo presentan los aceros B2, B4 y B6, en el cual se observan velocidades de corrosión menores a $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el primer ensayo de corrosión. En el segundo ensayo de corrosión acelerada se observa un aumento en las velocidades de corrosión, el cual no sobrepasa los $1.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para los aceros B2 y B6, pero en el caso del acero B4 se registra la máxima velocidad de corrosión que se encontró en este grupo de aceros, la cual es superior a los $3.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En el tercer ensayo de corrosión las velocidades de corrosión para estos aceros disminuyen a menos de $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este comportamiento indica la formación de una película pasivante superficial en el primer ensayo de corrosión acelerada, la cual se deteriora en la segunda prueba de corrosión acelerada. Sin embargo, esta película vuelve a formarse

durante el desarrollo de la tercer prueba de corrosión acelerada, disminuyendo las velocidades de corrosión acelerada.

El tercer comportamiento lo presenta el acero B5, el cual presenta en el primer ensayo de corrosión acelerada una velocidad de corrosión cercana a $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Durante el segundo ensayo de corrosión acelerada la velocidad de corrosión disminuye a $0.750 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, pero en el tercer ensayo de corrosión acelerada la velocidad de corrosión se incrementa por encima de los $1.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este comportamiento indica la formación de una película pasivante sobre la superficie de la muestra en el primer ensayo de corrosión acelerada, la cual sigue actuando y protegiendo al metal durante el desarrollo de la tercer prueba de corrosión acelerada. Es durante el tercer ensayo de corrosión acelerada que esta capa pasivante se rompe y en consecuencia se presentan mayores velocidades de corrosión.

De esta manera, el peor comportamiento lo presentan los aceros B3, B4 y B5, mientras que el comportamiento con menor deterioro lo presentan los aceros B1, B2 y B6.

3.2.7 Aceros grado C (Solución 2).

En la figura 3.9 se muestra el comportamiento que presentaron los aceros del grupo C al ser sumergidos en la Solución 2 a lo largo de las tres pruebas de corrosión acelerada. Se observan tres comportamientos principales.

El primero corresponde al acero C2, el cual disminuye su velocidad de corrosión después de cada ensayo de corrosión acelerada. Las velocidades de corrosión calculadas para este acero en el primer ensayo son cercanas a $0.900 \mu\text{m}/\text{cm}^2$, $0.750 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ en el segundo ensayo y de $0.600 \mu\text{m}/\text{cm}^2$. Este comportamiento indica que este metal fue capaz de formar una capa pasivante

a lo largo de los tres ensayos de corrosión acelerada, que se mantuvo estable y que evito mayores velocidades de corrosión.

El segundo comportamiento corresponde a los aceros C3, C4 y C5, el cual presenta velocidades de corrosión menores a $1.0 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ en el primer ensayo de corrosión acelerada. En el segundo ensayo de corrosión acelerada se presenta un aumento en las velocidades de corrosión (superior a $2.0 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ para el acero C3), que posteriormente disminuyen durante el tercer ensayo de corrosión. Lo anterior permite inferir que estos aceros desarrollaron una capa pasivante durante el primer ensayo de corrosión acelerada, la cual se deterioró en el segundo ensayo de corrosión acelerada, aumentando así las velocidades de corrosión en las muestras de metal. Finalmente es en el tercer ensayo de corrosión que esta capa pasivante vuelve a generarse, disminuyendo las velocidades de corrosión a valores menores a $1.1 \mu\text{m}/\text{cm}^2$.

El tercer comportamiento corresponde a los aceros C1 y C6, los cuales incrementan sus velocidades de corrosión después de cada ensayo, por lo que estos dos aceros presentan el peor comportamiento de este grupo de aceros, ya que la capa pasivante que generan no es lo suficientemente efectiva para evitar el deterioro de las muestras de metal, presentando velocidades de corrosión de hasta $1.4 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ para el acero C1.

Por el contrario, el acero que mejor comportamiento presenta, corresponde al acero C2.

4.2.8 Aceros grado D (Solución 2).

Para los aceros del grupo D se muestra su comportamiento a lo largo de las pruebas de corrosión acelerada en la figura 3.10, en donde se pueden observar dos comportamientos principales.

El primer comportamiento lo presenta el acero D6, que consiste en una disminución de la velocidad de corrosión después de cada ensayo de corrosión. En el primer ensayo de corrosión este acero presentó una velocidad de corrosión superior a $1.6 \mu\text{m}/\text{cm}^2$, disminuyendo a cerca de $1.5 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ en el segundo ensayo de corrosión acelerada y, terminando en $1.1 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ en el tercer ensayo de corrosión. Esto indica que este acero es capaz de formar una capa pasiva que es estable a lo largo de las tres pruebas de corrosión acelerada, por lo que las velocidades de corrosión tienden a ser menores.

El segundo comportamiento corresponde a los aceros D1, D2, D3, D4 y D5, que consiste en un aumento en la velocidad de corrosión después de cada prueba de corrosión acelerada, siendo el acero D2 el acero que presenta menor tendencia a este comportamiento, mientras que el acero D4 desarrolla las mayores velocidades de corrosión. De manera contraria a lo que ocurre con el acero D6 y a pesar de que las velocidades de corrosión iniciales de estos 5 aceros son menores, a $1.1 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ estos aceros no son capaces de mantener la capa pasiva que los envuelve superficialmente. De esta manera, conforme continúan las pruebas de corrosión acelerada, las velocidades de corrosión se incrementan hasta valores de $1.9 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ en el tercer prueba de corrosión acelerada para el acero D4.

Así, para este grupo de aceros el mejor comportamiento corresponde al acero D6 y D2, mientras que el peor comportamiento corresponde al acero D4.

Haciendo un análisis general, en el caso de los aceros de cada grupo estudiado dentro de la familia de aceros al silicio, se observa que los aceros que presentan velocidades de corrosión (i_{corr}) menores a $0.100 \mu\text{m}/\text{cm}^2$, puede deberse a que la presencia del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) origina capas superficiales pasivas de algún tipo de óxido, disminuyendo de esta manera la velocidad de corrosión de estos aceros.

Como se explica en el capítulo 1, el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) eleva la alcalinidad del concreto, y en este caso de la solución en la que está disuelto. Con contenidos normales de oxígeno y cuando el acero se haya sumergido en una solución, el acero se recubre de una capa de óxidos adherente y compacta, que permite pasivar su superficie y de esta manera se preserva de manera indefinida de cualquier signo de corrosión. Esto ocurrirá siempre y cuando la estructura de concreto sea de buena calidad, es decir, que no presente fisuras y no cambie sus características físicas o químicas. Estas características de buena calidad del concreto pueden variar al ser influidas por factores que propicien procesos de corrosión.

Algunos de estos factores pueden ser una concentración de sustancias agresivas como el ion cloruro (Cl^-) en la superficie del concreto, la permeabilidad del concreto a sustancias agresivas, presencia de fisuras en el concreto, estado superficial del acero, etc.^[5].

De estos factores, la presencia del ion cloruro (Cl^-), además de ser un promotor de fenómenos de corrosión, tiene la capacidad de alterar la pasividad del acero embebido, convirtiéndose en un factor desencadenante de la corrosión y, además, si el contenido del ion cloruro (Cl^-) se encuentra en concentraciones críticas, éste actuará como un acelerador de tal proceso. Si además de los iones cloruro (Cl^-) se consideran la humedad presente en el sistema acero – concreto y, cantidades mínimas de oxígeno, termodinámicamente es posible la presencia de fenómenos de corrosión^[5].

Al hacer una comparación general del comportamiento de todas las muestras expuestas a las Soluciones 1 y 2, se observa que los aceros que presentan comportamientos de menores velocidades de corrosión y por lo tanto de menor tendencia al deterioro son los aceros con un contenido de silicio de 0.383 y 0.387%. De forma contraria, los aceros que presentan mayor tendencia al deterioro son los aceros que contienen 1.23 y 2.02% de silicio.

Cabe mencionar que una de las teorías que se tienen sobre los aceros doble – fase ferrítico martensíticos y su resistencia a presentar fenómenos de corrosión cuando son embebidos en concreto, es que al aumentar el contenido de silicio en el acero, se mejoran sus propiedades de resistencia a la corrosión. Sin embargo, esta situación no se presentó para familia de aceros estudiada.

Esta situación puede observarse mediante las figuras 4.3 y 4.4, en donde se grafican los valores de velocidad de corrosión (i_{corr}) vs el contenido silicio de todas las muestras de los aceros sometidas a las condiciones de exposición en las Soluciones 1 y 2.

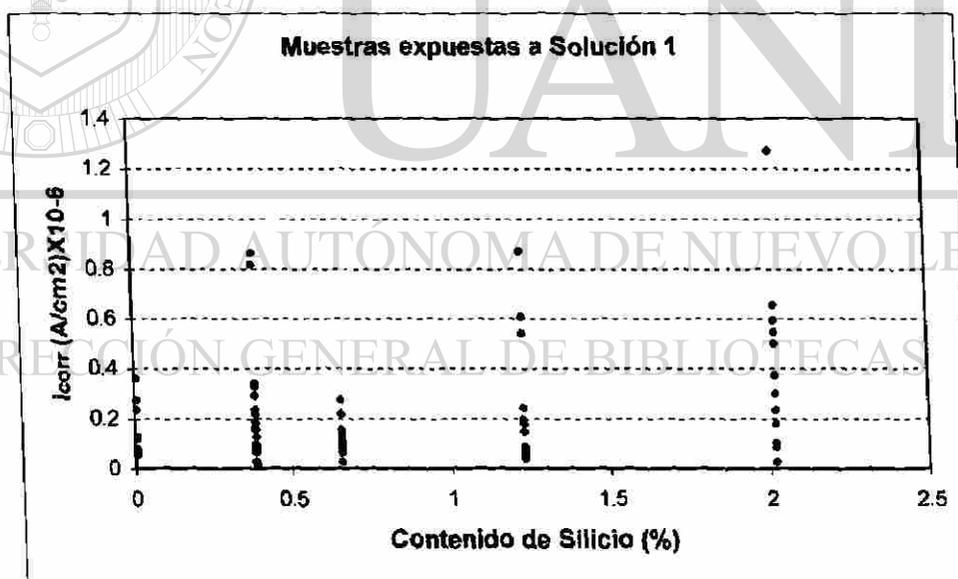


Figura 4.3: Gráfica que presenta las velocidades de corrosión para las muestras de los aceros expuestas en la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en función del contenido de silicio.

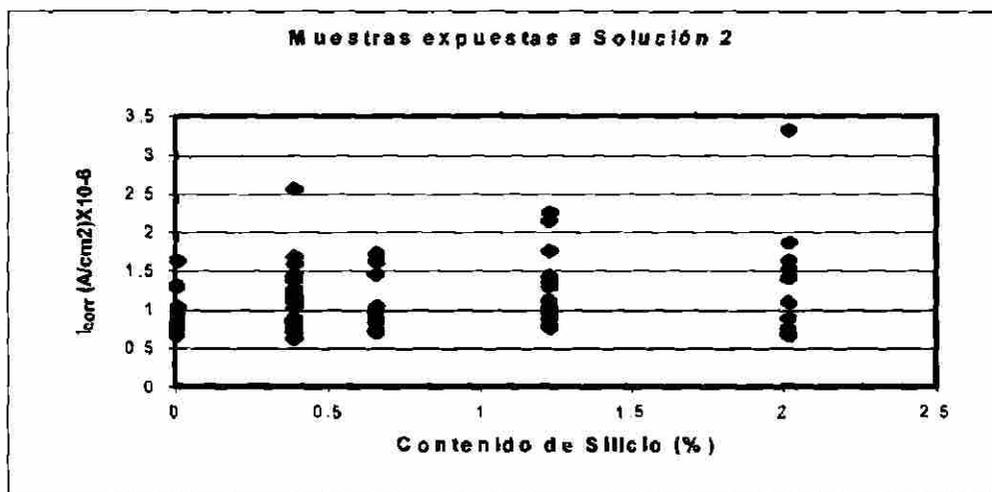


Figura 4.4: Gráfica que presenta las velocidades de corrosión para las muestras de los aceros expuestos en la Solución 2 ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$) en función del contenido de silicio.

De estos gráficos se observa que el comportamiento de las muestras en las dos soluciones es prácticamente el mismo. Sin embargo, el tener velocidades de corrosión mayores en los metales expuestos a la Solución 2 (figura 4.4), permite diferenciar el comportamiento de los aceros en función del contenido de silicio. Es en este gráfico donde se aprecia que las menores velocidades de corrosión se presentan para los aceros que contienen entre un 0.383 y un 0.387% de silicio, mientras que los aceros que contienen 1.23 y 2.02% de silicio presentan las mayores velocidades de corrosión.

Las microestructuras que presentan estos dos grupos de aceros indican que los aceros con 0.383 y 0.387% de silicio (figuras 2.16, 2.20, 2.22, 2.26, 2.28, 2.32, 2.34 y 2.38), no desarrollan estructuras de aceros doble – fase ferrítico martensíticos, sino más bien estructuras donde se presenta bainita. Por otra parte, los aceros que desarrollan en mayor grado la estructura ferrita – martensita presentan mayores velocidades de corrosión.

Por otro lado al graficar las pérdidas en peso de las muestras expuestas a la Solución 1 en una escala vertical y los valores de i_{corr} correspondientes a estos valores, se obtiene el siguiente gráfico:

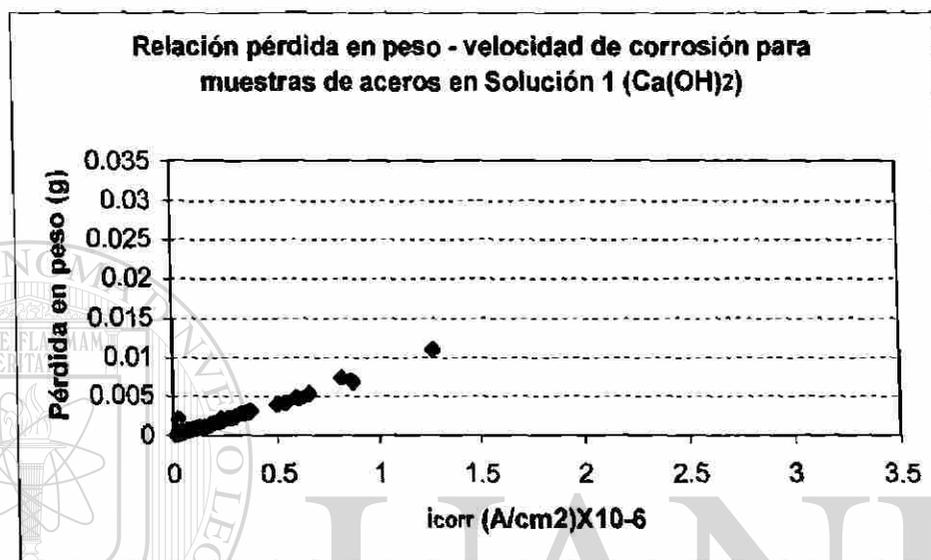


Figura 4.5: Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a la Solución 1 y su correspondiente velocidad de corrosión.

Una gráfica similar, ver figura 4.6, se puede obtener al graficar los valores de pérdida en peso e i_{corr} para las muestras de los aceros que estuvieron expuestas a la Solución 2. Al comparar los gráficos 4.5 y 4.6, mediante el gráfico 4.7, se observa que los valores de pérdida en peso y velocidad de corrosión presentan una relación lineal.

Esta línea de tendencia indica que todos los aceros presentan una misma cinética de corrosión, aún y cuando las muestras fueron sometidas a dos condiciones de agresividad diferentes.

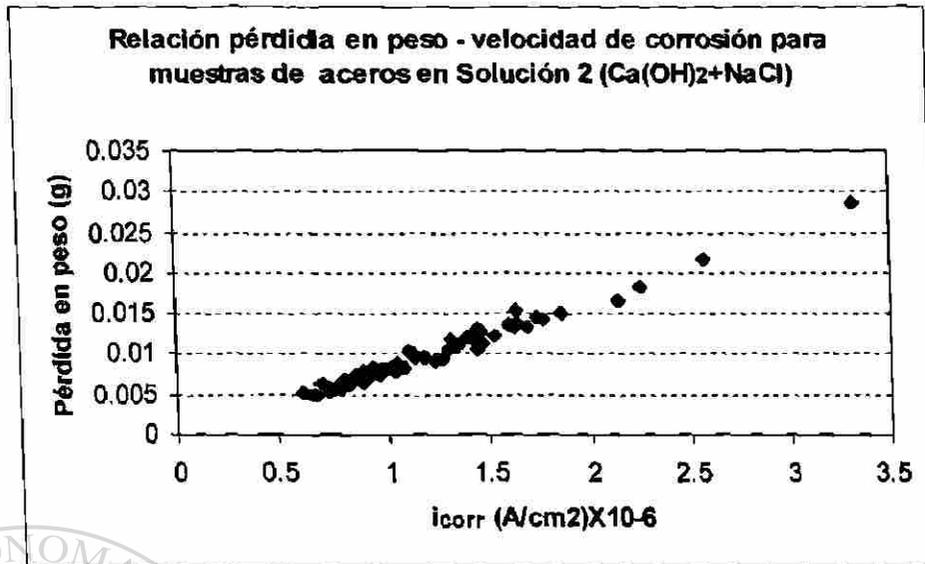


Figura 4.6: Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a la Solución 1 y su correspondiente velocidad de corrosión.

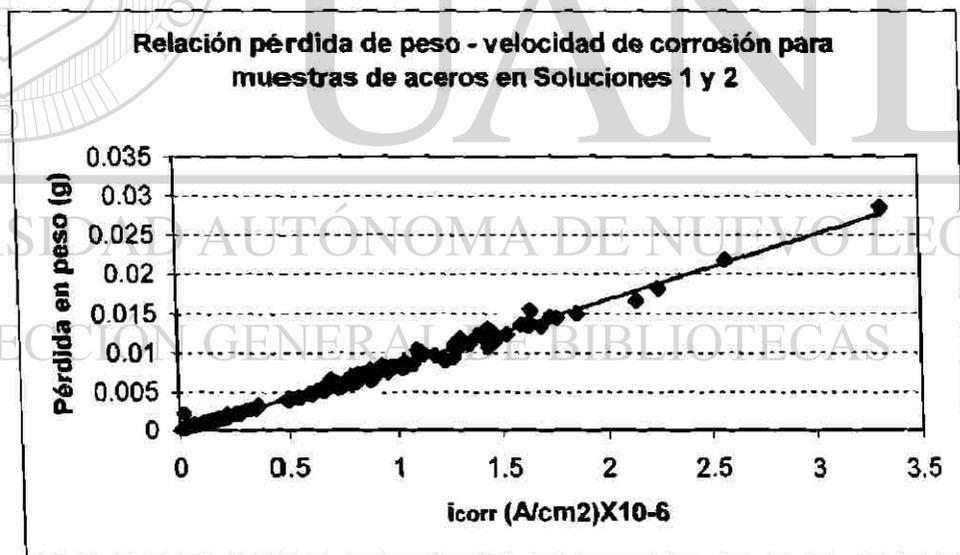


Figura 4.7: Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a las Soluciones 1 y 2, y su correspondiente velocidad de corrosión

Es decir, los aceros estudiados presentan un mismo mecanismo de corrosión, sin importar el porcentaje de silicio que cada uno de éstos contenga en su aleación, y sin importar el medio al que sean expuestos.

Debido a que los aceros expuestos en la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y en la Solución 2 ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$) desarrollan un mismo proceso de corrosión, se puede hablar de una constante de Faraday para esta familia de aceros. La constante de Faraday se determina al graficar los valores de pérdida de peso y velocidades de corrosión (figura 4.7), al determinar el valor de la pendiente que la línea de tendencia presente. Para esta familia de aceros, el valor de la constante de Faraday es de $0.0087 \text{ A}\cdot\text{g}/\text{cm}^2$.

Todas las muestras de los aceros al silicio que fueron sometidas a las pruebas de corrosión acelerada en presencia de iones cloruro (Cl^-), presentaron picaduras (figuras 3.11, 3.12 y 3.13). Esto indica que el mecanismo de corrosión que se presentará para estos aceros al ser utilizados como varilla de refuerzo, es el de corrosión localizada por picadura.

Un material de tales características no debe ser utilizado para la fabricación de varilla de refuerzo, ya que el desarrollo de este tipo fenómenos de corrosión es difícil de detectar y de reparar en estructuras de concreto armado.

De las figuras 3.11, 3.12 y 3.13, se observa que las picaduras presentes en estos aceros no siguen un patrón preferencial de ataque a alguna de las fases. En cambio, el inicio de la picadura se presenta en las inclusiones no metálicas que el material contiene. A partir de estas imperfecciones la picadura comienza a desarrollarse, creciendo a lo largo de los límites de frontera ferríticos.

En la tabla 4.1 se presentan cuales son las causas más comunes para que se presenten pilas de corrosión en un sistema determinado.

Tabla 4.1: Causas responsables de la formación de pilas de corrosión^[54].

Tipos de heterogeneidades	Ejemplos de pilas locales generadas
Heterogeneidades del metal	<p>De constitución: En aleaciones bifásicas y polifásicas, partículas contaminantes en la superficie, segregaciones, uniones bimetálicas, etc.</p> <p>De estructura: Límites de grano, dislocaciones emergentes, anisotropía de los granos cristalinos, etc.</p> <p>De orden mecánico: Tensiones, conformación, soldadura, etc.</p> <p>De estado superficial: Grado de pulido, rayas, discontinuidades de las capas protectoras, etc.</p>
Heterogeneidades del medio agresivo	<p>Diferencias de concentración de oxígeno: Pilas de Evans o de aireación diferencial.</p> <p>Diferencias de concentración salina, composición o pH.</p>
Heterogeneidades en las condiciones de exposición	<p>Diferencias de temperatura.</p> <p>Diferencias de potencial: Debidas a la actuación de un campo eléctrico externo sobre la estructura metálica.</p>

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.3 Medición de potenciales de corrosión (E_{CORR}).

Como se explica en el Capítulo 3, se realizó una primer etapa de mediciones de potenciales de corrosión para los aceros 1, 3, 4, A1, A4, B3, C3, D1 y D4. Los gráficos donde se presentan los resultados de estas mediciones de potencial son las figuras 3.21 a la 3.29.

De acuerdo al gráfico de la figura 3.20, el acero convencional de refuerzo en las estructuras de concreto puede presentar tres tipos de comportamiento en

función de los valores de potencial que se detecten. Así, un acero convencional presenta corrosión incipiente cuando sus valores de potencial de corrosión son mayores a -0.150 V; este mismo acero presenta corrosión moderada cuando su potencial se encuentra entre -0.150 y -0.350 V; un acero convencional con valores de potencial menores a los -0.350 V presentará corrosión severa^[52].

Como se puede observar en los gráficos 3.21 al 3.29, todos los aceros desarrollan potenciales de corrosión que se encuentran en el intervalo comprendido entre los -0.300 V a los -0.600 V. Esto indica que todos los aceros involucrados en esta primera etapa de mediciones han presentado potenciales de corrosión que indican fenómenos de deterioro del acero que podemos considerar como grave.

Otra observación importante es el hecho de que los gráficos presentan caídas de potencial repentinas, las cuales indican que los aceros embebidos en el mortero presentan picaduras.

La razón de esto puede explicarse de la siguiente manera: al generarse una picadura en un metal que está siendo corroído, se genera una zona anódica muy pequeña, en la cual se presentará una diferencia de potencial considerable. Debido a que el área que está siendo corroída es muy pequeña con respecto al resto del material, los fenómenos de corrosión sólo se realizarán en esta zona y el resultado será un deterioro localizado del metal.

A fin de comprobar estas consideraciones, las probetas de mortero de esta serie de mediciones de potencial fueron fracturadas para observar el grado de deterioro que presentan las muestras de metal después de 12 meses de estar embebidas en el mortero.

Al extraer las barras de acero de las probetas de mortero, se observó que la superficie del metal permaneció prácticamente inalterable, es decir, no se

presentaron fenómenos de corrosión generalizada como se hubiera esperado de un acero convencional. Sin embargo, se observaron picaduras de corrosión en distintas zonas superficiales.

La evidencia de estas picaduras sobre la superficie de las muestras de aceros, comprueban el comportamiento de potencial de corrosión que se detectó con el Potenciostato – Galvanostato. Por otro lado, también se valida el comportamiento de las muestras de los aceros cuando fueron sometidos a las pruebas de corrosión acelerada en la Solución 2 ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{NaCl}$).

Como se explica en el capítulo uno de este estudio, una de las características del concreto es que tiene una red de poros interconectados^[51]. Esta misma situación se presenta en el mortero, situación que puede relacionarse con el concepto de permeabilidad, característica que controla el paso de agentes químicos agresivos hasta el acero de refuerzo.

La permeabilidad hace que el mortero se comporte como una membrana semi-permeable en donde se lleva a cabo la migración, en este caso, de iones cloruro (Cl^-), humedad, oxígeno (los cuales, aceleran un proceso corrosivo). Así, en la interfase acero - mortero se crea una membrana selectiva a los iones, en donde por un lado se presenta el ion cloruro (Cl^-) que se dirige hasta el acero [®] produciendo la oxidación del hierro (Fe) del acero y generando un producto de esta oxidación (Fe^{2+}), creando de esta manera, pilas de concentración diferencial de pH. Este comportamiento ocasiona que se destruya la película de óxido protector del acero, rompiendo la pasividad del mismo para dar lugar a celdas pasivo/activo, que, con el transcurrir del tiempo generan zonas corroídas y zonas sin corroer. Todo esto da por resultado la formación de una corrosión localizada^[52].

La picadura es una forma de ataque localizado que da por resultado la formación de huecos en el metal. Estos huecos pueden tener diámetros

variados, desde unas cuantas micras hasta milímetros. Se le considera como una de las formas de corrosión más destructivas^[9].

La picadura es resultado de reacciones anódicas que se presentan en un metal. Por la naturaleza de este tipo de corrosión, la picadura se considera como un proceso autocatalítico, ya que es capaz de autoestimularse una vez que ha comenzado. Esto puede explicarse por medio de la figura 4.8.

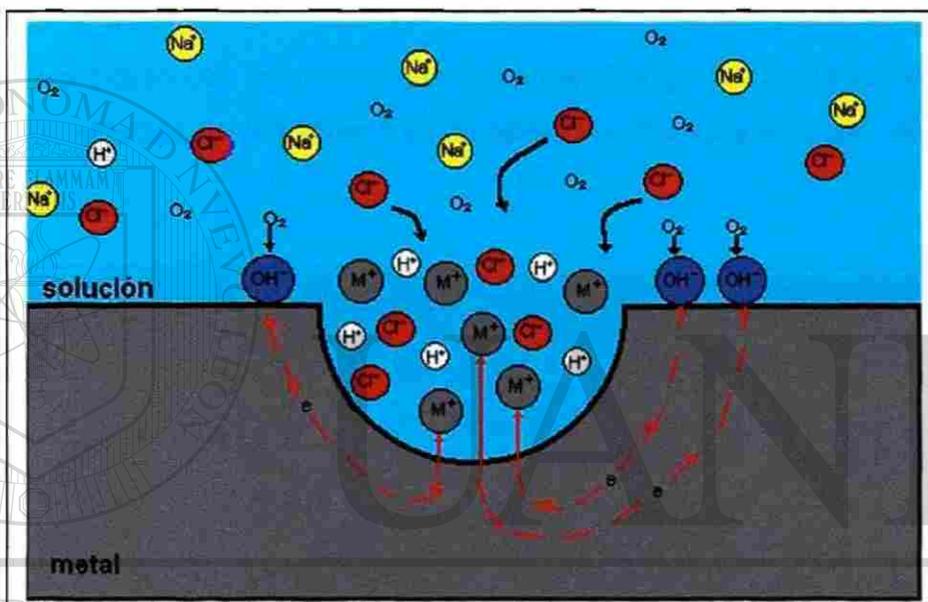


Figura 4.8: Proceso autocatalítico en un proceso de corrosión por picadura.

En esta figura un metal M está siendo corroído por picadura debido a una solución aireada de cloruro de sodio (NaCl). Una rápida disolución del metal se presentará en la picadura, mientras la reducción del oxígeno se presenta en las superficies adyacentes. Este proceso se estimula y se propaga por sí mismo. La rápida disolución del metal en la picadura tiende a producir un exceso de carga positiva en esta área, propiciando la migración de iones cloruro (Cl^-) para mantener el equilibrio eléctrico. De esta manera habrá, una gran concentración del compuesto MCl y, como consecuencia de una hidrólisis que se está llevando a cabo (de acuerdo a la ecuación 4.1), también habrá una gran concentración de hidrógeno.



Los iones hidrógeno (H^+) y los iones cloruro (Cl^-) estimulan la disolución de más metal, y el proceso entero se acelera conforme transcurre el tiempo. Debido a que la solubilidad del oxígeno en una picadura es prácticamente cero en soluciones concentradas, no se presenta reducción de oxígeno en la picadura. La reducción catódica del oxígeno se realiza en las superficies adyacentes a la picadura, las cuales no desarrollan procesos de corrosión^[9].

En las siguientes figuras se presentan las fotografías de la superficie que presentaron algunas de las muestras de aceros embebidos en concreto.



Figura 4.9: Fotografía que presenta los especímenes del acero C3 embebidos en concreto y utilizados para realizar mediciones de potencial de corrosión. Después de 12 meses de exposición, la superficie permaneció prácticamente inalterable, pero se observa la presencia de picaduras.



Figura 4.10: Fotografía que presenta los especímenes del acero D4 embebidos en concreto y utilizados para realizar mediciones de potencial de corrosión. Después de 12 meses de exposición, la superficie permaneció prácticamente inalterable, pero se observa la presencia de picaduras.

Así, se puede decir que las pruebas de corrosión acelerada para los aceros estudiados fueron representativas, ya que éstas fueron corroboradas mediante la realización de las pruebas de medición de potenciales de electrodo (que detectaron la generación de picaduras) y al extraer los especímenes de metal de las probetas acero – mortero, se observan dichas picaduras en sus superficies..

En la segunda etapa de mediciones de potencial de electrodo para las muestras de metal que fueron modificadas, se presenta un comportamiento diferente de acuerdo a la información contenida en el gráfico de la figura 3.35.

En la figura 3.35 podemos observar que la tendencia del potencial del sistema de acero - mortero sin NaCl y expuesto a un medio de agua potable es hacia potenciales superiores a los -0.150 V, es decir, tiende a pasivarse, lo cual es lo esperado debido a que no existen sustancias agresivas para el metal embebido.

Por otro lado, para el metal que fue embebido en mortero preparado con la adición de cloruros, muestra un comportamiento de corrosión severa durante los primeros días de exposición, sin embargo su tendencia es hacia la pasividad. Cabe hacer notar que su gráfica de comportamiento no muestra fluctuaciones repentinas de potencial, es decir, el espécimen metálico embebido en el concreto no ha presentado fenómenos de corrosión por picadura

En el caso del sistema expuesto al agua salada, el metal muestra una tendencia a presentar fenómenos de corrosión graves y no indica todavía, alguna tendencia a la pasivación. Para este sistema se observan ligeras caídas de potencial, lo cual indica fenómenos de corrosión por picadura.

De este último gráfico, también se puede observar que las modificaciones efectuadas a la microestructura de los aceros involucrados en esta etapa de medición sí presentan cambios con respecto a los aceros de la familia 3, ya que la probeta de mortero con sal presenta una mejora significativa en su comportamiento de potencial, tendiendo a un estado pasivo, lo cual no ocurre con los aceros 3, B3 y C3, correspondientes a la primer etapa de mediciones (figuras 3.19, 3.23 y 3.24).

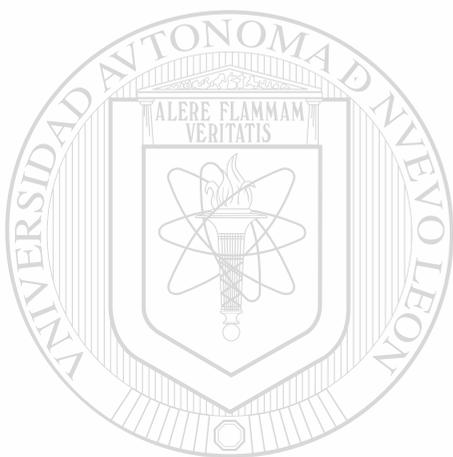
La modificación más importante para estos aceros es el hecho de que fueron rectificadas mediante un maquinado superficial. El objetivo de este rectificado es el de eliminar la capa metal decarburado y posibles imperfecciones superficiales como grietas debidas a los procesos de laminado.

El rectificado superficial de las muestras de acero modificado contribuyó a mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión de dichas muestras, ya que de acuerdo al gráfico de la figura 3.35, la muestra embebida en el mortero con ion cloruro (Cl⁻) no presenta fluctuaciones de potencial de corrosión repentinas y tiende a un estado de pasividad.

En resumen, las ideas más importantes que pueden obtenerse de este apartado del estudio son las siguientes:

- a) De los análisis metalográficos efectuados, para los 24 aceros generados únicamente los aceros B4, D4 y C4 pueden considerarse como aceros doble – fase ferrítico martensíticos.
- b) Estos aceros presentan contenidos de 2.02% de silicio y la temperatura de tratamiento térmico intercrítico es superior a los 815 °C.
- c) De acuerdo a la información obtenida mediante los ensayos de corrosión acelerada, los aceros que mejores propiedades de resistencia a la corrosión desarrollan son los aceros con contenidos de 0.383 y 0.387% de silicio. Los aceros que mayores velocidades de corrosión presentan son aquellos con contenidos de silicio superiores a 1.23%.
- d) Se presenta una misma cinética de corrosión para todos los aceros de la familia de aceros al silicio.
- e) El mecanismo de corrosión que se presenta en estos aceros sometidos a condiciones de corrosión acelerada, similares a las condiciones marinas, es el de corrosión localizada por picadura.
- f) Cuando muestras de estos aceros son embebidos en mortero, los aceros aleados al silicio de esta familia no son capaces de resistir a fenómenos de corrosión.
- g) De acuerdo a las mediciones de potencial de corrosión, estos aceros desarrollan fenómenos de corrosión por picadura.

- n) **Mediante la modificación de la estructura interna y de las características superficiales de estos aceros, es posible mejorar sus características de resistencia a la corrosión.**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 5

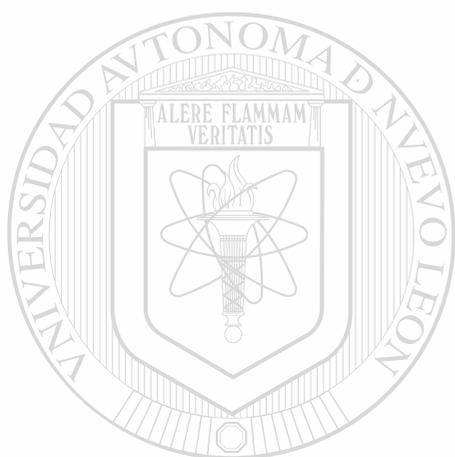
CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas en este estudio:

- I. Es posible generar aceros doble – fase ferrítico martensíticos mediante una composición química y un tratamiento térmico intercrítico adecuados.

- II. Los aceros utilizados para efectuar la evaluación de propiedades de resistencia a fenómenos de corrosión presentan defectos estructurales, los cuales actúan como promotores de dichos fenómenos.
- III. Bajo las condiciones de experimentación efectuadas, el mecanismo de corrosión que se presenta para esta familia de aceros es el de corrosión localizada por picadura.
- IV. Para las condiciones de experimentación efectuadas, los aceros evaluados no son viables para la fabricación de varilla de refuerzo en estructuras de concreto armado.

- V. Mediante la modificación microestructural y de superficie de estos aceros, es posible mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión de los mismos.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 6

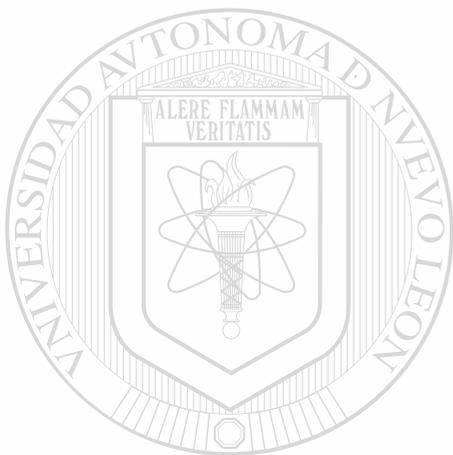
RECOMENDACIONES



A fin de dar seguimiento al estudio presentado, se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

- I. Generar una nueva familia de aceros con contenidos de silicio superiores a 1.23%.
- II. Llevar a cabo una nueva serie de tratamientos térmicos para corroborar la temperatura de tratamiento térmico intercrítico más adecuada para la generación de la doble – fase ferrita martensita.
- III. Controlar la presencia de inclusiones, grietas superficiales y de zonas heterogéneas a un grado tal, que estos defectos en las muestras de metal sean representativos para las condiciones actuales de fabricación de varilla convencional de refuerzo.

- IV. Fabricar con estos aceros una nueva serie de probetas mortero – acero, la cual debe dividirse en dos partes: la primera parte estará formada por probetas que no contengan ion cloruro (Cl^-) en el mortero y, la segunda parte estará formada por probetas que contengan ion cloruro (Cl^-) en el mortero.
- V. Realizar análisis electroquímicos a estos sistemas que incluyan mediciones de potencial de corrosión (E_{corr}) y medición de velocidades de corrosión (i_{corr}).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

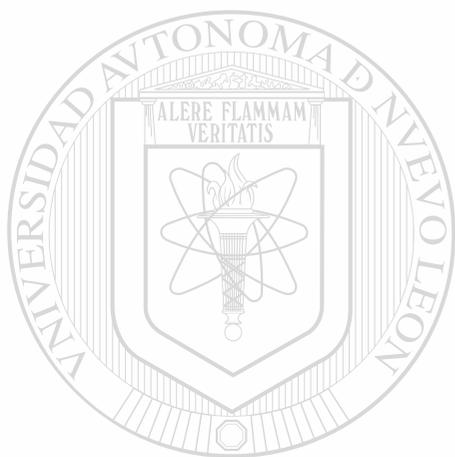
- [1] Waddell y Dobrodolwski, *Manual de la construcción con concreto*, capítulo 3, McGraw Hill, México 1996.
- [2] Castro P., *Corrosión en estructuras de concreto armado*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México 1998.
- [3] Biczok I., *Corrosión y protección del hormigón*, Urmo S.A. de Ediciones, España 1981.
- [4] Guzmán A.M., *Influencia del estearato de calcio en silicato tricálcico, clinker y cemento Portland tipo I*, Tesis UNAM Facultad de Química, México D.F. 1989.
- [5] Andrade C., *Corrosión localizada del acero en contacto con hormigón*, Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. XV – núm. 4, 1984.
- [6] Smith W.F., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, McGraw Hill, México 1994.
- [7] Brown T.L. y LeMay H.E., *Química la ciencia central*, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México 1991.
- [8] Avner, *Introducción a la metalurgia física*, McGraw Hill, México 1994.
- [9] Fontana M.G., *Corrosion Engineering*, McGraw Hill International Editions, Singapore 1987.
- [10] Uhlig H.H., *Corrosión y control de la corrosión*, Urmo S.A. de Ediciones, España 1979.
- [11] Avila y Genescá, *Más allá de la herrumbre*, Fondo de Cultura Económica S.A., México 1986.

- [12] Evans U.R., *Corrosiones metálicas*, Editorial Reverté S.A., España 1987.
- [13] Feliu S. y Morcillo M., *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera*, Ediciones Bellaterra S.A., España 1982.
- [14] Andrade J.A., Andrade C. y Escudero M.L., *Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón*, Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. XV – núm. 4, 1984.
- [15] Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería UNAM, *Manual de tecnología del concreto (Sección 3)*, LIMUSA S.A., México 1986.
- [16] Feliu S., *Principios de corrosión electroquímica y tipos de ataque*, XI Curso de estudios mayores de la construcción CEMCO'88, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid España 1988.
- [17] ACI Committe 201, Report 201 2R *Guide to Durable Concrete*, American Concrete Institute, Detroit Michigan 1982.
- [18] ACI Committe 222, Report 222 R, *Corrosion of Metals in Concrete*, American Concrete Institute, Detroit Michigan 1989.
- [19] ACI Committe 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit Michigan 1989.
- [20] Pereperéz B., Barberá E. y Andrade C., *La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón*, XI Curso de estudios mayores de la construcción CEMCO'88, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid España 1988.
- [21] Torres A., Sagüés A., *Time prediction for concrete cover cracking due to corrosion of embedded steel*, LATINCORR 98 III NACE Latin American Corrosion Congress y VI Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección, Cancún México 1998.
- [22] Jackson D.R., Islam M., *State of the art technologies por corrosion condition assesment of reinforced concrete structures and a methodology for decision making*, LATINCORR 98 III NACE Latin American Corrosion Congress y VI Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección, Cancún México 1998.
- [23] Malisehv, Nikolaiev y Shuvalov, *Tecnología de los metales*, LIMUSA Editores, México 1994.
- [24] Pickering F.B., *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, Applied Science Publishers, England 1983.

- [25] Llewellyn D.T., *Steels Metallurgy and Applications*, Butterworth-Heinemann Ltd, Great Britain 1992.
- [26] Metals Handbook Volume 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, 10th Edition 1990.
- [27] *Enciclopedia Barsa*, Tomo XIII, Encyclopaedia Britannica, Inc., Estados Unidos de Norteamérica 1971.
- [28] Roberts Austen W., *An introduction to the study of metallurgy*, C. Griffin and Company Ltd, London 1910.
- [29] Leslie W.C., *The Physical Metallurgy of Steels*, McGraw Hill, Tokio 1982.
- [30] Peters A.T., *Producción siderúrgica*, LIMUSA Editores, México 1987.
- [31] Trejo D., Monteiro P., Thomas G. and Wang X., *Mechanical properties and corrosion susceptibility of dual-phase steel in concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 7, pp. 1245-1254, 1994.
- [32] Trejo D., Monteiro P. and Thomas G., *Dual-Phase ferritic martensitic steel for concrete reinforcement*, Proceedings of the fifth (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 177-182, The Netherlands 1995.
- [33] Thomas G., comunicación personal, UANL-FIME-DIMAT, noviembre 1998.
-
- [34] Lizcano C., *Varillas de acero de doble fase resistentes a la corrosión*, Ciclo de seminarios agosto 1998 – enero 1999 Doctorado en Ingeniería de Materiales FIME – UANL, noviembre 1998.
- [35] Cerda O., comunicación personal, HyLSA, marzo 1998.
- [36] Lagneborg R., *Structure – property relationships in dual phase steels*, Proceedings of Seminar held at the Berlin Hilton Hotel, October 1978.
- [37] Davies R.G., *Influence of silicon and Phosphorous on the mechanical properties of both ferrite and dual-phase steels*, Metallurgical Transactions of The American Society for Metals and the Metallurgical Society of AIME, Volume 10A, January 1979, pp. 113-118.
- [38] Repas P.E., *Physical metallurgy of dual-phase steels*, 21st Mechanical Working and Steel Processing Division Conference, October 1979, Cleveland Ohio.

- [39] Petzow G., *Metallographic etching*, American Society for Metals, ASM International, 1978.
- [40] Tödtt F., *Corrosión y protección*, Ediciones Aguilar, Madrid 1959.
- [41] Sprowls P.O., *Planning and preparation of Corrosion tests*, ASM Handbook Volume 13 "Corrosion", ASM International, December 1992.
- [42] Metals Handbook Volume , *Metallographic etching*, ASM International, 10th Edition 1990.
- [43] Grinberg D.M.K. de, *Tratamientos térmicos de los aceros y sus prácticas de laboratorio*, LIMUSA, México 1994.
- [44] Rodríguez P., Ramírez E. and González J.A., *Methods for studying corrosion in reinforced concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 46, No. 167, June 1994.
- [45] Alonso C. y Andrade C., *Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón*, Materiales de construcción, Vol. 37, No. 207, julio/agosto/septiembre 1987.
- [46] Rodríguez P. and González J.A., *Use of the coulostatic method for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 46, No. 167, June 1994.
- [47] González J.A., López W. and Rodríguez P., *Effects of moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete*, Corrosion, Vol. 49, No. 12, December 1992.
- [48] González J.A., Feliú S., Rodríguez P., Ramírez E., Alonso C. and Andrade C., *Some questions on the corrosion of steel in concrete (part I): when , how and how much steel corrodes*, Materials and Structures, Vol. 29, January-Febrary 1996.
- [49] González J.A., Feliú S., Rodríguez P., Ramírez E., Alonso C. and Andrade C., *Some questions on the corrosion of steel in concrete (part II): Corrosion mechanism and monitoring, service life prediction and protection methods*, Materials and Structures, Vol. 29, January-Febrary 1996.
- [50] Castelan W.G., *Fisicoquímica*, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., E.U.A. 1987
- [51] Annual Book of ASTM Standards, part 13, 1977.

- [52] Rodríguez P., *Introducción a la corrosión*, Doctorado en Ingeniería de Materiales de FIME, UANL, 1998.
- [53] Weyers R.E., *Rehabilitation oh chloride contaminated concrete structures using corrosion inhibitor posttreatments*, 6th Iberoamerican congress of corrosion and protection LATINCORR 98, Cancún 1998.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1.1	Efecto exagerado de una carga sobre una viga construida con concreto reforzado.	2
1.2	Esquema que muestra la constitución del concreto reforzado.	2
1.3	Esquema que muestra un sistema de poros en el concreto.	4
1.4	Diagrama que muestra la disposición de una celda electrolítica de corrosión.	7
1.5	Comportamiento de dos metales (a) y (b) en una solución determinada.	9
1.6	Productos de corrosión del acero embebido en el concreto y su efecto en el mismo.	12
1.7	Figura que ilustra la representación esquemática de una celda de corrosión electrolítica en el concreto reforzado.	12
1.8	Diagrama de Pourbaix simplificado para el hierro a 25 °C.	15
1.9	Corrosión en la armadura metálica debida a concreto carbonatado.	16
1.10	Corrosión por picadura de la varilla de acero embebida en concreto por acción de iones cloruro (Cl ⁻).	18
1.11	Modelo de vida útil de una estructura de concreto Reforzado.	21

2.1	Sección de diagrama de fase que muestran la modificación del diagrama Fe-Si-C al adicionar 2.4% de silicio en peso a la aleación.	25
2.2	Microestructura característica de un acero doble - fase.	26
2.3	El esfuerzo de cedencia como función del contenido de silicio en el acero.	27
2.4	Comportamiento de aceros a ambientes corrosivos.	28
2.5	Gráfico que muestra los resultados de pruebas de corrosión en aceros convencionales y aceros doble - fase, de acuerdo a norma ASTM-G1.	29
2.6	Imagen de SEM que muestra la microestructura de un acero doble - fase (DFM steel).	30
2.7	Figura que ilustra los procesos de fabricación de la familia de aceros al silicio involucrada en la evaluación.	32
2.7	Tabla de los aceros en los que se efectuó el tratamiento intercrítico y gráfica del mismo.	33
2.9	Metalografía de acero 1	35
2.10	Metalografía de acero 2	35
2.11	Metalografía de acero 3	35
2.12	Metalografía de acero 4	35
2.13	Metalografía de acero 5	35
2.14	Metalografía de acero 6	35
2.15	Metalografía de acero A1	36
2.16	Metalografía de acero A2	36
2.17	Metalografía de acero A3	36
2.18	Metalografía de acero A4	36

2.19	Metalografía de acero A5	36
2.20	Metalografía de acero A6	36
2.21	Metalografía de acero B1	37
2.22	Metalografía de acero B2	37
2.23	Metalografía de acero B3	37
2.24	Metalografía de acero B4	37
2.25	Metalografía de acero B5	37
2.26	Metalografía de acero B6	37
2.27	Metalografía de acero C1	38
2.28	Metalografía de acero C2	38
2.29	Metalografía de acero C3	38
2.30	Metalografía de acero C4	38
2.31	Metalografía de acero C5	38
2.32	Metalografía de acero C6	38
2.33	Metalografía de acero D1	39
2.34	Metalografía de acero D2	39
2.35	Metalografía de acero D3	39
2.36	Metalografía de acero D4	39
2.37	Metalografía de acero D5	39
2.38	Metalografía de acero D6	39
2.39	Fotomicrografía que muestra la presencia de inclusiones no metálicas en un acero A5.	41
2.40	Fotomicrografía que muestra la presencia de un anillo de ferrita superficial en un acero A4.	42

2.41	Fotomicrografía que muestra la presencia de una grieta superficial debida al proceso de laminación de un acero B3.	42
2.42	Fotomicrografía que muestra la presencia de heterogeneidad en la distribución de fases de un acero C4.	43
3.1	Secuencia de preparación de probetas para pruebas de corrosión acelerada.	41
3.2	Disposición de las muestras de los aceros al silicio en cada una de las soluciones acuosas.	49
3.3	Comportamiento de la familia de aceros grado A durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	57
3.4	Comportamiento de la familia de aceros grado B durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	57
3.5	Comportamiento de la familia de aceros grado C durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	58
3.6	Comportamiento de la familia de aceros grado D durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	58
3.7	Comportamiento de la familia de aceros grado A durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.	59
3.8	Comportamiento de la familia de aceros grado B durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.	60
3.9	Comportamiento de la familia de aceros grado C durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.	60
3.10	Comportamiento de la familia de aceros grado D durante los tres ensayos de corrosión acelerada en solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$.	61

3.11	Muestra de acero B3 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2.	62
3.12	Muestra de acero C6 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2.	62
3.13	Muestra de acero D6 sujeta a prueba de corrosión acelerada en Solución 2.	63
3.14	Aceros seleccionados (indicados en amarillo) para efectuar pruebas electroquímicas de medición de potencial	67
3.15	Probeta acero - mortero utilizada en las pruebas electroquímicas de medición de potenciales de corrosión.	69
3.16	Diagrama que muestra los elementos de las probetas acero - mortero.	70
3.17	Disposición de probetas varilla – mortero sumergidas parcialmente en agua.	71
3.18	Disposición del equipo del Potenciostato – Galvanostato para efectuar las mediciones de potencial en las probetas varilla – mortero.	72
3.19	Imagen que muestra las conexiones a realizarse para efectuar mediciones de potencial en las probetas acero – mortero.	73
3.20	Gráfico que muestra los potenciales en los cuales se desarrollarán distintos grados de corrosión en la varilla de refuerzo de una estructura de concreto reforzado.	74
3.21	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 1.	75
3.22	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 3.	76
3.23	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero 4.	76
3.24	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero A1.	77

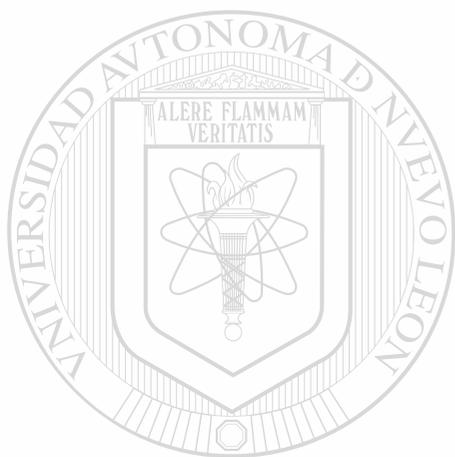
3.25	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero A4.	77
3.26	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero B3.	78
3.27	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero C3.	78
3.28	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero D1.	79
3.29	Gráfica potencial vs tiempo que ilustra el comportamiento para el acero D4.	79
3.30	Acero grado 3 previo al tratamiento térmico de normalizado.	80
3.31	Acero grado 3 después del tratamiento térmico de normalizado.	81
3.32	Acero grado 3 después del tratamiento térmico intercrítico.	81
3.33	Acero grado 3 después del tratamiento térmico intercrítico	81
3.34	Diagrama de probeta acero – mortero para muestras modificadas de acero.	82
3.35	Comportamiento de los aceros modificados expuestos a diferentes sistemas agresivos.	83
4.1	Efecto del silicio en la formación de perlita.	86
4.2	Efecto del silicio en la formación de segunda fase para aceros al silicio con tratamiento térmico intercrítico.	87
4.3	Gráfica que presenta las velocidades de corrosión para las muestras de los aceros expuestos en la Solución 1 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en función del contenido de silicio.	103

- 4.4 Gráfica que presenta las velocidades de corrosión para las muestras de los aceros expuestos en la Solución 2 ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$) en función del contenido de silicio. 104
- 4.5 Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a la Solución 1 y su correspondiente velocidad de corrosión. 105
- 4.6 Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a la Solución 1 y su correspondiente velocidad de corrosión. 106
- 4.7 Gráfico que muestra la relación que existe entre la pérdida de peso de las muestras expuestas a las Soluciones 1 y 2, y su correspondiente velocidad de corrosión. 106
- 4.8 Proceso autocatódico en un proceso de corrosión por picadura. 111
- 4.9 Fotografía que presenta los especímenes del acero C3 embebidos en concreto y utilizados para realizar mediciones de potencial de corrosión. 112
- 4.10 Fotografía que presenta los especímenes del acero D4 embebidos en concreto y utilizados para realizar mediciones de potencial de corrosión. 113

LISTADO DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1.1	Contenidos máximos de cloruros en el concreto para minimizar el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo.	18
2.1	Análisis químico de aceros al Silicio.	33
3.1	Resultados obtenidos del primer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂).	51
3.2	Resultados obtenidos del segundo ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂).	52
3.3	Resultados obtenidos del tercer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂).	53
3.4	Resultados obtenidos del primer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂) y sal común (NaCl).	54
3.5	Resultados obtenidos del segundo ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂) y sal común (NaCl).	55
3.6	Resultados obtenidos del tercer ensayo de corrosión acelerada en solución de hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂) y sal común (NaCl).	56

3.7	Criterio para determinar la espontaneidad o no espontaneidad de un sistema para presentar fenómenos de corrosión.	66
3.8	Proporciones de constituyentes utilizados en la fabricación de mortero para probetas.	68
4.1	Causas responsables de la formación de pilas de corrosión.	108



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Octavio Covarrubias Alvarado

Candidato para el Grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

Tesis: Determinación de propiedades de resistencia a la corrosión de aceros aleados al Silicio y embebidos en mortero

Octavio Covarrubias Alvarado nació en la Ciudad de México el 29 de Enero de 1975. Hijo del Sr. Octavio Covarrubias García y de la Sra. Adela Alvarado Muñoz, radica en la Ciudad de Monterrey N. L. desde 1986.

Curso sus estudios profesionales en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Metalúrgico durante 1997.

En febrero de 1997 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dentro del Plan Doctoral de Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales (DIMAT) de esta misma facultad.

Ha participado en diferentes proyectos de investigación dentro de las áreas de la corrosión y de la fundición. Es catedrático de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica desde 1997.

