

ISSN 0188-7297



Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN EN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE EN CONCRETO CONTAMINADO POR CLORUROS CUANDO SE LE APLICAN ESFUERZOS RESIDUALES

Andrés Antonio Torres Acosta
José Trinidad Pérez Quiroz
Augusto Jorge Ramírez Rentarías
Miguel Martínez Madrid

Publicación Técnica No 287
Sanfandila, Qro 2006

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Estudio de la corrosión en barras de acero
inoxidable en concreto contaminado por
cloruros cuando se le aplican esfuerzos
residuales**

**Publicación Técnica No. 287
Sanfandila, Qro, 2006**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M en C. Augusto J. Ramírez Rentería, M en C. José Trinidad Pérez Quiroz, y el Dr Andrés Torres Acosta, asistente, investigador Titular respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se agradecen los comentarios y sugerencias del M en C. Jorge Terán Guillen, Investigador de la misma Coordinación, y el Dr Miguel Martínez Madrid, coordinador.

Índice

Créditos y agradecimientos	III
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
Capitulo 1 Antecedentes	1
1.1. Bases de la corrosión	1
1.2 Como sucede la corrosión : El proceso electroquímico de la corrosión	1
1.3. Corrosión del acero en concreto	3
1.4. Protección contra la corrosión	4
1.4.1. protección indirecta (concreto)	5
1.4.2. Protección directa del acero	5
1.5. Tipos de aceros inoxidable	5
1.6 Aceros inoxidable austeníticos	6
1.7. Aceros inoxidable en concreto	9
1.8 Análisis de costo de vida útil	10
1.9 Construcciones existentes edificadas con acero inoxidable	10
Capitulo 2 Técnicas físico-químicas para estimar el estado del concreto	17
2.1. Resistividad Eléctrica del concreto	17
2.1.2. Velocidad de pulso ultrasónico de concreto	18
2.2 Técnicas electroquímicas para estimar el estado de corrosión del acero	19
2.2.1. Cinética de la Corrosión	19
2.2.2. Teoría del potencial de media celda	21
2.2.3. Aplicación de potencial de media celda en concreto	22
2.2.4. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	23
2.2.5. Propiedades del capacitor	28
Capitulo 3 Metodología experimental	31
3.1 Dimensiones de las Probetas	31
3.2 Fabricación de las Probetas	31
3.3. Propiedades de las mezclas de concreto	36
3.4 fabricación de las probetas	37
3.5. Métodos de ensayo para el análisis físico del concreto	40
3.5.1. Ensayo de resistencia a la compresión	40
3.5.2. Técnica de la resistividad eléctrica	41
3.5.3. Prueba de pulso ultrasónico	42
3.6 Evaluación del estado de la armadura	43
3.6.1. Técnica de medición del potencial de media celda	43
3.6.2. Técnica espectroscopia de impedancia electroquímica EIE	44
Capitulo 4 Resultados y discusión	49
4.1 Análisis de resultados	49
4.1.1. Resistencia a la compresión	49
4.1.2. Resistividad Eléctrica	52
4.1.3. Velocidad de pulso ultrasónico	54

4.2 Caracterización de acero inoxidable	55
4.2.1. Resultado del estudio químico del acero inoxidable	55
4.2.2. medición de potenciales de media celda	57
4.2.3. espectroscopia de Impedancia electroquímica	64
Capitulo 5 Conclusiones y Recomendaciones	79
5.1. Conclusiones	79
5.2. Recomendaciones	80
6 Referencias	81

Resumen

En la península de Yucatán (México) se ha reportado la existencia del muelle (Progreso) construido en 1937-1941, utilizando acero inoxidable tipo 304 como material de refuerzo, que hasta la fecha se encuentra en buenas condiciones en comparación con otro muelle construido (1960 en el mismo lugar), usando acero de bajo contenido de carbono, el cual se encuentra completamente destruido. En inspecciones realizadas a dicha estructura durante (2003-2004), se observó la presencia de barras de acero inoxidable "304", mostrando éstas signos de corrosión principalmente en los ganchos. Es común que el acero inoxidable tenga problemas de corrosión bajo esfuerzo tomando en cuenta la presencia de cloruros. Al constituirse los ganchos a 90° o 180°, en los extremos de las barras para mejorar la adherencia de éstas en el concreto, se generan esfuerzos de tensión/compresión en el acero. Además, durante las inspecciones realizadas al muelle, se determinaron concentraciones de cloruros de hasta el 2% por peso del concreto, a la profundidad de la barra de refuerzo (10 cm.), lo que hace suponer que el acero inoxidable en esta construcción es susceptible a la corrosión. Por consiguiente, en este trabajo se estudia el comportamiento de acero inoxidable 304 y 316 en concreto contaminado por cloruros, y generando esfuerzos residuales en tensión a las barras mediante ganchos de 90° y 180°; y se compara con resultados de barras rectas sin esfuerzo aplicado alguno. Se describen las pruebas realizadas en este proyecto, las cuales incluyen: la determinación de las propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados (concreto-acero inoxidable), y mediciones electroquímicas realizadas a la varilla de refuerzo de acero inoxidable, con o sin esfuerzo residual.

Palabras clave: acero inoxidable 304 y 316; corrosión; concreto armado; cloruros; ganchos 90° y 180°; durabilidad; resistencia a la polarización; espectroscopia de impedancia electroquímica.

Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales

Abstract

It has been reported the existence of a concrete pier built between 1937 and 1941, located in the Yucatan Peninsula (Mexico), which stainless steel was used as the reinforcement material. The pier is so far in good conditions after 65 years of being placed in service. In comparison another pier built in the 1960's in same location, where carbon steel was used as reinforcement, is totally damaged by corrosion and even is already demolished. During inspections performed to the pier during 2003 and 2004, the stainless steel showed some signs of corrosion at the end where mechanical deformation were made to the bars, also known as hooks. It is common that stainless steel could have corrosion problems under tensile stresses in environments where chlorides are present. When the stainless steel bar ends were deformed to form those hooks (90° or 180°), an improvement of the bar adherence with concrete is achieved, but tension/compression stresses are generated in the bar surface. In same inspections, concentrations of chlorides were determined and values between 1% and 2% by weight of the concrete, at the depth of the reinforcement bar (10 cm.), were obtained. Therefore, the stainless steel bars would be susceptible to stress corrosion cracking due to the residual stresses formed on those hooks. Consequently the aim of this work was to determine the performance of stainless steel 304 and 316 in concrete contaminated by chlorides, where residual stresses were applied by deforming smooth bars into 90° and 180° hooks. The electrochemical results were compared to the performance of straight bars with no residual stresses applied. The tests included the determination of the physical and chemical properties of the materials used (stainless and concrete) and electrochemical measurements of the stainless steel bars with and without residual stresses.

Keywords: Stainless steel 304 and 316, corrosion, armed concrete, chlorides, hooks 90° and 180°, durability, resistance to the polarization, spectroscopy of electrochemical impedance.

Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales

Resumen Ejecutivo

Para la caracterización del acero inoxidable se elaboraron ocho probetas prismáticas con dimensiones de 200 x 100 x 50 mm; Estas probetas alojaron tres barras lisas de acero inoxidable de 9.5 mm de diámetro, y un electrodo de referencia de titanio de 30 mm de longitud. De las tres barras de acero inoxidable, a dos de ellas se les aplicaron esfuerzos residuales de tensión mediante la deformación de éstas en ganchos de 90° y 180°. La tercera barra fue recta, y se colocó longitudinalmente en el prisma sin aplicársele esfuerzo alguno al no deformarse.

El diseño de la mezcla se realizó simulando la estructura del muelle Progreso, en Yucatán, México, el cual tiene una resistencia característica de 25 MPa. La contaminación de cloruros fue de 1 y 2% en peso del concreto, y se seleccionó también en función de los datos recabados en las inspecciones realizadas al muelle de Progreso

Para este diseño y elaboración de los prismas se aplicó un tiempo de curado de 28 días. Una vez curados los prismas se procedió a estabilizar sus propiedades electroquímicas en ambiente de laboratorio con una humedad relativa de 60 a 65%, en un periodo de 75 días. Posteriormente, se colocaron en una cámara de humedad controlada, por un periodo de 200 días, en donde la humedad relativa fue de 85 a 90% con una temperatura promedio de 20 ± 5 ° C, tratando de simular un ambiente marino similar al de Progreso, Yucatán, México.

Las pruebas electroquímicas realizadas fueron la de potencial de media celda, y la de espectroscopia de impedancia electroquímica o EIE. Estas medidas de potenciales se realizaron usando un voltímetro de alta impedancia. Las mediciones de EIE se obtuvieron mediante un potencióstato/Galvanostato/ZRA. Los datos experimentales se simularon utilizando un circuito equivalente, tipo Randles (resistencia en serie con un capacitor en paralelo con otra resistencia). Los parámetros electroquímicos obtenidos por las simulaciones de circuitos equivalentes se compararon entre las barras sin y con deformaciones.

1 Antecedentes

1.1 Bases de la corrosión

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material o de sus propiedades, debido a la acción del medio ambiente que lo rodea (Fontana, 1986). No obstante que otros materiales, además de los metales (madera, plásticos, etc.) pueden corroerse, el término se emplea especialmente al deterioro de metales. Algunas propiedades de los materiales pueden alterarse debido a la corrosión, lo cual suele ocasionar fallas inesperadas. Estos cambios pueden pasar inadvertidos en exámenes visuales y/o cambios de peso.

La causa de que un metal se corroa depende de la cantidad de energía que se le aplica a su mineral base para transformarlo en un metal comercial (Fontana, 1986). La energía calorífica necesaria para extraer los metales de sus compuestos químicos naturales se almacena en el propio metal. Durante el proceso de corrosión, el metal revierte el proceso artificial para regresar a su estado natural. La velocidad de regreso del metal a su estado natural como mineral es directamente proporcional a la cantidad de energía almacenada por él mismo (Fontana, 1986). La cantidad de energía que se requiere y almacena varía de un metal a otro; es relativamente alta en metales como el magnesio, aluminio y hierro; y baja en metales como la plata y el oro; de ahí que la vulnerabilidad a la corrosión es más alta para el magnesio, aluminio y hierro, que para la plata y el oro.

El hierro es un buen ejemplo de este ciclo. La fuente más común de hierro es la hematita (óxido de hierro Fe_2O_3). El producto que resulta de la corrosión del hierro es el óxido; el cual tiene la misma composición química que la hematita. La energía que se requiere para convertir el hierro natural al hierro metálico, se revierte cuando el hierro se corroe para formar el mismo compuesto. Lo único que cambia es la velocidad de la liberación de la energía.

1.2 Cómo sucede la corrosión: El proceso electroquímico de la corrosión

La corrosión metálica puede clasificarse en dos grandes categorías: corrosión seca y corrosión húmeda. La seca tiene lugar con la ausencia de una etapa líquida, o abajo del punto de humedad del ambiente. En este caso, el metal reacciona con los vapores de gases naturales, usualmente a altas temperaturas, formando óxidos secos o escamas (Ávila y Genescá, 1986).

En la corrosión húmeda, el metal reacciona con soluciones acuosas. La corrosión por humedad es la causa de la mayor cantidad del deterioro de materiales. Se ha establecido perfectamente que la corrosión húmeda es regularmente una reacción electroquímica. En la Figura 1.1 se presentan los elementos que forman la celda electroquímica. La reacción electroquímica se define como la reacción química que requiere de transferencia de electrones o que requiere de un proceso de oxidación y reducción (Ávila y Genescá, 1986).

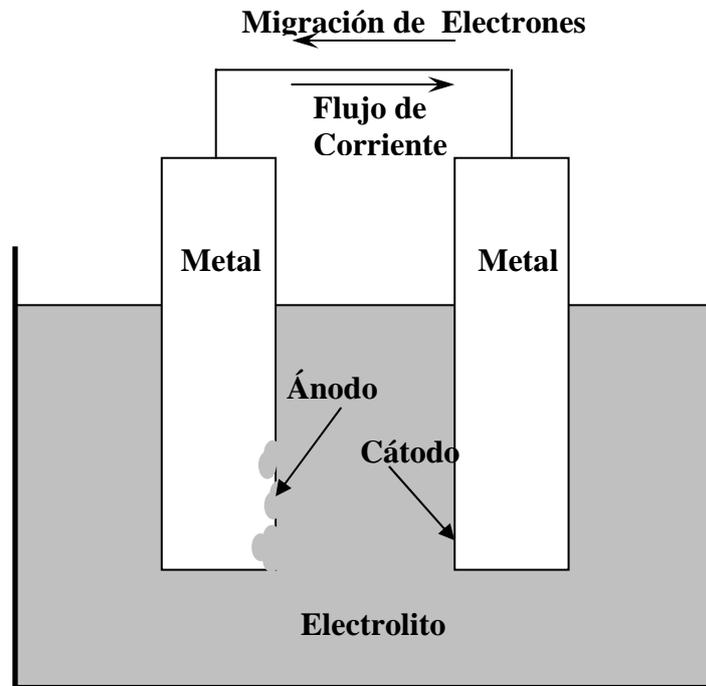


Figura 1.1
Celda electroquímica

Durante el proceso de corrosión, hay un flujo de electricidad desde ciertas áreas de la superficie del metal a otras áreas, a través de una solución (un electrolito) capaz de conducir electricidad. Los electrolitos conducen la electricidad debido a la presencia de iones, los cuales son átomos o grupos de átomos cargados positiva o negativamente en una solución. El término ánodo describe la superficie del metal desde la cual la corriente deja el metal para entrar a la solución; y ésta es el área donde la corrosión o disolución del metal se lleva a cabo (Ávila y Genescá, 1986).

El cátodo es la superficie del metal en la que la corriente deja la solución, y regresa al metal; no hay disolución del metal en el cátodo. El circuito se completa a través del metal mismo o afuera de la solución, mediante un conductor que une dos piezas del metal (Ávila y Genescá, 1986).

La oxidación o reacción anódica está marcada por el incremento en la valencia o en la producción de electrones. La disminución de la carga de valencia o el consumo de electrones significa una reducción, o reacción catódica. Las dos reacciones ocurren simultáneamente y a la misma velocidad en la superficie del metal. La velocidad de oxidación equivale a la velocidad de

la reducción (producción y reducción de electrones). En algunas reacciones corrosivas, la oxidación se produce uniformemente en la superficie; mientras que en otros casos, ésta es localizada (ocurre en un área específica).

1.3 Corrosión del acero en concreto

En la actualidad y desde hace tiempo, el material más utilizado en la industria de la construcción es el concreto, cuyo consumo supera al de todos los materiales de construcción. La mayoría de las estructuras de concreto está reforzada con varillas de acero, y la corrosión de estos refuerzos es la causa principal del deterioro de las mismas en ambientes marinos (Torres Acosta, 2001).

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se consume una capa de la superficie del acero, y se forma una capa de productos de corrosión (óxido, Fe_3O_4 , o hidróxido de hierro, $\text{Fe}(\text{OH})_2$) en el perímetro de la barra. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero; esto propiciará la formación de grietas y desprendimientos del concreto. Dichas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero, y potencialmente, la resistencia del elemento estructural (Torres Acosta y Martínez Madrid, 2001). En la Figura 1.2 se puede observar en detalle, el proceso de corrosión del acero en concreto.



Figura 1.2
Representación esquemática del proceso electroquímico de corrosión de las armaduras en el concreto

Las primeras observaciones sobre la corrosión de acero en concreto se hicieron a principios de este siglo, principalmente en ambientes marinos y plantas químicas. Sin embargo, fue hasta la segunda mitad de este siglo cuando el estudio sistemático de la corrosión de los refuerzos metálicos en concreto llegó a ocupar un papel importante en las investigaciones a nivel

mundial por la ocurrencia del problema en muchos tipos de estructuras, y por lo elevado de los costos de reparación. La corrosión del acero en concreto se considera como uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad de las obras civiles, puentes, túneles, carreteras y puentes del país (Pérez Quiroz, 2001).

Los elementos del concreto reforzado (varilla, cemento Portland, arena, grava y agua) le confieren propiedades excelentes a éste tales como: resistencia a la compresión y a la tensión. La elevada alcalinidad de concreto (pH entre 12.5 y 13.5) y resistividad eléctrica (en concreto sano de 100,000 Ohm-cm) proporcionan condiciones ideales para alcanzar la pasividad (protección) del acero. La corrosión del acero de refuerzo en concreto no se presenta, a menos que un agente externo al medio (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_2 , SO_2) modifique el estado pasivo normal de ese medio alcalino (Pérez Quiroz, 2001).

El ión cloruro causa el rompimiento de la condición pasiva normal del acero en concreto, y da como resultado el desarrollo de la corrosión. El umbral de cloruros que puede iniciar corrosión, se ha estimado en una concentración de 710 ppm (para un pH=12.5). Por arriba de esta concentración la película fallará irremediablemente. El ataque de los cloruros en acero embebido en concreto, como un proceso electroquímico donde el agua está presente funcionando ésta como un electrolito y proporcionando oxígeno que se reducirá en el cátodo. El ión cloruro ataca al acero formando FeCl_2 . Y en una reacción secundaria se forma $\text{Fe}(\text{OH})_2$, dejando al ión Cl^- libre para atacar nuevamente (Pérez- Quiroz, 2001).

Otra forma de ataque por corrosión a la varilla de refuerzo es el fenómeno que comúnmente se le denomina carbonatación. El CO_2 es un agente presente en la atmósfera; y puede actuar sobre el concreto formando CaCO_3 , que provoca la reducción de la alcalinidad del concreto (pH<12.5). La parte esencial del proceso la desempeña el CO_2 , por lo que éste recibe el nombre de carbonatación. El dióxido de carbono reacciona con los iones alcalinos que conforman al concreto para producir carbonatos; el pH del medio se ve disminuido y se presenta la corrosión. La característica de este proceso es la aparición de una banda que representa dos zonas con valores de pH diferentes; por lo general, una zona de pH<9 (zona carbonatada) y otra de pH>12 (zona alcalina) (Pérez Quiroz, 2001). La existencia de carbonatación en los concretos se determina usando un indicador (fenolftaleína). La difusión del $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ es diferente tanto en agua como en aire; en el agua es 10^4 , más lenta que en aire. Por tanto si los poros están secos, el $\text{CO}_{2(\text{gas})}$ difundirá rápidamente pero no reaccionará debido a la falta de agua; si están saturados la difusión será muy baja, y se presentará muy poca carbonatación; pero si los poros están parcialmente saturados, la carbonatación ocurrirá fácilmente (Pérez Quiroz, 2001).

1.4 Protección contra la corrosión

Los métodos para proteger las estructuras nuevas consisten en la elaboración de un concreto que funcione como una barrera física y química contra los agentes agresivos del ambiente, ya que no existe una mejor

protección del acero de refuerzo que la formación de una película pasiva formada por la hidratación del cemento.

Las formas de proteger y controlar la corrosión se basan en apartar algunos de los elementos que generan la corrosión (ánodo, cátodo, conductor, iónico, conductor eléctrico). Se han utilizado varios métodos para proteger de la corrosión al acero embebido en el concreto, como por ejemplo pinturas o revestimientos para el acero o el concreto (Durar, 2000). Los métodos más utilizados para prevenir y atacar el problema de corrosión en concreto, son los siguientes:

1.4.1 Protección indirecta (concreto)

- Inhibidores
- Revestimientos
- Recubrimientos
- Recalaminización electroquímica
- Extracción electroquímica de los iones cloruro

1.4.2 Protección directa del acero

- Protección catódica
- Recubrimientos epóxicos
- Recubrimiento galvanizado
- Reemplazo del acero por un material más resistente a la corrosión como acero inoxidable o materiales compuestos

Este último método de la lista es el que se considerará en el presente proyecto de investigación, reemplazando el acero convencional con acero inoxidable.

1.5 Tipos de acero inoxidable

La familia de aceros inoxidables esta clasificada y realizada por AISI (cuyas siglas en inglés significan, *American Iron and Steel Institute*, Instituto Americano del Hierro y el Acero), como se puede observar en la Tabla 1.1.

- Acero Inoxidable austenítico, designaciones AISI 200 y 300
- Acero Inoxidable ferrítico, designación AISI 400
- Acero Inoxidable martensítico, designaciones AISI 400 y 500
- Acero Inoxidable endurecido por precipitación, designación XX-XHP

Para el último grupo de aceros, los dos primeros números de la designación representan el contenido de cromo en %; la tercera cifra indica el contenido de níquel; y las letras HP, el tipo de acero (por sus siglas en inglés "Hardening Precipitation"), endurecidos por precipitación.

En cada uno de los cuatro tipos principales de aceros inoxidables, existe una composición química que representa la aleación base de la familia (tabla

1.1). Las demás aleaciones del grupo se derivan de esta aleación base, con variaciones específicas de composición para impartir propiedades específicas.

Tabla 1.1
Clasificación y características de los aceros inoxidables (AISI)

Tipos de aceros inoxidables				
Tipo	Composición	Microestructura	Propiedades mecánicas	Propiedades físicas
Austenítico	15-27%Cr, 8-35%Ni, 0-6% Mo, Cu, N	Austenita	<ul style="list-style-type: none"> • R Tensión: 490-860 MPa • R Cedencia: 205-575 MPa • Elong 50mm: 30-60% 	<ul style="list-style-type: none"> • No tratable térmicamente • No magnético
Ferrítico	11-30%Cr, 0-4%Ni, 0-4%Mo	Ferrita	<ul style="list-style-type: none"> • R Tensión: 415-650 MPa • R Cedencia: 275-550 MPa • Elong 50mm: 10-25% 	<ul style="list-style-type: none"> • No tratable térmicamente • Magnético • Buena resistencia a CAE por cloruros
Martensítico	11-18%CR, 0-6%Ni, 0-2%Mo	Martensita	<ul style="list-style-type: none"> • R Tensión: 480-1000 MPa • R Cedencia: 275-860 MPa • Elong 50mm: 14-30% 	<ul style="list-style-type: none"> • Endurecible por tratamiento térmico • Alta resistencia
Dúplex	18-27%Cr, 4-7%Ni, 2-4%Mo, Cu, N	Austenita y Ferrita	<ul style="list-style-type: none"> • R Tensión: 680-900 MPa • R Cedencia: 410-900 MPa • Elong 50mm: 10-48% 	<ul style="list-style-type: none"> • No tratable térmicamente
Endurecible por precipitación	12-28%Cr, 4-25%Ni, 1-5%Mo, Al, Ti, Co	Austenita y Martensita	<ul style="list-style-type: none"> • R Tensión: 480-1000 MPa • R Cedencia: 275-860 MPa • Elong 50mm: 14-30% 	<ul style="list-style-type: none"> • Endurecible por tratamiento térmico • Muy alta resistencia

1.6 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros austeníticos son el grupo de aceros inoxidables más usados en la actualidad. Su fabricación ha llegado a representar el 70% de la producción mundial de inoxidables en los últimos años, y dentro de este porcentaje, los de la serie 300 son los que mayormente se fabrican. Su posición dominante dentro del grupo de aceros inoxidables se debe, por un lado a su alto nivel de fabricación, y a su excelente resistencia a la corrosión, tanto a temperatura ambiente como a altas o bajas temperaturas (criogénicas), pues son más inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica, y a ciertos ácidos que los correspondientes a los martensíticos y ferríticos; y por otro, a la variada combinación de materiales específicos que se puede lograr con pequeñas variaciones de su composición química, proporcionando una amplia variedad de materiales para un gran número de aplicaciones. Los aceros inoxidables austeníticos son básicamente aleaciones ternarias Fe-Cr-Ni (Van Vlack, 1980).

La aleación base de los aceros austeníticos es el tipo 302; el cual se ha modificado para formar una familia de 22 aleaciones (Figura 1.3). El tipo 304 es la aleación más producida de la familia, encontrándosele en una amplísima variedad de aplicaciones. Su disminución del contenido de carbono a un máximo de 0.08% reduce la tendencia a la precipitación de carburos y mejora la soldabilidad. Para reducir aún más la tendencia a la precipitación, se ideó la versión 304L, con sólo 0.03% de carbono como máximo. Aunque el grado 304L

reduce la precipitación de carburos de cromo durante el enfriamiento, existen problemas potenciales, mucho más serios, como soldar con pasadas múltiples o en servicio a temperaturas de 500 °C. Para evitar esto, se crearon los grados 321, con Ti, y 347, con Nb y Ta. En ambas aleaciones precipita un carburo diferente al de cromo; de manera que este metal se mantiene en solución, y la aleación conserva su resistencia a la corrosión. La adición de molibdeno a la aleación 304 dio origen a la aleación 316, que posee una elevada resistencia mecánica a altas temperaturas. El grado 301 se usa en aplicaciones a temperatura ambiente, que requieren buena formabilidad y de buen endurecimiento por deformación. En este sentido, el acero 201 es un sustituto satisfactorio para el 301; pero donde son esenciales la habilidad al maquinado y las características de formado es más deseable el tipo 202. El tipo 309 y los grados 310 y 314 son aleaciones con alto contenido de cromo y níquel, que se usan principalmente en aplicaciones de alta temperatura (Honeycombe, 1984).

Los aceros inoxidable austeníticos (Figura 1.3) pueden ser al cromo-níquel (serie 300), o al cromo-níquel-manganeso (serie 200). Son esencialmente no magnéticos en la condición de recocido, y no endurecen por tratamiento térmico. Estos aceros no pueden ser templados y revenidos ni recocidos en la forma ordinaria, debido a que en cualquier estado y a cualquier temperatura están constituidos fundamentalmente por austenita, que tiene gran estabilidad y no se transforma por el enfriamiento rápido en otros constituyentes; por tanto, en estos aceros el temple no se puede producir. Pueden trabajarse fácilmente en caliente o en frío, y endurecerse en forma rápida por trabajado cuando se toman precauciones mecánicas y en esta condición, el acero puede llegar a ser ligeramente magnético. Son muy resistentes al impacto, pero difíciles de maquinar a menos que contengan azufre o selenio (grado 303 y 303Se). Los aceros austeníticos son en general los que tienen la mejor resistencia a alta temperatura y a la corrosión (Incharuza, 1981).

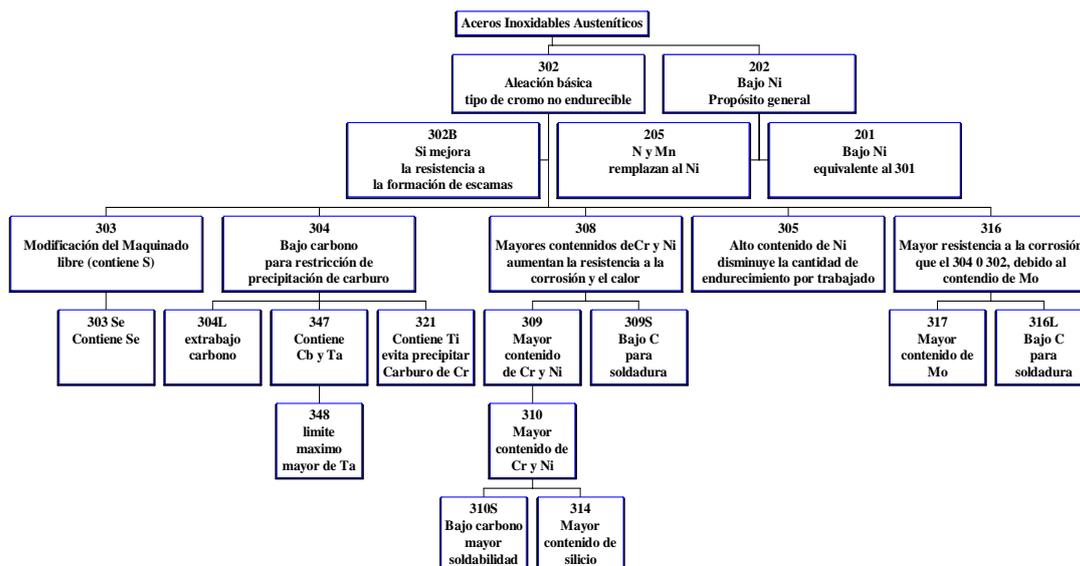


Figura 1.3
Familia de Aceros Inoxidables Austeníticos (Incharuza, 1981).

Aunque los aceros inoxidables austeníticos fueron desarrollados para obtener una alta resistencia a la corrosión, sus excelentes propiedades mecánicas son tan importantes como su resistencia al ataque de los medios agresivos, sobre todo porque, con pequeñas variaciones en la composición pueden aportar un amplio intervalo de propiedades, para una gran variedad de aplicaciones.

A temperatura ambiente, los aceros austeníticos pueden tener una resistencia a la cedencia que va de los 210 a los 1000 MPa, dependiendo de la propiedad de trabajado en frío, y de su composición específica. Además, poseen una buena ductilidad y tenacidad, aun a altos niveles de deformación (Inchaurza, 1981).

Los aceros austeníticos también se emplean en las condiciones de trabajado en frío, debido a que conservan alta ductilidad y tenacidad con altos esfuerzos de cedencia. La tenacidad y la resistencia a la fatiga son muy importantes en los aceros austeníticos, debido a que los utilizan mucho en aplicaciones estructurales, especialmente cuando han sido endurecidos por trabajado en frío. Los ensayos de Charpy con muesca en V a temperatura ambiente, muestran que los aceros en condición de recocido pueden absorber una gran cantidad de energía; y que aún después del laminado en frío, presentan una tenacidad excelente (Reed-Hill, 1986). Además de esto, se ha demostrado que la resistencia a la tensión en la dirección transversal al laminado es aproximadamente el 60% de la resistencia a la tensión en la dirección longitudinal. Debido a que las altas resistencias se obtienen por trabajado en frío, los procesos de fabricación de aceros inoxidables austeníticos que emplean calor tienen que ser cuidados escrupulosamente, en especial las operaciones de soldado (Inchaurza, 1981).

Los costos de los aceros inoxidables dependen principalmente de su composición química; el incremento del contenido de la aleación eleva el precio del material (Nurnberger, 1996). La Tabla 1.2 presenta los costos de los metales más utilizados en construcción.

Tabla 1.2
Comparación de costos en dólares americanos de diferentes tipos de metales utilizados en construcción (McDonald et al, 1995; Basham, 1999).

Tipo	Acero inoxidable	Cladding	Acero cubierto con Epoxico	Galvanizado	Acero al carbón
Costo * (\$/kg)	3.5	1.3	0.7	1.1	~0.5

* Solo costo de material y puede variar en diferentes partes del país.

1.7 Aceros inoxidable en concreto

Todos los aceros inoxidable contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidable. Muchas aleaciones inoxidable contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Estos elementos se incorporan al acero en estado de fusión para hacerlo "inoxidable" en toda su masa; por este motivo los aceros inoxidable no necesitan ser chapeados ni pintados, y no requieren ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión.

Aunque también dichos aceros se oxidan, en vez de óxido común, se forma en la superficie una delgada película de óxido de cromo, muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidable, se forman inmediatamente al combinarse el cromo con el oxígeno del ambiente (Smith, 2001).

Debido a la resistencia a la corrosión del acero inoxidable, se tiene una vida de servicio larga si se compara con el acero al carbono. Aunque el acero inoxidable tiene un costo inicial elevado, el costo de su vida útil es más bajo al reducir el costo de futuros trabajos de mantenimiento y de remplazo. (Smith, 2001).

El uso de los aceros inoxidable en construcción ocupa un lugar cada vez más importante en esta industria, principalmente en los países más desarrollados. El primero que mencionó que el hierro fuertemente aleado con el cromo volvía a éste más resistente contra los ácidos y esa resistencia crecía en función del contenido de cromo, fue el francés Berthier, en 1821. (Colombier, et al, 1968). A finales de los ochenta (Sorensen et al, 1990) apoyado en pruebas potencioestáticas, con contenidos de cloruros críticos, entre 5 y 8% para los aceros inoxidable AISI 304 y AISI 316 respectivamente, obtuvo muy buenos resultados para estos aceros inoxidable en concretos, no registrando daños por corrosión.

A principios de los noventa (Pastore, 1991) basó su investigación en la utilización de un duplex de acero inoxidable austenítico-ferrítico (23Cr4Ni) en concreto. Este acero dio como resultado una buena resistencia a la corrosión localizada, similar a la de los aceros inoxidable austeníticos AISI 304 y AISI 316. Además reportó condiciones completamente pasivas después de 18 meses de pruebas. Las probetas contenían 3% de cloruros con base en peso del cemento.

En 1998, Pedferri realizó pruebas a probetas de concreto con 350 kg/m³ de cemento Portland, con una relación a/c= 0.55, 1900 kg/m³ de agregado, e incorporando concentraciones de cloruro de 6% con base en el contenido de cloruro de calcio al agua de la mezcla. Las probetas se elaboraron con diferentes barras de acero inoxidable, acero al carbón y acero galvanizado expuestos al ambiente. Los aceros inoxidable austeníticos (AISI 304 y 316) y ferrítico (AISI 430) mostraron una condición pasiva en el concreto a 6% de cloruros totales con base en el peso de cemento, y para el acero al

carbón con una concentración de 1% de cloruros es suficiente para provocar el ataque por corrosión (Pedefferri, et al 1998).

1.8 Análisis del costo de vida útil

De acuerdo con una comparación directa del costo del material de refuerzo el acero inoxidable es una opción rentable, ya que un análisis económico detallado considerando los costos del ciclo de vida total de la estructura, incluyendo los relacionados con reparaciones, mantenimiento, administración, honorarios de consultas y alteraciones quebrantadoras del tráfico; además se deben considerar los requerimientos del diseño para la durabilidad (por ejemplo, los parámetros para el recubrimiento de concreto; el diseño de la mezcla y la ejecución del vaciado del concreto. (Knudsen, et al, 1998). Debido al costo del acero inoxidable, es una alternativa atractiva sustituir el acero al carbono por acero inoxidable. Esta alternativa se puede llamar “uso selectivo” del acero inoxidable.

Un análisis realizado, para la construcción del puente Schaffhausen en Suiza (Tabla 1.3), en el cual se estimó una pérdida de vida útil de 80 años, se analizaron tres tipos de materiales: a) acero al carbón, AC. b) acero al carbón cubierto con epóxico, ACE; c) acero inoxidable, AI. Para determinar cual sería el costo total para cada tipo de material, tomando en cuenta la tasa de inflación que era del 3.5%. Otro factor que se consideró fue el tiempo de inactividad, por mantenimiento, que fue de 120 días; esto es, el tiempo que tenía que estar inactivo el puente por causa del reemplazo de los materiales.

El costo del AI con respecto al AC es 10.8 veces más costoso; mientras que el ACE con respecto al AI es 2.8 más elevado; los costos de instalación para ambos casos son iguales. Las ventajas de la utilización se obtienen al momento en que el puente necesita el reemplazo de las secciones de acero, que es donde el costo en la vida útil aumenta; para el caso del AC el costo es de 185,005 dls; para el ACE es de 55,502 dls; y para el AI es de ~102 dls.

Dando como resultado y suponiendo que su ciclo de vida útil que es de 80 años, el costo sería de 13.064.094 dls. Con AC, para ACE de 12.951.856 y con el empleo del AI sería de 11.335.295 dls. Lo que representa la mejor opción en el material utilizado para la construcción del puente Schaffhausen. (Knudsen et al, 1998 y Yunovich et al, 2003).

1.9 Construcciones existentes edificadas con acero inoxidable

La Tabla 1.4 muestra algunos ejemplos de estructuras de concreto construidas con acero inoxidable. A inicios de los 80's, para asegurar un largo periodo de vida útil de servicio, se seleccionaron barras de acero inoxidable de

Tabla 1.3
Costo de vida útil, análisis del caso (Euro Inox, 1997)

Unidad: Bridge at Schaffhausen, Switzerland			
Material 1: Acero de carbón (AC)			
Material 2: Acero al carbón cubierto con epóxico (ACE)			
Material 3: Acero inoxidable(AI)			
Tasa y Duración			
Costeo de capital		9%	
Tasa de inflación		3.5%	
Duración deseada del ciclo de vida		80 años	
Tiempo de inactividad por mantenimiento/reemplazo		120 días	
Valor de la pérdida por producción		36.1 \$/día	
Verdadera Tasa de Interés		5.31 %	
Costos Iniciales			
Costo del material(\$ dils)	AC	ACE	AI
Placa, Hoja	0	0	0
Tubo, Accesorios	0	0	0
Barra y otros (bienes consumibles, accesorios)	5 918	22 685	64 000
Costos de fabricación e instalación (\$) dils.			
Recorte, soldadura, formación, etc	0	0	0
Asamblea e instalación	11 271 397	11 271 397	11 271 397
Otros costos de instalación (\$) dils.			
Protección superficial	0	0	0
Habilidades especiales de trabajo, etc	0	0	0
Gastos de operación			
Costos de mantenimiento (\$) dils.			
Costo por evento (\$)dils.	0	0	0
Tiempo transcurrido entre cada evento(Años)	25	25	80
Costos por reemplazo (\$)dils.			
Gastos de retiro por evento (\$)dils.	0	0	0
Material y gastos de instalación por evento (\$)dils.	500 346	150 104	0
Valor residual de material por evento (\$)dils.	0	0	-6 400
Tiempo transcurrido entre evento(Años)	25	25	0
Otros costos de instalación (\$)dils.			
Costo anual (\$)dils.			
Resumen del análisis del ciclo de vida de la producción			
Descripción			
Costo de Material (\$)dils.	5 918	22 685	64 000
Costo de Fabricación (\$)dils.	0	0	0
Otros Costos de Instalación (\$)dils.	11 271 397	11 271 397	11 271 397
Costos Iniciales (\$)dils.	11 277 315	11 294 082	11 335 397
Mantenimiento (\$)dils.	0	0	0
Reemplazo (\$)dils.	185 005	55 502	-102
Pérdida en la producción (costo indirecto \$) dils.	1 601 774	1 601 774	0
Otros materiales (\$)dils.	0	0	0
Costos de operación (\$)dils.	1 786 779	1 657 276	-102
Total CVU (\$)	13 064 094	12 951 856	11 335 295

316 y 304 como refuerzo para restaurar un edificio frente al mar, y construir paneles de concreto prefabricado para el Banco Tamesis Wapping, Reino Unido (Haynes, 1984). En 1984, el Departamento de Transporte de Michigan usó barras de acero inoxidable tipo 304 en un puente que se encuentra en el norte de Detroit; y en 1993 dentro de una inspección realizada al puente dio

como resultado que las barras de acero inoxidable se encontraban en buenas condiciones (MacDonald et al, 1995).

Una de las más importantes aplicaciones del acero inoxidable utilizado como refuerzo en el concreto, está en el muelle de Puerto Progreso, en la península de Yucatán, México (Figura 1.4). Este muelle fue construido entre 1937 y 1941 por la compañía danesa Christiani & Nielsen publicándose ya varios trabajos relacionados con esa estructura que al momento no ha presentado problemas de corrosión alguno (Castro, et al 2002, Torres Acosta, et al 2005).

Tabla 1.4
Aplicaciones típicas del acero inoxidable en construcción (Neuhart B, et al 2000)

Localización	Estructura	Tipos de acero	Año de construcción
Yucatán, México	Puerto	304 Barras redondas	1937-1941
Detroit, Michigan	Puente cubierto	304 Refuerzo (33ton)	1985
Trenton, New Jersey	Nueva rampa de la Avenida Bridge en I-295	304 refuerzo	1985
Oregon	Carretera de cala de cepillo	316LN rebar (>75tons)	1998
New Jersey	Nueva rampa del jardín del Estado Parkway	304 refuerzo (165 ton)	1998
Oregon	Puente del río Smith	316LN refuerzo (125 ton)	1998
Ontario, Canada	Santa Iglesia puente 401	316LN Refuerzo (150 ton)	1999
Oregon	Puente Haynes de Cenagal	304 refuerzo (>400 ton)	2002-2003
Cradlewell, UK	Losa de un paso subterráneo	316 refuerzo (240 ton)	1995
Switzerland	Puente Schaffhausen	304 y 2205 refuerzo (13 ton)	1995
Sydney, Australia	Restauración del patio delantero del Sydney Opera House	316 refuerzo (14tons)	~1990
UAE. and Qatar	Escollera en instalaciones de puerto	316 refuerzo (25tons)	1998

Aunque ningún trabajo de reparación o mantenimiento mayor se habían llevado a cabo después de 64 años de servicio, el muelle se encuentra en la actualidad en buenas condiciones y no muestra señal visible de deterioro por corrosión; como se reportó durante las evaluaciones que el personal del IMT, en conjunto con el CINVSTAV, Unidad Mérida, y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Yucatán, han realizado en los últimos cuatro años. En contraste con la excelente condición del acero inoxidable de este muelle, una ampliación dentro del mismo muelle pero con acero al carbón construido en los años 70's ya estaba fuera de servicio, debido a la corrosión (Figura 1.5).

Durante las inspecciones de este grupo se pudo estimar la contaminación de cloruros, que estuvo entre 1 y 2% por peso del concreto (Torres Acosta, et al 2002), siendo éstos valores los que en la literatura

pronostican que el acero inoxidable en concreto puede iniciar su corrosión (Castro et al, 2003).



Figura 1.4
Vista del muelle de Progreso.

Durante las actividades de inspección en el viaducto del muelle, se encontraron evidencias que indicaron la posición de las barras de acero inoxidable; las cuales se localizaban únicamente en el perímetro de los cabezales (vigas), y que servían estos como acero para evitar las contracciones del concreto por temperatura (Christensen, 1954). Por ello, el IMT y su equipo de trabajo se dieron a la tarea de ubicar las barras, habiendo encontrado que efectivamente, las barras se localizaban perimetralmente en los cabezales (Figura 1.5). Pero también se observó que dichas barras poseían dobleces en los extremos de éstas formando ganchos de 90 y 180 grados con la horizontal (Figura 1.6) y que en estas regiones la barra se encontraba corroída según muestra la Figura 1.6.

Es por esto que surgió la duda si esta corrosión se produjo cuando la barra estaba dentro del concreto, o cuando ésta fue expuesta al exterior, producto del impacto de un barco a este cabezal.

Fontana, 1988 ha demostrado que el acero inoxidable es propenso a corroerse cuando se encuentra en un ambiente rico en cloruros y además sometido a esfuerzos residuales en tensión, creándose así un fenómeno que en el área de corrosión se conoce como "Stress Corrosion Cracking" o corrosión bajo esfuerzos. Este sería el caso que presenta la Figura 1.6, en donde el concreto contaminado por cloruros y/o el ambiente marino prevaleciente fuera del concreto, y el gancho que genera esfuerzos en tensión residuales produjeron la corrosión.



Figura 1.5
Detalle del cabezal donde se muestran cinco de las barras



Figura 1.6
Detalle de una de las barras expuestas (fuera del concreto), en donde se observa corrosión en el gancho o dobles

La mayoría de las investigaciones con barras de acero inoxidable (tipos 304 o 316) en ambientes alcalinos, utilizan regularmente estas barras libres de esfuerzos en tensión (tensión directa o producido por esfuerzos residuales), y se ha encontrado que tales materiales son muy resistentes a la corrosión en medios altamente contaminados por cloruros (entre 1 y 2% por peso del concreto), ya sea con probetas expuestas en laboratorio o a un ambiente marino real (Millano V; Castro P). Pero ninguna investigación se ha realizado a la fecha que contemple, además del ambiente agresivo por cloruros, el efecto de esfuerzos residuales como los presentes en zonas de dobles en barras de acero inoxidable (Figura 1.6).

Es por esto que este trabajo pretende resolver este tema con un trabajo experimental con probetas de concreto contaminadas con cloruros, y en donde se coloquen barras de acero inoxidable (tipos 304 y 316) que tengan las mismas características que las barras encontradas en el muelle de Progreso (aplicación de esfuerzos residuales por los dobleces de éstas).

Para la evaluación del proceso de corrosión en la superficie de los aceros inoxidables, se requiere de técnicas que determinen lo más exacto posible el inicio, propagación y susceptibilidad del material, a sufrir corrosión localizada por picadura, y su tendencia a estado pasivo; fenómeno que aun no ha sido claramente definido en el caso de concreto, por causa de limitaciones de las técnicas convencionales empleadas.

Actualmente, son escasas las investigaciones realizadas en la materia, por lo que resulta relevante indagar sobre la estabilidad de la película pasiva, basado principalmente en un estudio comparativo de técnicas electroquímicas; entre las cuales se empleará la espectroscopia de impedancia electroquímica, técnica que permite distinguir entre los diferentes procesos en la interfase metal/concreto, los cuales se explicarán en capítulos siguientes.

2 Técnicas físico-químicas para estimar el estado del concreto

2.1 Resistividad eléctrica del concreto

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Su unidad de medida es el $k\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$. Depende en gran medida del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Está en función de variables tales como el tipo de cemento; las adiciones inorgánicas; la relación agua/cemento; la porosidad de la estructura; entre otras.

Debido a que la resistividad es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero en el concreto (DURAR, 2000), actualmente se ha incrementado el interés por determinar esta propiedad intrínseca del concreto. Concreto saturado con agua, normalmente tiene una resistividad del orden de 10 $k\Omega\text{-cm}$ (DURAR, 2000).

El objetivo de este ensayo es determinar la resistividad eléctrica del concreto armado en el laboratorio, para localizar áreas en las que la armadura pudiera no estar pasiva, y por tanto susceptibles de corroerse si se dieran las condiciones necesarias de oxígeno y humedad, (Feliz, et al; Y Wenner, et al, 1996).

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede considerarse despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que es factible utilizar como criterio general (DURAR, 2000):

Valor	Criterio
$\rho > 200 k\Omega\text{-cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 k\Omega\text{-cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 k\Omega\text{-cm}$	Alto riesgo

2.1.2 Velocidad de pulso ultrasónico del concreto

La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del concreto, hasta que es detectado por el receptor. Aquí, el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda.

La velocidad de pulso ultrasónico en el concreto es un ensayo no destructivo, que tiene como objetivo principal.

- a) Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del hormigón
- b) Detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras, y otras imperfecciones
- c) Monitorear las variaciones de las propiedades del hormigón a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

Tales parámetros pueden emplearse para comparar variaciones en la composición de distintos tipos de concreto, teniendo que considerar los siguientes factores:

- Distancia entre las superficies de contacto del transductor
- Posición del refuerzo, particularmente en la dirección de la propagación de la onda
- Densidad del concreto, que depende del trazo y de las condiciones de fabricación
- El tipo y densidad de los agregados
- Tipo de cemento y de grado de hidratación
- Edad del concreto

2.1.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto corresponde a la tensión máxima (de ruptura general) de compresión axial, en MPa, que puede soportar un testigo cilíndrico de diámetro igual, o tres veces superior al tamaño máximo nominal (TMN) del agregado. La relación entre la altura (h) y el diámetro (ϕ) del testigo debería ser $h/\phi = 2$, y deseable que nunca sea $h/\phi < 1$, retirado de lugares estratégicos de una estructura, preparado y roto en condiciones normales de un laboratorio.

El objetivo de esta prueba es el determinar la resistencia a la compresión del concreto. Considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica.

Las dimensiones de los testigos a utilizar deben cumplir lo siguiente:

- Siempre que sea posible los testigos deben guardar la relación altura / diámetro igual a dos. Pueden aceptarse testigos con $(h/\phi) \geq 1.00$, aunque se tendrán que multiplicar los resultados por factores de forma, según ASTM C-42.
- El diámetro debe siempre ser igual o superior a tres veces la dimensión del agregado grueso utilizado en la confección del concreto.
- No son admitidos testigos con altura (longitudinal) inferior a su diámetro.

Con base en la durabilidad; el valor de la resistencia mecánica por sí sólo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación a/c ; la dosificación; el tipo de cemento; el espesor de recubrimiento de la armadura; etc. Sin embargo, en general se acepta que concretos de elevada resistencia (> 45 MPa) son durables, y que hormigones por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad (NRB 5739, 1980).

2.2 Técnicas electroquímicas para estimar el estado de corrosión del acero

2.2.1 Cinética de la corrosión

La cinética estudia la velocidad con que ocurre un proceso de corrosión; se refiere también a, qué cantidad de metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado.

En electroquímica, el flujo de electrones generado en las reacciones de disolución (oxidación), que es igual al flujo de electrones consumidos en la reacción de reducción, se llama densidad de corriente de intercambio i_0 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), siendo ésta una característica de un metal en equilibrio. Para ilustrar esto más claramente, se ejemplifica con una placa de cobre sumergida en una solución que contiene iones cobre (Figura 2.1), la solución no contiene oxígeno disuelto. Bajo estas condiciones, la pieza de cobre no se corroerá. Esto se debe a que el cobre es más noble que la reacción de desprendimiento de hidrógeno. Aparte del hidrógeno iónico no existe otro reactivo más catódico en ese medio, por tanto el cobre establece un equilibrio del tipo:



Aún cuando el cobre se encuentra en equilibrio (no existe corrosión), es importante hacer notar que el sistema no permanece estático, sino dinámico; existen reacciones de oxidación donde el cobre se disuelve y reacciones de reducción donde los iones Cu^{2+} se depositan como metal.

Estas reacciones ocurren en forma continua y simultánea siendo iguales en la magnitud de la carga transferida, aunque de sentido contrario. La velocidad con que se disuelve el cobre de la pieza es igual a la velocidad con que el cobre en disolución se deposita. En resumen, en el equilibrio no existe flujo neto de electrones.

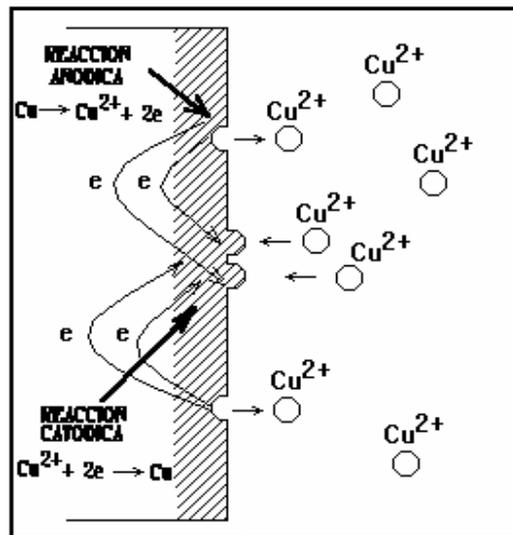


Figura 2.1
Equilibrio de las reacciones anódica y catódica.

Cada interfase tendrá una i_0 característica, y su magnitud refleja la facilidad que posee esa interfase metal-disolución para ceder y aceptar electrones. A mayor i_0 mayor facilidad de transferencia de carga, y viceversa. La magnitud de i_0 depende de consideraciones cinéticas, como: temperatura, concentración iónica, agitación, etc. Por tanto, como las velocidades de oxidación y reducción son iguales en magnitud, pero de signo opuesto, no habrá un flujo neto de electrones fuera del sistema, y de ahí que es imposible medir la i_0 en un instrumento. El equilibrio: la corriente anódica i_a es igual a la corriente catódica i_c (Covino, et al, 1997):

$$i_0 = i_a = i_c$$

Cualquier desviación de la condición de equilibrio desplazará el potencial de electrodo y entonces modificará las magnitudes de las velocidades anódicas y catódicas produciéndose un flujo neto de electrones.

2.2.2 Teoría del potencial de media celda

Como se ha podido observar, el potencial electroquímico es un parámetro muy importante ya que permite conocer qué metal se comporta como ánodo y cuál como cátodo. Aun en situaciones en donde un metal presenta diferencias de potencial debido a heterogeneidades superficiales, algunas veces es posible determinar qué zona se encuentra actuando como cátodo y cuál como ánodo.

Esto es debido a que las zonas que actúan catódicamente presentan un potencial más positivo, y las zonas que actúan anódicamente muestran un potencial más negativo. Consecuentemente, el potencial puede ser medido continuamente para detectar si el metal se corroe de acuerdo con la diferencia de potencial entre ambas zonas. La Figura 2.2 muestra la manera en que un potencial de media celda, se realiza en diferentes medios o electrolitos.

La medición del potencial es sensible a cambios que acontezcan en un proceso de corrosión. Un cambio brusco puede indicar el paso de un estado activo a condiciones de pasividad y viceversa. Así mismo, adquiere valores característicos para diferentes situaciones de temperatura, agitación, etc.

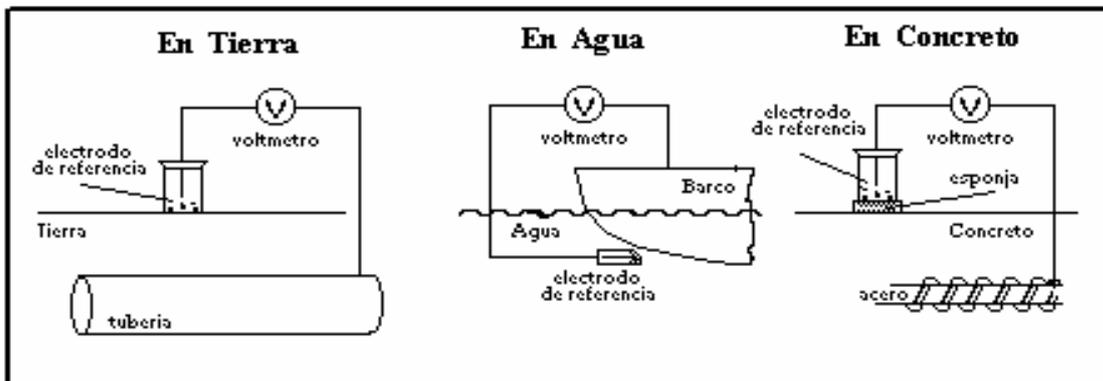


Figura 2.2
Medición del potencial de corrosión de diferentes electrolitos

No obstante que la medición del potencial es un indicativo de la actividad electroquímica del refuerzo, no es posible saber con precisión la velocidad a la que se está corroyendo; para ello es necesario estudiar la cinética del sistema concreto-metal.

2.2.3 Aplicación de potencial de media celda en concreto

La técnica de potencial de media celda se realiza conectando una terminal de un voltímetro de alta impedancia interna, al acero embebido en concreto, y la otra terminal a un electrodo de referencia. De esta forma se mide un potencial de media celda, como se ilustra en la Figura 2.3.

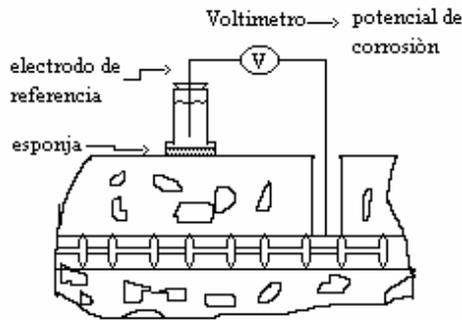


Figura 2.3
Medición de potencial

Diversos autores han contribuido en el análisis y crítica de esta técnica. (Andrade, et al. 1995). Probó esta técnica sobre puentes en los Estados Unidos, y determinó las correlaciones, de la Tabla 2.1 en donde el potencial está medido con respecto a un electrodo saturado de cobre, ESC.

Tabla 2.1
Criterio de Stratful para potenciales de corrosión como porcentaje de probabilidad de corrosión

Ecor (mV) vs ESC	Probabilidad de corrosión
-240	0%
-275	5%
-350	50%
-450	95%
-500	100%

En consecuencia, representó los estados activos y pasivos como sigue:

Tabla 2.2
Potenciales de corrosión como criterio de la condición de la varilla

Ecor (mV) vs ESC	Condición
< -270	activa
>-220	pasiva
-220 a -270	activa o pasiva

Vassie, en 1978 (Stratful, 1993), investigó la unidad de potencial de electrodo como un indicador de corrosión. Observó que el potencial de acero en concreto es influenciado por el contenido de humedad, y que éste con un alto contenido de cloruros, puede ser agresivo o pasivo dependiendo de la cantidad de humedad. Page y Treadaway (Vassie, 1978), mencionan que en el caso donde el potencial de corrosión decrece con el tiempo, se debe a que puede o no haber ocurrido despasivación, ya que este decremento de potencial (valores más negativos) puede asociarse al rompimiento de la capa pasiva o de la restricción progresiva de suministro de oxígeno a la superficie del acero. Wheat y Eliécer (Page, 1962), reportan que debido a la variación inherente en permeabilidad de un espécimen de concreto reforzado a otro, no puede ser asumido que éstos; al ser expuestos a una solución salina por un largo periodo tenderán a potenciales más negativos. Rengaswami, et al. (Wheat, 1985), mencionan que la medición de potenciales se limita al contenido de humedad en el concreto, indicando que en condiciones de inmersión los potenciales no son totalmente confiables. En un estudio de 5 años con pruebas de laboratorio y de campo, (Dhir et al, 1987), encontraron una buena correlación entre los valores de potencial de corrosión y la velocidad de corrosión.

2.2.4 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Es una técnica en corriente alterna que tiene la ventaja de cubrir varios órdenes de magnitud en frecuencia (desde MHz hasta μ Hz). Al variar la frecuencia de una señal senoidal de potencial, la corriente circula por la interfase. Haciendo la analogía del circuito eléctrico; el flujo de corriente pasa a través de los diferentes elementos del circuito, que tienen una respuesta en impedancia (Z) y ángulo de fase (θ) característicos.

Es necesario para el análisis de un diagrama generado con datos de corriente alterna conocer las respuestas de un elemento, sabiendo que una impedancia (Z) es una oposición al paso de la señal eléctrica. La analogía con la corriente directa se da como un límite en el que la frecuencia es cero.

Siguiendo la ley de Ohm (Blenkinsop, et al, 1985):

$$R = V / I \quad (2)$$

En corriente alterna se obtendría:

$$Z = V(\omega)/I(\omega) \quad (3)$$

Donde Z es la impedancia del circuito (Ohms); V(ω), el potencial en función de la frecuencia; y I(ω) la corriente (Ampers) en función también de la frecuencia ω

Cuando se aplica una señal de voltaje en corriente alterna se obtiene una respuesta en corriente de acuerdo con las ecuaciones (Alcocer, 1994; Rodríguez, 1995):

$$V = V_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t \quad (4)$$

$$I = I_{\text{máx}} \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (5)$$

Donde θ es el ángulo de fase, y es muy útil para aproximar las características de los elementos eléctricos a diferentes frecuencias.

La corriente alterna tiene como ventaja estar en función del tiempo y de la frecuencia; cuando se aplican frecuencias del orden de kHz, la onda de tipo senoidal es tan rápida que circula a través de un medio como si estuviese en corto circuito. Retomando el modelo de la interfase electrificada se tienen diferentes componentes que se asemejan a elementos eléctricos, como resistores, capacitores e inductores.

En el caso más simple, la zona compacta tiene similitud con un capacitor (C_{dl}); el electrolito (zona difusa) a una resistencia al paso de corriente y a la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), la resistencia característica de un metal (Figura 2.4).

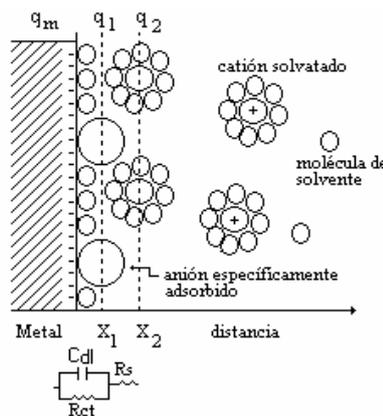


Figura 2.4
Similitud de la interfase electrificada, y un circuito eléctrico equivalente (Covino, et al, 1997)

Un circuito eléctrico equivalente es una aproximación a elementos eléctricos de los componentes de la interfase, como se muestra en la Figura 2.5. El valor de R_s representa la resistencia del electrolito; R_{ct} es la resistencia a la transferencia de carga; y C_{dl} es la doble capa compacta en los límites de las fases. La corriente circulará por los elementos que presenten menor resistencia, y por tanto, origina menor caída de potencial. Si la corriente circula por R_{ct} , se dice que es un sistema resistivo; por ello la interfase estará activa; es decir, su resistencia a la transferencia de carga será pequeña, permitiendo el paso de corriente. Cuando R_{ct} adquiere valores elevados, la corriente circulará por el capacitor, dando origen a la llamada corriente capacitiva, en la cual se tiene acumulación de carga en ambos lados del capacitor, pero no existe una transferencia de carga en la interfase. En este caso se habla de una interfase pasiva, en consecuencia de baja velocidad de corrosión.

En el caso de concreto, la resistividad (R_s) es considerable, en ocasiones del orden de $k\Omega\text{-cm}$; por tanto, puede interferir en la respuesta de la interfase acero-concreto y proporcionar una lectura incorrecta. Es por esto que la medición de R_{ct} debe hacerse con compensación óhmica, que estime la resistencia eléctrica del concreto (R_s), y permita un cálculo de la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) más preciso.

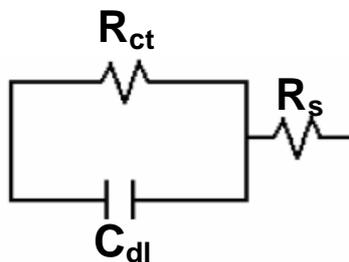


Figura 2.5
Circuito eléctrico equivalente de la interfase electrificada

Cuando se aplica un voltaje, la señal circula a través de la resistencia del electrolito (R_s) y del capacitor C_{dl} , y se registra la R_{ct} . El ángulo de fase toma valores cercanos a cero e indica que la Z (impedancia) medida que corresponde a una resistencia. Al disminuir la frecuencia, el capacitor tarda más en permitir el flujo de corriente, y tendrá una caída de potencial. Si esa caída de potencial es menor que la R_{ct} (resistencia a la transferencia de carga), la corriente circulará por el capacitor iniciándose un decremento en el ángulo de fase. Al continuar disminuyendo la frecuencia, la pérdida de potencial será mayor en el capacitor y llegará el momento en que compita con la R_{ct} . A estos valores de frecuencia, el ángulo de fase alcanza un máximo y toma valores menos negativos.

Diagrama de Nyquist, la representación está realizada en el plano complejo, donde se representa la componente imaginaria de la impedancia (Z'') frente a la componente real (Z') a cada frecuencia de excitación; es decir vectores de impedancia de notación compleja. Esta forma de representación se llama diagrama de Nyquist. Este es uno de los formatos más conocidos para representar los datos de impedancia.

Por ejemplo, en electroquímica las impedancias capacitivas se representan en la parte superior del eje imaginario. El diagrama de Nyquist para el circuito de Randles se muestra en la Figura 2.6. Del mismo modo pueden ejemplificarse a altas frecuencias los condensadores (C_{dl}), los cuales conducen fácilmente, y al hacer un cortocircuito se genera la resistencia a la transferencia de cargas (R_{ct}); de esta manera, la impedancia depende únicamente de la resistencia del electrolito (R_s), lo cual corresponde al primer punto de corte del semicírculo con el eje horizontal en el diagrama, donde la frecuencia $\omega \approx \infty$. Al decrecer la frecuencia, C_{dl} se hace menos conductor, generando un semicírculo en función de la frecuencia " ω ". A muy bajas frecuencias, el condensador deja prácticamente de conducir; y la impedancia es la suma de $R_s + R_{ct}$, que coincide con el segundo punto de intersección del semicírculo con el eje horizontal, donde $\omega \approx 0$.

El diámetro del semicírculo es igual al de R_{ct} . En sistemas bajo control por activación, R_{ct} es equivalente al valor medido, mediante el método de corriente continua polarización lineal, R_p . Por tanto, se puede calcular la intensidad de corrosión sustituyendo R_p por R_{ct} en la ecuación 6.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (6)$$

Aunque la incertidumbre en la determinación de la constante B se traslada a la velocidad de corrosión de las medidas de impedancia (Feliú, S et al, 1985).

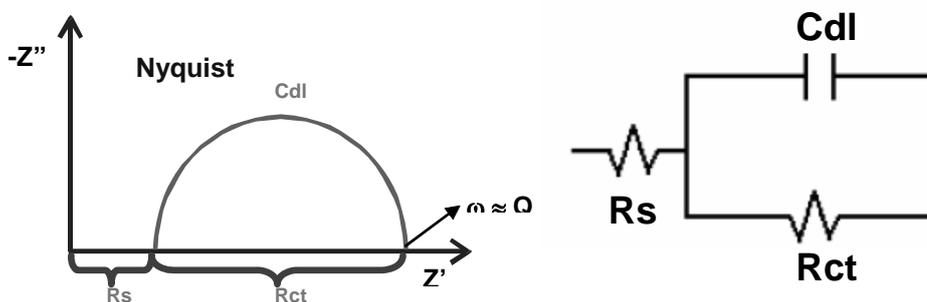


Figura 2.6
Diagrama de Nyquist para el circuito equivalente de Randles

De igual forma se puede calcular el valor del capacitor; la capacitancia del elemento C_{dl} , está en el punto más alto de la semicircunferencia, con la siguiente relación entre C_{dl} y la frecuencia a la que se alcanza dicho punto, ω_{max} (Cottis, et al, 1999):

$$C_{dl} = (1/ R_{ct}) \omega_{max} \quad (7)$$

Siendo $\omega_{m\acute{a}x} = 2\pi f$, y f la frecuencia característica. A partir de este valor de la capacidad se puede calcular la constante dieléctrica, siempre que se hayan utilizado probetas de geometría definida.

Diagrama de Bode; estos diagramas representan el módulo de impedancia y el ángulo de fase frente a la frecuencia. La Figura 2.7 muestra el diagrama de Bode para el circuito de Randles de la Figura 2.6. La representación del módulo corresponde a dos líneas rectas paralelas al eje de las abscisas, para altas y bajas frecuencias; y una diagonal de pendiente -1 a frecuencias intermedias. La extrapolación de la recta a altas frecuencias da el valor de R_s , y la de la recta a bajas frecuencias, R_s+R_{ct} .

Los diagramas de Bode también muestran el ángulo de fase θ . En los límites de bajas y altas frecuencias donde el comportamiento del circuito de Randles es como el de una resistencia, el ángulo de fase es prácticamente cero. A frecuencias intermedia, θ aumenta pudiendo alcanzar 90° para un comportamiento puramente capacitivo (Feliz, et al, 1985).

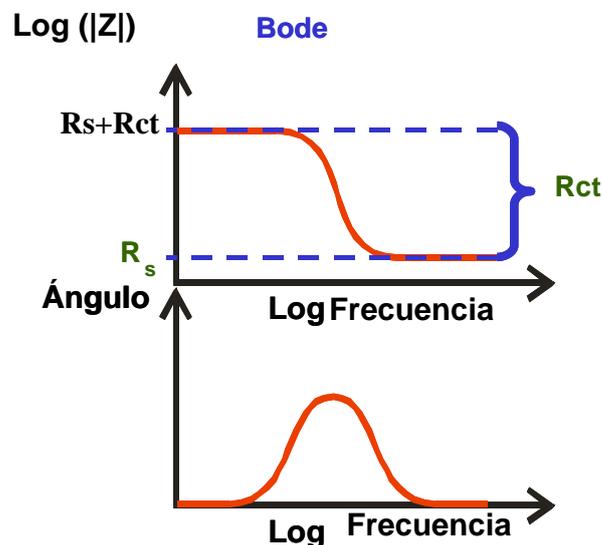


Figura 2.7
Diagramas de Bode, magnitud arriba y fase abajo, para el circuito equivalente de Randles

Una de las ventajas de los diagramas de Bode sobre los de Nyquist es que la frecuencia aparece en uno de los ejes, por lo que es fácil entender a partir del diagrama la impedancia con la frecuencia. Al mismo tiempo, la representación gráfica utiliza el logaritmo de la frecuencia y de la magnitud $|Z|$, que permite representar un amplio rango de frecuencias en un mismo gráfico, dando a cada década igual peso. Esto puede ser una ventaja cuando la impedancia depende fuertemente de la frecuencia como es el caso de un condensador. También son preferibles cuando la dispersión de los datos impide un ajuste adecuado del diagrama de Nyquist (Feliú, et al, 1985).

Con estos principios y análisis de respuesta a una señal de corriente alterna, pueden ser representadas las lecturas de R_{ct} y C_{dlc} que son los datos más importantes de esta investigación, para determinar las propiedades electroquímicas del metal (acero inoxidable) en el electrolito que se encuentre (concreto). El valor de R_{ct} es también conocido como resistencia a la polarización o R_p y nos indica si hay o no corrosión usando la relación de la ecuación (6). El valor de C_{dlc} proporciona la propiedad de la interfase metal/electrolito (acero inoxidable/concreto).

2.2.5 Propiedades del capacitor

Como se discutió en la sección anterior, el valor del capacitor proporciona una idea de las propiedades de la interfase acero/concreto. La interfase electrificada producida durante la prueba de EIE está formada por las cargas eléctricas impuestas en el metal y los iones en el electrolito (concreto). Esta doble capa actúa, como ya se explicó, en un capacitor puro con cargas negativas en un lado de la interfase y cargas positivas en el otro lado de la interfase, (ver Figuras 2.8 y 2.9).

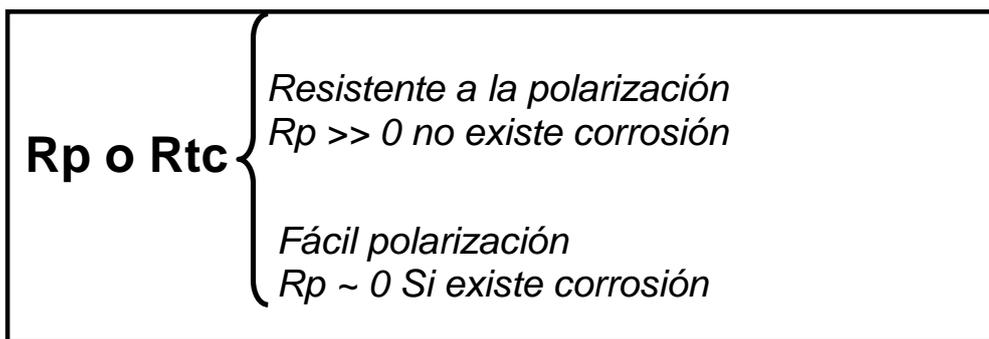


Figura 2.8
Relación de los parámetros de R_{tc} o R_p .

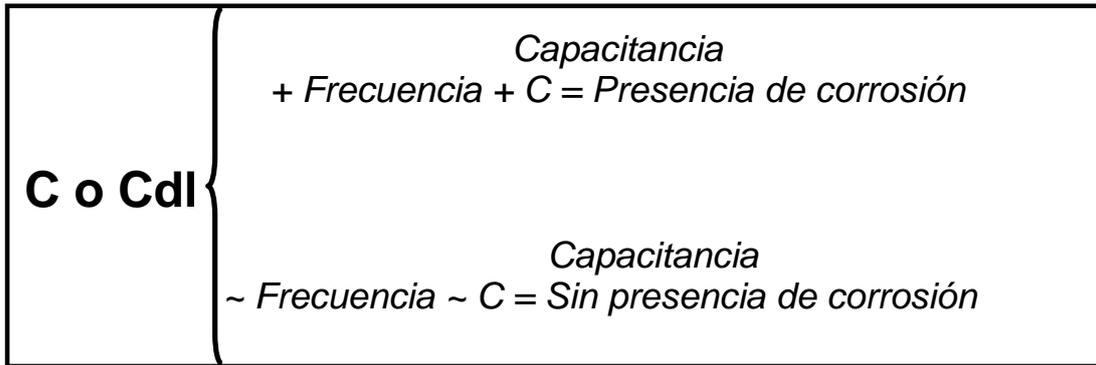


Figura 2.9
Relación de los parámetros de Cdl o C

Una vez obtenidos los valores de la impedancia y calculados los valores de R_p y C , se representan gráficamente para así observar la tendencia como se aprecia en la Figura 2.10, y además tener una apreciación de la cantidad del metal que se está disolviendo en un medio dado; esto es, cuando el sistema se encuentra desplazado de una situación en equilibrio.

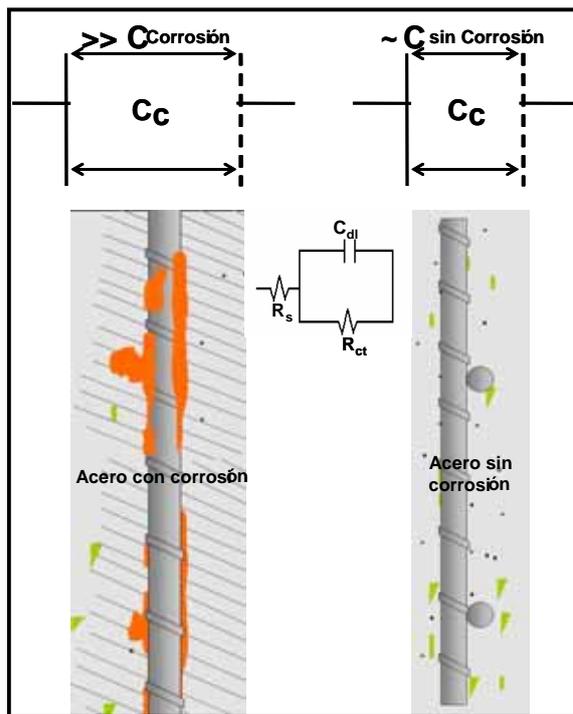


Figura 2.10
Representación de la capacitancia en relación a la corrosión

3 Metodología experimental

3.1 Dimensiones de las probetas

Para esta investigación experimental se elaboraron ocho probetas rectangulares, las cuales contenían tres barras redondas lisas de acero inoxidable de 9 mm de diámetro, a dos de las cuales se les aplicaron esfuerzos residuales de tensión, generando ganchos a 90° y 180°, y 0° correspondiente a una barra recta se colocó longitudinalmente en el prisma.

Las probetas se clasificaron en dos tipos dependiendo del acero utilizado (inoxidable 304 y 316); su designación se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1
Configuración e identificación de las probetas

Tipo	Probetas	% de Cl. Con relación al concreto.
1	Acero Inoxidable 304 90°	1 y 2%
1	Acero Inoxidable 316 90°	1 y 2%
2	Acero Inoxidable 316 90°	1 y 2%
2	Acero Inoxidable. 316 90°	1 y 2%
Total 8 probetas		

Además de las probetas reforzadas con acero inoxidable, también se fabricaron cilindros de concreto simple de 5 x 10 cm y 10 x 20 cm. Los primeros se utilizaron para las mediciones de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Los segundos fueron para las pruebas de resistencia a la compresión.

3.2 Fabricación de las probetas prismáticas

Para elaborar las probetas de concreto se inició con la fabricación de moldes de madera tipo cimbraplay, los cuales incluían cuatro probetas por molde, por lo que se fabricaron dos moldes (Figura 3.1)



Figura 3.1
Fabricación de moldes y habilitado del acero inoxidable

Una vez elaborados los moldes se habilitaron las barras lisas de acero inoxidable AISI 304 y 316. Estas barras se cortaron con una longitud de 30 cm dando un total de 24 piezas; 12 de acero 304 y 12 de acero 316. De estas 12, ocho se doblaron en un banco de dobleces; cuatro de ellas formando un gancho estándar de 90°, y las otras cuatro uno de 180°. La Figura 3.2 muestra las barras ya dobladas.

Cada barra se identifico con un marcador de números por impacto para su nomenclatura. En seguida se procedió a aplicar una cinta aislante (de electricista) en los extremos de las barras, de tal manera que las puntas que salieran del concreto no tuvieran problemas de corrosión (Figura 3.3). Por ultimo se procedió a limpiar con acetona y fueron almacenados en un lugar seco y limpio, hasta el momento del vaciado.



Figura 3.2
Barras de acero inoxidable rectas y dobladas a 90° y 180°

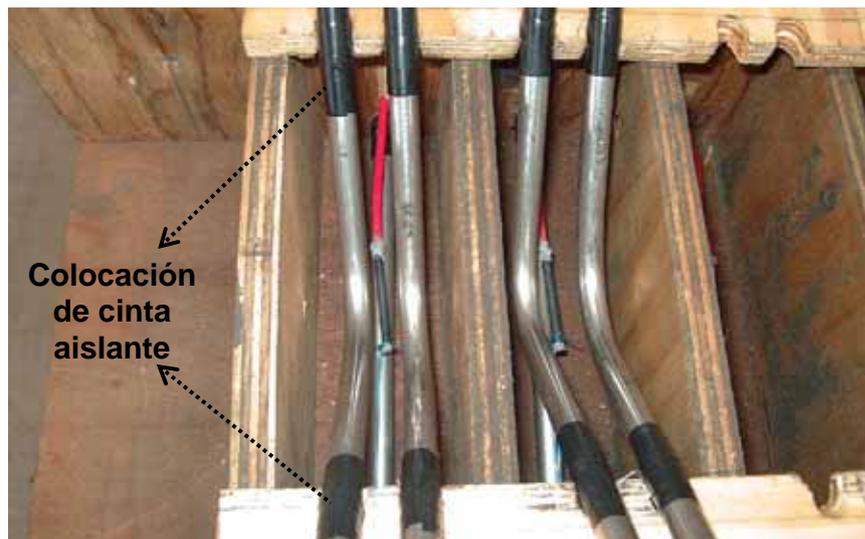


Figura 3.3
Colocación de cinta aislante

En la Tabla 3.2 se listan las nomenclaturas con que se identificaron las barras de acero, y el significado de cada letra o número de acuerdo con los parámetros para la identificación. Por ejemplo, para el caso de una barra de acero inoxidable será identificado 481. Esto significa que es un acero 304, con un ángulo de 180°, y es la barra número 1.

A continuación se elaboraron los electrodos de referencia. En esta investigación se utilizaron barras de titanio/óxido de titanio activadas, similares a

las de investigaciones anteriores (Moreno, 1999; Camacho Hurtado, 2002; Torres Acosta, et al, 2005). Estas barras se comercializan en los E.U. en tiras de 120 cm como ánodos de sacrificio para sistemas de protección catódica. Fueron cortadas cuidadosamente a 5 cm de longitud para que la superficie del óxido de titanio activado no se rayara. Después, empleando un taladro de mesa fija se perforó una de sus puntas con una broca de carburo de tungsteno de 0.3 mm de diámetro para colocar en éste orificio el cable de conexión de cobre. Con el cable de cobre dentro del orificio de la barra se aplastó la punta de la barra de titanio sobre el cable desnudo de cobre para hacer una conexión mecánica resistente a la extracción. Finalmente, se aplicaron a estos electrodos protecciones contra la corrosión con un epóxico (Sikadur, 30) en cada uno de sus extremos desnudos (sin óxido de titanio), y en la conexión con el cable de cobre (Figura 3.4).

Tabla 3.2
Identificación de las probetas de concreto armado

Espécimen	Tipo de acero inoxidable	Angulo aplicado	Número de barra	Contenido de Cl
4015	304	Rectas	15	1%
4913	304	90°	13	1%
4914	304	90°	14	1%
4018	304	Rectas	18	2%
4916	304	90°	16	2%
4917	304	90°	17	2%
6021	316	Rectas	21	1%
6919	316	90°	19	1%
6920	316	90°	20	1%
6024	316	Rectas	24	2%
6922	316	90°	22	2%
6923	316	90°	23	2%
4012	304	Rectas	12	1%
481	304	180°	1	1%
482	304	180°	2	1%
409	304	Rectas	9	2%
485	304	180°	5	2%
484	304	180°	4	2%
406	304	Rectas	6	1%
688	316	180°	8	1%
687	316	180°	7	1%
403	316	Rectas	3	2%
6811	316	180°	11	2%
6810	316	180°	10	2%

En la Figura 3.5 se presenta la configuración de las probetas fabricadas indicando la posición de las diferentes barras de acero inoxidable (rectas y dobladas), así como del electrodo de referencia de titanio.

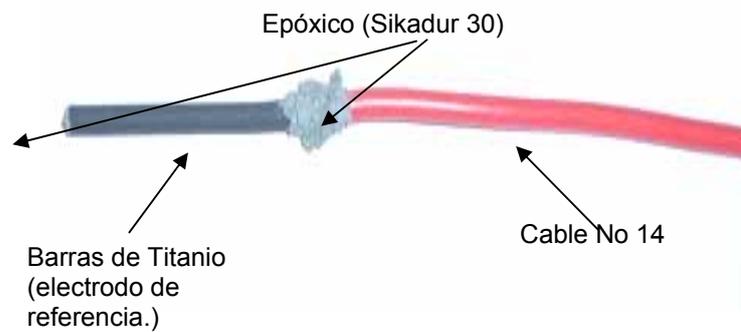


Figura 3.4
Configuración del electrodo de referencia Ti

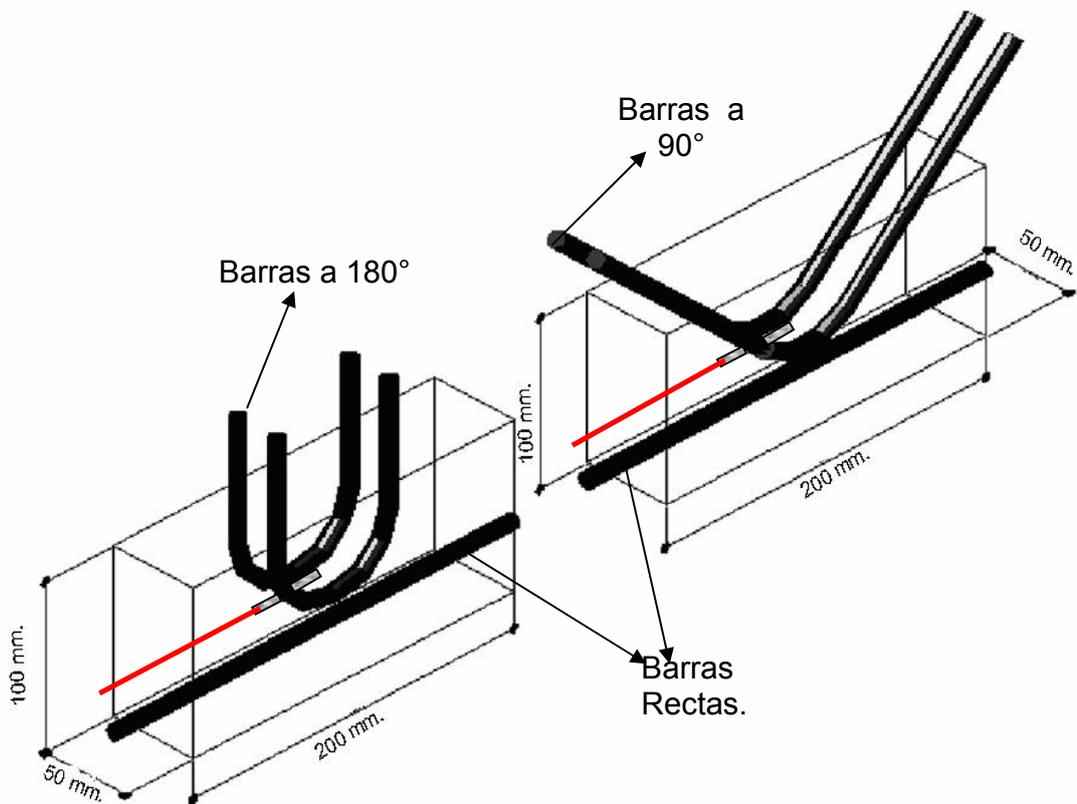


Figura 3.5
Configuración y dimensiones de las probetas instrumentadas.

3.3 Propiedades de las mezclas de concreto

El cemento utilizado en la preparación de las mezclas de concreto fue tipo Portland puzolánico marca Tolteca del tipo CPP, según Norma ONCCE (2003). Para el agua de mezcla se empleó agua potable. Como agregado grueso se utilizó grava triturada cribada por una malla Standard de $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm) para eliminar la grava gruesa; una vez cribada, se procedió a guardarla herméticamente almacenándola en bolsas de plástico cerradas para evitar el paso de la humedad y la contaminación, así como la posible variación de sus características.

Como agregado fino se utilizó arena de mina. Igual que la grava, ésta se cribó en una malla de 1.4 mm. Después del secado se guardó en bolsas plásticas herméticas para mantenerla seca hasta su aplicación. Para simular las condiciones presentes en las zonas marinas, como el fenómeno de corrosión en el muelle de Progreso, se agregó sal común (NaCl) a la mezcla de concreto utilizando las proporciones estimadas en las inspecciones realizadas al muelle (Torres Acosta, et al, 2002), las cuales fueron 1 y 2% de cloruros totales por peso del concreto.

El diseño de la mezcla de concreto fue similar al proporcionamiento de la relación a/c = de 0.4, utilizado en investigaciones anteriores (Torres-Acosta, 2003); el que se determinó fue el adecuado para los tamaños de las probetas. Los volúmenes de concreto y las proporciones de las mezclas de concreto empleadas se presentan en las Tablas 3.3 y 3.4.

En estas Tablas se muestra el volumen de las probetas para este estudio, así como el volumen total por cada tipo de probeta. Además se presenta el volumen total de concreto necesario para la elaboración de las mismas.

Tabla 3.3
Volumen requerido de concreto para cada tipo de probeta

Tipo de probeta	No de probetas	Volumen, cm³	Volumen total
1 Testigo	4	196.08	784
2 Cilindros	4	1570.8	6283
Muestras de concreto armado	8	1000	8000
Volumen total (cm³)			15.067
Volumen total + 20% exceso (cm³)			18.080

Tabla 3.4
Cantidad de agregados para el volumen total requerido de concreto

Materiales para el concreto	Proporciones Kg / m ³
Cemento	445
Grava	885
Arena	987
Agua	201
NaCl 1%	25.18
NaCl 2%	50.36

3.4 Fabricación de las probetas

Primero se pesaron las cantidades de cemento, arena, grava y cloruros; luego se midió el volumen de agua requerido para el diseño disolviendo las cantidades de sal común (NaCl) para cada mezcla; finalmente se procedió a mezclar de la siguiente forma para asegurar la homogeneidad: inicialmente se humedeció la superficie de mezclado, se adiciono la mitad del peso de agua con la mitad del peso de la arena para agitar por unos minutos; esto fue con el objeto de que la arena absorba el agua necesaria. Después se agregó el cemento, la grava y el resto de la arena, y el agua, y se agitó por dos minutos más. El procedimiento se realizó para los dos tipos de mezclas elaboradas 1 y 2% NaCl. En la Figura 3.6 se muestra uno de los pasos del mezclado.



Figura 3.6
Proceso de mezclado para la fabricación de prismas y cilindros.

Como ya se explicó, en el interior de cada probeta se colocaron tres barras de acero inoxidable dependiendo de la configuración que se describe a continuación. La Figura 3.7 muestra un detalle de una probeta con barras dobladas a 90°.



Figura 3.7.
Detalle de la configuración interior de las probetas

Para identificar las probetas de concreto, se colocó sobre la superficie de éstas el número de las barras, el porcentaje de cloruros en el concreto; y a cada probeta se le identificó con un número que empezara con las letras PR de "Prisma". Por ejemplo 6913 2% esto es acero inoxidable 316, sometido a un ángulo de 90°, barra número 13, y con un 2% de concentración de cloruros (Figura 3.8).

Una vez fabricado el concreto de las probetas, se tomó un tiempo de curado de 28 días. Ya curadas las probetas, se procedió a estabilizar sus propiedades electroquímicas en ambiente de laboratorio con una humedad relativa entre 60 y 65%, durante 75 días. Posteriormente se colocaron en una cámara de humedad controlada, como muestra la figura 3.9, por un periodo de 232 días, en donde la humedad relativa fue de 85 a $\pm 5\%$ con una temperatura promedio 20 ± 5 °C, tratando de simular un ambiente marino similar al de Progreso, Yucatán, México.

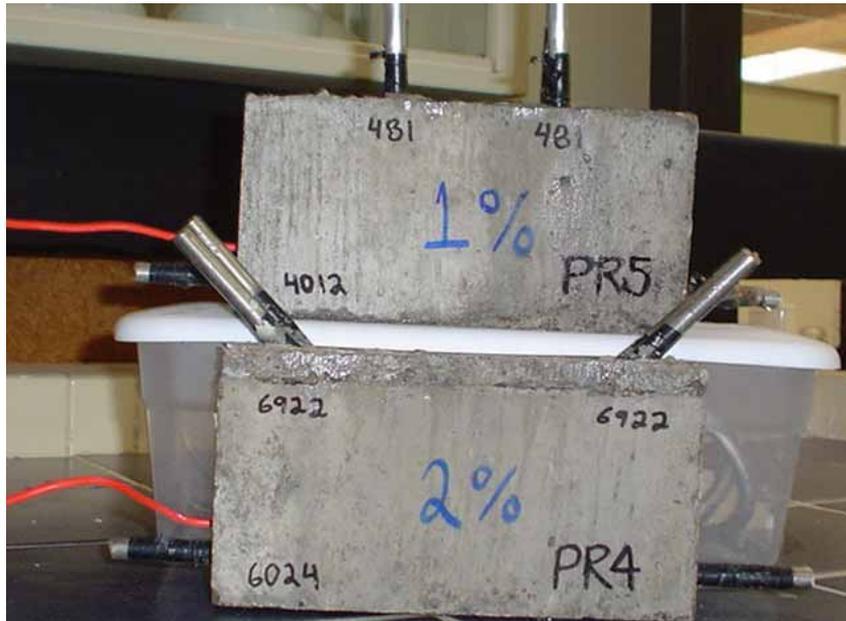


Figura 3.8
Identificación de probetas con la numeración



Figura 3.9
Cámara de humedad controlada sin tapa para que se observe el interior

3.5 Métodos de ensayo para el análisis físico del concreto

3.5.1 Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo debe nivelarse con azufre para obtener una superficie perfectamente plana y ortogonal a la generatriz del cilindro. Posteriormente se le aplica una carga en compresión hasta obtener la ruptura del mismo. Se utilizó para estas pruebas una máquina universal, marca INSTRON, modelo 8503, de 50 toneladas de capacidad. La velocidad de desplazamiento del pistón fue de 1 mm/min según rango establecido en la Norma ASTM C-42. Los datos de desplazamiento del pistón y carga aplicada se concentraron en la computadora del sistema (ver Figura 3.10). El esfuerzo de ruptura (E_r) directo se determina al dividir el valor obtenido de la prensa entre el área del testigo.



Figura 3.10
Equipo para la prueba de resistencia a la compresión y cilindro después del ensayo

3.5.2 Técnica de la resistividad eléctrica (ρ)

Otra prueba que se realizó fue la de resistividad eléctrica (R_s). Esta medición se hizo con un medidor de resistividad de suelos Nilsson 400, utilizando el procedimiento descrito en el manual DURAR (2000). La Figura 3.11 presenta con detalle el proceso durante estas pruebas. Las probetas utilizadas fueron cilindros de 10 x 20 cm. A éstos se les colocaron esponjas húmedas en los extremos para así colocarles los electrodos metálicos que fueron fabricados con placas circulares de acero inoxidable (Figura 3.11).

El medidor de resistividad se conectaba a las terminales metálicas para medir la resistencia eléctrica a dos puntos (terminal C1 se unía a la terminal P1 y la C2 con la P2) como muestra la Figura 3.11. La resistencia eléctrica entre las dos placas se medía con el medidor de resistividad Nilsson, y posteriormente se convertía en resistividad con la ecuación:

$$\rho = R \cdot A \cdot L^{-1}$$

donde ρ es la resistividad eléctrica en $\Omega\text{-cm}$ o $\text{k}\Omega\text{-m}$, A el área en cm^2 o m^2 , de la sección del cilindro; y L la longitud en cm o m .

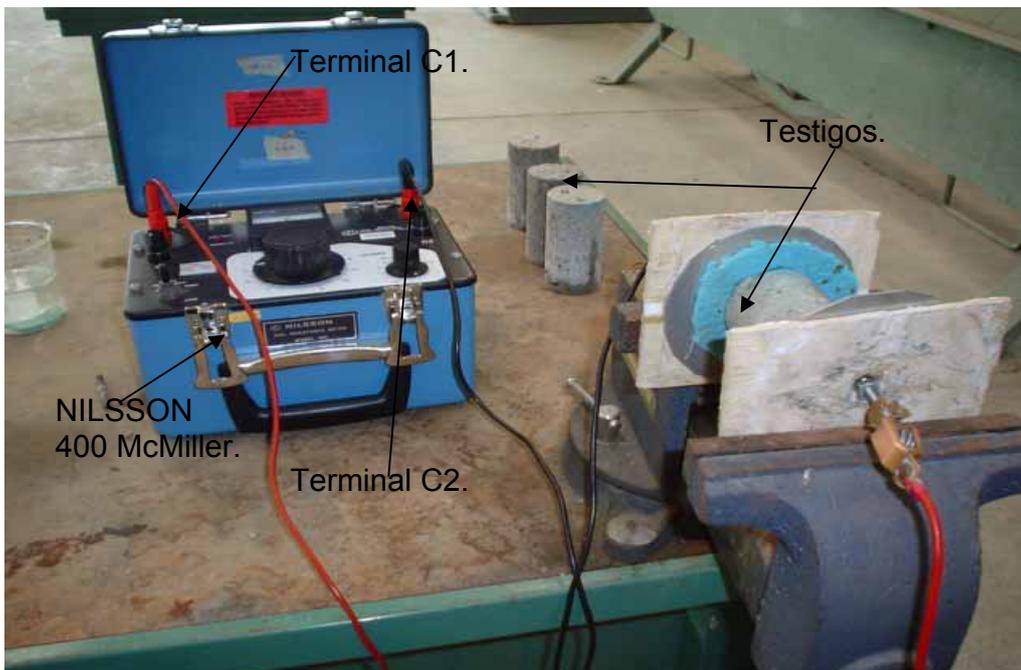


Figura 3.11
Prueba de la resistividad eléctrica

3.5.3 Prueba de pulso ultrasónico

Esta prueba se realizó con el objetivo de conocer la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del concreto, y detectar fallas internas (por ejemplo, presencia de vacíos) generadas durante la fabricación del concreto.

Para esta investigación, las pruebas de velocidad de pulso ultrasonico fueron hechas con con un equipo de ultrasonido, modelo E48. Las mediciones de pulso ultrasónico se aplicaron a 4 cilindros de 5 x 10 cm, que servirían para determinar la calidad del concreto tomando como base el procedimiento del manual (DURAR, 2000). La figura 3.12 muestra el equipo y la colocación de los sensores en la probeta cilíndrica de concreto.

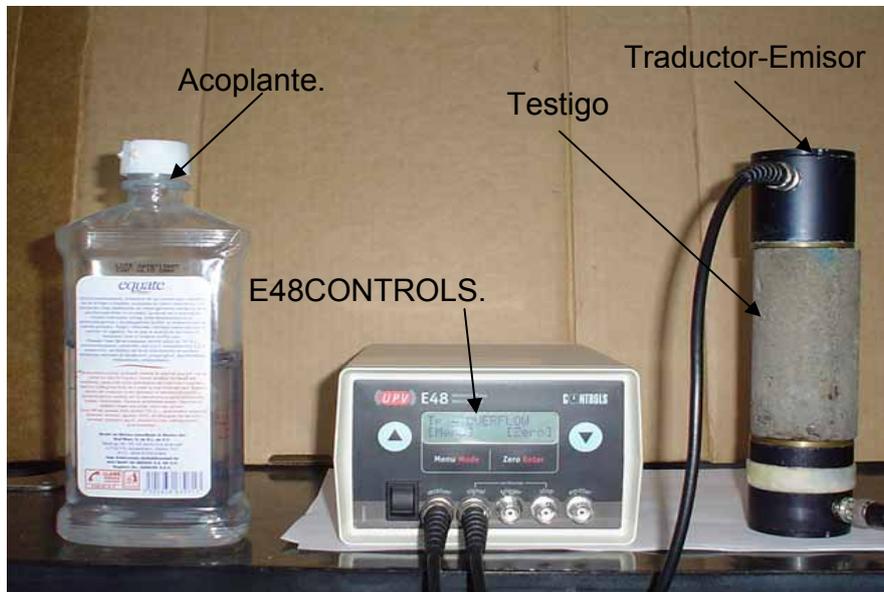


Figura 3.12
Equipo para la prueba de pulso ultrasónico.

El cálculo de la velocidad de propagación de ondas fue conforme a la siguiente fórmula (DURAR, 2000):

$$V = L \cdot t^{-1}$$

Donde V es la velocidad de propagación de ondas en el material en m/s; L la distancia entre los puntos de acoplamiento o sensores en m; y t el tiempo de recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción en unidades de segundos.

3.6 Evaluación del estado de la armadura

Para evaluar el estado de la armadura se llevaron a cabo dos técnicas electroquímicas únicamente: potencial de media celda, y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE).

3.6.1 Técnica de medición de potencial de media celda

La medición del potencial de corrosión fue registrada continuamente (365 días) en cada probeta; en lo correspondiente a los sistemas refuerzo-concreto se empleó un electrodo de referencia, el cual fue Titanio activado (Ti/O_2) y un electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (CSC) siguiendo el procedimiento de DURAR y la Norma ASTM C876. Estos potenciales pueden ser expresados como un potencial electroquímico que no es más que el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. Las mediciones se realizaron tres veces a la semana para conocer la evolución de la corrosión en cada uno de los electrodos embebidos en el concreto, a partir del comienzo del periodo de exposición; siendo el primer potencial el correspondiente a un tiempo igual a cero, hasta culminar el periodo de exposición con la activación de los electrodos (Figura 3.13).

Para dicha medición se utilizó un voltímetro de alta impedancia interna, modelo Miller LC-4. Estos potenciales fueron convertidos a potenciales vs. CSC realizando mediciones de calibración periódicas entre el electrodo interno de titanio y el de CSC según se muestra en la Figura 3.13.

Se realizaron también mediciones del electrodo de trabajo con respecto al electrodo de Titanio (o pseudo electrodo de referencia) que se encuentra igualmente embebido en el concreto, para observar la variación del potencial de activación del acero inoxidable que a su vez se convirtieron a potenciales vs CSC. Además, como medida de seguridad se tomaron lecturas de potenciales del electrodo de Titanio con respecto al CSC (el cual se supone debe permanecer constante, o aproximadamente constante). Es de suma importancia resaltar que todas las mediciones deben ser realizadas en el mismo punto para evitar alteraciones en el valor del potencial por cambio de posición donde se colocó, el electrodo, por lo que se procede a ubicar este lugar en las probetas como punto de referencia.

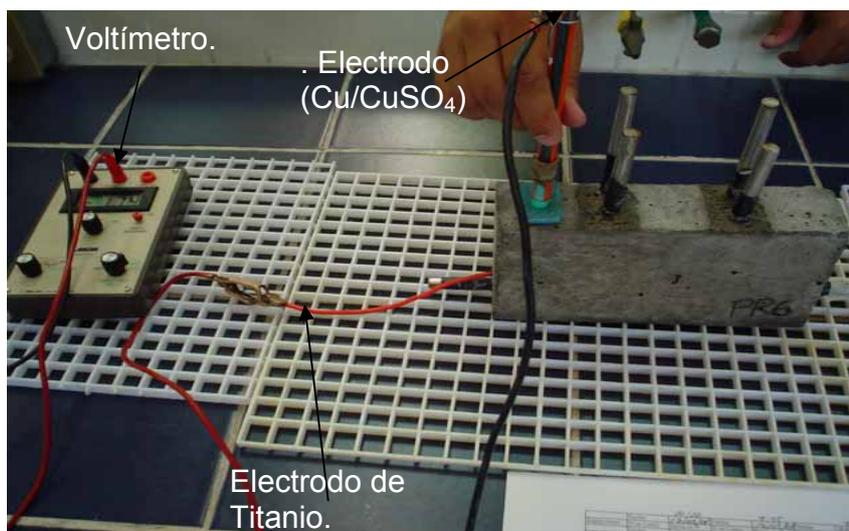


Figura 3.13
Equipo para la medición de potencial de media celda

3.6.2 Técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Para determinar las propiedades electroquímicas, como velocidad de corrosión y propiedades de la interfase, se realizaron además de las mediciones de potencial de media celda, experimentos de EIE. El esquema de celda utilizado para esta técnica, se muestra en Figura 3.14.

Las mediciones de EIE se llevaron a cabo mediante un potencióstato/galvanostato/ZRA, modelo PCI4-750. Fueron realizadas en el intervalo de frecuencias de 300 kHz a 2 mHz, con una amplitud de 10 mV por arriba del potencial de circuito abierto (más positivo 10 mV que el potencial de circuito abierto). Antes de iniciar el experimento de impedancia se media el potencial de media celda con un electrodo de CSC como referencia. Para que los datos del mismo fuesen confiables durante este tiempo, el potencial del electrodo no debía de variar en más de 1 mV. El potencióstato captura los datos y forma un archivo "dta", el cual se almacena en la computadora del potencióstato.

Después de obtener los datos experimentales, estos se analizaron con el programa Gamry Echem Analyst, potencióstato/galvanostato/ZRA. En la Figura 3.15 se presenta la pantalla que se obtiene al abrir el archivo de los datos mediante este último programa.

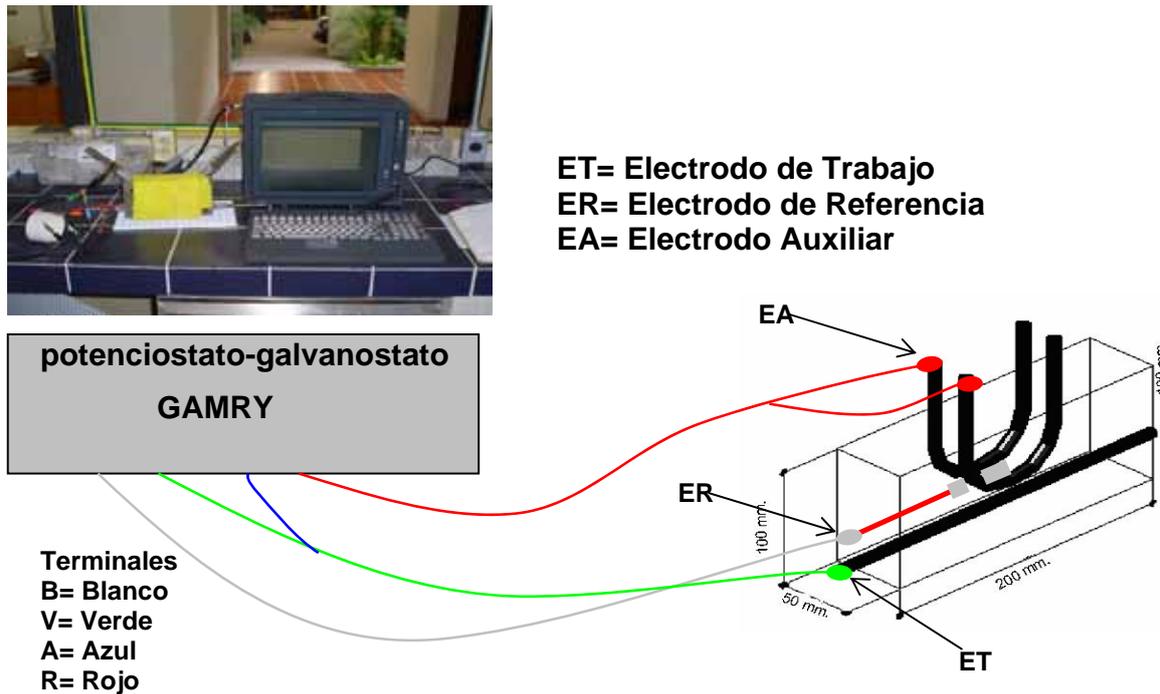


Figura 3.14
Representación de las conexiones para la prueba de EIE.

El siguiente paso fue simular los resultados experimentales mediante un circuito equivalente. El circuito utilizado, que asemeja los datos obtenidos fue el tipo Randles (resistencia en serie con un capacitor en paralelo con otra resistencia). La Figura 3.15 muestra uno de los pasos de esta simulación utilizando el programa Echem Analysis.

Cabe mencionar que debido a que las probetas son polarizadas durante las diferentes pruebas electroquímicas realizadas, primero se hacía la prueba de EIS, luego R_p , y finalmente la de resistencia eléctrica, dado el caso de que en este orden las probetas se polarizaban menos y se podían hacer las pruebas secuencialmente.

Una vez seleccionado el modelo de Randles, (Figura 3.16), se hacía el ajuste de los datos de EIE por el método simple del cual se obtienen los parámetros electroquímicos de R_p y C (Figura 3.17); contando con los parámetros anteriores se obtienen los parámetros del modelo donde están los valores de R_p y C que son los que se obtienen a partir de los diagramas de impedancia, pudiendo introducirse en la ecuación de Stern-Geary y obtener la corriente de corrosión, y a partir de esta la velocidad de corrosión; de acuerdo con 6 (capítulo 2), usando $B = 0.026$ V para acero activo por corrosión, o $B = 0.052$ V para acero pasivo (sin corrosión).

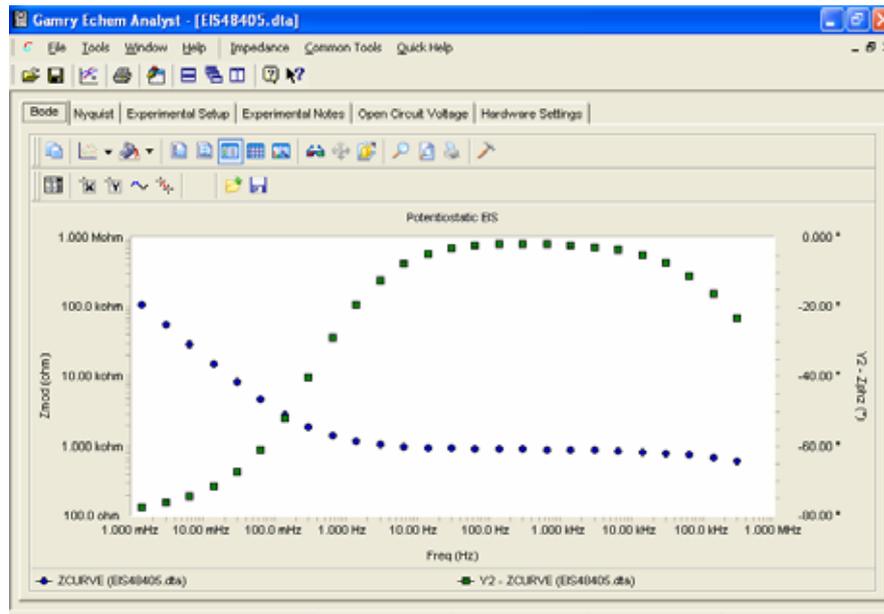


Figura 3.15
Paso 1 del análisis: forma en que se presentan los resultados de EIE en el programa Gamry Echem Analyst

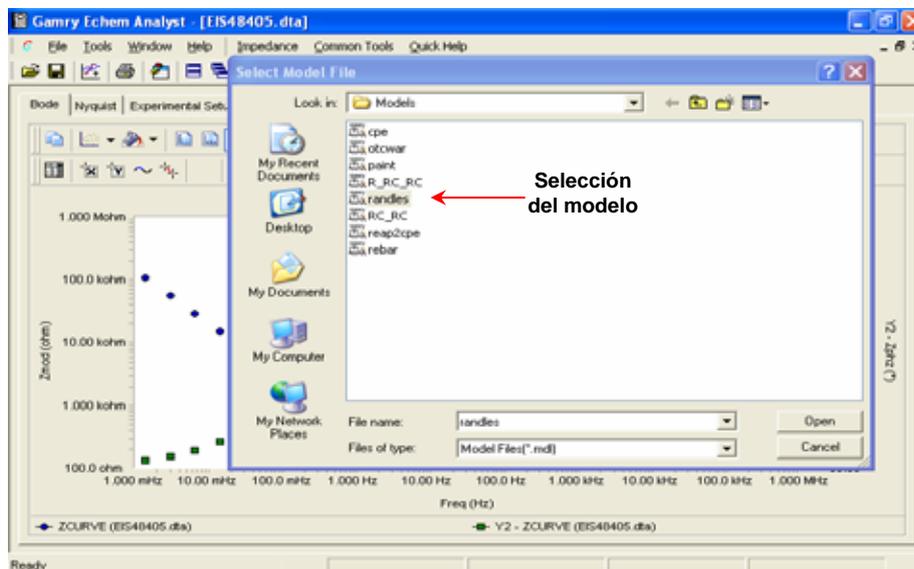


Figura 3.16
Paso 2 del análisis: selección del modelo para simular el circuito equivalente donde se generaran R_p y C

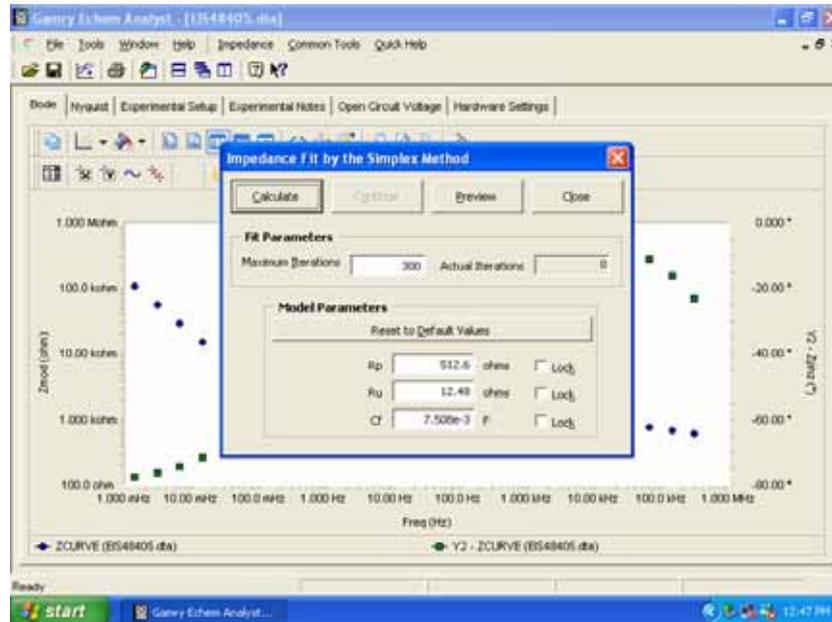


Figura 3.17

Paso 3 del análisis: ajuste de la EIE por el método simple para obtener R_p y C

En el diagrama de Bode magnitud (Log Z vs Log f), y Bode fase (fase vs Log f) de la Figura 3.18 incluyen los datos experimentales (círculos y cuadros respectivamente) se incluyen las líneas de la simulación del modelo de Randles.

Los resultados de R_p y C se obtienen seleccionando la pestaña titulada RANDES de la figura 3.18, mostrándose en una tabla similar a la figura 3.19. Los resultados obtenidos en esta investigación serán ahora presentados y analizados en el capítulo siguiente, Resultados y Discusión.

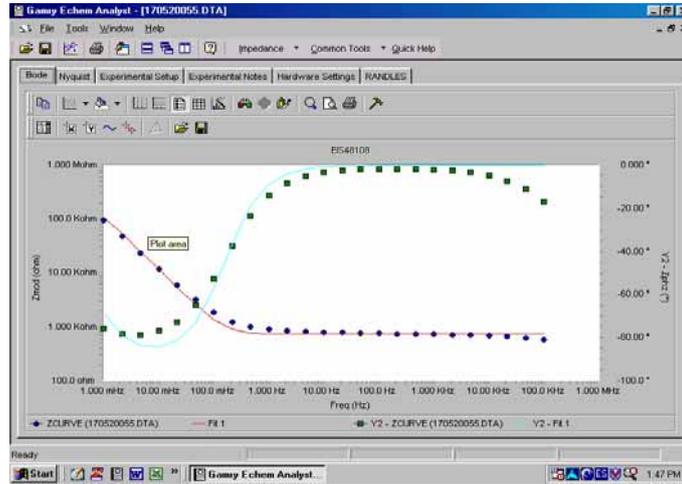


Figura 3.18
Representación de los diagramas de Bode con los datos experimentales (puntos), y la simulación del circuito Randles (rayas)

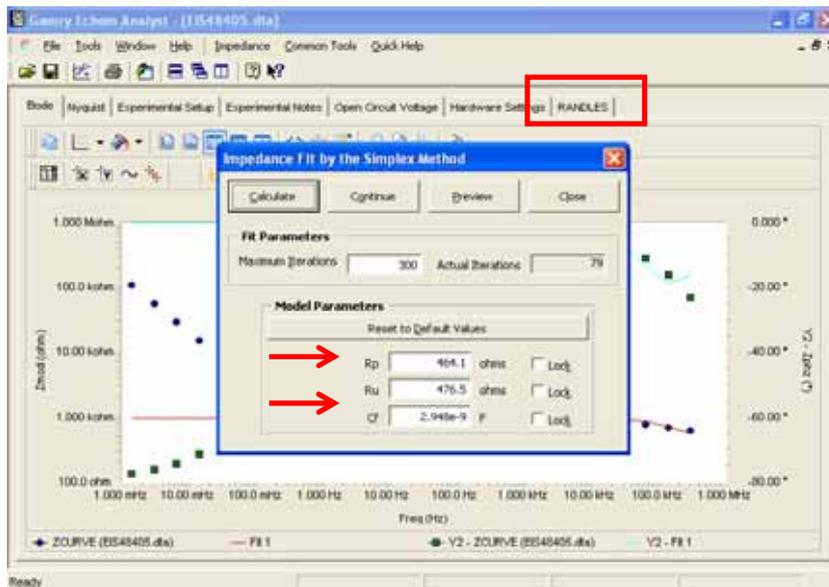


Figura 3.19
Representación de los valores Rp Y C del GAMRY

4 Resultados y discusión

4 Análisis de resultados

4.1.1 Resistencia a la compresión

Los resultados de las probetas para este ensayo se muestran en la Tabla 4.1. Como se puede observar, el valor promedio de la resistencia a la compresión característica a 28 días para los concretos contaminados con el 2% de Cl⁻, fue de 145 kg/cm². Mientras que las probetas contaminadas con un 1% de Cl⁻ mostraron una resistencia a la compresión de 220 kg/cm².

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los resultados de esfuerzo-deformación unitaria de dos probetas cilíndricas de cada mezcla fabricada en esta investigación. Con estos resultados se puede obtener un valor aproximado del módulo de elasticidad del material, calculando la pendiente de estas curvas en la porción recta, y depreciando el efecto inicial inelástico, que creemos se debió a los reajustes del cilindro con los sistemas de sujeción de la máquina universal INSTRON, utilizada para estas pruebas.

Es importante señalar las diferencias obtenidas no sólo en la carga máxima de la prueba, con la cual se calcula la resistencia a la compresión del material, sino también en la pendiente de la porción recta de estas curvas. A esta pendiente se le podría denominar Modulo de Elasticidad Aparente (MEA) del concreto. En la Tabla 4.1 se presentan los valores de los cuatro cilindros probados en este trabajo. Se puede observar que este MEA fue menor para el concreto fabricado con un 2% de Cl⁻ (promedio 1946 kg/cm²) que los obtenidos con el concreto de 1% de Cl⁻ (promedio 3911 kg/cm²). Esto permite determinar que el concreto con 2% de cloruros no sólo disminuyó su resistencia, sino también que es un concreto menos rígido, siendo que el valor del MEA es menor.

Tabla 4.1
Ensayo de resistencia a la compresión

% de Cl ⁻	Área, cm	Carga de ruptura ton	Pendiente (kg/cm ²)	F'c (kg/cm ²)	F'c (MPa)
2%	78.54	12.9	2245.8	164.25	16.42
2%	78.54	10.39	1646.3	132.28	13.22
1%	78.54	17.37	4032.5	221.16	22.11
1%	78.54	17.61	3787.8	224.2	22.42

La Figura 4.3 presenta un diagrama compuesto con los resultados de la resistencia a la compresión en función de la relación a/c de la investigación comparados con los publicados (Steven, et al, 2004). En la Figura 4.3 se señalan las variaciones de resistencias propias para las relaciones de a/c, en las cuales al tener una menor relación de a/c, aumenta la resistencia a la compresión en 28 días del concreto.

Los resultados obtenidos de los concretos fabricados con cloruros (presentados en la misma figura por un círculo y un triángulo) fueron todos menores a los obtenidos de la literatura, (Steven, et al, 2004), (220 kg/cm² para concretos con el 1% y para los concretos del 2%, 145 kg/cm²), lo que resulta muy por debajo de los rangos que se establecen para esta relación a/c de 0.45 entre 300 Kg/cm² y 550 Kg/cm². Los resultados, hasta ahora demuestran que los concretos fabricados con cloruros integrados a la mezcla, aparentemente disminuyen la resistencia a la compresión del concreto, siendo este comportamiento un tanto extraño a lo esperado, ya que los cloruros ayudan a la hidratación del cemento como se ha demostrado en trabajos anteriores (Torres Acosta, 1999). Este comportamiento tendrá que ser confirmado con mayor información experimental programada a realizarse en el futuro y poder ser así más concluyentes.

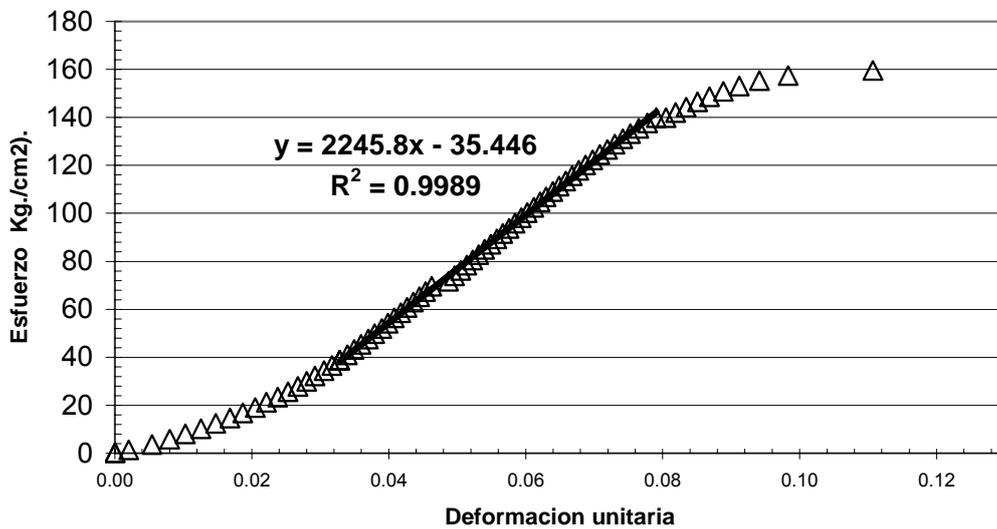


Figura 4.1
Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para un cilindro con 2% de cloruros adicionado

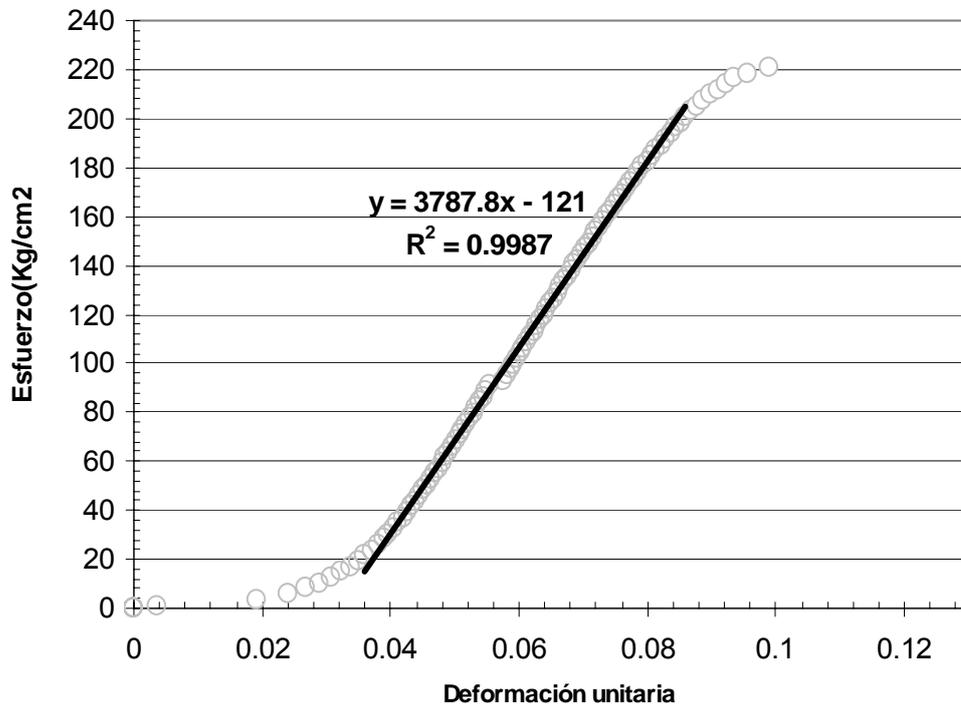


Figura 4.2
Resultados de la prueba de resistencia a la compresión para un cilindro con 1% de cloruros adicionado

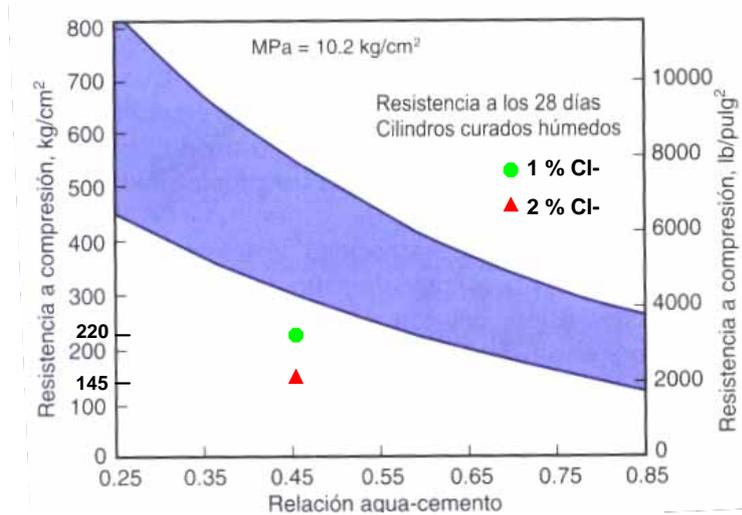


Figura 4.3
Variación de resistencias típicas para la relación a/c de concretos con cementos Pórtland (Steven H K, et al 2004). En comparación con los concretos fabricados con 1 y 2% de Cl⁻

4.1.2 Resistividad eléctrica

Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran el comportamiento de la resistividad eléctrica con respecto al tiempo para los concretos fabricados con contaminación de 1 y 2% de cloruros. La medición de la resistividad eléctrica del concreto sirve para determinar el grado de saturación de los poros del concreto, el grado de hidratación de la pasta, y de manera indirecta la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

Se puede observar que el comportamiento en las figuras antes mencionadas, que la resistividad en ambos concretos se incrementó con el tiempo hasta llegar a valores constantes después de 120 días de haberse fabricado. Cabe aclarar que durante estas mediciones, los cilindros de concreto utilizados para obtener éstas, estuvieron todo el tiempo en la misma cámara de humedad controlada en donde permanecieron los prismas, obteniéndose así el comportamiento del concreto de los prismas por igual.

Los cambios registrados en los valores de resistividad durante el tiempo pudieron generarse debido a que el concreto se mantuvo hidratándose durante los primeros 120 días, disminuyendo así la porosidad del material e incrementándose la resistividad eléctrica, ya que los poros fueron cerrándose o desconectándose por el proceso de hidratación. Esta posible explicación fue también demostrada por Torres Acosta (1999) quien observó un incremento en la resistencia del concreto fabricado con cloruros de un 3.5% a los 200 días en comparación con la resistencia a la compresión a los 28 días.

Torres Acosta (1999) argumentó que los cloruros inhibían el proceso normal de hidratación y que lo hacían más lento, pero una vez cumplido cierto tiempo (más de 100 días) los cloruros actuaban como un catalizador de hidratación al ser estos higroscópicos y permitir una saturación de agua en los poros aumentando la posibilidad de hidratación del cemento sin hidratar y cambiando así la resistencia final del concreto a edades mayores de 150 días. Los datos de resistividad eléctrica apoyan esta teoría, aunque hubiera sido más adecuado el que se tuvieran probetas de concreto a probarse en compresión a mayor tiempo de curado (más allá de 28 días), pero como no era parte de los alcances de este trabajo, no fue programado el colado de mayor número de cilindros de concreto.

La Figura 4.6 presenta los resultados de resistividad eléctrica en esta investigación en comparación con otros obtenidos por Mindess y Young (1981) para concretos con tres diferentes relaciones agua cemento y sin cloruros. Es interesante observar que los valores de resistividad de los concretos sin contaminación de Cl^- rebasan los 15,700 $\text{K}\Omega\text{-cm}$ para fechas mayores a 150 días y relación a/c de 0.40, en comparación con los de esta investigación (27 a 43 $\text{k}\Omega\text{-cm}$) con concretos contaminados con Cl^- . Observándose una diferencia de dos órdenes de magnitud entre los concretos sin Cl^- y los contaminados con Cl^- .

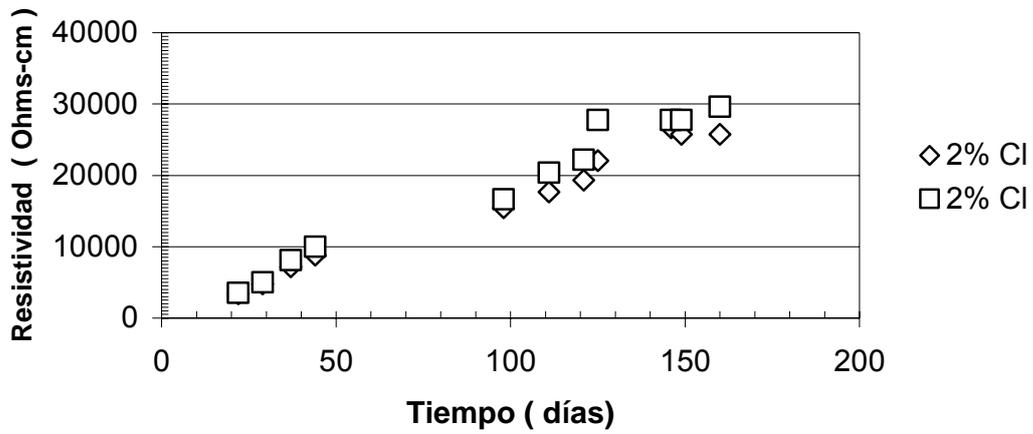


Figura 4.4
Resistividad vs tiempo de exposición 2% de Cl⁻

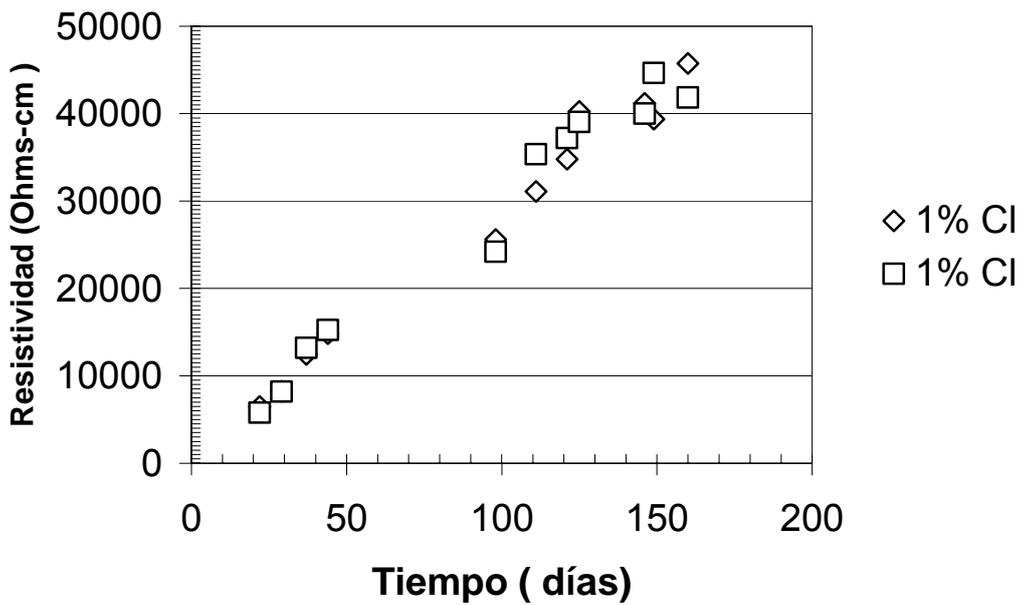


Figura 4.5
Resistividad vs tiempo de exposición 1% de Cl⁻

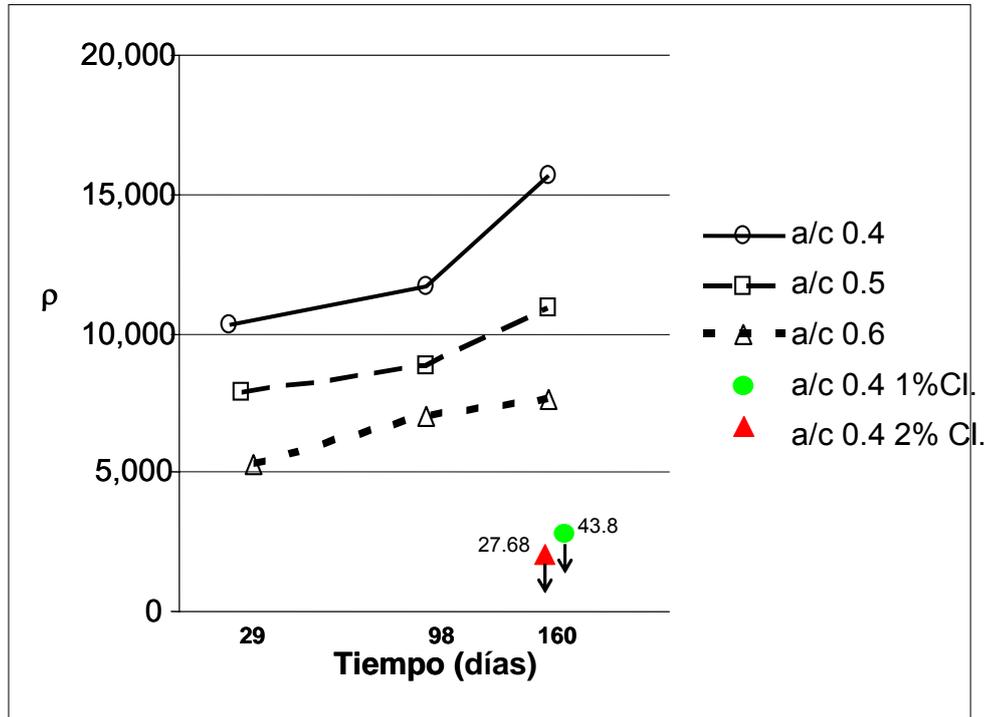


Figura 4.6
Resistividad de esta investigación comparada con otras (Mindess y Young 1981)

4.1.3 Velocidad de pulso ultrasónico

La Tabla 4.2 presenta los resultados de las pruebas de pulso ultrasónico realizadas a los ocho meses de fabricación del concreto, y obtenidos con los cuatro cilindros de 50 x 100 mm. De los resultados de esta tabla se puede observar que tres de ellos tuvieron resultados muy parecidos (aproximadamente 3 500 m/s) y únicamente un cilindro presentó valores del orden de 3700 m/s correspondiente a menos del 10% de diferencia con los demás. Esto permite inferir que el concreto utilizado para la fabricación de los cilindros fue bastante homogéneo, en cuanto a su velocidad de propagación, y un 10% de diferencia entre probetas no implica que haya sido error de fabricación de los concretos.

Tabla 4.2
Valores de velocidad de propagación en el concreto

% de Cl ⁻	Longitud del cilindro, cm	Tiempo (ms)	Velocidad de propagación m / s
2 %	10	0.0028	3571.428
2 %	10	0.0027	3703.703
1 %	10	0.00284	3521.126
1 %	10	0.0028	3571.428

Todas las mediciones realizadas al concreto sirvieron para caracterizar el material utilizado en esta investigación y compararlos con los resultados de las pruebas efectuadas al concreto del muelle de Progreso. De los resultados obtenidos en su reporte del Muelle de Progreso y los actuales se puede inferir que los concretos son muy parecidos, y que la simulación del ambiente a exponer a las barras de acero inoxidable es adecuada.

4.2 Caracterización de acero inoxidable

4.2.1 Resultado del estudio químico del acero inoxidable

Se realizó un análisis metalográfico y químico a las muestras de acero inoxidable, de las cuales se pudo percatar que corresponden a los tipos AISI-SAE 304 y 316, tal y como se observa en la Tabla 4.3, así como en las metalografías correspondientes (Figuras 4.7 y 4.8). Los aceros inoxidables analizados son austeníticos y por tanto no magnéticos, son altamente resistentes a la temperatura y la corrosión, pero muy susceptibles de sufrir corrosión localizada. La adición de molibdeno en el inoxidable 316 es para proveer mayor resistencia a la corrosión por picadura en ácido fosfórico y acético, así como en soluciones diluidas de cloruros; también le da mayor resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico. El fósforo en cantidades entre 0.07-0.12% mejora las propiedades de corte; sin embargo, en cantidades mayores (como es el caso de todas las muestras analizadas) reduce la ductilidad, por lo cual el acero tiene más tendencia a agrietarse cuando se trabaja en frío.

La composición química de las barras de acero inoxidable 304 y 316 utilizadas en esta investigación se muestra en la Tabla 4.3 (Saborío, 2005). Con los resultados se definió que las propiedades químicas de los aceros empleados corresponden, según norma AISI-SAE, a 304 y 316.

Tabla 4.3
Caracterización química del acero inoxidable utilizado

Tipo de acero	Código del cliente	%C ±0.01	% Mn ±0.01	% Si ±0.01	% Cr ±0.1	% Ni ±0.1	% P ±0.01	% S ±0.01	% Cu ±0.001	% Mo ±0.01
AISI-SAE 304	B	No se analizo	1,49	0,38	18,0	8,51	0,36	No se analizo	---	0,39
AISI-SAE 316	C	No se analizo	1,37	0,24	15,4	10,3	0,19	No se analizo	---	1,84

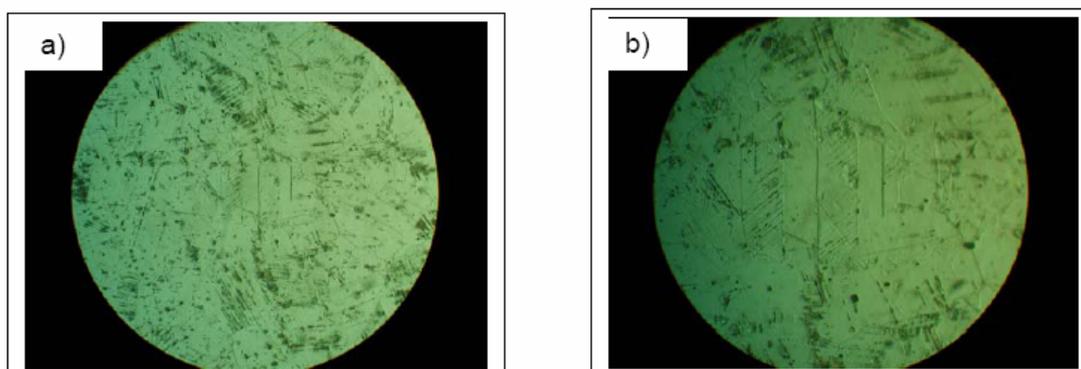


Figura 4.7
Muestra de acero B correspondiente a un AISI-SAE 304

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran las metalografías realizadas y vistas en un microscopio óptico a 500 y 1000x de aumento (incisos a y b, respectivamente). La estructura metalográfica observada consiste de granos de austenita equiaxiales (Saborío, 2005). Para observar en el microscopio los granos y bordes de grano se realizó un ataque ácido a base de 10 ml ácido nítrico + 10 ml ácido acético + 15 ml ácido clorhídrico + 2 gotas de glicol (Saborío, 2005).

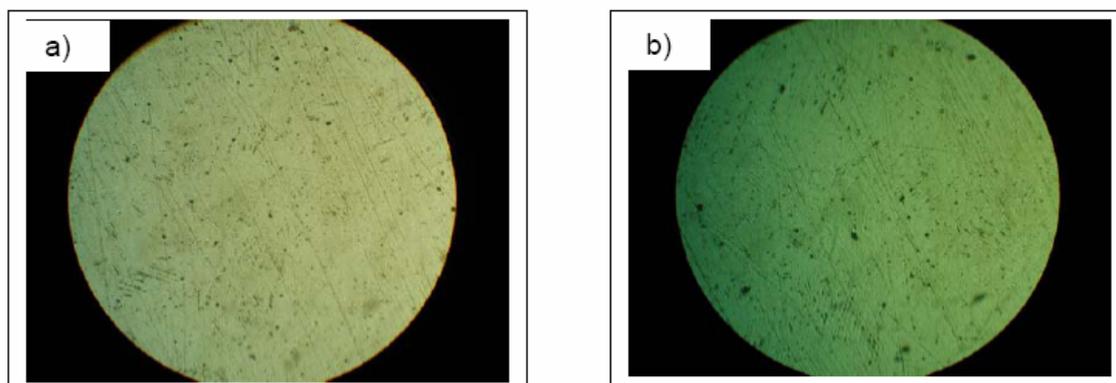


Figura 4.8
Muestra de acero C, correspondiente a un AISI-SAE316

Con estos resultados se pudo comprobar que los aceros obtenidos fueron los que realmente el fabricante definió al momento de la compra.

4.2.2 Medición de potenciales de media celda

Las medidas de potenciales informan sobre la posibilidad de corrosión del acero de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados respecto a las condiciones de humedad; contaminación; calidad del concreto; etc. (DURAR. 2000). Según el criterio de valoración de potenciales del acero al carbón en concreto vs CSC, establecido en el Manual de la Red DURAR, y de acuerdo con las condiciones del medio de exposición se sabe que (González J A, et al 2005): si el potencial vs CSC se encuentra entre ± 200 mV, en condiciones de bajo contenido de cloruro, un pH > 12.5 y alto contenido de humedad relativa, el espécimen se encontrará pasivo con un riesgo de daño despreciable.

Si por el contrario, el medio posee una elevada humedad relativa, concentraciones de cloruros y presencia de oxígeno y los potenciales oscilan entre -200 y -600 mV, entonces existe un alto riesgo de daño y una alta probabilidad de ataque por corrosión localizada. Cabe aclarar que estos valores fueron obtenidos para acero al carbón y a la fecha no se ha generado norma alguna para el acero inoxidable, por lo que se tomará como válido este criterio en esta investigación, tomando en consideración que a la fecha no se encuentran valores de potenciales de media celda, que puedan indicar si existe o no la posibilidad de corrosión del acero inoxidable.

Las Figuras 4.9 a 4.20 muestran los valores de potencial de media celda de los dos aceros estudiados (304 y 316), con las dos concentraciones de cloruros utilizadas (1 y 2%) y según el tipo de barra estudiada (barras rectas, ganchos de 90° y ganchos de 180°).

Para todos los casos, y según las Figuras 4.9 a 4.20, tomando lo establecido por las Normas ASTM C-876 y el Manual DURAR, se determinó que los valores demuestran que las varillas inician con valores un tanto negativos (aproximadamente -0.25 V vs. CSC), encontrándose en estado pasivo. Pequeñas diferencias se pueden encontrar en los valores de potencial entre las varillas rectas que tienen el 1 y 2% de contaminación de Cl^- , siendo los potenciales de las barras en concreto con 2% que son un poco más negativos que los valores encontrados en los concretos con 1% de concentración. Estas pequeñas diferencias pueden deberse a esta diferencia de concentración de cloruros (Figuras 4.9 a 4.12). Cabe mencionar que estos valores tienen como referencia potenciales de acero al carbón pasivo.

Se pueden observar en todos los otros valores de potencial de media celda en ganchos 90° y 180°, fluctuaciones menores y algunos valores dispersos que corresponden un 2% del total únicamente. Tales fluctuaciones pudieron haberse

generado debido a cambios en temperatura durante las mediciones (los laboratorios del IMT no poseen un control adecuado de temperatura ya que se han medido variaciones de hasta 8 °C en un día laboral de ocho horas) o por cambios propios del potencial de las barras de acero que no pueden ser controlados en la prueba, como por ejemplo que se active más o se pasive la barra, y se haya realizado la medición de potencial en el preciso momento de estos cambios de potencial abruptos.

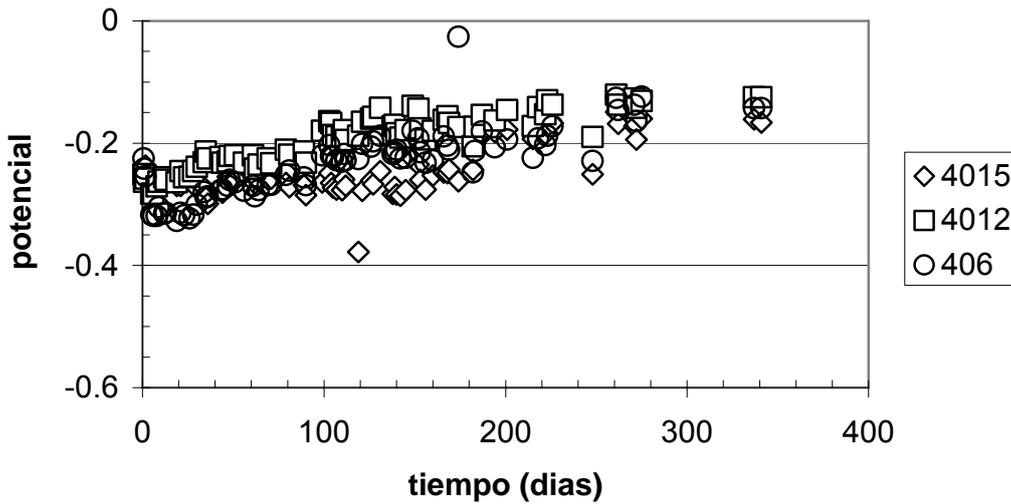


Figura 4.9
Potencial de barras rectas de acero inoxidable 304 con 1% de NaCl

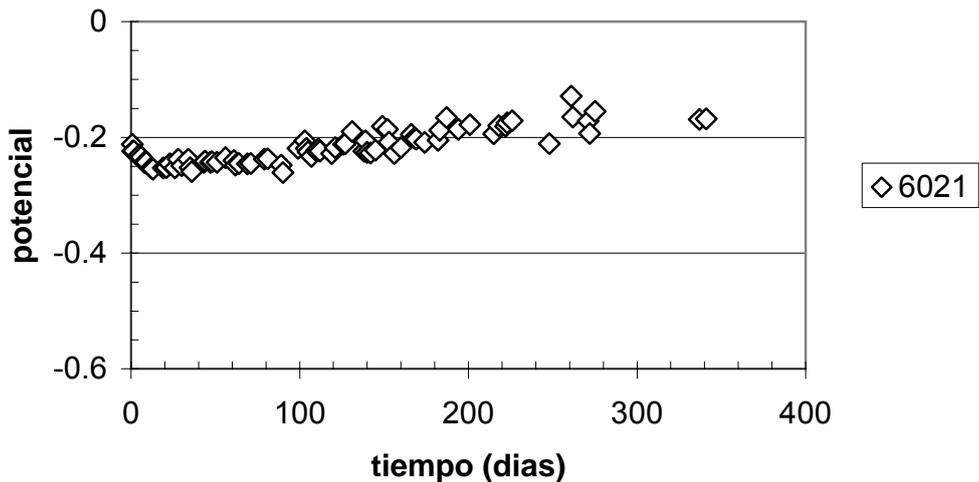


Figura 4.10
Potencial de barras rectas de acero inoxidable 316 con 1% de NaCl

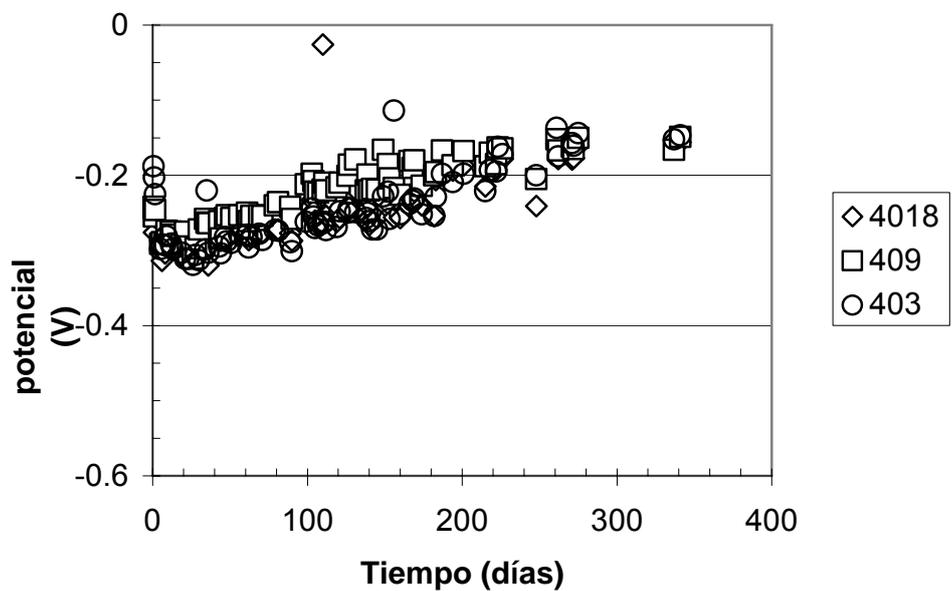


Figura 4.11
Potencial de barras rectas de acero inoxidable 304 con 2% de NaCl

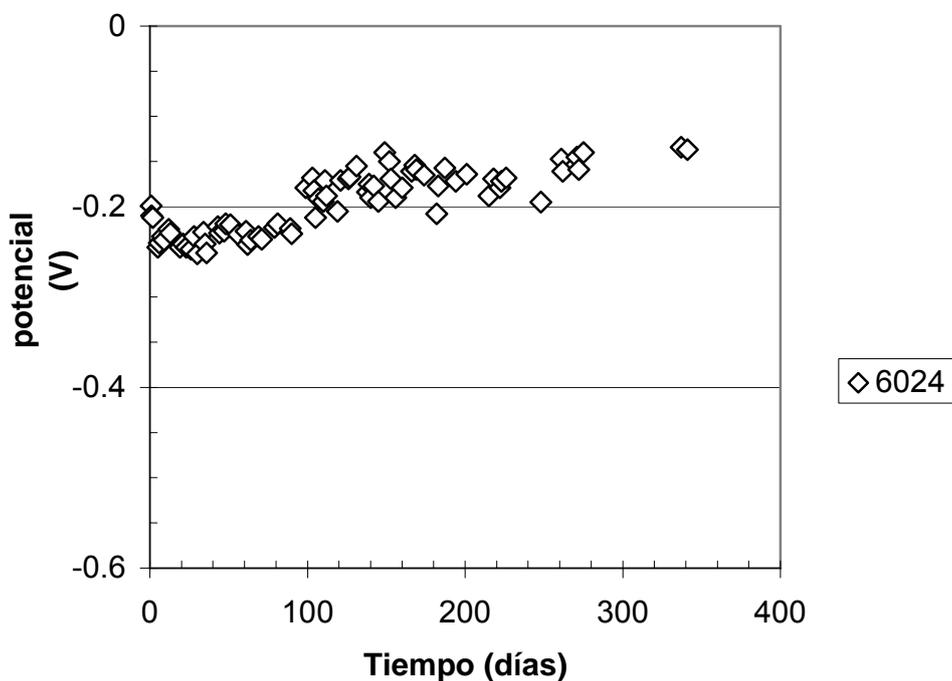


Figura 4.12
Potencial de barras rectas de acero inoxidable 316 con 2% de NaCl

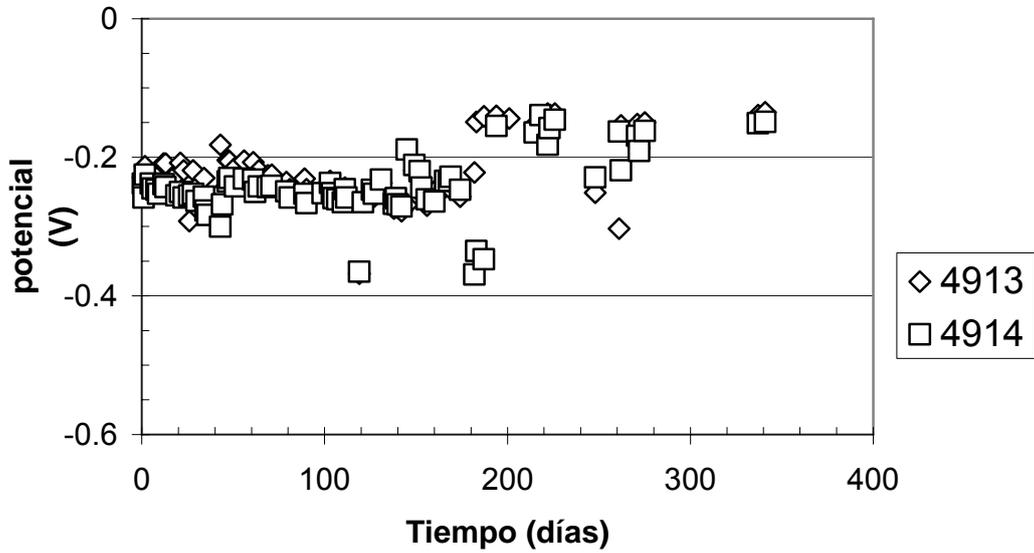


Figura 4.13
Potencial de barras a 90° de acero inoxidable 304 con 1% de NaCl

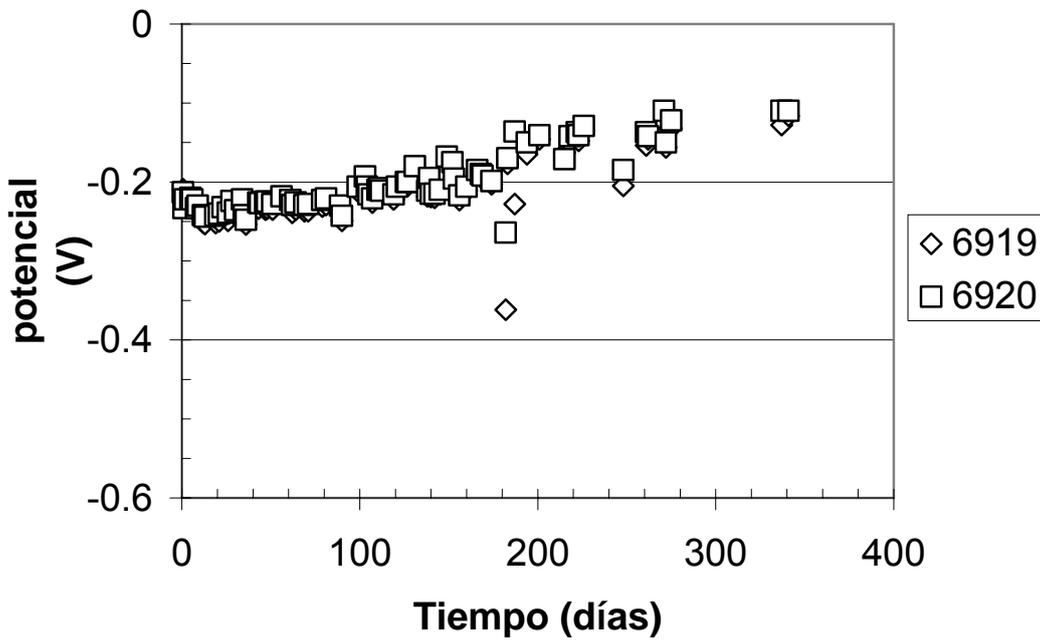


Figura 4.14
Potencial de barras a 90° de acero inoxidable 316 con 1% de NaCl

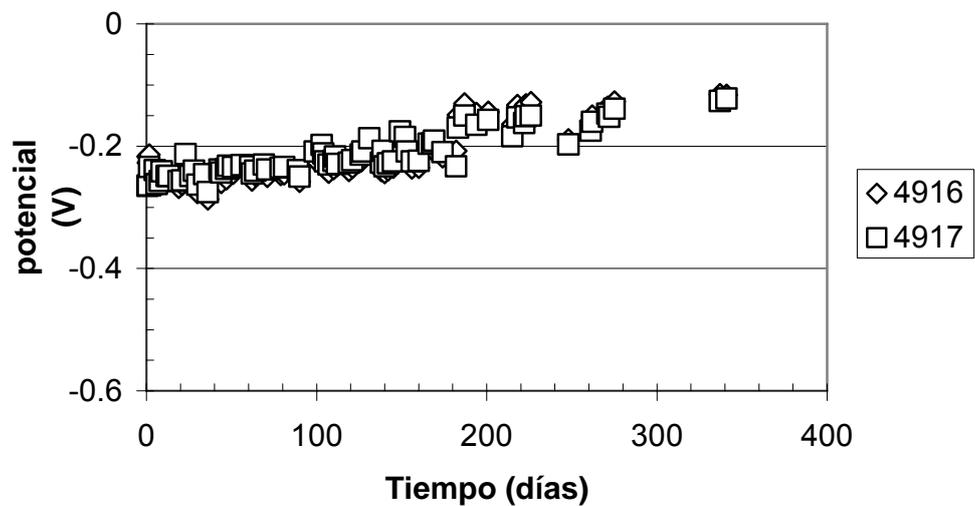


Figura 4.15
Potencial de barras a 90° de acero inoxidable 304 con 2% de NaCl

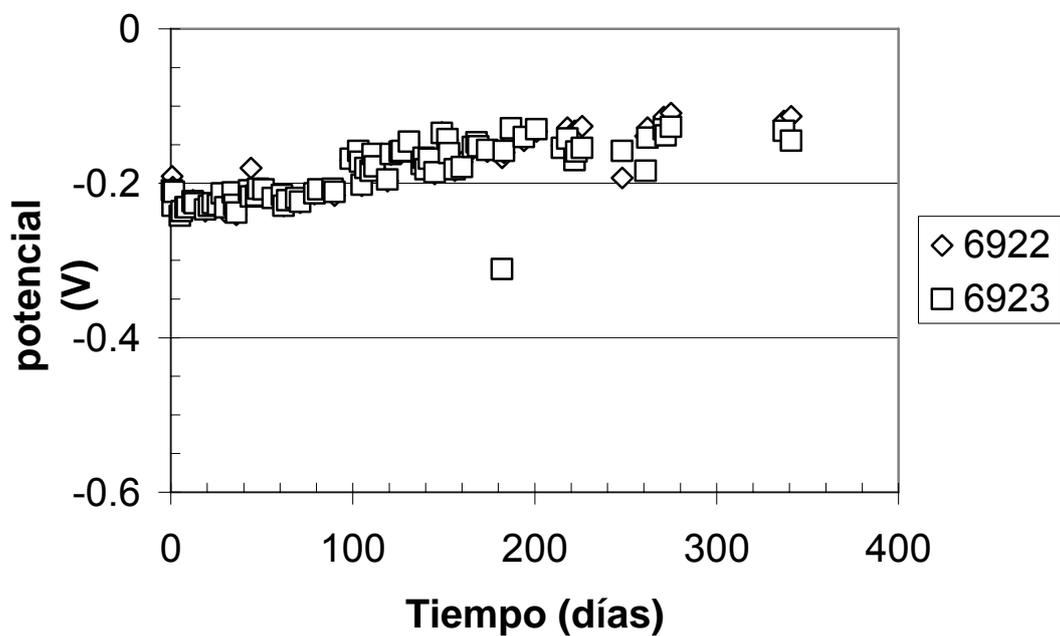


Figura 4.16
Potencial de barras a 90° de acero inoxidable 316 con 2% de NaCl

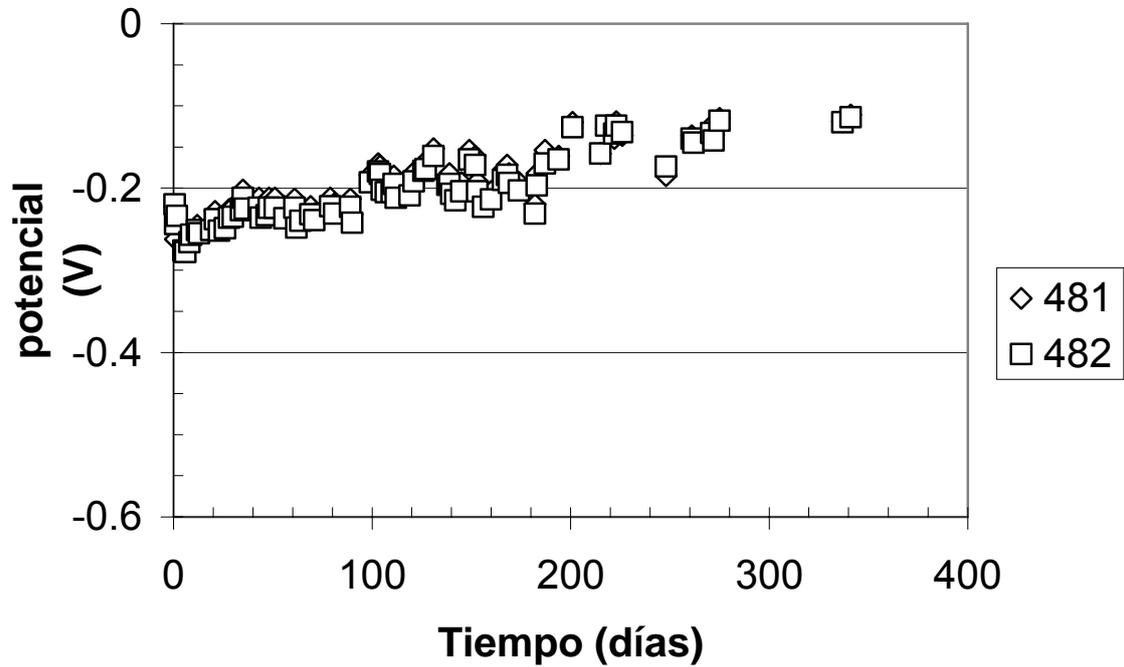


Figura 4.17
Potencial de barras a 180° de acero inoxidable 304 con 1% de NaCl

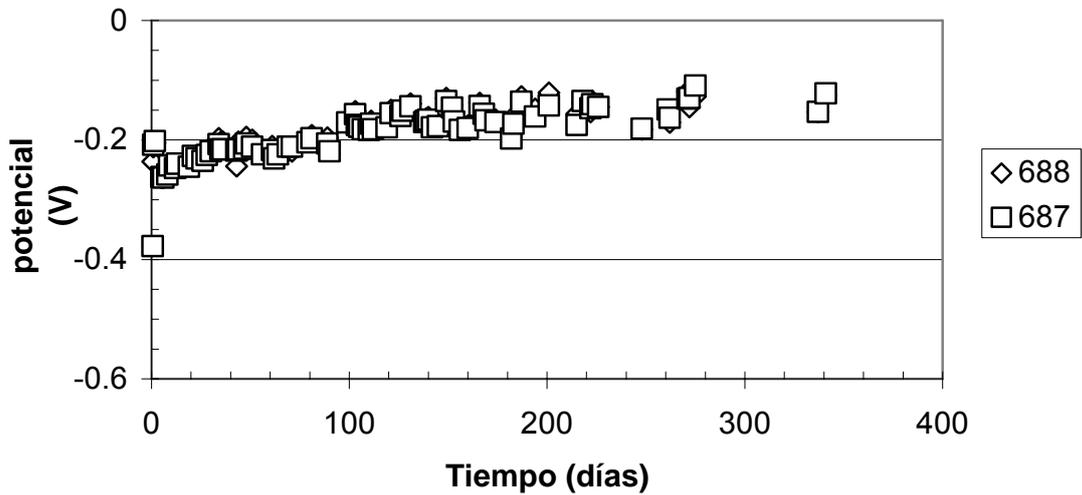


Figura 4.18
Potencial de barras a 180° de acero inoxidable 316 con 1% de NaCl

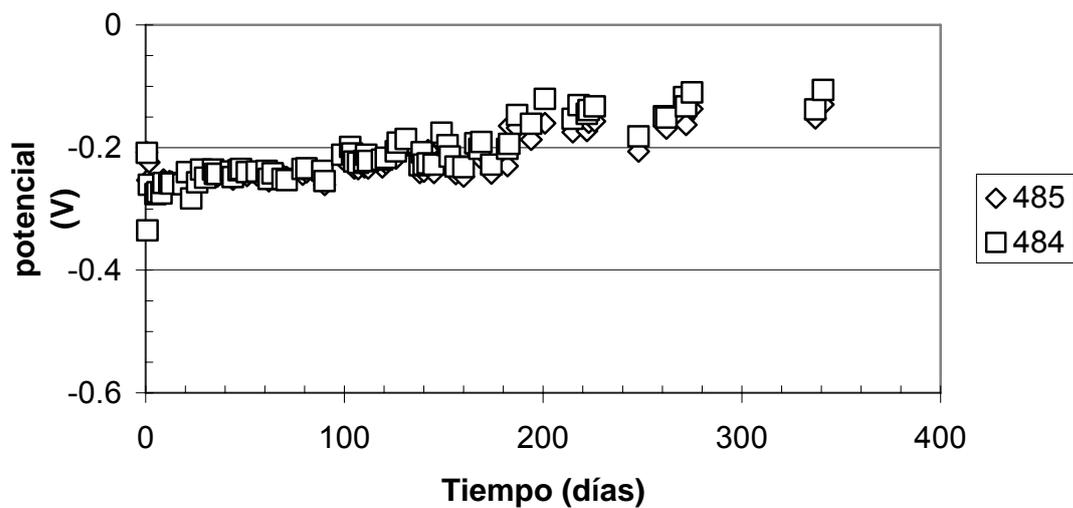


Figura 4.19
Potencial de barras a 180° de acero inoxidable 304 con 2% de NaCl

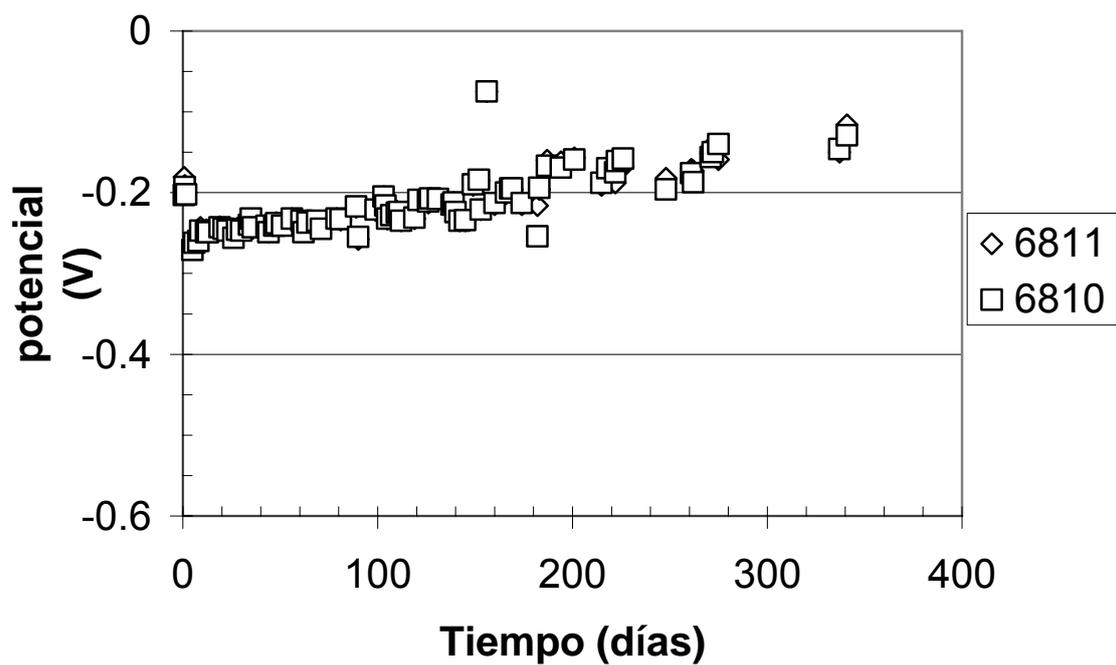


Figura 4.20
Potencial de barras a 180° de acero inoxidable 316 con 2% de NaCl

Como se puede observar en las gráficas anteriores de potencial de media celda, el comportamiento fue muy similar en el ambiente estudiado (concreto contaminado con cloruros a una humedad alta) para todos los tipos de concreto y barras utilizadas en esta investigación. No se presentó un cambio significativo entre cantidad de cloruros y/o tipo de barra de acero (recta vs doblada, o acero 304 vs acero 316). Los valores de potencial en tiempos mayores de 300 días, todos fueron por encima de -0.2 V vs CSC (entre -0.15 y -0.18). Esto corresponde a valores de potencial de media celda que indican pasividad del acero, por lo que se pudo observar en todos los casos que el acero no se corroe o si se siguen los criterios de evaluación mencionados (ASTM C-876 y Red DURAR). Esta condición de acero pasivo se comprobará con valores de velocidad de corrosión obtenidos con la técnica de impedancia electroquímica que se presenta a continuación.

4.2.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) del acero inoxidable

Siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior (Sección 3.6.2) se obtuvieron los valores de impedancia de cada una de las barras, a diferentes tiempos de experimentación (22, 43, 76, 181, 265, 278, 320 Y 355 días). Con los resultados de las pruebas de EIE se generan tres diagramas: Nyquist; Bode Magnitud; y Bode Fase. Éstos permitieron estudiar los parámetros electroquímicos mediante modelos de circuitos equivalentes y ajustes matemáticos (Figura 3.16). Los resultados permiten definir diferentes procesos en la interfase metal/electrolito, y de esa manera conocer la resistencia a la polarización aparente (R_p o R_{ct}) y determinar los valores de capacitancia (C_{dl}) de cada barra estudiada.

A modo de ejemplo en las Figuras 4.21 y 4.22 se presentan los típicos diagramas de Nyquist (impedancia real vs impedancia imaginaria) obtenidos para las barras de acero 304 y 316 respectivamente. Las figuras 4.23 y 4.24 muestran los diagramas de Bode Fase y Bode Magnitud para las barras 304 y 316 respectivamente.

Para el caso de los resultados presentes en los diagramas de Nyquist es claro notar que los aceros 304 presentan una tendencia a formar un semicírculo a valores muy altos de la parte real de la impedancia, en comparación de los resultados de los aceros 316 en donde el semicírculo es más abierto, indicando que el valor de R_p es mayor comparado con las barras de 304 y, por tanto, la velocidad de corrosión aparente es mayor para el acero inoxidable 304 que para el acero inoxidable 316.

Los diagramas de Bode (figuras 4.23 y 4.24) no muestran diferencia significativa entre ellos: se obtuvieron valores de ángulo de fase máximos de $\sim 80^\circ$ y valores de $|Z|$ de ~ 90 k Ω a 2 mHz.

A partir del ajuste del espectro experimental, similares a las Figuras 4.21 a 4.24, se obtienen los parámetros electroquímicos R_p y C_{dl} utilizando el circuito eléctrico equivalente, tipo Randles. En la Tabla 5.4 se presentan los valores obtenidos, mediante simulación del circuito equivalente (Randles), de los parámetros electroquímicos: R_p y C_{dl} .

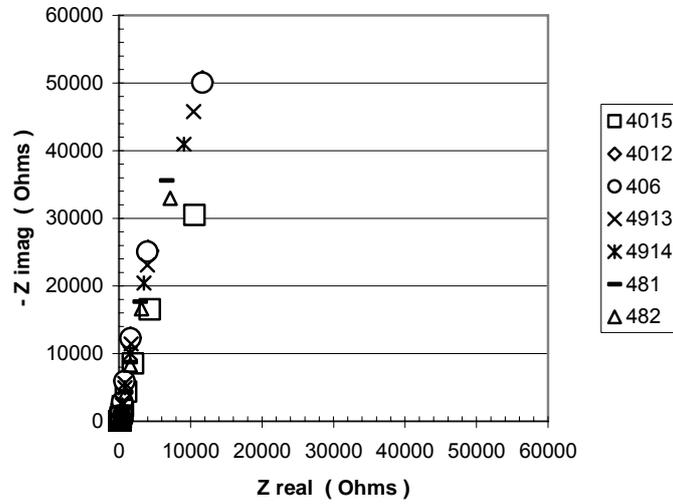


Figura 4.21
Diagrama de impedancia, tipo Nyquist, del acero inoxidable 304 para barras rectas (4012 y 4015), ganchos a 90° (4913 y 4914) y ganchos a 180° (481 y 482) en concreto contaminado con 2% de cloruros

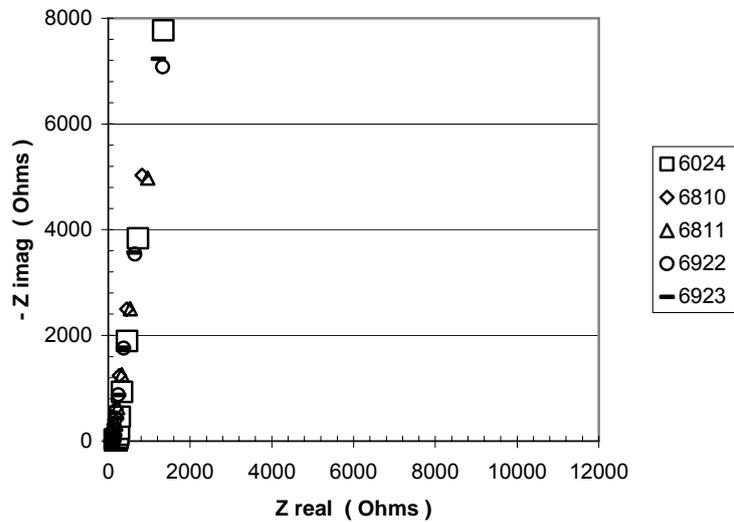
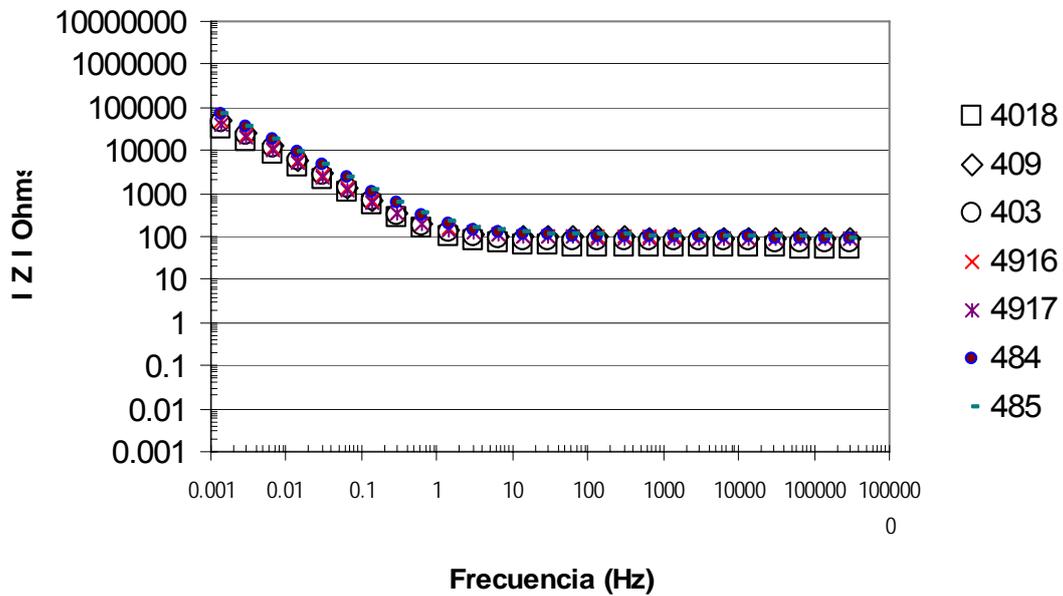
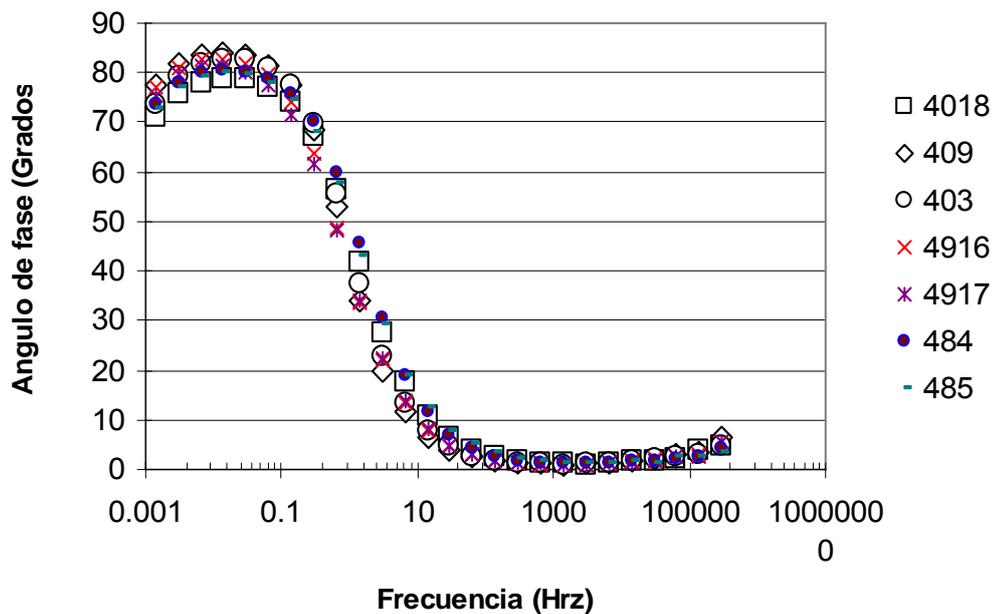


Figura 4.22
Diagrama de impedancia de Nyquist del acero inoxidable 316 para barras rectas (6024), ganchos a 90° (6922 y 6923) y ganchos a 180° (6810 y 6811) en concreto contaminado con 2% de cloruros



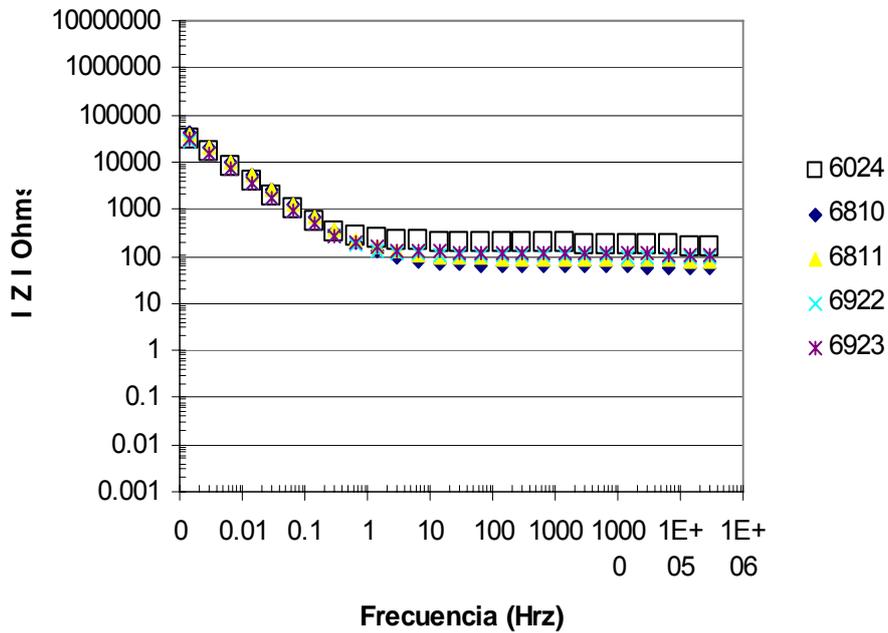
(a)



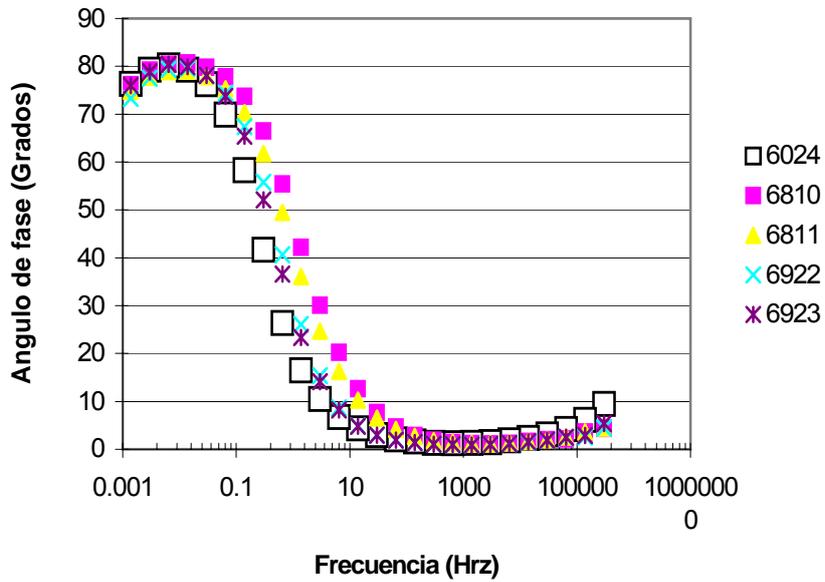
(b)

Figura 4.23

Diagrama de Impedancia Bode Fase (a), y Bode Magnitud (b) del acero inoxidable 304 para barras rectas (403, 409 y 4018), ganchos a 90° (4916 y 4917) y ganchos a 180° (484 y 485) en concreto contaminado con un 2% de cloruros



(a)



(b)

Figura 4.24

Diagrama de impedancia de Bode Fase (a), y Bode Magnitud (b) del acero inoxidable 316 para barras rectas (6024), ganchos a 90° (6922 y 6923) y ganchos a 180° (6810 y 6811) en concreto contaminado con un 2% de cloruros

En las Figuras 4.25 a 4.30 se presentan los valores de C_{dl} calculados con el software de análisis Echem de Gamry para las barras de acero inoxidable 304 y 316 en función del tiempo. Es muy claro observar que los valores obtenidos en todos los casos presentaron una disminución gradual de valor de esta capacitancia para la fecha 181 días. Esto se debió a que las probetas de concreto se secaron más de lo debido (diciembre de 2004).

Esta variación de la humedad del concreto produjo una disminución de la actividad por corrosión de las barras de acero inoxidable, debido a la falta de suficiente electrolito (agua) en la interfase acero/concreto. Esta falta de agua produjo que los iones se movilizaran con mayor dificultad, aumentando así la distancia iónica y, por consiguiente disminuyendo la C_{dl} de esta interfase. Para la siguiente fecha de prueba (día 265), el ambiente de las probetas se humedeció para alcanzar nuevamente la humedad relativa de $\sim 90\pm 5\%$, lo que desestabilizó los valores de C_{dl} a los obtenidos en fechas anteriores al secado excesivo.

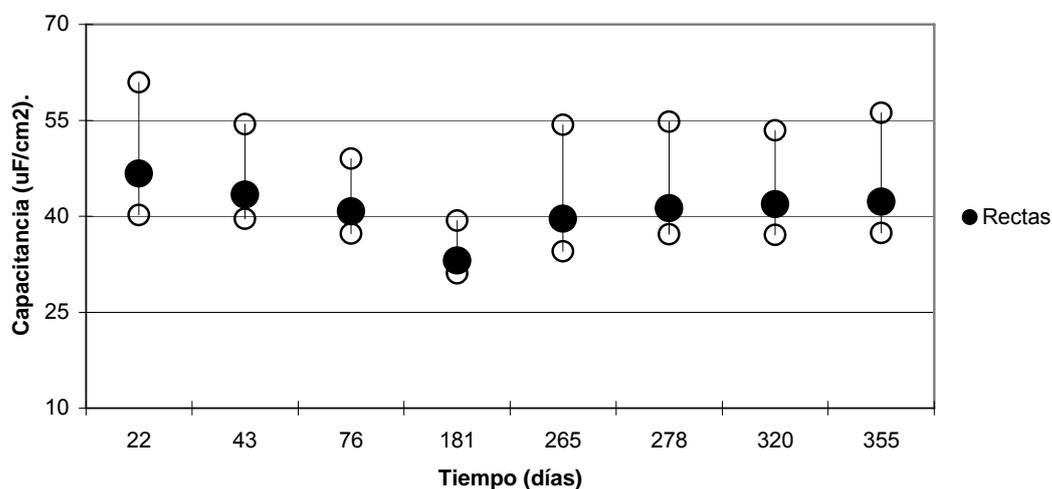


Figura 4.25
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 304 barras rectas

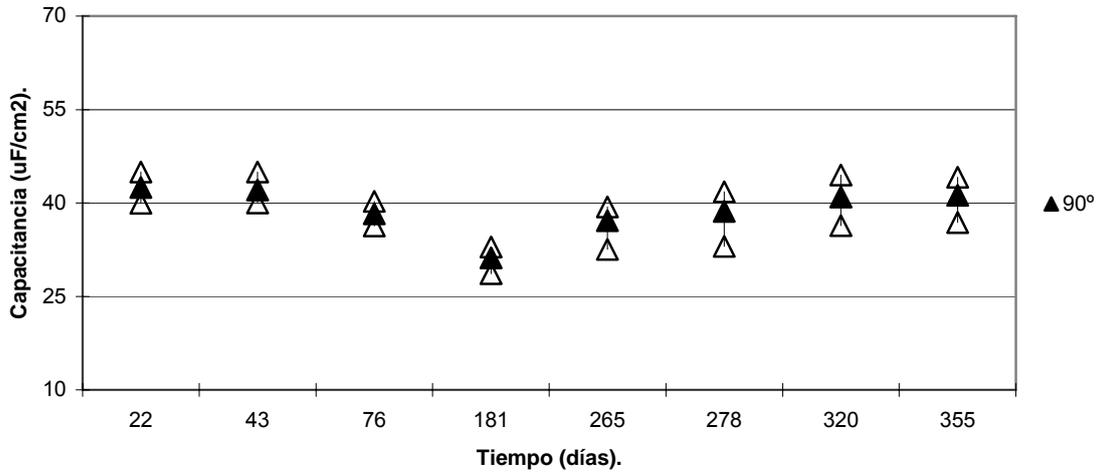


Figura 4.26
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 304 barras a 90°

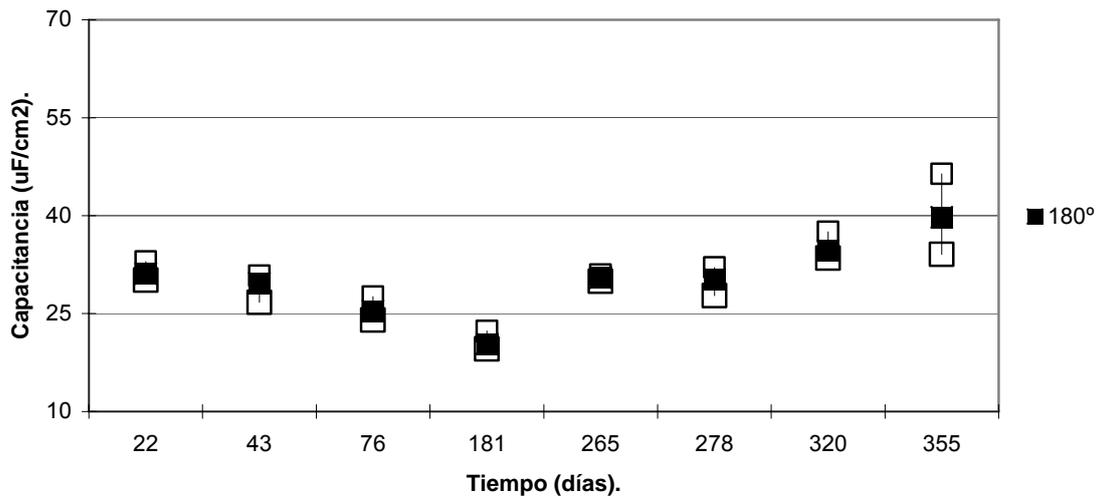


Figura 4.27
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 304 barras a 180°

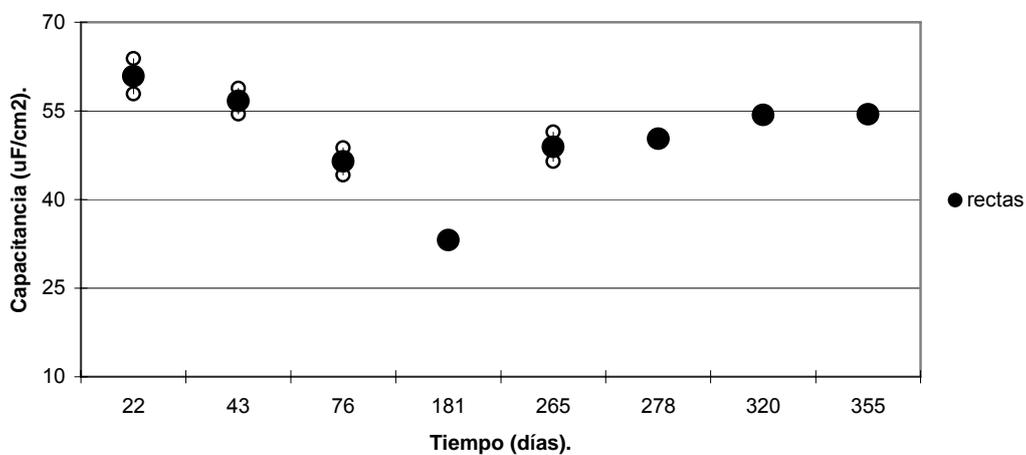


Figura 4.28
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 316 barras rectas

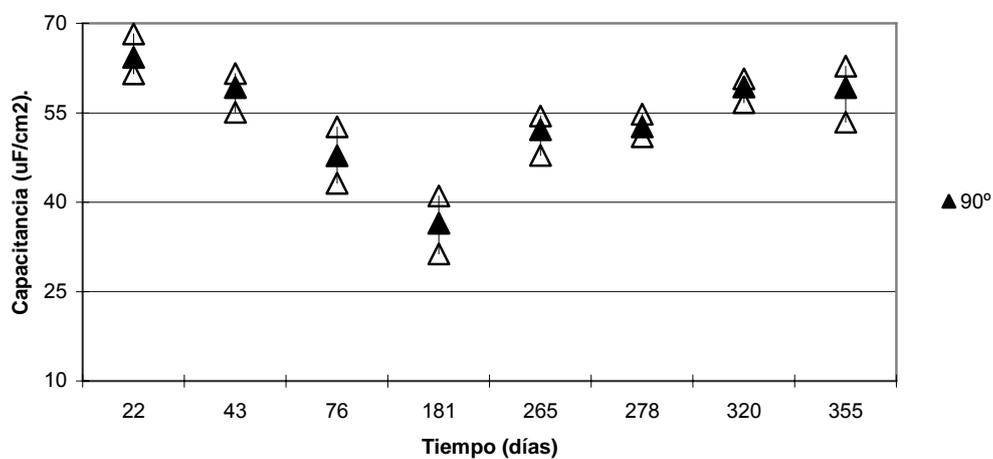


Figura 4.29
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 316 barras a 90°

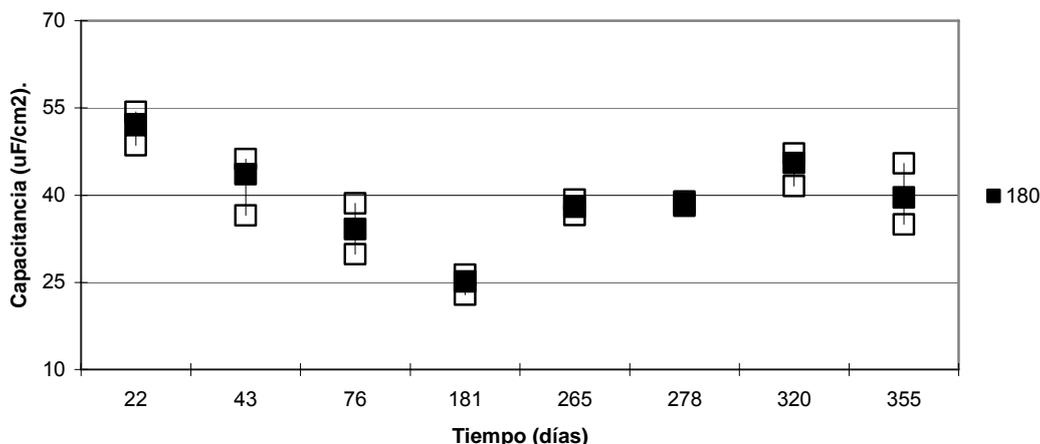


Figura 4.30
Promedio, máximo y mínimo de la capacitancia vs tiempo en Al 316 barras a 180°

Los valores obtenidos de la C_{dl} (Figuras 4.25 a 4.30) fluctuaron entre 10 y 60 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, siendo que los valores más pequeños se observaron en las barras con ganchos de 180° de acero de ambos tipos. Tomando como referencia valores de investigaciones anteriores de capacitancia para acero al carbón (Saremi, et al., 2002 y DURAR, 2000) y acero inoxidable (Millano, 2004), que fluctuaron entre 20 y 50 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para acero al carbón pasivo; 100 y 265 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para acero al carbón activo, 1 y 4 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para inoxidable pasivo; y 20 y 65 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para inoxidable activo, se puede inferir que mientras menor es el valor de la capacitancia del circuito equivalente utilizado para simular los datos de EIE, el acero se encuentra en estado pasivo. Los valores de C_{dl} para barras rectas en esta investigación fueron todos mayores de 25 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ que corresponden a acero inoxidable activo, según datos de Milano, 2004.

También es importante observar en estas gráficas (Figuras 4.25 a 4.30) las diferencias en los valores de C_{dl} para barras 304 rectas; barras con ganchos a 90°; y con ganchos a 180° fueron en promedio, 30 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, 40 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ y 20 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ respectivamente. Para el caso de acero inoxidable 316, los valores de la capacitancia para barras rectas, con gancho 90° y con gancho 180° resultaron ser de 40, 55 y 22 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ en promedio, respectivamente.

Como puede observarse de los datos mencionados, de alguna manera los esfuerzos residuales para los ganchos a 90° incrementan el valor de C_{dl} del acero en un 35% aproximadamente, en comparación con el valor de las barras rectas sin esfuerzo aplicado. Por el contrario, los valores de C_{dl} para ganchos a 180° la C_{dl} disminuyeron un 50% en relación a las barras rectas.

Esto puede atribuirse a la diferencia en esfuerzos residuales en los diferentes ganchos estudiados, y que existe posiblemente, un valor de esfuerzo

residual que hace que el acero inoxidable cambie sus propiedades electroquímicas en la interfase. En estudios previos se mencionó una relación entre activación por corrosión y capacitancia en donde explican que a mayor velocidad de corrosión, mayor es el valor de la capacitancia (Milano, 2004) y (González et al, 2005). Esto implicaría que las barras de ambos tipos de acero, 304 y 316, en donde se formarán ganchos estándar de 90° tendrían mayor probabilidad de corrosión que las barras rectas; y que las barras con gancho estándar de 180° tendrían menor probabilidad de corrosión.

Este comportamiento fue también comprobado con el efecto del secado producido en la medición del día 181 en donde los valores de la capacitancia de los aceros 304 y 316, con o sin ganchos disminuyeron, lo que sustenta el hecho que la activación por corrosión decreció debido a la reducción de la capacitancia producto del secado del concreto. Esto se comprueba con los resultados de R_p en la Tabla 5.4, los cuales aumentaron el día 181 en comparación con los valores de otras fechas, donde la humedad se mantuvo elevada.

Se puede observar de la misma Tabla 4.4 que los valores de R_p aumentaron al transcurrir el tiempo de experimentación en todos los casos, implicando que ambos tipos de acero (304 y 316) fueron formando alguna capa de óxido en la superficie que hizo que las barras se pasivaran. Los valores de R_p y C_{dl} se calcularon considerando el área total de la barra de refuerzo en contacto con el concreto como activa, lo cual no corresponde a las condiciones normales de corrosión de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros, que presenta un fenómeno de corrosión muy localizado (Bertolini, 2002; Millano, 2004).

En estudios previos utilizando barras de acero inoxidable 304 y 316 rectas en concreto y soluciones de hidróxido de calcio se obtuvieron valores de R_p de entre 7,600 y 29,800 kOhms-cm² (promedio 9,400 kOhms-cm²) cuando permanecieron pasivas; y entre 4,400 y 10,300 kOhms-cm² (promedio 6,730 kOhms-cm²) para barras activas (Millano, 2004). Cabe señalar que los valores de R_p obtenidos por Millano no poseen gran diferencia entre lo que llamaron acero pasivo y activo (< 28%).

Tabla 4.4
Parámetros electroquímicos, Rp y C, estimados a 22, 43, 76, 181, 265,278, 320, 355 días, calculados tomando el
circuito equivalente tipo Randles

Cl. Varilla	22 Días		43 Días		76 Días		181 Días		265 Días		278 Días		320 Días		355 Días	
	Rp Kohms.cm2	C uF/cm2														
2% 403	9079.4	40.86393	11079.6	39.6112	13153.8	38.2721	12,440.8	31.9654	6095.84	37.5810	0	0	9713.7	40.4536	12084.3	38.3585
2% 409	3511.4	54.96760	6630.2	45.4212	7130.2	43.0886	6,945.0	39.3089	3179.05	54.2765	9273.9	54.7948	8639.6	53.4125	14464.1	38.1641
2% 4018	9033.1	40.28078	10936.1	39.8704	15496.6	37.2786	12,644.5	31.1015	6443.00	34.6652	16186.5	37.8186	16130.9	38.1425	15061.4	39.2657
2% 6024	5023.6	63.86609	5292.1	58.8337	6653.3	48.7689	8,324.7	33.2613	3676.30	51.4255	11644.5	50.7775	9334.1	54.2549	8672.0	54.2765
1% 406	9079.4	42.80778	9815.6	40.8207	12394.5	39.0065	17,038.4	32.8294	7100.94	37.0842	20089.6	37.1706	15107.7	37.7970	6898.7	56.1771
1% 4012	6477.4	60.95032	4787.4	54.4060	6074.6	49.0281	7,931.2	31.1015	2713.64	39.6760	7685.8	39.2441	7019.1	44.5140	12945.5	37.3650
1% 4015	9630.4	40.17279	10653.6	40.2160	14862.3	37.8834	9,602.6	31.9654	6038.23	34.5140	13579.8	37.2354	12501.0	37.0842	6593.1	44.2117
1% 6021	4801.3	57.86177	6037.5	54.4708	6435.7	44.1253	7,347.8	33.0454	2948.62	46.4363	9945.2	49.8272	9014.6	54.4276	8287.7	54.5572
1% 4913	8285.3	39.93902	9667.8	40.5894	12910.1	36.3415	10,194.2	28.6585	5096.40	32.5610	15050.3	33.0285	8915.0	36.3821	7675.2	36.8699
1% 4914	7448.9	44.97967	8221.3	44.9797	10046.6	40.2642	5,116.8	32.9268	3654.90	38.5569	8772.4	41.7886	8865.8	41.8699	8659.2	41.2195
1% 6919	3257.0	68.25203	5628.5	60.6707	5643.2	52.6220	5,854.8	41.0569	2816.35	53.6789	9097.1	54.7561	7129.1	60.6911	6140.2	62.8455
1% 6920	3680.2	61.54472	5234.9	55.1016	6223.8	43.1911	8,137.7	31.3008	2903.15	47.8252	9451.3	52.4593	6046.7	56.6870	8408.3	53.4146
2% 4916	8752.7	40.48780	10582.9	39.9797	13628.4	37.3780	12,560.8	31.7073	5361.45	38.0894	14824.0	40.4065	11173.3	41.0976	10007.3	42.6829
2% 4917	6642.0	44.45122	9234.8	42.8455	10568.2	38.9837	10,105.7	31.5041	3633.20	39.3699	11266.8	39.3902	8905.2	44.4715	9028.2	44.1057
2% 6922	3820.4	63.82114	5849.9	59.5325	6912.6	46.3008	7,995.0	38.0081	2906.25	52.8049	9682.6	50.9553	4727.1	59.3089	5751.5	61.5650
2% 6923	4734.5	63.55691	5908.9	61.5650	6642.0	49.1260	7,055.3	35.5691	2631.90	54.4309	8767.4	52.3577	6282.8	60.6504	7202.9	59.2276
2% 481	9510.8	31.24069	10659.4	30.7692	12944.4	25.9553	10,175.8	22.3325	5812.50	29.9504	13528.7	27.7643	11662.8	33.4739	12061.8	34.3672
2% 482	7532.1	32.95285	10885.0	30.6452	12738.8	27.6179	11,602.4	19.6030	5502.50	30.6948	14294.4	29.6526	12138.4	33.4739	11949.0	34.0447
1% 687	5835.4	48.58561	6403.7	36.5261	7052.5	29.8511	8,297.8	22.8288	3340.25	37.8660	8938.5	38.9082	7431.3	46.2035	9007.1	34.9628
1% 688	5460.7	52.55583	5239.0	45.6328	6657.6	33.8958	7,427.3	26.3027	3014.75	38.3127	8334.0	38.1638	6516.5	47.1960	12654.2	35.3350
1% 484	7834.3	30.12407	9801.0	30.5211	12287.5	24.1439	12,928.2	19.6030	5325.80	30.3474	11038.2	31.5633	10667.4	34.2928	7773.9	46.4020
1% 485	7254.0	30.24814	10655.3	26.7246	12315.7	24.0199	12,456.7	20.0744	6379.80	30.9926	10792.3	32.0596	10748.0	37.5434	6427.9	44.3176
2% 6810	5222.9	53.27543	6020.8	46.2035	2812.9	38.6104	8,962.7	26.3027	3092.25	36.5757	8007.6	38.5608	7064.6	41.5881	6294.9	42.6055
2% 6811	4412.9	54.31762	6105.5	46.0050	7096.8	34.36725	7,830.3	25.0620	3008.55	39.2060	7919.0	38.4864	6516.5	47.1712	7439.4	45.4839

Los valores de R_p obtenidos en este estudio (menores de $4,600 \text{ k}\Omega\text{-cm}^2$) para barras rectas son del orden de acero activo presentes en investigaciones previas (Millano, 2004). En la Tabla 4.4 se puede observar que los valores de R_p a 355 días, para barras de acero tipo 316 con ganchos a 90° fueron los más bajos, lo cual implicaría que dichas barras son más susceptibles a corroerse aceleradamente por esfuerzos residuales. Esto sustenta los valores de C_{dl} , en donde las barras con ganchos a 90° tuvieron los valores más altos de C_{dl} en promedio.

Para evaluar los resultados de parámetros electroquímicos de las pruebas de EIE, se graficaron los valores de R_p vs C_{dl} que se pueden observar en las Figuras 4.31 a 4.35. Estas gráficas comprueban lo discutido anteriormente en donde se relaciona el valor de C_{dl} con la activación por corrosión. Además se puede observar que a mayor valor de C_{dl} , menor es el valor de R_p lo que implica mayor actividad por corrosión. Revisando estas figuras también se puede observar que los valores de C_{dl} disminuyen y los de R_p aumentan con el tiempo de experimentación, lo cual da la pauta para demostrar que en el tiempo de experimentación de esta investigación (menor a 360 días), las barras de acero inoxidable 304 y 316 se pasivaron, aun con las concentraciones de cloruro y las humedades usadas. Este fenómeno tendrá que demostrarse cuando se tengan valores de C_{dl} y R_p a mayor tiempo de exposición, pero a la fecha se pudo demostrar que en el ambiente estudiado, las barras de acero inoxidable 304 y 316 no presentaron diferencias marcadas por lo que se recomendaría emplear acero tipo 304, como el utilizado en el Muelle de Progreso, para reforzar estructuras de concreto en ambiente marino tropical, ya que el costo de este tipo de acero es menor en casi un 30% al acero inoxidable, tipo 316, en México.

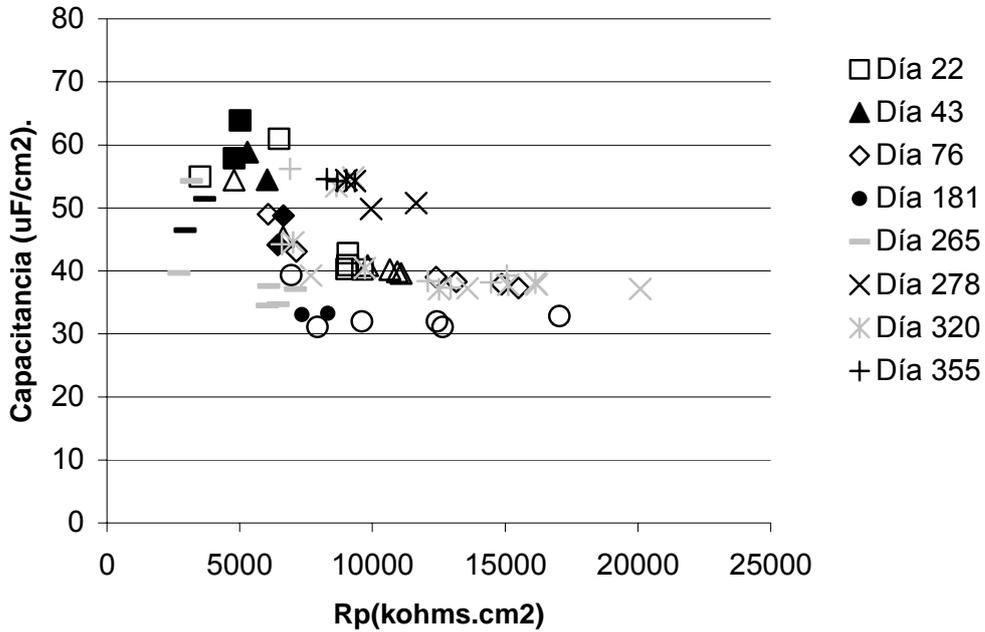
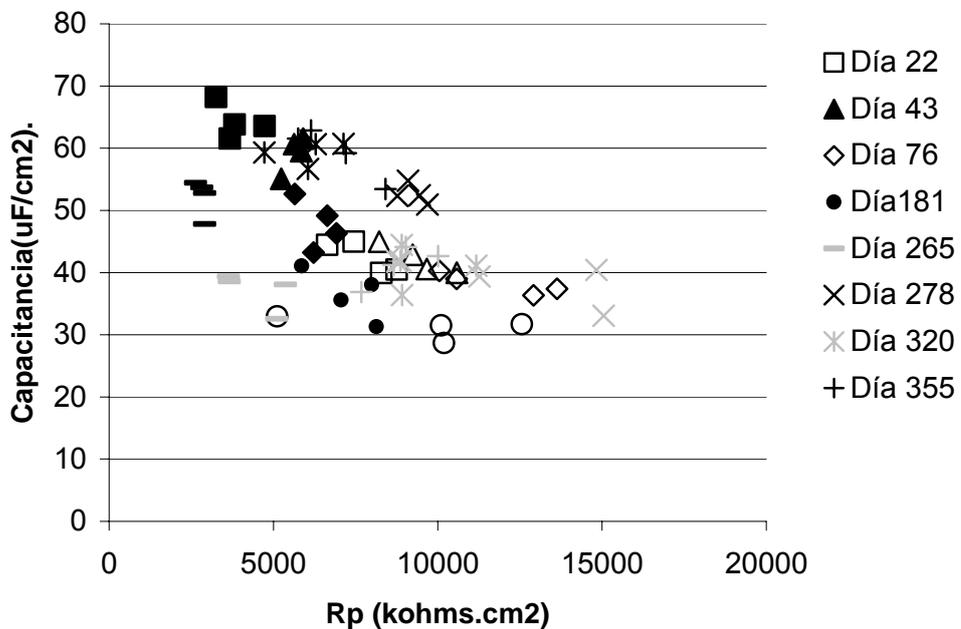


Figura 4.31
Lecturas del comportamiento C vs Rp para barras de acero inoxidable 304 y 316 colocadas rectas



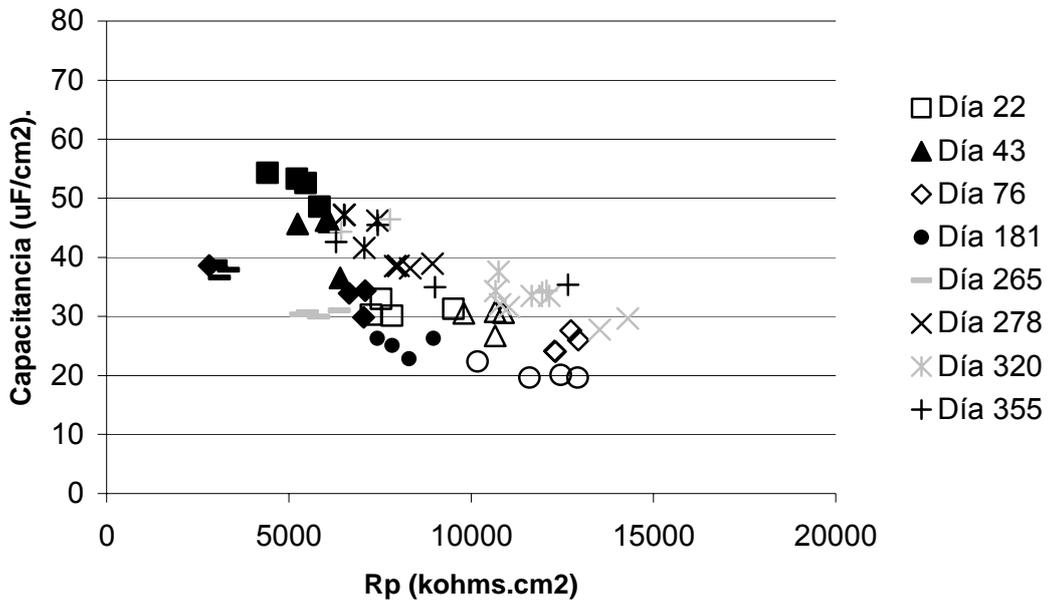


Figura 4.33
Lecturas del comportamiento C vs. Rp para barras de acero inoxidable 304 y 316 colocadas a 180°

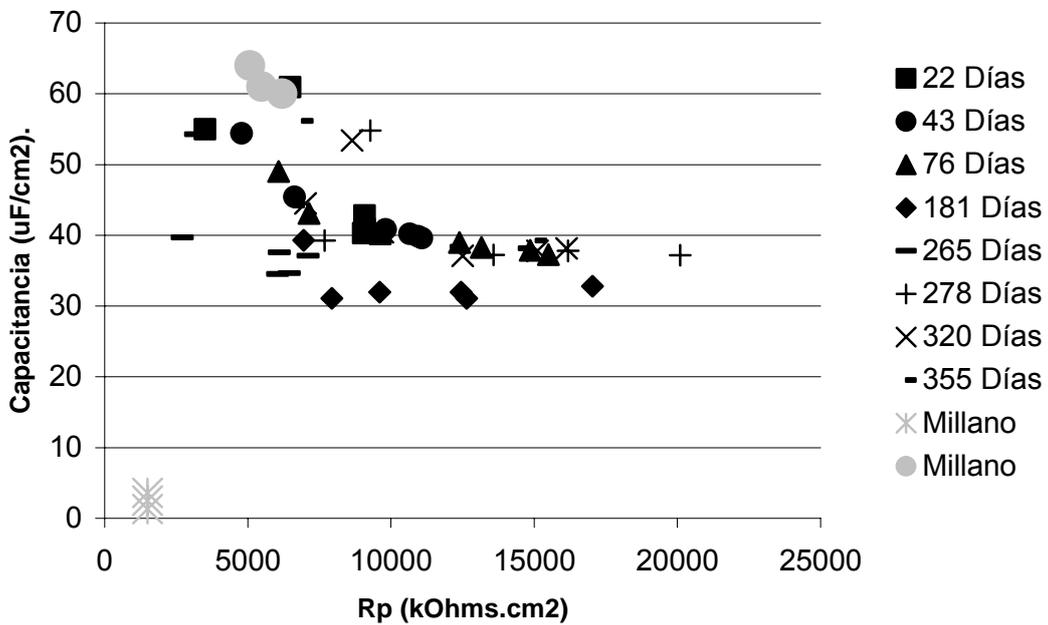


Figura 4.34
Comparación del acero inoxidable 304 en barras rectas

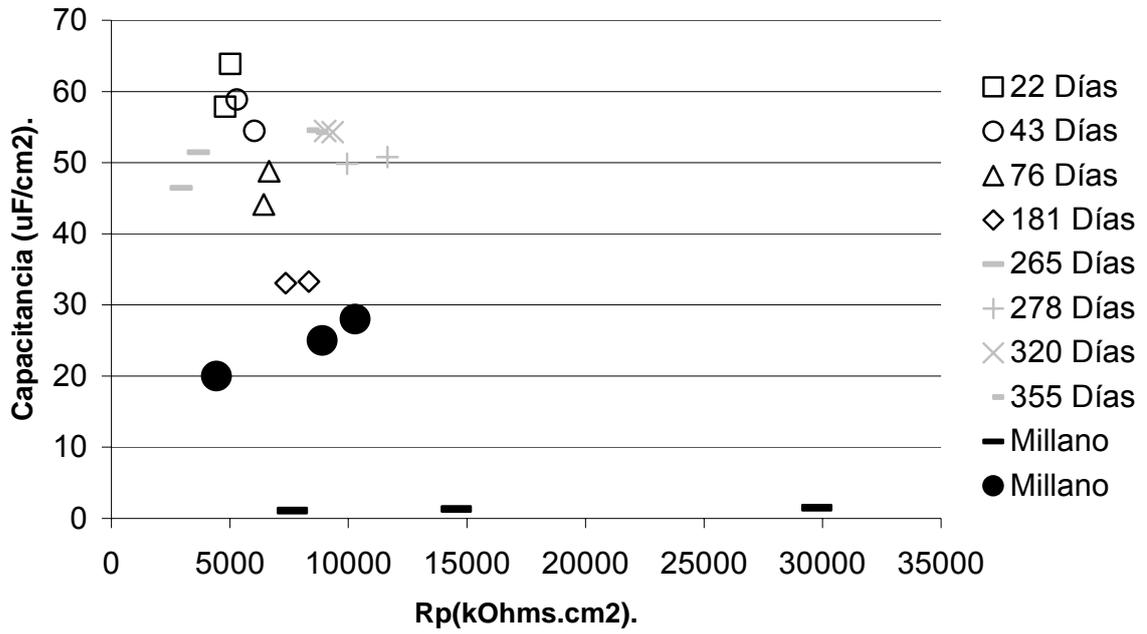


Figura 4.35
Comparación del acero inoxidable 316 en barras rectas

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Con la caracterización de las propiedades físicas de los concretos fabricados en esta investigación, se determinó que éste presentaba las propiedades del concreto semejantes en el muelle de Progreso.
- Con la ayuda de un análisis químico realizado a los aceros utilizados en esta investigación, se comprobó que se usaron dos tipos de acero inoxidable denominados AISI-SAE 304 y 316.
- Los resultados hasta ahora obtenidos han demostrado que los aceros inoxidables, tipo AISI-SAE 304 y 316, no presentan problemas de corrosión en concretos húmedos con alta contaminación por cloruros de hasta 2% en peso. Esta afirmación se basa en los resultados de potencial de media celda obtenidos, los cuales fluctuaron entre -0.23 y -0.16 V vs CSC y los valores de resistencia a la polarización, R_p , los cuales fueron mayores a 5000 $k\Omega\text{-cm}^2$.
- Hasta ahora, los resultados muestran diferencias marginales en el comportamiento electroquímico entre barras rectas de acero inoxidable y barras que presentan esfuerzos residuales por doblado (formación de ganchos). Aunque se pudo observar que a 355 días de exposición en este ambiente, las barras de inoxidable AISI-SAE 316 muestran una ligera disminución de su resistencia a la corrosión cuando se utilizan como ganchos a 90° , y esta resistencia aumenta si son dobladas en ganchos de 180° .
- Por otro lado, las barras inoxidables, tipo AISI-SAE 304, presentaron valores de capacitancia, C_{dl} , menores que las otras condiciones cuando se usan como ganchos de 180° , indicando así un comportamiento de mayor pasividad que los otros casos estudiados.
- En ambas barras de acero inoxidable y para todas las concentraciones de cloruros, se comprobó que para acero activo el valor de la C_{dl} es mayor que para los aceros pasivos.

5.2 Recomendaciones

- Realizar mediciones electroquímicas en el acero inoxidable del muelle de Progreso para comparar los resultados obtenidos con las probetas de acero inoxidable AISI-SAE 304.
- Efectuar el mismo estudio para otros tipos de acero inoxidable (AISI-SAE 304L, 316L, etc) con el fin de determinar la resistencia a la corrosión por picaduras de estos aceros, y establecer la correspondiente comparación.
- Utilizar barras de acero inoxidable corrugadas, con el fin de determinar si existe mayor susceptibilidad a la formación de picaduras.
- Ampliar el rango de concentración estudiado para las barras lisas de acero inoxidable AISI-SAE 304 y 316.
- Exponer las probetas en ambientes naturales agresivos sin la incorporación de cloruros en la mezcla, para obtener un mejor criterio de selección entre los aceros estudiados; aunque esto haría que la investigación podría llevar a tiempos tan prolongados, como una decena de años.
- El análisis electroquímico indica que se puede recomendar el uso de las barras de acero inoxidable AISI-SAE 316 como material de refuerzo, para obtener una extensión de vida útil de estructuras de concreto armado en ambientes de alto riesgo (agresivos) $\geq 4\% \text{ Cl}^-$.
- Aplicar un proceso de corrosión acelerada a las barras de acero inoxidable con el fin de obtener resultados que simulen largos periodos de corrosión.

6 Referencias.

Aguilar Martel, M. *Evaluación estadística de los agentes corrosivos del medio ambiente en la degradación de la infraestructura de puentes en México*, Universidad Marista de Querétaro, (2002)

Alcocer, I. *Carbonatación en estructuras de concreto*. UNAM, (1994).

Andrade, C, Merino, P. Nòvoa, X R., Pérez, M. C. and Soler, L. *Passivation Of Reinforcing Steel In Concrete*, Materials Science Forum, Vols 192-194, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 891-898. (1995).

Ávila M. Javier, Genescá Joan. *Mas allá de la herrumbre*“. México (1986).

Bertolini Luca, Gastaldi Matteo, Pedferri P., Redaelli E., Factors Influencing The Corrosion Resistance Of Austenitic And Duplex Stainless Steel Bars In Chloride Bearing Concrete, Dipartimento di Chimica Fisica Applicata, Politécnico de Milano, Milano, Italia (2002).

Blenkinsop, R., Currel, B., Midgley, H and Parsonage, J.. *The Carbonation Of High Alumina Cement, Part I*. Cement and Concrete Research. V. 15, pp. 276-284. (1985)

Camacho Hurtado, S. *El Uso De Una Pintura Rica En Zinc Como Sistema De Protección Catódica En Concreto*, Universidad Marista de Querétaro, (2002).

Castro Borges P., Troconis de Rincon, O., Moreno, E.I., Torres Acosta, A.A., Martínez Madrid., and Knudsen, A. *Performance Of A 60-Year Old Concrete Pier With Stainless Steel Reinforcement*, Materials performance, vol. 59, No. 10, October, pp. 2-7, (2002).

Christensen, A.. “Pier at Progreso,” Reprint from 50 Years of Civil Engineering, Copenhagen, Denmark. Aceros inoxidables. Desarrollo y aplicaciones, Internet: www.monografia.com, (1954)

Cottis, R. y Turgoose, S. *Electrochemical Impedance And Noise*. Barry Systems. Jhon Wiley and Sons Editor. NACE Internacional, Houston, TX. (1990).

Dhir, R. K.. “*Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coefficient In Concrete. Magazine Of Concrete*” research, vol. 42, No. 152, pp 117-185. (1990)

DURAR Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. CYTED. Tercera Edición. Agosto,. ISBN 980-296-541-3 (2000).

Feliú, S., y Feliú, V. *Modelado e Identificación de Procesos de Corrosión; Análisis de la Respuesta a Señales Eléctricas*. Monografía No. 380. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid (1985).

Fontana y Gren. *Corrosion Engineering*. Editorial McGraw- Hill. United States of America. (1986).

Gonzalez, J.A., Miranda, J.M., Birbilis, N., and Feliu S. (2005). "Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages", the journal of science and engineering Corrosion. Vol. 61, No.1, pp. 37-50. (January 2005)

Haynes, J.M. *Stainless Steel Reinforcement, Civil Engineering*, (8): p.26-28. (1984).

Honeycombe, R.W. *The plastic deformation of metals*. London. (1984).

Inchaurza, Z.A. "Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor. Propiedades, Transformaciones y Normas". Ed. Limusa. México. *Uso selectivo del acero inoxidable*. Internet: www.arminox.com.au, (1981).

Knudsen, A., Jensen, F.M., Klinghoffer, O. and Skovsgaard, T. *Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement*, Proceedings of International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Federal Highway Administration Publication No. FHWA-SA-99-014, (McLean, Virginia: FHWA), (1998).

McDonald, D.B., Sherman, M.R., Pfeifer, D., and Virmani, P. (1995). *Stainless Steel Reinforcing as Corrosion Protection*, *Concrete International*, (5): p.65-70.

Moreno, E. I. *Carbonation of Blended Cement Concretes*, Ph. D Thesis, Department of Civil and Environmental engineering, University of South Florida, Tampa, FL, (1999)

Neuhart, B. and Martin, J. *Stainless Steel Reinforcement in Bridge Construction - Status 2000*, 17th International Bridge Conference, June 12-14, Pittsburgh, PA, Engineers' Society of Western Pennsylvania, (2000).

Nurberger, U. Beul, W. and Onusit, G. *Corrosion Behavior of welded stainless reinforced steel in concrete*. *Otto Graph Journal, FMPA BW, Stuttgart*, pp 225-259, (1993).

Page, C. I. and Treadaway, K. W. *Aspects of electrochemistry of steel in concrete* *Nature*, Vol. 297, No. 13, pp. 109-118. (1982).

Pedefferri Pietro, Bertolini Luca, Bolsón Fabío, Pastore Tommaso. Behavior of Stainless Steel in Concrete. Dipartimento de Chimica Fisica Applicata, Politecnico de Milano, Milano, Italia, (1998).

Pérez Quiroz, J. T. Seguimiento por la Técnica de Impedancia Electroquímica de la Protección Catódica del Acero de Refuerzo en Concreto Modificado por un Agente Humectante Universidad Nacional Autónoma de México, (2001).

Reed-Hill, R., Principios de Metalurgia Física, Ed. CECSA, México. (1986)

Rodríguez, A. Carbonatación en concreto armado: efecto del medio de curado y exposición en diferentes ambientes en la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, Universidad Nacional Autónoma de México, (1995).

Rodríguez-Maribona, I., Carpio, J. J. and Raharinaivo, A. *Electrochemical Behavior of Concrete Reinforcing Steel Under Cathodic Polarization: Comparison of Some Test Procedures*. Materials Structure / Materials et Constructions, Vol. 24 pp. 100-105. (1991).

S. Covino, G. R. Holcomb, S. J. Bullard, J. H. Russell, S. D. Cramer, J. E. Bennett and H. M. Laylor. (1999). Electrochemical Aging of Humectant : Treated Thermal Sprayed Zinc Anodes for Cathodic Protection, NACE Corrosion Congress '99, Paper 548.

Saborío, L. E. (2005) CICORR Instituto Costarricense de Electricidad.

Sorensen, B, Jensen, P.B, Maahn E. The corrosion Properties of Stainless Steel Reinforcement “. Elsevier Applied Science, pp 601-610. (1990)

Steven, H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tanesi. Diseño y control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE.UU., páginas.468-470. (2004).

Sidney Mindess, J. Francis Young. Concrete Prentice-Hall, EUA. (1981).

Stratful, R. F. American Highway Research. Record, No. 433, 12. (1993).

Torres Acosta, A.A. Durabilidad de estructuras de concreto expuestas a un ambiente marino. Parte 1-periodo de iniciación de la corrosión (T_1), Construcción y Tecnología, Vol. 13 No. 157, Junio, pp 24-35, IMCYC México D.F. (2001).

Torres Acosta, A.A. y Martínez Madrid, M. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad publicación técnica IMT No. 181, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro. (2001)

Torres Acosta, A.A. Galvanic corrosion of Steel in contact with carbon-polymer composites-part 2 Experiments in concrete, *Journal of composites for constructing*, vol. 6, No. 2, pp. 116-122. (2002).

Torres-Acosta, A. A. Electrochemical Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) Strands in Alkaline Solutions, *Proceedings XVIII Congress of the Mexican Society of Electrochemistry*, Chihuahua, Chihuahua, México, May 26-30. (2003).

Torres Acosta, A.A., Favela Gallegos, M., Vasquez Vega, D., Martinez Madrid, M., Castro Borges, P., Moreno, E.I and Cuadros, H. "Structural evaluation and rehabilitation of concrete arches in the Progreso Pier, International Conferences of construction and rehabilitation of concrete structure, Johannesburg South Africa. November. (2005),

Van Vlack, L. *Materiales para ingeniería*. Ed. CECSA. México (1980).

Vassie, P. R; *Transport and Road Research Laboratory, Report 953*. (1978).

Walter, G. W. A Review of Impedance Plot Methods Used for Corrosion Performance Analysis of Painted Metals. *Corrosion Science*, Vol. 26, no. 9, pp. 681-703. (1986).

Wheat, H. G. and Eliezer, Z.. Some Electrochemical Aspects of Corrosion of Steel in Concrete. *Corrosion NACE*, Vol. 41, No. 11, pp. 640-645. (1985)

Yunovich, M, Thompson, N.G., Virmani, Y.P. "Life Cycle Cost Analysis for Reinforced Concrete Bridge Decks", *CORROSION/2003*, Paper No. 03309, (NACE International: Houston, TX) (2003).

Glosario.

Acero: Aleación hierro-carbón, con un contenido máximo de carbono del 12%

Acero inoxidable: Aleación de hierro que contiene un mínimo de 12% de cromo, níquel, molibdeno, titanio; otros elementos se pueden añadir para mejorar dependiendo de la composición, la resistencia a la corrosión.

Acuoso: Medio que contiene agua en la que ésta actúa como electrolito, o conductor iónico de la corriente.

Activo: Término que se refiere a un estado de los materiales metálicos en el que estos tienden a corroerse, o a aleaciones metálicas que se sitúan en el extremo de potenciales más negativos en las series electroquímicas y son muy corroibles.

Agente agresivo: Componente del medio al que se le atribuye la acción corrosiva sobre el material metálico.

Agrietamiento: Roturas en el concreto siguiendo una trayectoria única, o ramificada.

Ánodo: Electrodo de las celdas electroquímicas en el cual se produce la oxidación de alguna sustancia.

Cátodo: Es el electrodo de la célula electrolítica o de una pila corrosiva en el que tiene lugar la reducción, es decir, es el elemento receptor de electrones.

Control de la corrosión: Mantenimiento de la velocidad de corrosión y de la forma de ataque en un sistema medio / metal en un nivel y morfología tolerables y a un costo aceptable.

Corrosión: Transformación de un metal del estado elemental al combinarlo (estado iónico) por reacción química o electroquímica con su medio, que conlleva a su destrucción o deterioro.

Densidad de corriente: Intensidad de corriente por unidad de superficie. Suele expresarse en A/m^2 , mA/m^2 , $\mu A/cm^2$, etc.

Durabilidad: Término referido a una estructura, indica la vida en servicio remanente de la misma.

Electrodo de referencia: Es una pila prácticamente impolarizable y de potencial constante, que sirve para medir y controlar el potencial del electrodo sometido a estudio en la celda, refiriéndolo a una escala arbitraria (p.e., escala de hidrógeno, $Cu / CuSO_4$, $Ag/AgCl$, etc).

Electrodo de trabajo: Es la muestra de ensayo o electrodo sometido a estudio en una celda electroquímica.

Metal activo: Es un metal poco resistente a la corrosión, o que se está corroyendo. A estos metales les suele corresponder un potencial próximo al extremo más negativo (más activo) de las series electroquímicas o galvánicas de potenciales.

Oxidación: Pérdida de electrones en una reacción electroquímica, por ejemplo en los procesos anódicos, cuando un metal pasa del estado metálico al de catión (estado oxidado, combinado o corroído).

Pasividad: Se refiere al estado de un metal cuando permanece prácticamente inalterado por largos períodos de tiempo, en medios en los que debiera reaccionar.

Polarización: Es la diferencia matemática entre potencial del electrodo para unas condiciones dadas de intensidad de corriente y el potencial de corrosión o potencial de circuito abierto.

Potencial de corrosión: Es el potencial de un electrodo que se corroe en un medio dado, sin flujo de corriente externa.

Potenciostato: Instrumento electrónico que mantiene a un electrodo a potencial constante, y es capaz de variarlo también según una secuencia de tiempo, dentro de un amplio margen de velocidades de barrido.

Resistencia a la polarización: Es la pendiente $\Delta E / \Delta i$, de las curvas de polarización en el potencial de corrosión. La resistencia a la polarización R_p , es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, $i_{corr} = B/R_p$, cuando la técnica de polarización lineal es aplicable (B es la constante de Stern).

Velocidad de corrosión: Es la cantidad de material o aleación deteriorada (oxidada) por unidad de tiempo. Puede expresarse en función de la penetración (mm/año, $\mu\text{m}/\text{año}$); de la variación de peso por unidad de superficie ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, m.d.d, etc).



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx