



Certificado en ISO 9001:2000‡



SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES

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

CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE REFUERZO-PROTECCIÓN EN ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO DAÑADOS POR CORROSIÓN, UTILIZANDO COMPUESTOS BASE FIBRAS DE CARBÓN

Francisco Lee Orantes
Andrés A Torres Acosta
Jorge Terán Guillén
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No 295
Sanfandila, Qro. 2006**

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

**Caracterización de un sistemas de refuerzo-
protección en elementos de concreto
reforzado dañados por corrosión utilizando
compuestos base fibras de carbón**

**Publicación Técnica No. 295
Sanfandila, Qro, 2006**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el M C Francisco Lee Orantes; el Dr Andrés A Torres Acosta; M C Jorge Terán Guillen; asistente, jefe del área de materiales, e investigador, respectivamente de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Se agradecen los comentarios y sugerencias del M C José Trinidad Pérez Quiroz y de la Dra Angélica del Valle Moreno, investigadores de la misma coordinación.

Índice

	Página
Resumen	VII
Abstract	IX
Resumen ejecutivo	XI
1. Introducción	1
2. Fundamentos generales	3
2.1 Planteamiento del problema.....	3
2.2 Corrosión.....	4
2.3 Concreto reforzado	6
2.4 Tipos de corrosión en el acero de refuerzo	8
2.4.1 Corrosión localizada	9
2.4.1.1 Corrosión por picaduras.....	9
2.4.1.2 Corrosión bajo tensión	10
2.4.2 Corrosión uniforme/generalizada.....	10
2.5 Factores involucrados en el proceso de corrosión	10
2.5.1 Iones despasivantes	11
2.5.1.1 Cloruros	11
2.5.1.2 Sulfatos.....	12
2.5.2 Carbonatación.....	13
2.5.3 Existencia de fisuras	14
2.6 Modelo de vida útil	16
2.6.1 Vida útil	16
2.6.2 Vida residual	17
2.6.3 Estado límite de servicio (ELS) y estado límite último (ELU).....	17
2.6.4 Probabilidad de falla	17
2.7 Técnicas para caracterización utilizadas.....	19
2.7.1 Resistencia eléctrica y resistividad de los materiales	20
2.7.2 Potencial de media celda	21
2.8 Protección catódica.....	23
2.8.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio.....	25

2.8.2 Protección catódica por corriente impresa.....	26
2.8.3 Criterios de protección catódica.....	28
2.8.3.1 Criterio de protección de -850mV.....	28
2.8.3.2 Criterios de desplazamiento del potencial.....	29
2.9 Hipótesis	32
2.10 Justificación	32
2.11 Objetivo general.....	32
2.11.1 Objetivos específicos	32
2.12 Alcances	33
3 Desarrollo experimental	35
3.1 Materiales utilizados (Sistema)	35
3.1.1 Resinas epóxicas.....	35
3.1.2 Refuerzo estructural.....	36
3.2 Caracterización del polímero conductor.....	37
3.2.1 Fabricación de los polímeros conductores.....	37
3.2.2 Medición de la resistencia eléctrica	39
3.2.3 Cálculo del factor de forma.....	40
3.3 Fabricación de los especímenes de concreto	41
3.3.1 Acondicionamiento de las barras de refuerzo.....	41
3.3.2 Fabricación de los moldes y prismas.....	41
3.4 Colocación del sistema en los especímenes.....	47
3.4.1 Colocación del reforzamiento.....	48
3.4.2 Calculo de la constante geométrica de resistividad (prismas)	50
3.5 Cámaras de humedad controlada	52
3.6 Aplicación de las corrientes de protección.	56
3.7 Medición del potencial de media celda en los prismas	58
3.7.1 Medición de los potenciales de media celda de las barras de acero.....	59
3.7.2 Medición del potencial de media celda del electrodo de Titanio/Oxido de Titanio (Ti/TiO (Calibración).....	60
3.8 Medición de la resistencia eléctrica en los prismas.....	60
3.8.1 Medición de la resistividad eléctrica del electrolito (concreto)	60

3.8.2 Medición de la resistencia eléctrica del sistema propuesto	60
3.8.3 Medición de la resistencia eléctrica del CFRP	62
3.9 Medición de la fuerza de adherencia del sistema.	64
3.10 Inspección visual (Interfase y varillas de refuerzo).....	66
4 Resultados y Discusiones	67
4.1 Resistividad de las resinas epóxicas conductoras	67
4.2 Potencial de media celda para corrientes alta, media y baja, (1000 mA/m ²), (100 mA/m ²), y (50 mA/m ²)	70
4.3 Potencial de media celda para diferentes concentraciones de fibras añadidas	71
4.4 Potencial de media celda para las 3 resinas seleccionadas	73
4.5 Resultados de las mediciones de despolarización.....	74
4.6 Resistividad del sistema (CFRP+ Polímero Conductor vs. Barra Protegida).....	76
4.7 Resistencia eléctrica de CFRP (Platinas)	77
4.8 Resistividad del electrolito (Concreto).....	78
4.9 Envejecimiento electroquímico y vida de servicio estimada.....	80
4.10 Fuerza de adherencia del sistema propuesto	81
4.10.1 Efecto del porcentaje de fibras.....	82
4.10.2 Efecto del tipo de resina conductora.....	82
4.10.3 Efecto de la variación de la corriente aplicada.....	82
4.11 Inspección visual.....	83
Conclusiones	87
Referencias	89
Anexos	91



Resumen

En este estudio se emplearon compuestos de fibra de carbón como reforzamiento y protección catódica en elementos de concreto con corrosión. Diferentes resinas epóxicas se analizaron previamente, y las que presentaron mejores características conductivas se seleccionaron para su utilización en el sistema de protección catódica. Éstas se fabricaron variando la cantidad de fibras de carbón y la longitud de estas fibras para aumentar la conductividad eléctrica/iónica de la resina prototipo. Los compuestos fueron pegados a los elementos de concreto con las resinas seleccionadas, y éstos fueron conectados eléctricamente con una de las barras de refuerzo de los prismas de concreto usándose así como ánodos de corriente impresa. Una corriente eléctrica se aplicó entre el compuesto de carbón (ánodo) y la barra de refuerzo (cátodo) en diferentes magnitudes durante 200 días. Después de estar interconectados durante este lapso, el compuesto de carbón no presentó cambios en sus propiedades electroquímicas ni mecánicas. Por su parte, las varillas preservadas mediante el sistema de protección catódica no mostraron signos de corrosión.



Abstract

In this study carbon fiber composite were used as external reinforcement and as a cathodic protection (CP) system to stop corrosion in concrete elements. Different epoxy resins were tested first to select the more adequate to be used in the CP system. The resins tested were fabricated by varying the amount and length of the carbon fibers used. The composites were glued to the concrete specimens using such selected resins and connected electrically with one of the rebar of the concrete specimens and were used as impressed current anodes. A direct electrical current was applied between the carbon composite (anode) and the rebar (cathode) at different magnitudes during 200 days. After being interconnected with the steel, the carbon composite presented neither electrochemical nor mechanical differences.

Resumen Ejecutivo

En el ámbito de la construcción es bien conocido que las estructuras de concreto reforzado son susceptibles a diferentes tipos de degradación; en este sentido, la corrosión de la armadura de acero ocupa un lugar preponderante dentro de la clasificación de las causas de deterioro. La corrosión se encarga de degradar al acero y a su vez al concreto; debido a los óxidos expansivos del acero que generan grietas, las cuales a su vez provocan la disminución de la resistencia mecánica de la estructura de concreto para cual fue diseñada.

Para remediar la pérdida de la resistencia producida por la corrosión del acero de refuerzo, se han diseñado diferentes métodos de reforzamiento externo. Entre ellos el uso de compuestos a base de fibras de carbón (CFRP por sus siglas en inglés). Las láminas de CFRP son una combinación de fibras de carbono y una matriz de resina epóxica, que tienen en dirección de la fibra una resistencia mecánica y rigidez muy altas, además de un excelente comportamiento a la fatiga, mejor inclusive que la del acero, y su densidad es muy baja. El reforzamiento externo con fibras de carbón tiene numerosas aplicaciones, tales como: aumento de capacidad de carga; daños en elementos estructurales por envejecimiento; sismos; impactos; errores de diseño o construcción entre otros.

La protección catódica se contempla como una opción importante para disminuir la degradación por corrosión de la infraestructura de concreto reforzado, ya que es uno de los sistemas más utilizados actualmente gracias a su eficiencia para detener el proceso de corrosión. Así mismo, los sistemas base fibras de carbono han demostrado ser un sistema capaz de reforzar estructuralmente a los elementos de concreto reforzado, brindando grandes beneficios.

Por consiguiente, la tecnología propuesta en esta investigación permitirá reforzar a una estructura de concreto y al mismo tiempo protegerla contra la corrosión mediante el sistema de protección catódica. Este doble sistema emplea elementos base fibra de carbón como refuerzo estructural, y a través de una resina epóxica semiconductor permite la utilización de los mismos elementos de refuerzo como ánodos inertes para proteger al acero de refuerzo mediante el sistema de protección catódica por corriente impresa.



1 Introducción

La realización de proyectos de investigación acerca de la afectación del fenómeno de la corrosión en los elementos de concreto reforzado, toma una alta importancia debido a la gran cantidad de dinero que se invierte en reparar, reconstruir o sustituir estructuras dañadas por corrosión. Actualmente, Estados Unidos de Norteamérica cuenta con aproximadamente 575,000 puentes de los cuales 280,000 sufren de corrosión. Los costos por mantenimiento para estructuras de concreto reforzado en puentes es de aproximadamente de 1,4 a 1,6% del costo del PIB. En el Reino Unido se tienen pérdidas por más de 620 millones de libras esterlinas por problemas de corrosión en los puentes de las grandes autopistas.

En México no hay datos precisos que reflejen la enorme cantidad de dinero que se invierte para reparar estructuras dañadas por corrosión. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la prevención y reparación de estructuras va en aumento, debido a las consecuencias en la integridad estructural de los puentes y su efecto social.

Se define la corrosión como un proceso de deterioro o destrucción de las propiedades físicas y químicas de un material metálico, causada por las reacciones electroquímicas con el medio ambiente que le rodea. Los puentes están fabricados en su mayoría de concreto reforzado que se compone de agregados gruesos, finos, agua, cemento, varilla, y puede contener otros materiales cementantes o aditivos químicos, para mejorar sus propiedades. Dependiendo del tipo y cantidad, el cemento proporciona ciertas propiedades físicas y químicas de protección al acero de refuerzo, tales como reducir el calor inicial de hidratación; incrementar la resistencia a la reacción álcali-agregado; disminuir la permeabilidad y aumentar la resistencia a la penetración de soluciones agresivas (sulfatos y cloruros). El concreto protege al acero de refuerzo proporcionándole una capa protectora, conocida como "capa pasiva". Cuando ésta capa se rompe, el acero de refuerzo queda desprotegido con lo cual se inicia el proceso de corrosión.

La protección catódica es una técnica de investigación probada, que puede resolver muchos problemas para la protección contra la corrosión; además de que representa un bajo costo, es de fácil instalación y proporciona un mayor tiempo de vida útil para las estructuras.

Este proyecto de investigación consta de de dos etapas generales: Protección catódica, y Refuerzo estructural. La primera etapa es la que se presenta en este documento. Consiste en desarrollar un sistema de protección contra la corrosión en estructuras de concreto reforzado, utilizando compuestos base carbón.

En el segundo capítulo se presentarán los conceptos básicos de las estructuras de concreto reforzado; el proceso de la corrosión en el acero de refuerzo; los agentes agresivos que inician el proceso de corrosión; las técnicas para estimar el grado de corrosión en una estructura; así como los sistemas de protección (protección catódica) contra la corrosión en el acero de refuerzo; el planteamiento de la problemática, la hipótesis, la justificación, objetivos, alcances y la metodología a implementar para el desarrollo de este proyecto de investigación.

En el tercer capítulo se describen los materiales utilizados en este proyecto, además del desarrollo experimental de todas las etapas de este proyecto. Iniciando con la fabricación de la resina epóxica conductora; siguiendo con la fabricación de los moldes de los prismas a estudiar; continuando con la elaboración de la mezcla de concreto; la estabilización de los prismas en ambiente laboratorio, la incorporación del sistema en los prismas, la colocación de los prismas en las cámaras de humedad relativa controlada, y por ultimo la aplicación de las corrientes de protección aceleradas.

Las corrientes de protección aceleradas tienen la finalidad de estimar el grado de degradación del CRFP (en sus siglas en inglés, Polímero de Fibras de Carbón Reforzadas) debido al flujo de las corrientes de protección, y su posible vida útil.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados y las discusiones que se encontraron en la realización del proyecto, iniciando con la selección de las resinas epóxicas conductoras que tuvieron un mejor desempeño, siguiendo con el monitoreo de los prismas durante todas las etapas del proyecto mediante pruebas electroquímicas, y por ultimo la estimación de la vida de servicio del sistema propuesto.

2 Fundamentos generales

2.1 Planteamiento del problema

El concreto armado o concreto reforzado con varillas de acero, es uno de los materiales de construcción más usado en todo el mundo; sin embargo, presenta el inconveniente de ser susceptible o fallar por corrosión. No obstante los avances tecnológicos mundiales, el problema de la corrosión sigue sin ser entendido completamente, debido principalmente a la complejidad del proceso corrosivo entre el medio ambiente-concreto-acero.

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido tema de relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Se calcula un monto de 300,000 millones de dólares por fallas en la infraestructura de los Estados Unidos de América. Así mismo, se estima que de esa cantidad, es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención contra la corrosión (Del Valle, A, 2001).

La corrosión en el refuerzo metálico embebido es reconocida como uno de los mayores problemas en estructuras de concreto, convirtiéndose en un tema que requiere la atención de los ingenieros para poder dar el mantenimiento a las estructuras, tales como puentes, edificios, muelles, etc, y conservar así su integridad estructural o extender su vida útil. El incremento en el número de puentes de concreto reforzado, presforzado, o postensado, que muestran signos de deterioro producto del ambiente en que están expuestos, han planteado la necesidad de utilizar métodos más precisos para predecir la disminución de resistencia, su efecto en el comportamiento estructural del puente, y su probabilidad de falla asociada a esta degradación o su confiabilidad operativa.

Muchos colapsos de estructuras en servicio reportados en países industrializados como los Estados Unidos, Japón y Europa se atribuyeron a la degradación de la resistencia de diseño de la estructura producida por agentes ambientales.

La operación adecuada de los puentes y estructuras de la red carretera nacional es un factor de considerable interés dentro de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Por tanto, en el marco del proyecto SCT – IMT, denominado “Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión”. Surge la necesidad de desarrollar sistemas para controlar (disminuir) y prevenir el proceso de corrosión en los puentes y muelles de México (Torres-Acosta, 2004). Por este motivo el IMT (Instituto Mexicano del Transporte), a través del Área de Materiales de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, realiza estudios para evaluar sistemas de protección contra la corrosión que puedan ser emplearse en la SCT.

Este proyecto, nació como una necesidad de restablecer la capacidad portante de los puentes y muelles perdida por el deterioro de su armadura de acero de refuerzo debido al proceso de corrosión.

Este trabajo de investigación propone un sistema híbrido en el cual se unen dos sistemas independientes: refuerzo estructural con base en fibras de carbón, capaz de devolverle la capacidad portante perdida; y un sistema de protección catódica que evitará que la armadura de refuerzo tenga problemas de corrosión.

Es decir, el sistema propuesto en la investigación posee las bondades de un doble sistema. Esto es, un sistema de reforzamiento estructural con base en la utilización de un material compuesto de fibra de carbón (CFRP por sus siglas en inglés) como agente reforzador, así como la posibilidad de trabajar como un sistema de protección catódica, empleando ánodos por corriente impresa mediante la adherencia del CFRP al elemento estructural a través de un polímero conductor en una matriz base epóxico. Esto permitirá proveer de electrones al acero de refuerzo, y con esto disminuir su velocidad de corrosión de manera que ésta sea insignificante, y permita llegar a la vida útil de diseño para la estructura.

El polímero conductor se fabricará adicionando fibras de carbono a una resina comercial. Este sistema es resistente a un ambiente de alta humedad o que se exponga a ciclos de mojado-secado. La investigación presenta los resultados que hasta la fecha se tienen del comportamiento de este tipo de sistema de protección catódica en su fase inicial, usando probetas de laboratorio.

2.2 Corrosión

La corrosión puede definirse como el deterioro de las propiedades de un material debido a la acción del medio ambiente por un proceso electroquímico.

La corrosión metálica en un medio ambiente húmedo es un proceso de naturaleza electroquímica que involucra reacciones de oxidación y reducción, ocasionando el deterioro de material metálico y de sus propiedades (Ávila y Genescá, 1986). El origen del fenómeno es la presencia de heterogeneidades en la superficie de los metales, que producen zonas de diferentes niveles de energía, y propician la formación de la celda electroquímica.

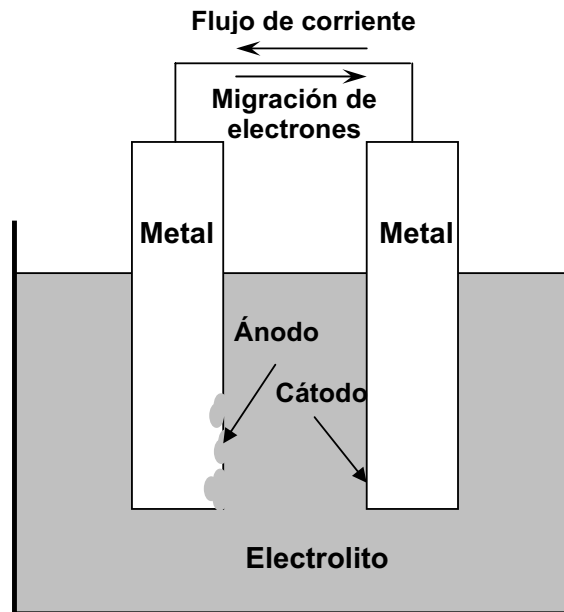
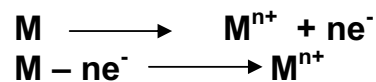


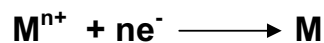
Figura 2.1
Celda electroquímica o galvánica

Como puede apreciarse en la fig 2.1, en una celda electroquímica son indispensables los siguientes elementos:

Ánodo: Porción de una superficie metálica en donde se lleva a cabo la reacción de oxidación (proceso de corrosión). En este proceso existe una pérdida de electrones como consecuencia de la transformación del metal a su forma iónica, que se representa con la siguiente reacción:



Cátodo: Porción de la superficie metálica donde se lleva a cabo la reacción de reducción, en la cual los electrones liberados en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito. En este proceso hay una ganancia de electrones. En el cátodo se cierra el circuito eléctrico a través de un conductor externo.



Electrolito: Sustancia a través de la cual las cargas eléctricas son transportadas por un flujo de iones.

Diferencia de potencial: Desigualdad en el estado energético entre los dos electrodos (ánodo y cátodo) que provoca un flujo de electrones desde el ánodo hasta el cátodo.

Conductor eléctrico: Conductor externo que conecta eléctricamente los electrodos (conduce los electrones desde el ánodo hacia el cátodo).

Los electrones que se pierden en el ánodo durante la reacción de oxidación se utilizan en el cátodo para que suceda la reacción de reducción. La pregunta es ¿Por qué existe la corrosión? Se puede iniciar estableciendo que la corrosión de los metales es en cierto sentido inevitable; una pequeña venganza que se toma la naturaleza por la continua explotación a que la tiene sometida el hombre (Ávila y Genescá, 1986).

Se tiene el conocimiento de que los metales, salvo alguna excepción, como los nobles (oro, platino, etc), no existen nativos en la naturaleza debido a que el estado de existencia más estable de un metal es su forma combinada; o dicho desde un punto de vista termodinámico, es el estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfatos o carbonatos. En realidad, lo que se hace para extraer el metal es ir en contra de una reacción que ocurre espontáneamente en la naturaleza, por ejemplo, la reacción de formación de un mineral. Se puede decir que cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse.

2.3 Concreto reforzado

El concreto es un material compuesto de arena, grava, cemento y agua que tiene una alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión. Por tanto, al embeber las varillas en el concreto éste adquiere mejores propiedades mecánicas en cuanto a tensión y compresión. El concreto ha alcanzado gran importancia como material estructural, ya que puede adaptarse a una gran variedad de moldes adquiriendo formas caprichosas y de varios tamaños debido a su consistencia plástica en estado fresco. Las propiedades del concreto dependen en gran medida en la calidad y proporción de los componentes de la mezcla.

Otro material importante que conforma una estructura de concreto es sin duda el acero, ya que tiene excelentes propiedades mecánicas como son: elasticidad, ductilidad, maleabilidad, resistencia, tenacidad, etc. El acero se emplea en el concreto como refuerzo, lo que da por resultado un material muy resistente, pero a la vez tenaz y con un sinnúmero de propiedades a favor; y esto lo hace actuar en el concreto reforzado como su columna vertebral, lo que permite que el concreto pueda trabajar incluso a tensión.

Por tanto, la definición del concreto armado es la unión de dos materiales, concreto y acero, trabajando en forma conjunta, en la cual el concreto resiste los esfuerzos de compresión y las barras corrugadas de acero los de tracción (fig 2.2). La interacción del concreto con el acero de refuerzo se basa en que lo provee de una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido (del orden de un par de nanómetros) en la superficie del acero, impidiendo que el acero continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasivación, ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto, se debe principalmente al hidróxido de calcio (CH) que se forma durante la hidratación de los silicatos (C2S, C3S, C3A, C4AF) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio) que pueden estar incorporados como sulfatos en los elementos constituyentes del cemento (Mindess y Young, 1981). Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12,6 y 14, es decir, en un extremo alcalino de la escala de pH (Li y Sagües, 1999).

El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasivar al acero e iniciar su corrosión; sin embargo, en un ambiente agresivo, agentes químicos como los cloruros o sulfatos del agua de mar, o el CO₂ de un ambiente urbano, se pueden acumular en la superficie del concreto transportándose lentamente a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la armadura (Torres-Acosta, 2004).

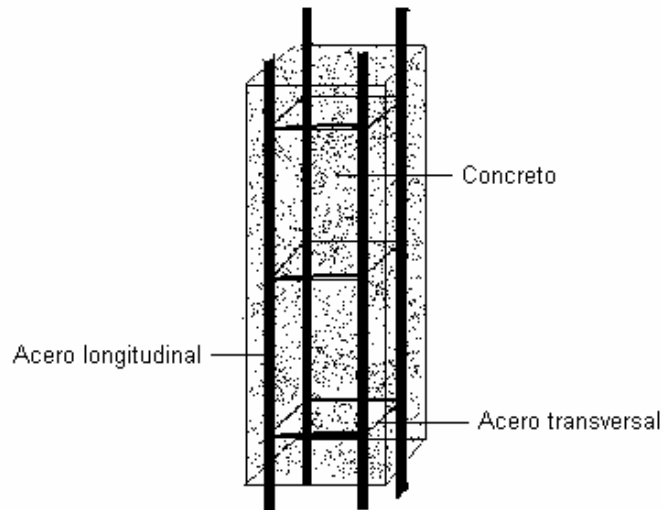
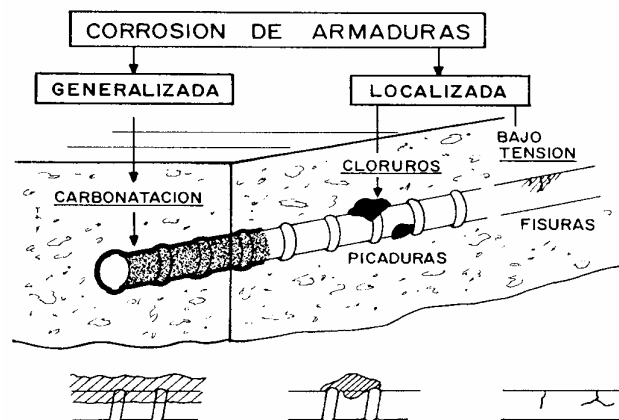


Figura 2.2

Esquema de una columna común de concreto reforzado

2.4 Tipos de corrosión en el acero de refuerzo

En el concreto armado, las formas que puede adoptar la corrosión del acero de refuerzo son diversas. Se han clasificado los diferentes tipos o formas de corrosión de acuerdo con la apariencia física del ataque (fig 2.3). Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes (Fontana, 1967):



2.4.1 Corrosión localizada

2.4.1.1 Corrosión por picaduras

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva, típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa del concreto.

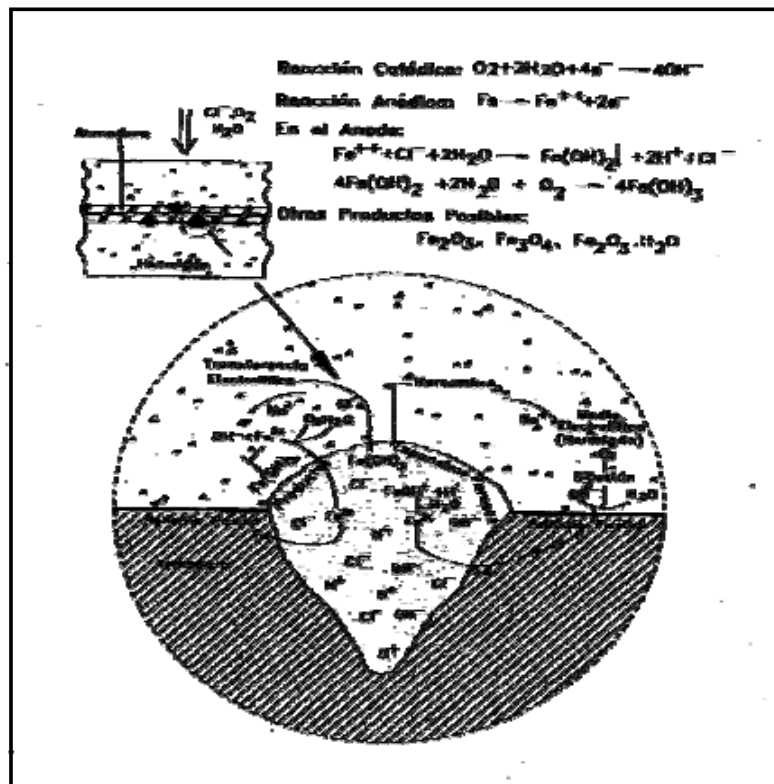


Figura 2.4

Proceso autocatalítico de corrosión por picaduras (DURAR, 1998)

De esta manera, se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero. Varios factores actúan en conjunto para mantener o profundizar las picaduras existentes, más que para extender la corrosión o generar nuevas picaduras.

Como se tiene conocimiento, las picaduras son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento (fig 2.4). En el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para formar H^+ y Cl^- libre. Esto decrece el pH localmente y los iones cloruro permanecen en el medio para seguir interviniendo en el proceso de corrosión, agravando el problema. (DURAR, 1998)

2.4.1.2 Corrosión bajo tensión.

Este tipo de corrosión ocurre cuando se presentan conjuntamente dos circunstancias específicas: esfuerzos de tensión sobre el acero y un medio agresivo. Ocurre principalmente cuando se utilizan aceros de alta resistencia debido, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través del metal. El hidrógeno puede provenir de diferentes fuentes: corrosión del acero, protección catódica, etc. Este daño produce el fenómeno de fragilización por hidrógeno.

2.4.2 Corrosión uniforme/generalizada

La corrosión uniforme es resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, resultante de la carbonatación del concreto y/o la presencia de excesiva cantidad de iones cloruro. También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del concreto producida por la precolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas que provocan la precipitación de calcio.

2.5 Factores que afectan y desencadenan la corrosión en el acero de refuerzo

Se denomina así al conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero de refuerzo en el concreto. Como ya se mencionó, la corrosión sólo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (considerados menores de ocho), por lo que serán factores que afectan o desencadenen todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del concreto, o bien como es el caso de las fisuras y oquedades, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el concreto (DURAR, 1998).

Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos en el proceso de la corrosión de las armaduras. De tal manera que: la dosificación, la compactación y la homogeneidad del concreto, así como el espesor de recubrimiento del concreto, el estado superficial del acero de refuerzo y la humedad ambiental, son factores que afectan este proceso.

Por otra parte, los factores desencadenantes que con más frecuencia dan lugar a la corrosión del acero de refuerzo son: presencia de oquedades con acero de refuerzo al descubierto; altas tensiones mecánicas en el acero (creación de hendiduras en las fisuras); corrientes erráticas o de interferencia; contacto galvánico entre dos metales; iones despasivantes; los más importantes son: Cl⁻, SO₄, CO₂ atmosférico o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad; lixiviación por aguas blandas; y las fisuras, presentando estos últimos, ambos efectos.

2.5.1 Iones despasivantes

De los iones despasivantes, los cloruros son los que más afectan directamente la despasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que el acero se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

2.5.1.1 Cloruros

Como ya se ha señalado, provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos. Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas: a) porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o agregados); o b) porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos, o estar sometida a la acción de sales de deshielo o por contaminación externa.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el colado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables. En general, los límites que se aceptan son distintos al respecto, tal como se muestra en la tabla 2.1. Por ejemplo, en Europa y en cierto aspecto en América, se admite para concreto armado 0,4% de acuerdo con el contenido de cemento; y para pretensado, 0,2 % en la misma base. (DURAR, 1998)

Las divergencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos resultan por la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos (su contenido en álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), o bien por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros.

Con relación a este límite máximo de cloruros, es importante mencionar que parte de ellos se puede combinar con las fases aluminicas y ferríticas de los cementos, por lo que sólo son peligrosos los que quedan sin combinar o libres (DURAR, 1998). La proporción entre libres y combinados, tampoco es constante al estar influida por la finura del cemento, su contenido de yeso, la temperatura durante el fraguado y la humedad de los poros del concreto.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos en donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes.

Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas (DURAR 1998).

Tabla 2.1
Máxima concentración de cloruros en el concreto reforzado

País	Norma	Límite Máximo de Cl-	Referido a
USA	ACI 318	<= a 0,15% en ambiente de Cl-	CEMENTO
USA	ACI 318	<= a 0,30% en ambiente normal	CEMENTO
USA	ACI 318	<= a 1% en ambiente seco	CEMENTO
Inglaterra	CP-110	<= a 0,35% al menos en un 95%	CEMENTO
Australia	AS 3600	<= al 0,22%	CEMENTO
Noruega	NS 3474	<= al 0,6%	CEMENTO
España	EH 91	<= al 0,4%	CEMENTO
Europa	EUROCODIGO 2	<= al 0,22%	CEMENTO
Japón	JSCE-SP 2	<= al 0,6 kg/m ³	CONCRETO
Brasil	NBR 6118	<= al 0,05%	AGUA

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior:

- El tiempo que tardan en llegar hasta el acero de refuerzo
- La proporción que induce la despasivación
- La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión

2.5.1.2 Sulfatos

El ión sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. De estas sales las más importantes son las siguientes: los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, calcio, magnesio y sódicos; los sulfatos potásicos, cúprico y aluminico son menos peligrosos, mientras que los sulfatos báricos y el de plomo son insolubles y, por tanto, inofensivos para el concreto(DURAR, 1998).

La presencia de sulfatos en agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación.

Por otro lado, la presencia de sulfatos conduce a una reacción de cambio de base, en el curso de la cual el catión del sulfato será sustituido por Ca^{+2} , originándose la degradación del concreto por reacción de cambio iónico.

En ciertas circunstancias puede ocurrir, sin embargo, que la presencia de sulfatos dé origen a una degradación por expansión debido a la formación de otros componentes estables en la masa endurecida del cemento (DURAR, 1998). Una de las causas de la nocividad de los sulfatos es el yeso que se forma al reaccionar el anión sulfato del agua con el Ca(OH)_2 liberado por el cemento, el cual se deposita en los poros del concreto en donde se cristaliza con absorción de dos moléculas de agua.

Este proceso de reacción química y de cristalización, que es acompañado de un incremento de volumen, ejerce una acción expansiva en los poros del concreto (especialmente en los de las capas superficiales) y termina por lograr su desmoronamiento. Se ha indicado que este aumento de volumen es del 17,7%. Si existen además iones Mg^{++} , la formación de hidróxido magnésico produce un aumento de volumen del 19,6%, aproximadamente.

La degradación generada por los sulfatos es causada en su mayor parte por el contenido de aluminato tricálcico del cemento. El C_3A reacciona, según ya se ha indicado, con el yeso formado por el ion sulfato y el Ca(OH)_2 o con el yeso contenido en el agua selenitosa original, formándose un sulfo-aluminato cálcico hidratado de gran complejidad y poco soluble (DURAR, 1998).

Este compuesto cristaliza absorbiendo 31 moléculas de agua y creando fuertes presiones internas en el poro de concreto a causa de su aumento de volumen. Dicha sal compleja es llamada sal de Michaelis-Candlot-Deval; existe en la naturaleza y es conocida como etringita. Se debe indicar que la etringita, sólo se forma para determinados valores de pH.

2.5.2 Carbonatación

Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material.

La fig 2.5 muestra el cambio abrupto de pH que se produce en el interior del concreto y es el que da lugar a la aparición de un frente carbonatado, que se revela muy bien con el indicador de fenoftaleína.

La velocidad de avance de este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará en llegar al acero. La velocidad de avance es función fundamentalmente de (DURAR, 1998):

- a) El contenido de humedad del concreto
- b) Su porosidad (relación a/c)
- c) Su contenido en materia alcalina carbonatable

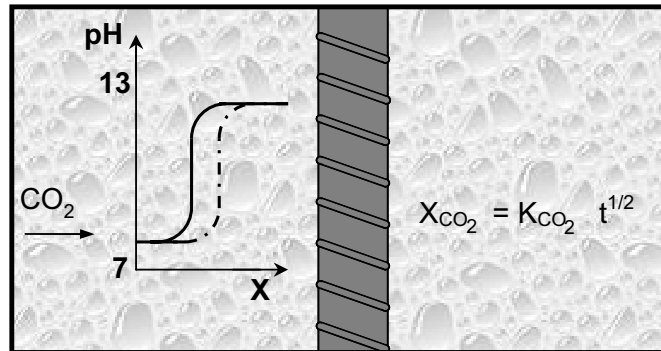


Figura 2.5

. Variación del pH en el concreto debido a la carbonatación

La porosidad del concreto es también un parámetro muy importante, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente siempre saturados de humedad y por tanto inaccesibles a la carbonatación. Los concretos porosos se carbonatan a gran velocidad. Finalmente, el contenido en CaO y de alcalinos (sodio y potasio) son materias susceptibles de carbonatarse.

Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación; de ahí que los cementos Portland sin adiciones resultan en general más resistentes a la carbonatación.

Una vez carbonatado el concreto a la altura del acero, si la humedad ambiental es más baja del 80%, la despasivación no dará lugar a velocidades de corrosión apreciables. Sólo si la humedad es > 80% (exteriores con temperaturas variables entre el día y la noche, o a lo largo del año) se pueden alcanzar velocidades de corrosión apreciables (DURAR, 1998).

En general, las velocidades de corrosión serán mucho menores que en el caso de los cloruros. Otra circunstancia favorable a tener en cuenta, es que al igual que en el caso de la corrosión atmosférica, la corrosión desencadenada por la carbonatación puede dar lugar a capas de herrumbre con características protectoras que atenúan la velocidad de corrosión. Todo ello hace de la carbonatación, un fenómeno mucho menos agresivo que la corrosión por cloruros.

2.5.3 Existencia de fisuras

Las fisuras estructurales transversales al acero de refuerzo pueden constituir en un principio un camino rápido de llegada de los agentes agresivos hasta éste, dependiendo de su abertura.

Las fisuras del concreto, originadas por sollicitaciones mecánicas sobre la estructura, se presentan en general en planos ortogonales al acero de refuerzo principal, puesto que éste se coloca precisamente para absorber las tensiones de tracción que el concreto por sí solo no puede soportar.

Las fisuras que acompañan al acero de refuerzo en su misma dirección son en general, resultado de un proceso de corrosión ya iniciado. Pueden, sin embargo, aparecer también por procedimientos constructivos incorrectos, como por una retracción de fraguado en ciertas condiciones, estribos con muy bajo rendimiento, o estados tensionales de compresión elevados por efecto del módulo de Poisson.

La abertura máxima de fisuras se limita, entre otras exigencias, por la durabilidad del acero de refuerzo. Los códigos suelen limitar el ancho de fisura a valores entre 0,1 y 0,4 mm. La incidencia de la abertura de la fisura en la corrosión del acero de refuerzo depende de factores como:

- La agresividad del medio ambiente
- El recubrimiento del acero de refuerzo
- La calidad del concreto

En la actualidad existe la tendencia a considerar que la mayor o menor agresividad no depende del tamaño de la abertura como tal, sino que se piensa que por debajo de un determinado valor de la abertura de la fisura (entre 0.3 y 0.4 mm), ésta no incrementa el riesgo de ataque (DURAR, 1998).

La tendencia actual relacionada con la abertura máxima de fisuras para estructuras de concreto armado es pues, acortarla por el valor de 0,4 mm al considerarse que por debajo de este valor, el riesgo de ataque no se incrementa. Igualmente se limita indirectamente la abertura por recomendaciones constructivas: recubrimientos del acero de refuerzo, diámetros y espaciamientos entre barras, y calidad del concreto (a/c, adiciones). En cuanto a las fisuras longitudinales debidas a asentamientos tradicionales del concreto o a retracción plástica, se puede considerar que se comportarán en cuanto a la durabilidad, de forma más agresiva que las transversales, dado que el área del acero de refuerzo expuesta al ataque es mayor en las fisuras longitudinales (DURAR, 1998).

a). Influencia de las fisuras

Las grietas inherentes al concreto reforzado constituyen un camino rápido de penetración de los agresivos hasta la armadura, como se observa en la fig 2.6.

Cuando la carbonatación o cloruros alcanzan la armadura, se empiezan a corroer zonas no recubiertas de concreto que comienzan a actuar de ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo (DURAR, 1998). Las normatividades de los diferentes países contemplan un ancho máximo admisible de las fisuras en la

superficie, que se sitúa en 0,3 mm para ambientes no agresivos y en 0,1 mm en los agresivos.

Sin embargo, estudios recientes han demostrado que no existen diferencias significativas en el comportamiento de las fisuras, siempre que éstas tengan un ancho inferior alrededor de 0,4 mm, ya que en general estas fisuras se obstruyen o se cierran con los propios productos de corrosión, y no supone un riesgo significativo en términos de la vida útil de la estructura.

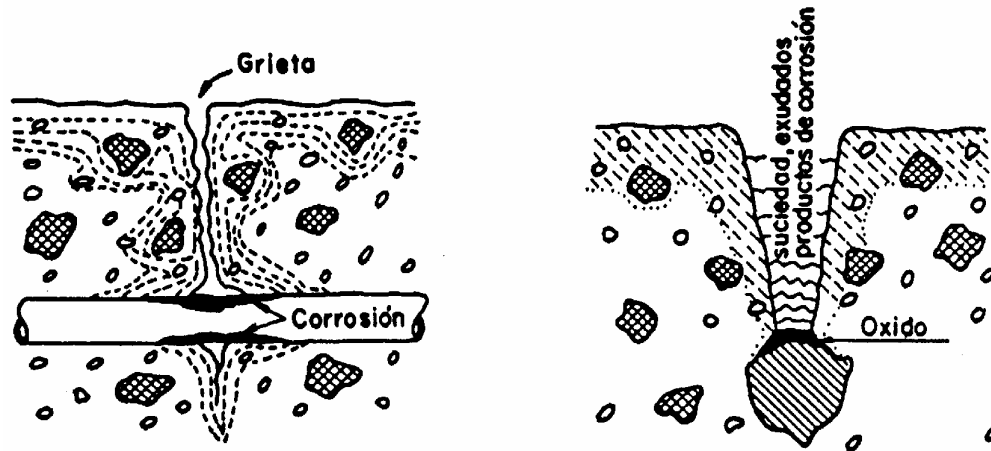


Figura 2.6

Corrosión provocada por la existencia de fisuras en el recubrimiento

En cambio, factores como la relación recubrimiento/diámetro de la armadura y calidad del recubrimiento, han resultado más decisivos en algunos trabajos. Así, mientras las fisuras no superen un ancho de 0,4 mm, aunque suponen un camino más corto para que los agentes agresivos alcancen a la armadura, en términos de vida útil no parece que supongan un factor que la acorte significativamente.

2.6 Modelo de vida útil

2.6.1 Vida útil

El reporte de la Red Temática DURAR, propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: "periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento." Es decir, si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), ésta ya sobrepasó el periodo de su vida útil. En el diseño de estructuras por durabilidad, el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el cliente, por lo que se le llamará vida útil de servicio, TVU.

2.6.2 Vida residual

“Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento que la estructura alcanza el anterior límite aceptable (fin de la vida útil).” Este es el periodo en el que la estructura necesitaría reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original; esto es, que sea segura, funcional y estética.

En pocas palabras, la etapa de vida residual es el tiempo que tiene el dueño de la estructura, o elemento estructural, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso.

2.6.3 Estado límite de servicio (ELS) y estado límite último (ELU)

Los valores mínimos de servicio (o valores máximos aceptables de degradación) son llamados los estados límites de la durabilidad de una estructura. Estos son principalmente dos: 1) estado límite de servicio (ELS); y 2) el estado límite último (ELU).

El primero (ELS) correspondería al punto en el tiempo en el cual la estructura ha llegado a su vida útil, o sea “es el estado en el cual los requerimientos de servicio de una estructura o elemento estructural (seguridad, funcionalidad y estética) ya no se cumplen”.

El ELU, en el segundo caso, es el estado en que la estructura o elemento estructural “se encuentra asociado con colapso u otra forma similar de falla estructural” (CEB, 1992). En este reporte se define al ELU, como al tiempo en el cual la estructura llega a un estado de degradación inaceptable antes de que sufra un colapso inminente: $ELU < TCOLAPSO$.

2.6.4 Probabilidad de falla

La probabilidad de falla se podría definir como la posibilidad de exceder cierto estado límite, ya sea el ELS o el ELU (ACI Committee 201, 1991). El término ‘falla por durabilidad’ es usado cuando existe una falla por degradación del material en una estructura o elemento estructural; en comparación de ‘falla mecánica,’ la cual es causada por cargas mecánicas externas. Es importante notar que la falla por durabilidad podría generar una falla mecánica.

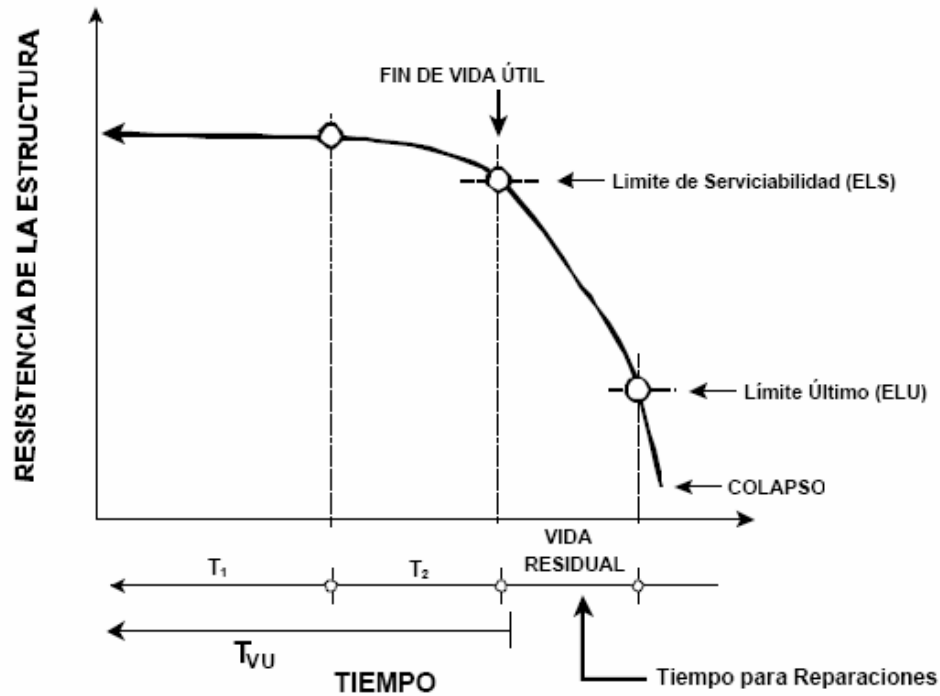


Figura 2.7
Modelo de durabilidad (Instituto Mexicano del Transporte)

Se ha estimado experimentalmente y por inspección de estructuras en servicio, que la duración de T_2 es únicamente entre 1 y 5 años, dependiendo principalmente de la velocidad de corrosión, i_{CORR} (que a su vez está ligada íntimamente al contenido en humedad y de oxígeno del concreto que rodean a la armadura).

En cambio, el periodo T_1 podría prolongarse, en el mejor de los casos, entre 50 y 100 años, dependiendo de la calidad del concreto (ACI Committee 201, 1991). Por esto las tendencias actuales para el diseño por durabilidad de estructuras de concreto en ambiente marino, enfatizan en prolongar el periodo T_1 lo más que se pueda.

El periodo de propagación de la corrosión (o T_2) comprende desde el inicio de la corrosión hasta la manifestación de daños externos, como por ejemplo, manchas pequeñas de óxido, grietas superficiales cuya dirección es paralela a la dirección del acero de refuerzo (o pre-esfuerzo). Cabe aclarar que dichas grietas deben tener un ancho no mayor de 0.1 mm; de lo contrario, el elemento estructural se encontró más allá de la etapa T_2 (en su vida remanente o residual).

Durante el periodo de iniciación, los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes más comunes son los iones de cloruro y la neutralización de la pasta de concreto, conocida como carbonatación.

Cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, estos penetran a través de él cuando la estructura es puesta en servicio. Al llegar a la superficie del metal, provocan que la corrosión se desencadene.

Cuatro son las consecuencias de la corrosión de la armadura, tal y como muestra la fig 2.8:

- Pérdida de sección del acero
- Fisuración del recubrimiento y su posible desprendimiento
- Pérdida de adherencia acero/concreto
- Posible pérdida de ductilidad del acero
- Pérdida de las propiedades necesarias y originales del concreto

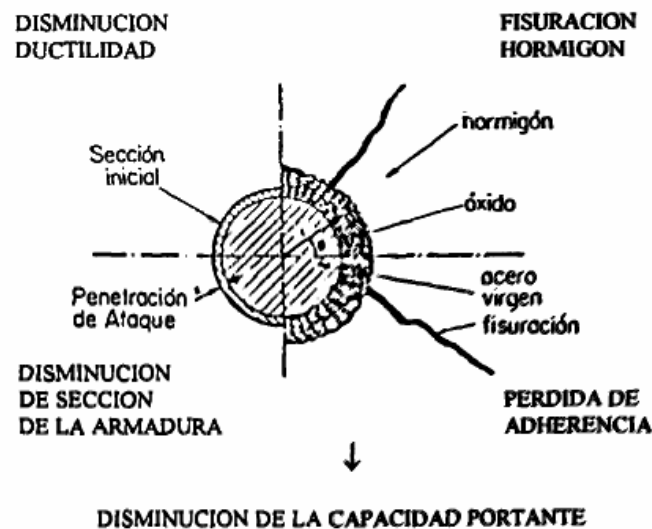


Figura 2.8

Consecuencias de la corrosión en el acero de refuerzo.

2.7 Técnicas para caracterización utilizadas

Entre las técnicas experimentales que se utilizarán se encuentran las electroquímicas, que nos sirven para realizar el seguimiento de los parámetros de corrosión. En esta investigación, los métodos empleados en la práctica se limitan a los de resistencia eléctrica y potencial de media celda, los cuales permiten conocer

las características físicas y eléctricas del sistema y así identificar el estado físico del acero de refuerzo en la estructura.

2.7.1 Resistencia eléctrica y resistividad de los materiales

Una de las primeras aplicaciones de las pruebas de resistencia eléctrica fue desarrollada en California a partir de un método para medir la permeabilidad de los sellos de las juntas de los puentes (Carrión Viramontes, 1999). El método supone que cuando se emplea un material dieléctrico para sellar la superficie del concreto, su resistencia eléctrica es una medida de su impermeabilidad.

El procedimiento implica la medición de la resistencia entre el acero de refuerzo y una esponja sobre la superficie de concreto; el método estandarizado lo describe la Norma ASTM D 3633. Se puede aplicar a cualquier elemento con una capa impermeabilizada no conductora, previendo que el acero de refuerzo no contenga ningún recubrimiento epóxico. Debido a que la resistencia es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, recientemente se ha incrementado el interés por determinar la resistividad del concreto. Cuando la resistividad se incrementa, las corrientes de corrosión decrecen de tal manera que la corrosión no tiene importancia práctica en el concreto seco. La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el Ω -cm u Ω -m (fig 2.9). Depende en gran proporción y en menor grado de hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento; las adiciones inorgánicas; la relación agua / cemento; la porosidad de la estructura; entre otras (DURAR, 1998).

La resistencia eléctrica, R_e , se calcula como $\frac{E}{I}$ y se expresa en Ω . De esta manera

la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (\text{k}\Omega\text{-cm}) \text{ u } (\Omega\text{-m}) \quad 2.1$$

Donde:

A = área transversal del espécimen

L = longitud del espécimen

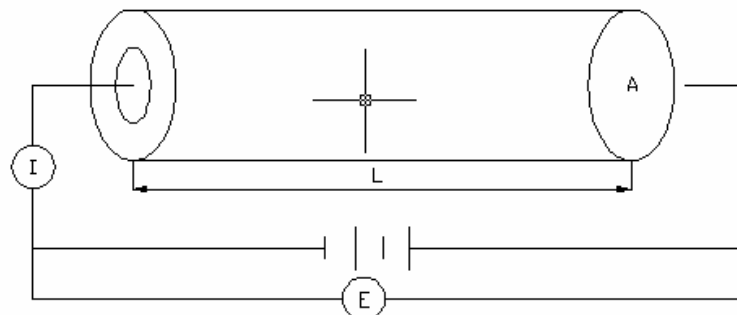


Figura 2.9

Prueba de resistividad eléctrica en laboratorio

Una de las desventajas del método de prueba es que dominan los efectos de la superficie, mientras que la resistividad al nivel del acero es de mayor interés. El procedimiento de prueba y la manera de calcular la resistividad se describe en la Norma ASTM G-57. La humedad del concreto normalmente tiene una resistividad del orden de 10 k Ω -cm. Los valores de resistividad asociados con la actividad de corrosión son algo inciertos (DURAR, 1998). Algunas observaciones en estructuras marinas en California, indican que cuando la resistividad excede los 60 k Ω -cm, no se presenta corrosión. Sin embargo, en otro estudio, la corrosión del acero de refuerzo fue detectada por debajo de los 60 k Ω -cm. La tabla 2.2 resume los resultados entre diferentes investigadores, quienes han realizados extensos trabajos sobre la relación de la resistividad del concreto con la corrosión de sus partes de acero (DURAR 1998).

Las cifras de la tabla 2.2 suponen que el concreto contiene suficientes iones cloruro para iniciar las reacciones de corrosión. Otro trabajo publicado en Inglaterra ha sugerido que es improbable que la corrosión se presente en el concreto con una resistividad de 20 k Ω -cm, y es necesario soportar la actividad de corrosión en el intervalo de resistividad de 0.5 a 10 k Ω -cm (DURAR 1998). Es necesario desarrollar más trabajo experimental para poder emplear las mediciones de resistividad como un indicador seguro de la existencia de condiciones de corrosión en un puente; esto, a pesar de que el método proporciona información útil para suplir las mediciones de potencial.

Tabla 2.2
Interpretación de las mediciones de la resistividad del concreto

Resistividad del concreto k Ω -cm	Pronóstico de corrosión
Más de 12,000	Normalmente no hay signos
Entre 5,000 y 12, 000	Probable
Menos de 5,000	Casi seguro

2.7.2 Potencial de media celda

Cuando el acero se corroe en el concreto, existe sobre el acero una diferencia de potencial entre las áreas de media celda anódicas y las áreas de media celda catódicas. El potencial de corrosión de media celda puede medirse por comparación con una celda de referencia normalizada, la cual tiene un valor constante conocido.

Normalmente, en el trabajo de campo se usa una celda o electrodo de Cu-CuSO₄ debido a que es robusta, económica y estable. La diferencia de potencial entre el acero de refuerzo y la celda de referencia se mide a través de un voltímetro de alta impedancia. Esto se hace conectando una salida del voltímetro al acero de refuerzo y la otra salida a la celda de referencia; el potencial del electrodo se mide en cualquier

posición, moviendo la media celda sobre la superficie del concreto de manera ordenada.

La celda se puede usar verticalmente hacia abajo, horizontal o vertical hacia arriba, cuidando que la solución de cobre esté en contacto todo el tiempo con el tapón poroso y la barra de cobre de la celda. Una descripción más completa del equipo y los procedimientos de prueba se encuentran en la Norma ASTM C 876. Con el fin de detectar todas las áreas anódicas, se requieren mediciones aproximadamente cada 150mm (ASTM C-876).

Esto particularmente es importante cuando se trabaja sobre las trabes de concreto presforzado, donde las celdas de corrosión no son muy comunes (Kunsenber y Barton, 1981).

El criterio general para interpretar las mediciones de potencial, según la Norma ASTM C876-87, se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3
Interpretación de las mediciones de potenciales de media celda.

Ecorr (Cu/CuSO ₄)	Probabilidad de corrosión
Más negativo que -0,35 V	Mayor del 95%
Más positiva que -0,20 V	Menor del 5%
Valores de -0,20 a -0,35 V	Aproximadamente 50%

Pruebas de campo y en el laboratorio han demostrado que la corrosión puede ocurrir cuando se tiene un potencial cercano a -0,20 V. Para lograr una mejor interpretación de los datos se recomienda inspeccionar los gradientes de potencial sobre la estructura y aunque no se han establecido criterios definitivos, generalmente se coincide que diferencias de potencial de más de 50 mV son significativas y diferencias de 100 mV son indicativas de la actividad de corrosión. Si se obtienen lecturas positivas del potencial, generalmente esto indica que hay poca humedad en el concreto, y las lecturas no se deben considerar válidas.

Es importante reconocer que las mediciones de media celda indican el potencial de corrosión en ese momento, pero no dan información de la velocidad de corrosión. La velocidad de corrosión del acero en las estructuras de los puentes es ante todo, controlada por la resistividad del concreto y la disponibilidad de oxígeno en la superficie del acero. Por consiguiente, es posible tener una condición de alto potencial, pero lenta velocidad de corrosión. Esto también se debe reconocer, especialmente cuando se trabaja en las estructuras de concreto pre-esforzado, ya que el potencial que se está midiendo es del acero más cercano a la celda.

Si las mediciones se hacen en la mayoría de la estructura presforzada, el potencial que se mide es el del acero de refuerzo. Esto puede, de hecho, ser información útil si los potenciales indican que no hay actividad por corrosión.

Bajo tales circunstancias, es probable que el acero de presfuerzo embebido más profundamente también no esté corroído. La medición del potencial es la única prueba no destructiva disponible que mide directamente la actividad de corrosión.

La prueba es rápida, económica y relativamente fácil de llevar a cabo. Cuando se interpreta en conjunción con los datos de otras pruebas, tales como resistividad y el contenido de cloruros, ésta puede ser extremadamente útil en la evaluación de la gravedad de la corrosión en la estructura.

2.8 Protección catódica

La protección catódica es un sistema contra el proceso de degradación que ha sido utilizado tiempo atrás en numerosas instalaciones, que debido a sus condiciones de operación requieren una integridad absoluta; tal es el caso de tuberías de conducción de hidrocarburos, plataformas marinas, barcos, muelles, etc. Sin embargo, es hasta la década de los 70's cuando se comienza a utilizar como medio de protección en sistemas concreto-metal (Del Valle, 2005). El motivo: es el único método capaz de detener el proceso de corrosión, aún en concentraciones elevadas de cloruros y con deterioros muy avanzados en las estructuras. Actualmente, en los Estados Unidos es el método de protección en edificaciones de concreto reforzado que más se utiliza tanto en reparaciones como en estructuras nuevas.

A continuación se detalla un poco más cuáles son los fundamentos básicos de esta técnica de protección. Como es sabido, para que se den condiciones activas o pasivas en el acero, es necesario tener condiciones específicas tanto de pH como de potencial en el sistema electroquímico (Poblano Salas, 2000). En el caso del acero embebido en concreto resulta que, debido a la alcalinidad del concreto y al potencial electroquímico del acero, se forma una película de óxido compacta y estable encargada de proteger al metal de ataques posteriores.

En condiciones normales de operación, la película evita una mayor degradación del acero; pero cuando las condiciones de pH o de potencial se alteran por diversos motivos, la película deja de proteger al metal, y la corrosión del mismo se acelera.

La corrosión se traduce en términos prácticos como una pérdida de electrones del metal, provocando la formación de iones metálicos cuya cinética de transformación depende de la cantidad de electrones perdida. El propósito primordial de la protección catódica es proveer al metal los electrones que él mismo pierde debido al proceso de oxidación.

El suministro de los electrones se puede realizar por dos vías (Pérez Quiroz, 2001):

1. Ánodos de sacrificio: se conecta eléctricamente al metal que se corroe un metal con mayor actividad o que sea más susceptible a oxidarse que el metal de refuerzo (o pre/esfuerzo); de esta forma, los electrones que este último pierde le sirven al acero de refuerzo para mantenerse en buen estado (fig 2.11).
2. Corriente impresa: mediante una fuente de electrones se obliga al metal de refuerzo a mantener un potencial eléctrico (exceso de electrones) que garantice su integridad (fig 2.12).

El nombre de protección catódica se da, porque el metal a proteger es obligado a comportarse como cátodo; es decir, la zona en donde se lleva a cabo la reacción de reducción.

La protección catódica se basa en la existencia de un potencial dentro de la zona de inmunidad en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o de potencial-pH, más conocido como diagrama de Pourbaix (DURAR, 1998). Si consideramos ese diagrama para el caso del hierro (fig 2.10), se puede observar que están perfectamente delimitadas las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad.

Para poder pasar el hierro a la zona de inmunidad hay que disminuir su potencial a un valor de $-0,620$ V con respecto electrodo normal de hidrógeno (ENH), que equivale a $-0,800$ V con respecto al electrodo de Ag/AgCl. Desde el punto de vista cinético en un sistema cualquiera en el cual tenga lugar el fenómeno de corrosión, existe un balance entre las reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie del metal. La consecuente desviación del potencial es llamada polarización (DURAR 1998).

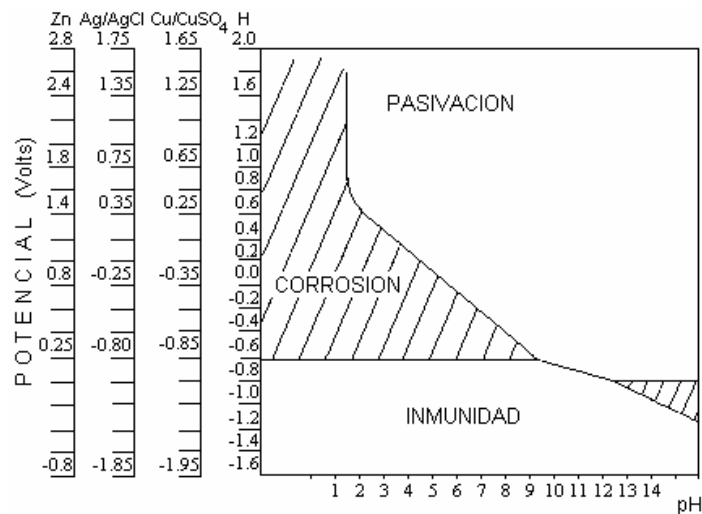


Figura 2.10
Diagrama de Pourbaix (E vs pH) para el hierro

A continuación se describen los dos tipos de sistemas de protección catódica: ánodos de sacrificio y corriente impresa.

2.8.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio

El método se basa en la diferencia que existe en la actividad química de los metales. La serie electromotriz es una tabla con metales y sus diferentes reacciones electroquímicas, las cuales corresponden a un valor particular de potencial respecto a una referencia; en este caso es la reacción de reducción del hidrógeno, cuyo valor de potencial es arbitrario y es cero ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$).

La tabla 2.4 muestra a continuación la serie electromotriz utilizada actualmente (Fontana, 1967). La protección del acero de refuerzo se logra aprovechando la mayor actividad de los elementos que se encuentran por debajo del acero en la serie. El fin es conectar eléctricamente ambos elementos dentro de un electrolito, provocando que la reacción de oxidación del metal más activo aporte los electrones al acero, obligándolo a establecer una reacción de reducción, y así mantenerse con estado de oxidación cero.

Tabla 2.4
Tabla de la serie electromotriz utilizada en campo

Reacción	Potencial a 25°C (V)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1,500
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$	1,190
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	0,857
$\text{Ag}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0,799
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0,337
$\text{H}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000
$\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,036
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,990
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,762
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,370

Los elementos que comúnmente se emplean para evitar que el acero de refuerzo sufra daño por corrosión son el zinc y el magnesio; ya que como se observa en la serie electromotriz, sus potenciales de media celda se encuentran por debajo del potencial del hierro.

Es importante señalar que en este tipo de sistemas, debido a que la cantidad de electrones que se suministra al cátodo está controlada sólo por la cantidad de elemento activo que actúa como ánodo, es necesario que el electrolito tenga una resistencia baja al paso de corriente para que el proceso sea eficiente.

Lo anterior es difícil que se presente en el concreto, por lo que este tipo de sistemas se ve limitado a situaciones de altos niveles de humedad en puentes y en estructuras metálicas expuestas al medio ambiente (Poblano Salas, 2000).

Otro factor importante en los sistemas de protección catódica es la eficiencia de los ánodos en la capacidad de drenaje de corriente suministrada. Lo anterior se refiere a qué tanto de la corriente que generan los ánodos, realmente se utiliza en la instalación; esta propiedad se da en función de la composición química del ánodo, su tamaño y geometría, y del tipo de elemento base (Poblano Salas, 2000).

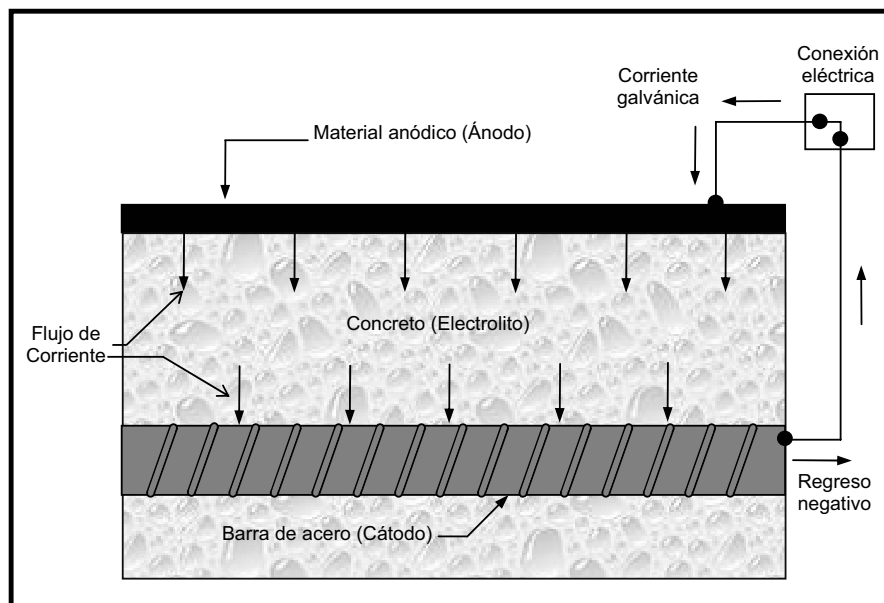


Figura 2.11
PC por ánodos de sacrificio en un elemento de concreto reforzado

2.8.2 Protección catódica por corriente impresa

Este tipo de protección contra la corrosión involucra suministrar al sistema a proteger, la corriente necesaria para que la estructura se mantenga en un estado pasivo o inmune. Lo anterior se entiende si tomamos en cuenta que para estar dentro de la zona de inmunidad o pasividad, es necesario conservar un valor de potencial en el sistema concreto-metal.

Dicho valor puede modificarse cuando se presenta corrosión en el sistema, y puede corregirse o mantenerse en valores adecuados mediante la aplicación de una

corriente. Lo que se hace en sí es suministrar electrones mediante una fuente de poder a la varilla, de tal forma que se favorezca en su superficie la reacción de reducción del ion hierro a hierro metálico. La fig 2.12 muestra una conexión básica de protección catódica (Poblano Salas 2000).

Este tipo de sistemas es el que se utiliza en forma más común en estructuras de concreto, ya que la elevada resistividad de estos sistemas puede vencerse mediante el uso de generadores eléctricos de potencia regulable.

Es por ello que actualmente numerosas estructuras cuentan con este tipo de protección aún en condiciones ambientales adversas. Dentro de las que cuentan con sistema de protección catódica por corriente impresa se incluyen puentes, muelles, plataformas, y una gran cantidad de estructuras de concreto-metal, que por su importancia requieren una integridad estructural absoluta.

Debido a la necesidad de instrumentar metodologías de protección y rehabilitación de estructuras con problemas de corrosión, la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) de Estados Unidos, y la Asociación Americana de Caminos y Transportes Estatales (AASHTO) han desarrollado especificaciones y normas para promover y regular estos procedimientos (DURAR, 1998).

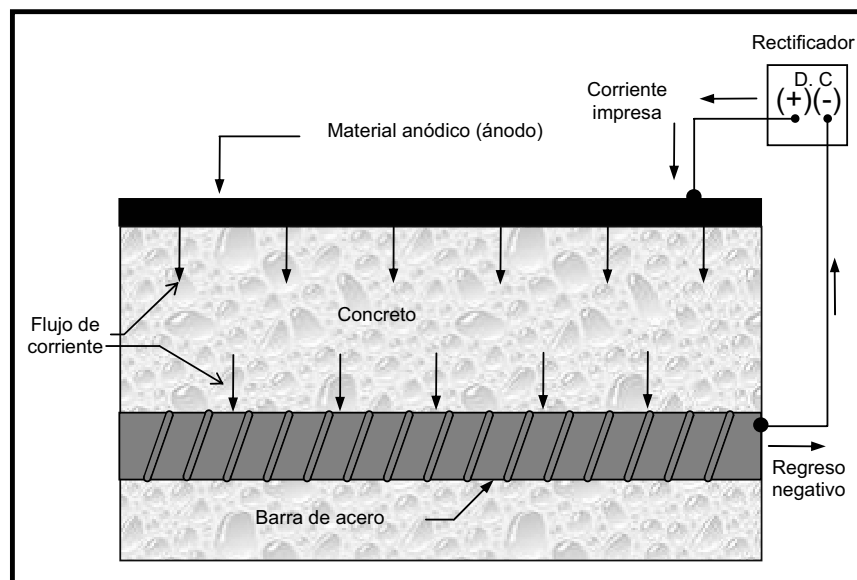


Figura 2.12.
PC por corriente impresa en un elemento de concreto reforzado

Los más generales e importantes son: la Práctica Estándar para Protección Catódica en Concreto Reforzado en Estructuras Expuestas al Medio Ambiente de NACE, y la Guía de Especificaciones para Protección Catódica de Puentes de Concreto Reforzado de la ASSHTO.

2.8.3 Criterios de protección catódica

La norma NACE RP0290-90 establece los criterios a seguir respecto a la protección, energización, operación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica.

2.8.3.1 Criterio de protección de -850mV

El criterio más usado para estructuras de acero expuestas a suelos, es el potencial de -0,850 V referido a un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄. En la NACE este criterio es establecido como sigue (NACE RP0290):

“Un voltaje negativo (catódico) de al menos 0,850 V medido entre la estructura y un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄. La determinación de este voltaje se hace con la corriente de protección aplicada.”

Una de las dificultades en la aplicación de este criterio de potencial radica en el requerimiento de que la medición será tomada con la corriente aplicada. Debido a dicho requerimiento, se deduce que todas las mediciones contendrán un error en la medición de la caída óhmica, que variará en magnitud dependiendo de factores tales como la magnitud de la corriente, la resistividad del electrolito, y posición del electrodo de referencia (NACE RP0290).

Esto esencialmente quiere decir que el potencial medido de una estructura contiene un error de caída óhmica usualmente de magnitud desconocida, y por tanto, el potencial exacto de polarización de la estructura no es determinado. El criterio de -0,850 V vs Cu/CuSO₄, se interpreta como un potencial de polarización libre de caída óhmica con una velocidad de corrosión despreciable, pero no cero.

Aunque el criterio de -0,850 V se ha verificado en condiciones aereadas y deareadas a temperatura ambiente, esto no necesariamente tiene validez bajo algunas otras condiciones. En presencia de bacterias sulfato-reductoras, por ejemplo, el criterio de potencial debe ser incrementado hasta -0,950 V. También, a altas temperaturas de 40 y 60°C, esto no puede reducir la velocidad de corrosión hasta un valor despreciable, aún a potenciales tan negativos como -1,025 V vs CSE. Ensayos de acero en electrolitos con diferentes valores de pH han indicado que no puede ser obtenida una protección suficiente a un potencial de -0,850 V vs CSE en una solución teniendo un pH de 3,5, bajo condiciones estáticas y de agitación (NACE RP0290).

Es evidente que el criterio de -0,850 V, establecido por el Standard NACE RP-01-69, está claramente en un error. El criterio de -0,850 V vs CSE debe ser corregido, estableciéndolo como un potencial de polarización libre de caída óhmica externa, con un claro entendimiento de que la actividad de la corrosión no será completamente detenida, especialmente en presencia de elevadas temperaturas, soluciones de bajo pH, y bacterias anaerobias.

2.8.3.2 Criterios de desplazamiento del potencial (-100, -300 mV y E vs log i)

Los dos criterios de cambio de potencial de uso común están establecidos en el estándar NACE, como sigue:

Criterio de los 300 mV (NACE RP0290):

“Un desplazamiento del voltaje más negativo (catódico) de 300 mV, que el voltaje de corrosión producido por la aplicación de la corriente de protección. El cambio de voltaje es medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia. Este criterio de cambio de voltaje no se aplica a estructuras en contacto con metales disimilares”.

Criterio de los 100 mV (NACE RP0290):

“Un desplazamiento del voltaje más negativo (catódico), que el voltaje de corrosión, de 100 mV medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia. Este desplazamiento del voltaje de polarización es determinado interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización. Cuando la corriente es inicialmente interrumpida, un inmediato desplazamiento del voltaje ocurrirá. Esta lectura de voltaje después del inmediato desplazamiento será usada como la lectura base de la cual se medirá el decaimiento de la polarización”.

En altas resistividades, suelos bien aireados que son relativamente porosos, el acero puede exhibir potenciales de corrosión en el rango de -0,300 a -0,400 V y la polarización de la estructura de acero hasta el criterio de -0,850 V puede requerir grandes corrientes para la protección catódica con un correspondiente incremento en costo. No obstante, es de gran interés que la protección se alcanza con menos de -0,100 V de polarización. La fig 2.13 ilustra los potenciales típicos medidos con un electrodo de referencia sobre la superficie cuando se está ejecutando el ensayo de desplazamiento de -0,300 V. Cuando la corriente de protección catódica se aplica a “ t_1 ” hay un inmediato desplazamiento del potencial hasta -0,650 V causado por la caída de voltaje en el suelo entre el electrodo de referencia y el metal.

En un tiempo “ t_2 ”, a un potencial de -0,700 V, el criterio de -0,300 V está satisfecho aun cuando la polarización es únicamente de 0,050 V. A un tiempo “ t_3 ”, el desplazamiento del potencial de polarización de -0,100 V es satisfecho. Este último criterio es más valido que el criterio del desplazamiento de -300 mV, dado que esto se relaciona sólo con la polarización, y por definición la caída óhmica debe eliminarse de la medición.

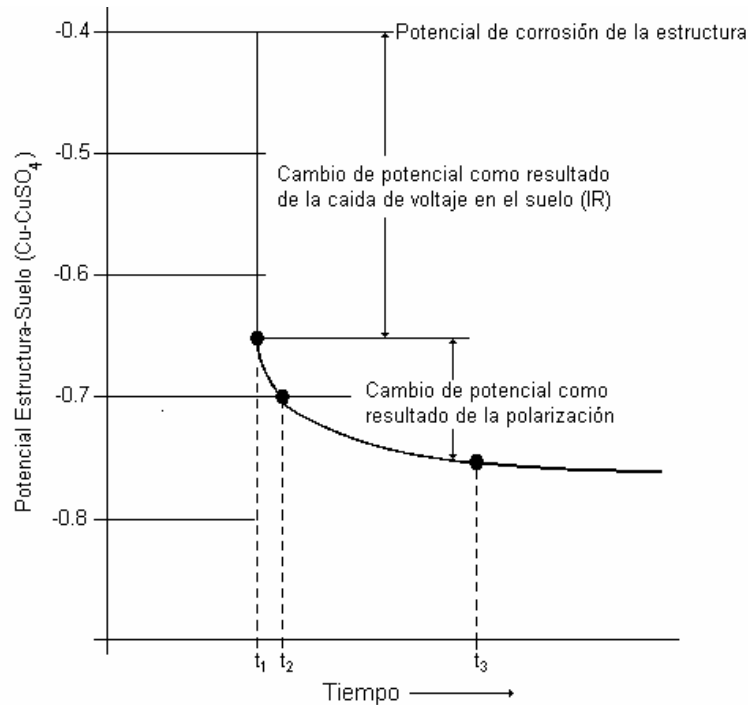


Figura 2.13
Típico cambio del potencial de una estructura embebida con respecto al tiempo

Debido al hecho de que no hay una justificación científica para el criterio de -300 mV, el cual debe ser corregido por la caída óhmica en cualquier evento; y que el desplazamiento del potencial de polarización de 100 mV es un criterio perfectamente aceptable, es obvio que el criterio de -300 mV establecido en el estándar es tan insignificante como innecesario. El criterio de potencial discutido en este punto generalmente se aplica universalmente sin resolver las particulares circunstancias ambientales. Es a menudo afirmado, no obstante, que el criterio de “E log i” proporciona un estándar más exacto no sólo a causa de que el método es considerado científicamente fundamentado, sino también debido a que los ensayos deben ser realizados *in situ*, por tanto, se considera el efecto de las condiciones ambientales específicas.

Criterio de “E log i”:

“Un voltaje entre la estructura-electrolito por lo menos tan negativo (catódico) como aquel originalmente establecido en el comienzo del segmento Tafel de la curva “E log i”. Este voltaje entre la estructura-electrolito será medido entre la superficie de

la estructura y un electrodo de referencia contactados por el electrolito en la misma ubicación donde la medición del voltaje es tomada para obtener la curva $E \log i$.

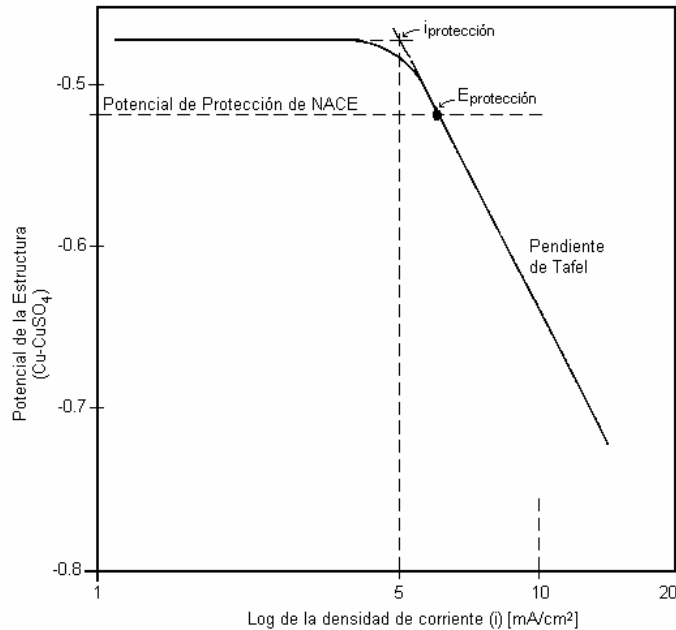


Figura 2.14

Curva “E vs log i” para acero en contacto con agua conteniendo 500ppm de sulfato de sodio

Este criterio se refiere a la curva que relaciona el potencial de la estructura a la corriente catódica aplicada (fig 2.14), la cual es algunas veces llamada curva *Britton* (Pérez Quiroz, 2001).

El potencial a cual la curva de potencial parte de la porción lineal de la curva (pendiente de Tafel) es considerada por el estándar como el criterio de potencial de protección ($E_{\text{protección}}$).

La intersección de las dos líneas rectas (pendientes) extrapoladas desde las dos porciones de la curva “E log i”, denotan la mínima densidad de corriente requerida para la protección ($i_{\text{protección}}$). En la obtención de datos de los ensayos, los potenciales medidos deben ser corregidos para el error de la caída óhmica, por lo que sólo los potenciales de polarización son graficados; la corriente debe aplicarse en escalones separados por incrementos de proporciones iguales.

2.9 Hipótesis

Las fibras de grafito se pueden implementar como un sistema de protección catódica y como un refuerzo estructural en los elementos de concreto reforzado.

2.10 Justificación

Existe en la actualidad gran cantidad de estructuras de concreto-metal dañadas por corrosión. Es de interés económico y social mantenerlas en funcionamiento, por lo que ha despertado la preocupación del desarrollo de proyectos que involucren implementar técnicas de protección, reparación o de mantenimiento de dichas estructuras. También el de desarrollar normativas para la construcción, así como la evaluación de los daños ocurridos por corrosión y de las propiedades mecánicas de las estructuras en servicio. Todo esto debido a los costos enormes en la reparación de las estructuras de gran importancia para el país, tales como puentes, muelles, edificios, etc.

2.11 Objetivo general

Este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un sistema híbrido capaz de proteger contra la corrosión al acero de refuerzo, en las estructuras de concreto y además reforzar físicamente las estructuras por medio de un sistema de refuerzo estructural exterior con elementos base carbón.

2.11.1 Objetivos específicos

- Caracterización de un polímero capaz de funcionar como adhesivo entre la superficie de elementos de concreto reforzado y los sistemas de refuerzo estructural base carbón, que a su vez permita la implementación de un sistema de protección catódica en dicha estructura.
- Determinar la factibilidad de implementar el sistema de protección catódica en elementos de concreto reforzado, utilizando compuestos base carbón.
- Determinación del grado de degradación del sistema de reforzamiento estructural base carbón, debido al flujo de la corriente de protección y del medio ambiente agresivo al que estará sujeto.

2.12 Alcances

- A través de un análisis eléctrico, mecánico, y electroquímico se determinarán las propiedades, junto con las características de los polímeros que se utilizarán como adhesivos entre las estructuras de concreto reforzado, y el sistema de reforzamiento estructural.
- Obtener la factibilidad de utilizar el sistema de reforzamiento estructural base carbón como elemento del sistema de protección catódica por corriente impresa en las estructuras de concreto reforzado, a través de mediciones electroquímicas de corrosión, comparando los resultados obtenidos con la normativa de los sistemas de protección catódica.
- La estimación del grado de degradación de los compuestos base carbón debido al flujo de la corriente de protección se determinara por mediciones, eléctricas, electroquímicas y mecánicas. Por otro lado, definirán las diferencias entre sistemas con pruebas aceleradas y con sistemas con pruebas no

- aceleradas.

3 Desarrollo experimental

3.1 Materiales utilizados (sistema)

3.1.1 Resinas epóxicas

Las resinas epóxicas multipropósito analizadas en este estudio se describen a continuación, junto con algunas de sus propiedades y sus aplicaciones en la práctica (SIKA 2007)

- *Resina A:* Resina epóxica de impregnación de alto módulo y alta resistencia.

Características: Módulo de flexión: 3,000 MPa (30,000 kg/cm²)
Módulo de tensión: 3,500 MPa (35,000 kg/cm²)

Aplicaciones: Resina de impregnación para tejidos de reforzamiento estructural; para inyección a presión de grietas en estructuras de concreto; elaboración de mortero epóxico para reparación de irregularidades, y nivelación de superficies interiores; sellante de losas en interiores contra agua.

- *Resina B:* Adhesivo epóxico tixotrópico.

Características: Módulo elástico: 12, 800 MPa (128,000 kg/cm²)
Resistencia a la compresión: 95 MPa (950 kg/cm²)

Aplicaciones: Adhesivo de láminas de reforzamiento estructural CFRP a estructuras de concreto, mampostería y acero; unión de elementos de concreto; relleno para reparación de superficies o elementos con oquedades en aplicaciones horizontales, verticales y sobre cabeza; anclaje de barras de refuerzo, pernos, sujetadores.

- Resina C:* Imprimante y puente de adherencia.

Características: Adherencia en plano inclinado: 10,5 MPa (105 kg/cm²)

Aplicaciones: Puente de adherencia para la unión de concreto fresco a concreto endurecido; imprimante de alta adherencia para recubrimientos epóxicos sobre superficies húmedas; elaboración de morteros epóxicos para anclajes y rellenos.

- *Resina D*: Adhesivo epóxico multipropósito de baja viscosidad y alta resistencia

Características: Resistencia a la tensión: 61 MPa (610 kg/cm²)
Módulo de elasticidad: 2800 MPa (28,000 kg/cm²)
Resistencia a la flexión: 96 MPa (960 kg/cm²)
Resistencia a cortante: 35 MPa (350 kg/cm²)

Aplicaciones: Inyección a presión de grietas de concreto; relleno por gravedad de grietas en superficies horizontales de concreto y mampostería; elaboración de mortero epóxico; anclaje de barras, pernos, tornillo y sujetadores.

- *Resina E*: Inyección epóxica para sellado de grietas

Características: Resistencia a la tensión: 25 MPa (250 kg/cm²)
Módulo de elasticidad: 1060 MPa (10,600 kg/cm²)
Resistencia a la flexión: 50 MPa (500 kg/cm²)
Resistencia a compresión: 53 MPa (530 kg/cm²)

Aplicaciones: Sellador de cavidades y grietas inactivas en elementos estructurales impidiendo la filtración de agua y otras sustancias corrosivas; inyección adhesiva en uniones imperfectas entre concreto, mortero, piedra, madera y acero; endurecedor superficial para bases de cemento altamente porosos o de baja resistencia al desgaste.

3.1.2 Refuerzo estructural.

En este estudio se utilizaron dos tipos de reforzamiento estructural, un sistema de láminas de fibras de carbón el cual se utilizó como refuerzo estructural y como ánodo por corriente impresa, y un sistema de tejido de fibras de carbono el cual proporcionó las fibras colocadas en las resinas (A-E) para convertirlas en polímeros conductores.

- *Láminas de CFRP*: Láminas de fibra de carbono producidas en un proceso de pultrusión con propiedades precisas del material

Características: Módulo de elasticidad: 165, 000 MPa (1,650,000 kg/cm²)
Resistencia a la tensión: 2,400 MPa (24,000 kg/cm²)

Aplicaciones: Incremento de cargas (Incremento de cargas vivas, incrementos de cargas vehiculares, cambios de uso de la estructura); daño en las partes de la estructura (envejecimiento de los materiales de construcción, corrosión en el acero de refuerzo, impacto de vehículos, incendios, terremotos).

Mejoramiento de la capacidad de servicio (recuperación de deformaciones, reducción de esfuerzos en el acero de refuerzo, reducción del ancho de fisuras); modificaciones del sistema estructural (eliminación de muros o columnas, eliminación de secciones en losas o muros).

- *Tejidos compuestos de fibra de carbono*: Sistema de reforzamiento estructural a base de tejido unidireccional de fibra de carbono.

Características: Módulo de elasticidad: 230 000 MPa (2, 300, 000 kg/cm²)
Resistencia a la tensión: 3900 MPa (39, 000 kg/cm²)

Aplicaciones: Incremento de cargas (Incremento de cargas vivas, incrementos de cargas vehiculares, cambios de uso de la estructura); daño en las partes de la estructura (envejecimiento de los materiales de construcción, corrosión en el acero de refuerzo, impacto de vehículos, incendios, terremotos); mejoramientos de la capacidad de servicio (recuperación de deformaciones, reducción de esfuerzos en el acero de refuerzo, reducción del ancho de fisuras); modificaciones del sistema estructural (eliminación de muros o columnas, eliminación de secciones en losas o muros). Este elemento puede ser utilizado para geometrías complejas, en reforzamientos a cortante, flexión, torsión, y en confinamiento de estructuras.

3.2 Caracterización del polímero conductor

3.2.1 Fabricación de los polímeros conductores

Para lograr que el polímero base resina se convirtiera en un polímero conductor, se añadieron fibras de carbono como material conductor de electricidad (filler). Las fibras añadidas a la resina se obtuvieron de un sistema de reforzamiento base de tejidos de fibras de carbono unidireccionales de alta resistencia.

Las fibras se cortaron en diferentes longitudes (3, 6 y 12 mm) y después se añadieron la mezcla al momento de la preparación de la resina, formando así un elemento adhesivo que a su vez permite el flujo de electrones debido a la presencia de estas fibras.

Se elaboraron 16 probetas de resinas, teniendo como variable el tipo de resina (resina A a resina E), el porcentaje de fibras (2.7, y 4% en peso) y la longitud de las mismas (3, 6 y 12 mm). Las probetas se colaron en moldes de plástico de 25,4 mm de diámetro y una longitud de 100 mm. Dos alambres de cobre # 12 se ubicaron a 10 mm de la base y a 10 mm de la parte superior del molde, atravesando por la mitad los moldes de plástico.

En la parte inferior de los moldes se fijaron con silicón placas de acero galvanizado para evitar que la resina epóxica se derramara. Los alambres de cobre tenían la finalidad de servir como los conectores externos y así medir la resistencia eléctrica de las probetas una vez que las diferentes resinas epóxicas fueran vaciadas en su interior. La fig 3.1 muestra las dimensiones de las probetas utilizadas.

Las probetas de las resinas epóxicas tienen las dimensiones mostradas (fig 3.1):

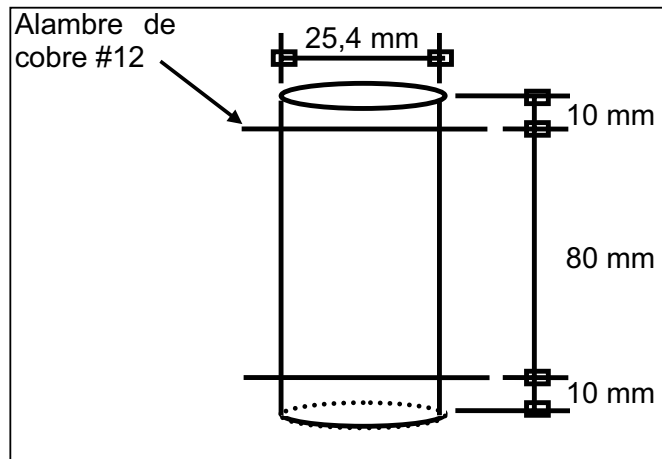


Figura 3.1
Dimensiones de las probetas de resinas epóxicas conductoras.

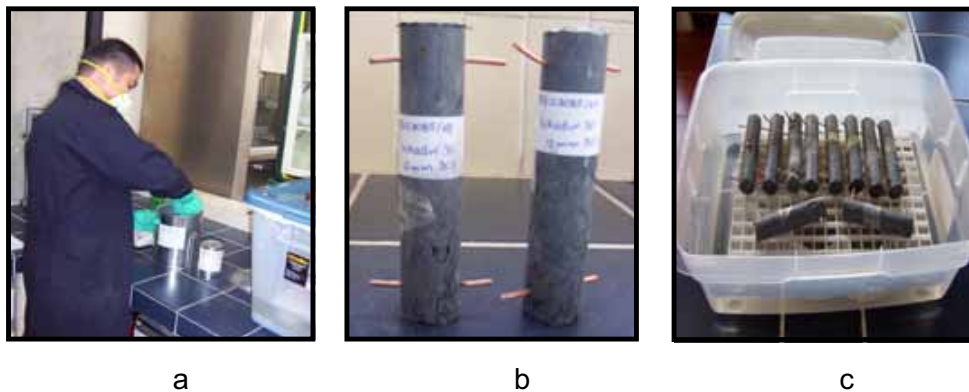


Fig 3.2
(a; b; y c). Elaboración de las resinas conductoras, y su estado final

Una vez fabricadas, se realizó una evaluación de su capacidad conductora por medición de su resistividad, durante un período de 4 semanas, dentro del cual se mantuvieron a las probetas 7 días en un ambiente de laboratorio ($\sim 70\%$ de humedad relativa $21 \pm 2^\circ \text{C}$) y después fueron colocadas en un ambiente húmedo para observar si la humedad afectaba la resistencia de las resinas estudiadas. En la fig 3.2 (a, b y c) se puede apreciar en forma progresiva la elaboración de las resinas epóxicas conductoras.

El procedimiento de preparación de las resinas epóxicas se presenta a continuación:

- Pesar el componente B (matriz) de la resina seleccionada
- Añadir las fibras de CFRP y mezclar con una paleta de plástico hasta lograr la homogeneidad en los componentes
- Pesar el componente A (catalizador)
- Adicionar el componente A a la mezcla preparada anteriormente (comp A + fibras), mezclar los tres elementos hasta que la pasta sea uniforme
- Colocar la resina obtenida dentro de un molde de plástico para lograr la forma y dimensiones requeridas

3.2.2 Medición de la resistencia eléctrica

El objetivo de medir la resistencia eléctrica en las resinas estudiadas era evaluar su conductividad, debido a que a menor resistencia eléctrica se obtiene una mayor conductividad. Para este proyecto se requería una resina epóxica conductora que permita el flujo de la corriente de protección. Por este motivo, las resinas que presentaron menor resistencia se seleccionaron para su estudio y aplicación en el sistema híbrido propuesto en la investigación.

Las mediciones de resistencia eléctrica se llevaron a cabo mediante un resistómetro denominado Nilsson Mode 400. Utilizando el método de medición de 2 pines, en el cual se interconectan los elementos C1 (corriente 1) + P1 (potencial 1) y por otro lado C2 (corriente 2) +P2 (potencial 2); una vez que se encontraban interconectados los pares, se procedió a conectar el par C1P1 a un elemento de cobre (superior), y el par sobrante C2P2 al elemento cobre (inferior). Una vez realizada esta configuración se procede a la medición a través del resistómetro indicado; esto se puede observar en la fig 3.3 (a y b) (Nilsson Inc, 1984).

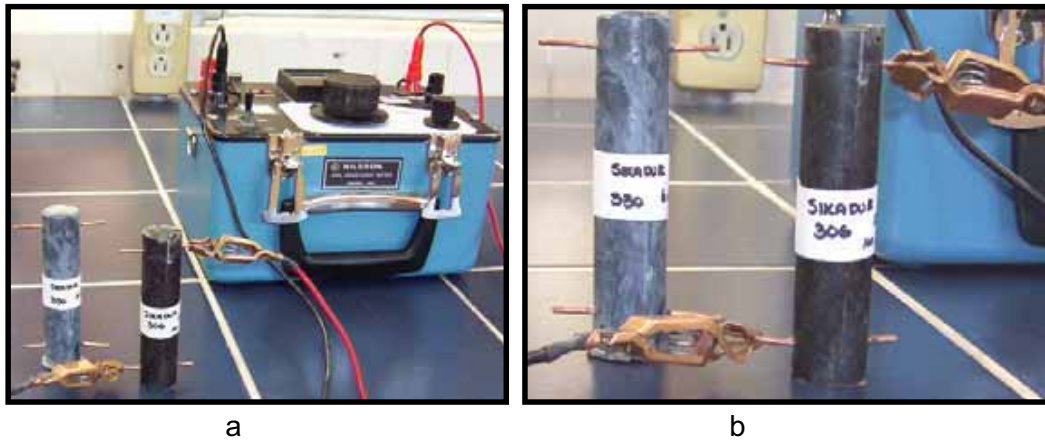


Figura 3.3
(a y b). Medición de la resistencia eléctrica en las probetas de resinas epóxicas

3.2.3 Cálculo del factor de forma.

El cálculo del factor de forma para las probetas de las resinas estudiadas se describe a continuación (Webster y Fontana, 1987):

$$B = \left(\frac{K}{R} \right) \quad 3.1$$

En donde:

B = factor de forma, (cm).

K = es la resistividad de una solución estándar determinada en forma experimental en una celda con un factor de forma igual a la unidad, (Ω -cm).

R = resistencia eléctrica del electrolito, (Ω)

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y se puede definir como el recíproco de su conductividad. Su unidad de medida es el Ω -cm o Ω -m.

Para calcular la resistividad de una solución estándar se utilizaron diferentes soluciones: cloruro de potasio (KCl), cloruro de níquel (NiCl), cloruro de sodio (NaCl) y agua potable (H_2O clorada).

Estas soluciones fueron preparadas con una concentración de 0.01 molar; y mediante el resistómetro y en una celda con factor de forma igual a 1 se efectuaron las mediciones de los valores de resistividad para estas soluciones. Una vez que se obtuvo la resistividad de las diferentes soluciones, se procedió a medir el valor de la resistencia eléctrica del electrolito.

Se realizó vaciando las diferentes soluciones utilizadas dentro de los moldes idénticos a los utilizados para la fabricación de las resinas conductoras, y midiendo la resistencia eléctrica entre los alambres de cobre para cada una de las soluciones empleadas. Dichas mediciones se pueden observar en la fig 3.4 (a y b), la ilustración *a* permite observar la medición de la resistencia eléctrica entre los alambres de cobre, y la *b* la medición de la resistencia eléctrica del electrolito.

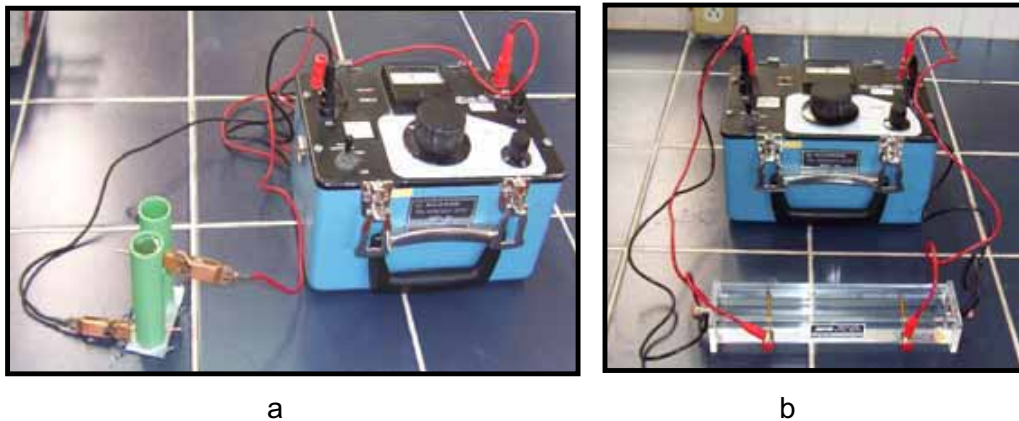


Figura 3.4
(a y b). Mediciones de resistencia y resistividad eléctrica para calcular la constante geométrica de las resinas epóxicas conductoras

3.3 Fabricación de los especímenes de concreto

Para el desarrollo de este proyecto se elaboraron 14 prismas de concreto reforzado (dimensiones 50x100x200 mm), con 2 varillas de refuerzo en su interior.

3.3.1 Acondicionamiento de las barras de refuerzo.

El acero de refuerzo se colocó a través de 2 varillas de 9,5 mm de diámetro, colocadas dentro de los moldes; estas varillas se cortaron con segueta, limpiadas, cabeceadas con esmeril y numeradas en sus extremos para su identificación.

3.3.2 Fabricación de los moldes y prismas

Los moldes se fabricaron de Triplay de 30 mm de espesor; cada molde maestro contiene 6 moldes individuales de probetas; los moldes secundarios cuentan con las dimensiones especificadas anteriormente (50x100x200 mm).



Figura 3.5
Imagen de los moldes antes de la ubicación de los elementos

Las varillas de refuerzo, así como el electrodo de referencia fueron colocados según detalle en la fig 3.6.

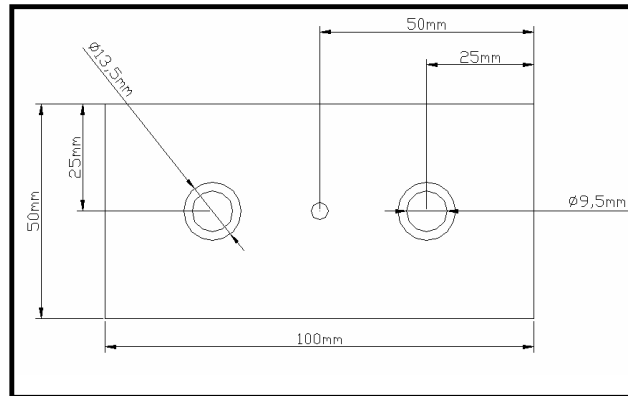


Figura 3.6
Imagen de la ubicación de las varillas de refuerzo y del electrodo de referencia

A continuación en las figs 3.7 a 3.11, se ilustra el proceso de ubicación de las varillas de refuerzo y de los electrodos de referencia dentro de los moldes individuales: Como se observa en la figura anterior las varillas a 25 mm de las paredes de la probeta y distanciadas 50 mm entre ellas; en la parte central de la probeta se encuentran los electrodos de referencia en cada probeta.



Figura 3.7

Colocación de las varillas de refuerzo y del electrodo de referencia

Una vez que se hicieron los orificios correspondientes para poder fijar las varillas en el lugar correspondiente, se procedió a trabajar los orificios de los electrodos de referencia, y a la colocación y fijación de dichos elementos en su respectiva ubicación final. En la fig 3.8 se muestra el molde terminado, con las varillas y electrodos en posición.

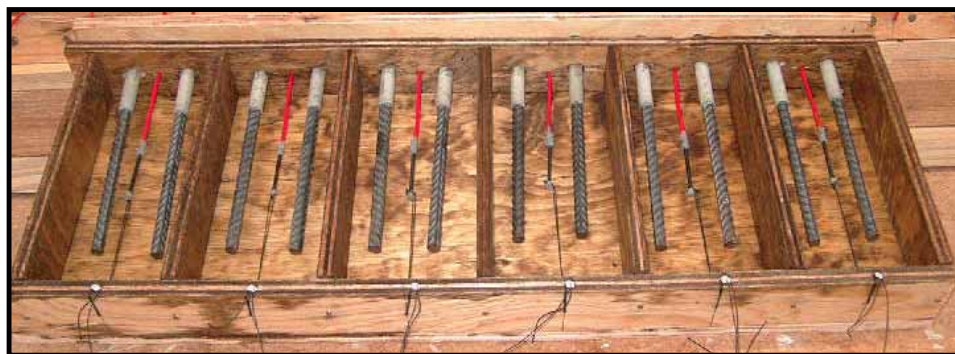


Figura 3.8

Molde maestro (6 individuales) con elementos de refuerzo

En forma más detallada se ilustra a continuación:



Figura 3.9
Imagen a detalle de un molde individual con sus elementos ubicados en su posición final

La fig 3.9 muestra un acercamiento de una sola probeta terminada. El electrodo de referencia, se encuentra equidistante de las dos varillas y a la mitad de la longitud de las mismas, con la finalidad de realizar las mediciones de potenciales de corrosión de las dos varillas de refuerzo de una manera confiable. Una vez ensamblados todos los moldes requeridos, se procedió a elaborar una mezcla de concreto a utilizar para la fabricación de las probetas, en las siguientes ilustraciones se puede ver en forma secuencial el proceso de fabricación de las mismas. La fig 3.10 muestra los moldes listos para recibir el concreto.

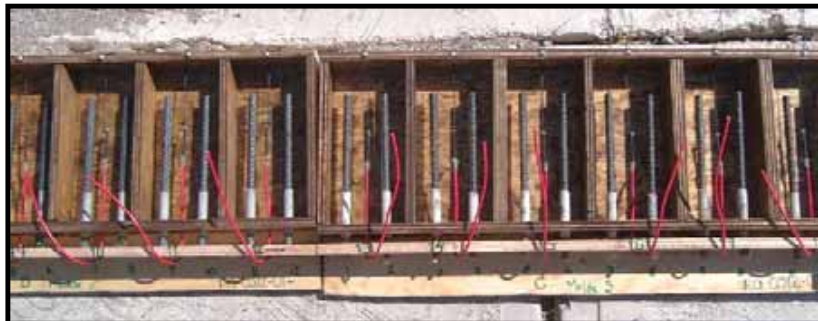


Figura 3.10

Imagen de los moldes listos para recibir la mezcla

A continuación se presenta la descripción de la mezcla utilizada para la fabricación de los prismas de concreto, tabla 3.2.

Tabla 3.2
Materiales utilizados para la fabricación del concreto estudiado

Material	Cantidad (kg)
Cemento	9,11
H ₂ O	6,38
Grava	20,20
Arena	18,10
Sal (NaCl)	0,270

La adición de NaCl (0,270 kg) en las probetas de concreto reforzado tiene la finalidad de activar y acelerar el proceso de corrosión en dichas probetas.

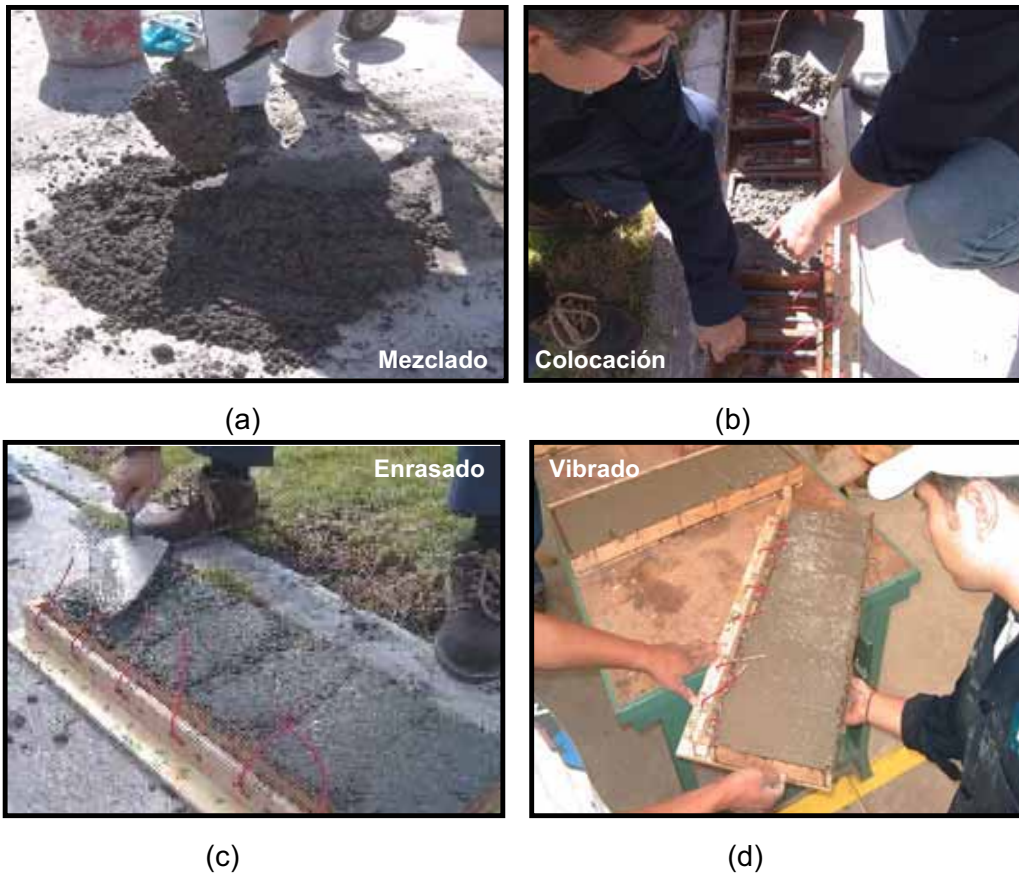


Figura 3.11
(a; b; c; y d) Imágenes progresivas del proceso de elaboración de mezcla y de

colado de los prismas estudiados

Los prismas fueron curados dentro de los moldes por un periodo de cuatro semanas. Después de la etapa de curado se les colocó en un ambiente de laboratorio (~70% HR; $21 \pm 2^\circ \text{C}$) por dos semanas este periodo se denominó secado. En la fig 3.11 (a, b, c y d) se observa el proceso de elaboración de la mezcla y de elaboración de los prismas en estudio.

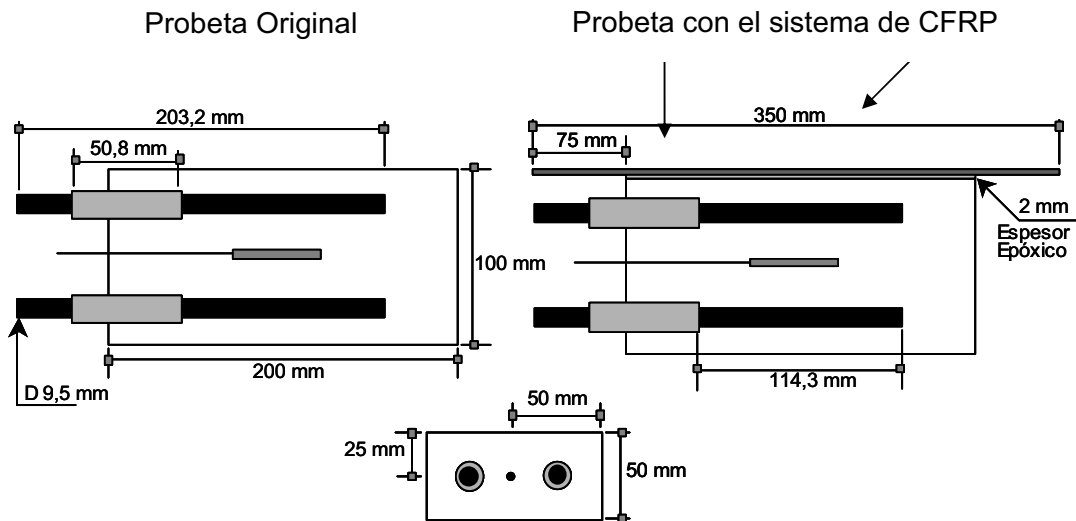


Figura 3.12
Dimensiones de los prismas de concreto estudiados (original y sistema colocado).

En la fig 3.13 se pueden observar las dimensiones de los prismas fabricados, así como el estado final después de la colocación del CFRP.

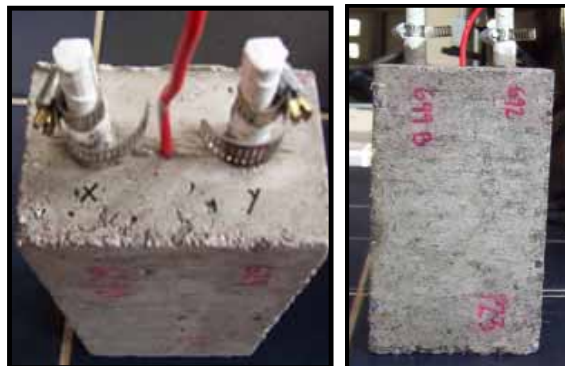


Figura 3.13
(a y b). Prismas estudiados en detalle, colocados en ambiente de laboratorio

Después de decidir cual de las 2 varillas sería protegida por el sistema de protección catódica, se procedió a limpiar el área de la probeta que recibiría el sistema (CFRP + polímero conductor), por medio de una limpieza manual. Enseguida se colocó un encintado para delimitar el área en que el polímero se aplicaría.

Cuando las probetas estuvieron limpias, se procedió a colocarlas en ambiente de laboratorio (fig 3.14).



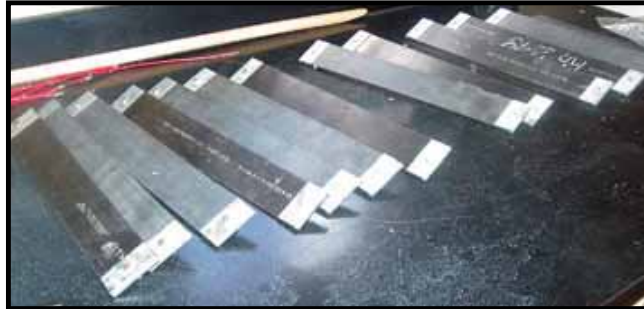
Figura 3.14
Prismas de concreto estudiados en ambiente de laboratorio

Teniendo listas las superficies de los prismas de concreto para recibir el polímero y el CFRP, el siguiente paso fue la preparación del polímero conductor.

3.4 Colocación del sistema en los especímenes.

El sistema de reforzamiento estructural base platinas CFRP, fue cortado en tramos de 350 mm para su colocación sobre los prismas.

En los extremos de las platinas se instalaron conectores; mordazas de acero, para las mediciones eléctricas y lograr una mejor distribución de la corriente de protección a través de las fibras (fig 3.15).



a

Figura 3.15
Platinas de CFRP con las conexiones instaladas

3.4.1 Colocación del reforzamiento

Una vez que se contaba con los elementos de CFRP en las dimensiones deseadas, y equipados con las conexiones indicadas se procedió a su colocación sobre una de las caras de las probetas mediante los polímeros conductores seleccionados con anterioridad. El sistema refuerzo-protección, solo protegerá a una de las 2 varillas en cada prisma; esto con la finalidad de hacer manifiesta la efectividad del sistema de protección catódica por corriente impresa.

Utilizando una espátula se colocaron las resinas conductoras seleccionadas, sobre un costado de los prismas. Una vez que se incorporaron las resinas al concreto se procedió a ubicar el CFRP en su posición final. Para lograr mejor adherencia se aplicó cierta presión sobre la superficie del CFRP, mediante pesos y prensas mecánicas (fig 3.16).

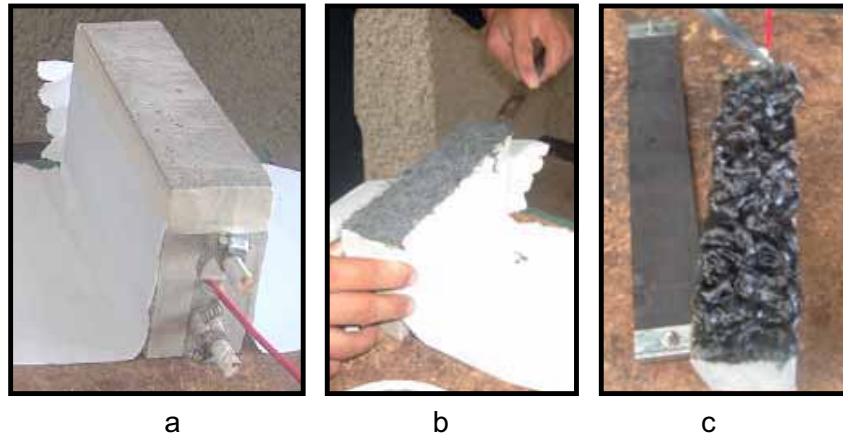


Figura 3.16

(a, b y c). Colocación de las resinas seleccionadas en los prismas estudiados

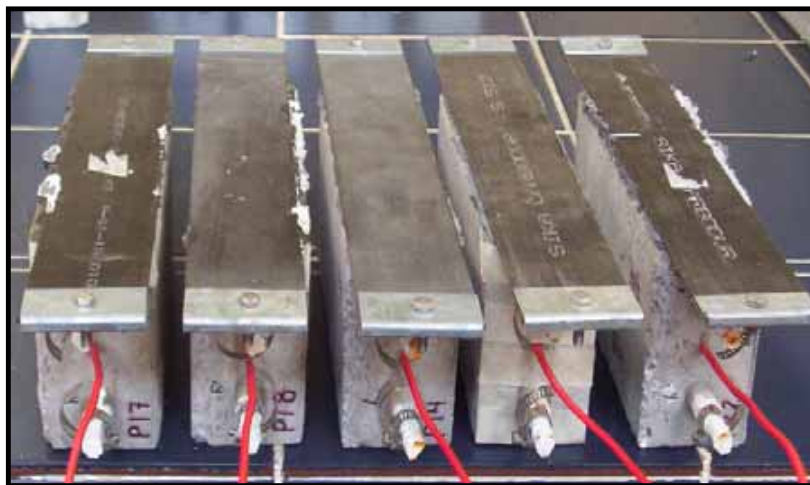


Figura 3.17

Sistema de CFRP + polímero conductor incorporado a los prismas

Adherido el CFRP mediante el polímero conductor al prisma de concreto, se procedió a la etapa de endurecimiento de la resina epóxica, colocando a los especímenes en

un ambiente de laboratorio (~70% HR; $21 \pm 2^\circ \text{C}$) durante un período de 7 días, tiempo en el cual se logra la resistencia máxima de las resinas epóxicas utilizadas (fig 3.17).

Alcanzado ese punto, y después de un proceso de estabilización en ambiente de laboratorio (~70% de humedad relativa; $21 \pm 2^\circ \text{C}$), se procedió a colocar de las 14 probetas dentro de la cámaras de humedad controladas.

Los 14 prismas fueron identificados con la letra P y un número del 11 al 24. En la tabla 3.3 se lista la distribución de las resinas conductoras seleccionadas utilizadas para la unión del sistema a los prismas estudiados.

Tabla 3.3.
Distribución de las resinas y de la cantidad de fibras añadidas

Probeta # ID	Resina Tipo	Fibras de Carbono %
P24	B	3%
P23	B	3%
P22	B	3%
P21	B	3%
P20	B	4%
P19	B	4%
P18	E	3%
P17	E	3%
P16	B	2%
P15	B	2%
P14	B	3%
P13	B	3%
P12	D	3%
P11	D	3%

3.4.2 Cálculo de la constante geométrica de resistividad

De la misma forma en que se calculó la constante geométrica de resistividad para las resinas conductoras, se utilizaron diferentes soluciones como: cloruro de potasio (KCl), cloruro de níquel (NiCl), cloruro de sodio (NaCl) y agua potable clorada (H_2O), en concentración 0.01 molar. Mediante el resistómetro Nilsson 400 a través de la caja de suelos (Soilbox), se obtuvieron los valores de resistividad eléctrica para cada una de las soluciones empleadas, posteriormente se procedió a medir la resistencia eléctrica de las soluciones (electrolito) en una probeta fabricada de acrílico de 3 mm de espesor, con dimensiones idénticas a los prismas estudiados; en la fig 3.18, se pueden apreciar las varillas utilizadas, junto con el electrodo de referencia de Ti/TiO

ubicadas en su posición, al igual que en los prismas de concreto. La medición se llevo a cabo en dos configuraciones:

1. Medición de la resistencia eléctrica entre las varillas; esto con la finalidad de encontrar una constante geométrica que nos permita convertir los valores de resistencia eléctrica del electrolito (concreto) a valores de resistividad eléctrica;
2. Medición de la resistencia eléctrica entre una placa de acero (en la misma posición que el CFRP) y la varilla protegida (varilla cercana al CFRP).

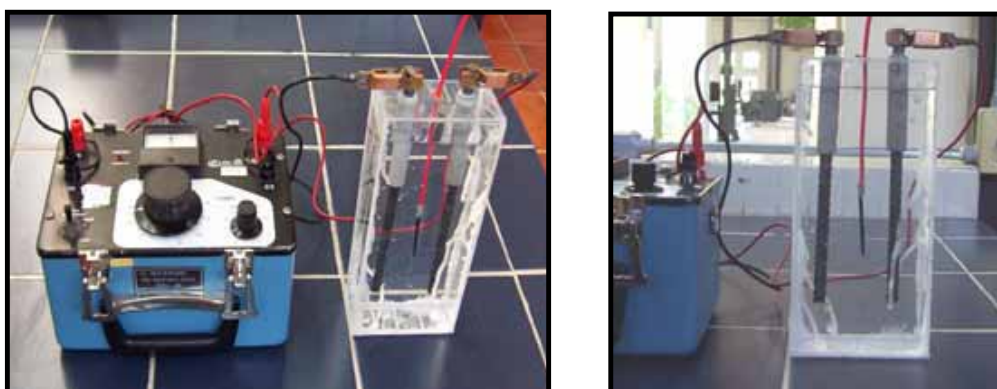


Figura 3.18
(a y b). Mediciones de resistencia eléctrica del electrolito

El procedimiento de cálculo de estas constantes es semejante al empleado anteriormente para obtener la constante geométrica para las resinas epóxicas conductoras; los valores obtenidos de las mediciones eléctricas de ambas configuraciones se presentan a continuación (tabla 3.4.).

Tabla 3.4.
Cálculo de la constante geométrica de resistividad para el electrolito

Solución	Resistividad K (k Ω -cm)	Resist elect R (Ω)	Cte. geométrica B (cm)
KCl	660	70	9.428
NaCl	700	100	7
NiCl	500	60	8.333
H ₂ O	2300	250	9.2
Promedio =			8.49

Tabla 3.5.
Cálculo de la constante geométrica de resistividad para el sistema

Solución	Resistividad K (k Ω -cm)	Resist elect R (Ω)	Cte. geométrica B (cm)
KCl	660	32	20.625
NaCl	700	47	14.893
NiCl	500	30	16.666
H ₂ O	2300	120	19.166
		Promedio =	17.837

3.5 Cámaras de humedad controlada

Las cámaras de humedad controlada (fig 3.19) se fabricaron con cajas de plástico transparente, de dimensiones 690 x 480 x 410 mm, donde se instalaron tramos de tubo PVC de 50 mm de longitud, como apoyo de las rejillas de plástico sobre las que se colocaron las probetas posicionadas sobre un costado; esto con la finalidad de que no tuvieran contacto directo con el fondo de las cámaras. Dentro de éstas se colocó agua con una altura de 30 mm para generar una humedad entre el 80 y 90 % (85% como valor nominal). Por la parte interior de las tapas de las cámaras, se incorporó un empaque para evitar que escapara la humedad. En la misma tapa se instrumentaron las conexiones eléctricas necesarias para realizar las mediciones electroquímicas requeridas, a fin de tener una mínima perturbación del ambiente diseñado en el interior de las cámaras de humedad controlada.



Figura 3.19.
Imagen de las cámaras de humedad relativa controlada



Figura 3.20
Conexiones eléctricas en las cámaras de humedad controlada

Como se comentó con anterioridad las conexiones eléctricas se realizaron desde el interior hacia el exterior; cada elemento (Varillas, CFRP y el electrodo de referencia) tuvieron su propia conexión eléctrica con el propósito de realizar las mediciones electroquímicas y así conocer su comportamiento durante todo el proyecto. En la fig 3.21, se aprecia el diagrama de las conexiones eléctricas en las cámaras de humedad relativa (HR), las cuales se realizaron durante las tapas de las mismas. Se puede ilustrar la interconexión eléctrica entre el conector de la fuente de poder (DC), el switch (On/Off) y la barra protegida; y así de poder interrumpir la corriente eléctrica de protección al momento de realizar algunas mediciones, o durante la manipulación de probetas.

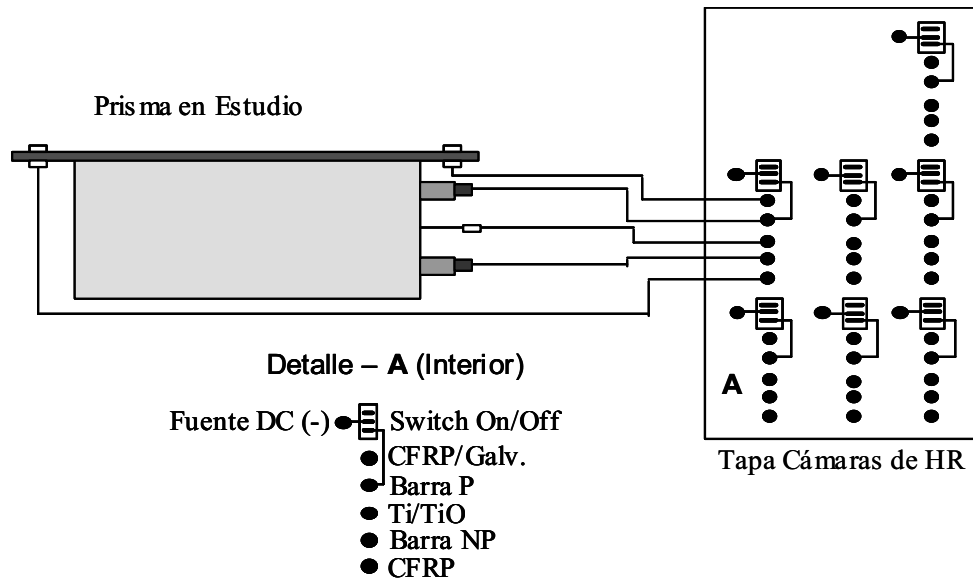


Figura 3.21
Conexiones en la parte interna de la tapa de las cámaras de HR

Las conexiones eléctricas fueron hechas con cable de calibre #12, para las uniones entre los elementos y los conectores (jacks), se utilizaron Terminales Tipo O, mismas que se soldaron con el propósito de contar con una buena conexión eléctrica. En la fig 3.22 se observan los elementos al exterior de la tapa; los cuales son utilizados para realizar las mediciones correspondientes.

Una vez que las probetas fueron instaladas en las cámaras de humedad relativa, permanecieron durante 75 días, hasta que los potenciales de las 14 probetas se estabilizaron; una vez que se llegó a ese punto de equilibrio, se procedió a la aplicación de las diferentes magnitudes de corriente de protección.

Detalle – A (Exterior)

- Switch On/Off  ● Fuente DC (-)
- CFRP/Galvanostato (+)
 - Barra Protegida
 - Ti/TiO
 - Barra No Protegida
 - CFRP

Figura 3.22
Conexiones eléctricas en el exterior de la tapa de las cámaras de HR

En la fig 3.23 se muestran las cámaras de HR, la ubicación de los prismas, y la distribución de las conexiones.

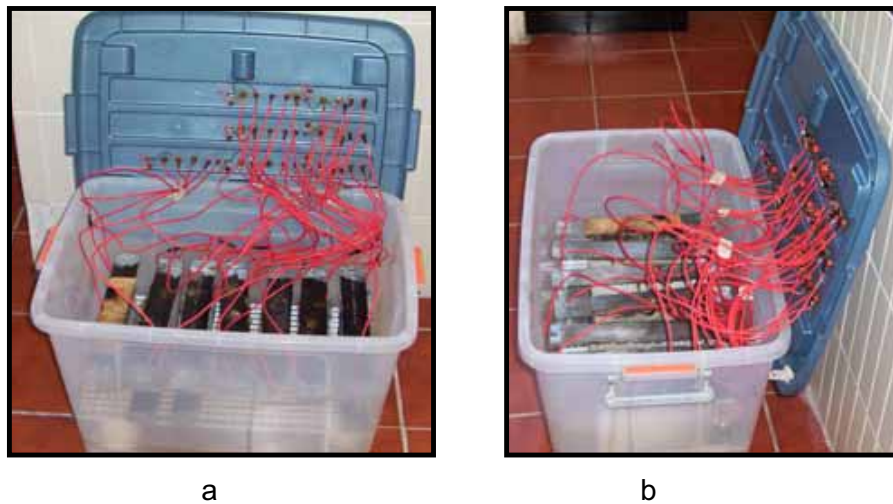


Figura 3.23
(a y b). Imagen de las cámaras de HR con las probetas y las conexiones eléctricas instaladas

3.6 Aplicación de las corrientes de protección.

Cuando las mediciones de potencial eléctrico resultaron estables dentro de las cámaras de humedad relativa, se procedió a la aplicación de la corriente eléctrica de protección entre el CFRP (ánodo) y la varilla de refuerzo seleccionada o barra protegida (cátodo), en diferentes magnitudes (50, 100 y 1,000 mA/m²) durante 180, 180 y 25 días respectivamente, mediante una fuente de poder Hewlett-Packard 627B DC (0-60 V, 0-15 A) y un galvanostato de 20 canales, construido en el laboratorio (capacidad por canal de 0-300 mA).

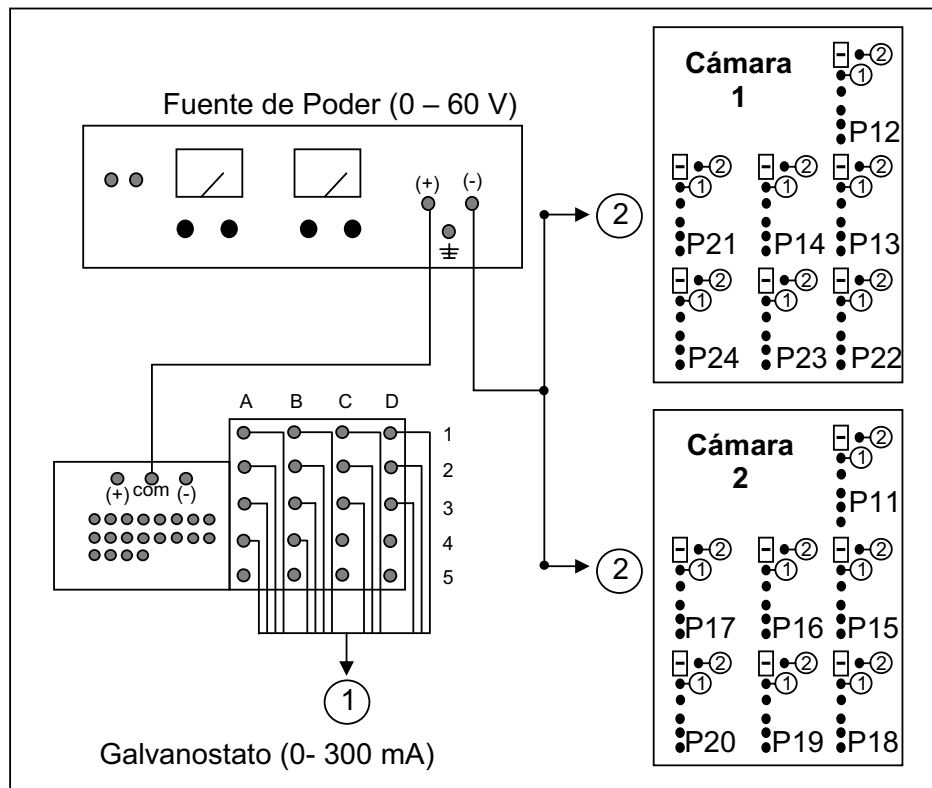
La aplicación de estas corrientes de protección tuvieron como objetivo proteger sólo una de las varillas embebidas en las probetas; esto con la finalidad de hacer manifiesta la efectividad del sistema.

En la imagen siguiente (figura 3.24), se pueden apreciar los elementos las instalaciones y la ubicación general de cada uno en la aplicación de las corrientes de protección aceleradas.



Figura 3.24
Aplicación de las corrientes de protección aceleradas

En la fig 3.25 se observa el diagrama de conexión entre las cámaras de humedad controlada, fuente de poder y galvanostato. También se visualiza la distribución de los prismas en las dos cámaras de humedad controlada.



(b)

Figura 3.25
Diagrama de conexiones y de aplicación de las corrientes de protección aceleradas

Una vez que las conexiones eléctricas se hicieron y revisaron, se procedió a calibrar las corrientes netas que fueron suministradas por el galvanostato. Para esto, con base en la tabla 3.6 se calibró cada canal del galvanostato, por medio de los potenciómetros con el propósito de aportar la corriente deseada para cada probeta.

Cada probeta contaba con su propia conexión individual, por lo que permanecen ajenas unas a otras en referencia a la conexión eléctrica. Cada una contó con su propio switch (on/off) a fin de detener el paso de la corriente, cada vez que fuera requerido, como en las pruebas de resistencia eléctrica o en las mediciones de depolarización para verificar los criterios de protección catódica.

En la tabla 3.6 se observa la distribución de la aplicación de las 3 diferentes magnitudes de corriente a las 14 probetas estudiadas.

Tabla 3.6
Distribución de la aplicación de corrientes

Galvanostato # Canal	Probeta # ID	Densidad de corriente
A1	P24	50 mA/m ²
B1	P23	50 mA/m ²
C1	P22	100 mA/m ²
D1	P21	100 mA/m ²
A2	P14	1000 mA/m ²
B2	P13	1000 mA/m ²
C2	P20	100 mA/m ²
D2	P19	100 mA/m ²
A3	P18	100 mA/m ²
B3	P17	100 mA/m ²
C3	P16	100 mA/m ²
D3	P15	100 mA/m ²
A4	P12	100 mA/m ²
B4	P11	100 mA/m ²

3.7 Medición del potencial de media celda en los prismas

Como ya se especificó la medición del potencial de media celda de las barras de refuerzo en los prismas estudiados, tuvo la finalidad de funcionar como un indicador de la actividad corrosiva en estos elementos. Esta medición indicó si los elementos de acero presentan o no signos de activación por corrosión (ASTM C-876).

Debido a la alta resistencia eléctrica inherente en la medición del sistema, el voltímetro a utilizar debe poseer una alta impedancia de entrada para poder precisar la medición del potencial de media celda. Por ello, en este estudio se utilizó un voltímetro de alta impedancia interna (10 a 200 MΩ), marca MC Miller, modelo LC-4.

Las mediciones de los potenciales de media celda para cada una de las barras de refuerzo embebidas en los prismas, se hicieron con base en el electrodo de referencia interno de titanio/óxido de titanio (Ti/TiO₂). Una vez obtenidas las mediciones se calculó el potencial de media celda de este electrodo (Ti/TiO) con respecto a un electrodo estandarizado de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄); y con ello comparar los resultados de los potenciales de media celda de las barras de refuerzo con los valores presentes en la literatura.

3.7.1 Medición de los potenciales de media celda de las barras de acero

Las mediciones de los potenciales de media celda de las barras de acero (protegidas y no protegidas), se realizaron de la siguiente forma: mediante el voltímetro de alta impedancia se conectó la terminal (COM) al electrodo de referencia, en este caso el electrodo interno de titanio (Ti/TiO_2); y la terminal (DC/AC/ Ω) a la barra de acero que sería examinada. A continuación se procedió a documentar los resultados de la medición. La fig 3.26 muestra el procedimiento gráficamente.



Figura 3.26
Medición del potencial de media celda para las barras de refuerzo

3.7.2 Medición del potencial de media celda del electrodo de titanio/óxido de titanio (Ti/TiO_2) (calibración)

La calibración del electrodo de referencia de titanio activado (Ti/TiO_2) se realizó mediante la medición de su potencial de media celda a través de un electrodo de referencia estandarizado de cobre/cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO_4). La medición se realizó conectando la terminal (COM) al electrodo de (Cu/CuSO_4) y la terminal (DC/AC/ Ω) al electrodo interno de titanio activado (Ti/TiO_2). Para realizar la medición del potencial de media celda, se tuvo que humedecer por medio de una esponja saturada con agua, el área de concreto en donde se realizaría la prueba, para tener una mayor precisión en la medición.

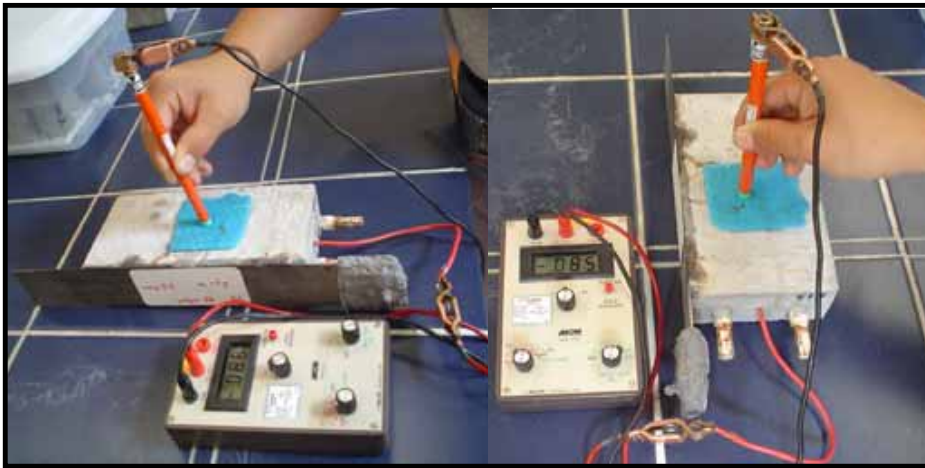


Figura 3.27
Medición del potencial de media celda del electrodo de referencia

3.8 Medición de la resistencia eléctrica en los prismas

Las mediciones de resistencia eléctrica que se realizaron en los prismas fueron 3: 1) Resistencia eléctrica del electrolito (concreto), es decir barra protegida vs. no protegida; 2) Resistencia eléctrica del sistema propuesto (CFRP+polímero conductor vs. barra protegida); y 3) Resistencia eléctrica del CFRP (entre los extremos del CFRP) (Nilsson Inc, 1984).

3.8.1 Medición de la resistencia eléctrica del electrolito (concreto)

Para determinar indirectamente posibles cambios en la humedad interna del concreto durante los periodos de esta experimentación, se realizaron mediciones de resistencia eléctrica entre las barras de refuerzo.

Dichas mediciones se realizaron a través del resistómetro de suelos Nilsson modelo 400, por el método de dos puntos. Se interconectaron las terminales P1/C1 por medio de un cable, así como también las terminales P2/C2. Una vez concluida la operación se procedió a conectar los dos cables de medición, a los elementos a ser estudiados.

La medición de la resistencia eléctrica del electrolito (concreto) se logró midiendo la resistencia eléctrica; conectando la terminal P1/C1 a la barra de refuerzo protegida y

la terminal P2/C2 a la barra no protegida; y efectuando la medición a través del resistómetro (fig 3.28).

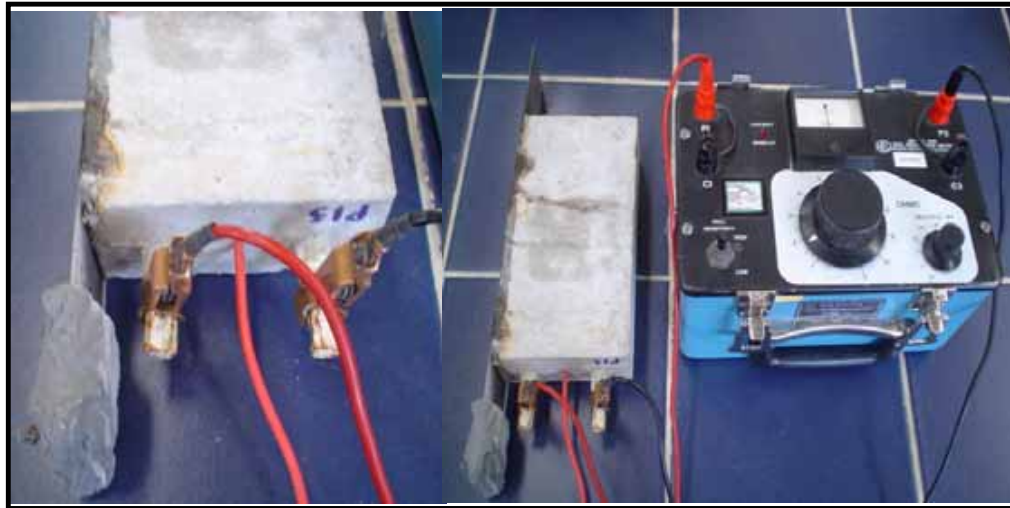


Figura 3.28
Medición de la resistencia eléctrica del concreto

3.8.2 Medición de la resistencia eléctrica del sistema propuesto

Para determinar indirectamente si el sistema polímero conductor/CFRP se despegaba del concreto, durante la aplicación de la corriente se realizó por otra parte la medición de la resistencia eléctrica del sistema utilizando el mismo método de los dos puntos: conectando la terminal P1/C1 a un extremo del CFRP y la terminal P2/C2 a la barra de refuerzo protegida y midiendo el valor de esta resistencia a través del resistómetro mencionado (fig 3.29).

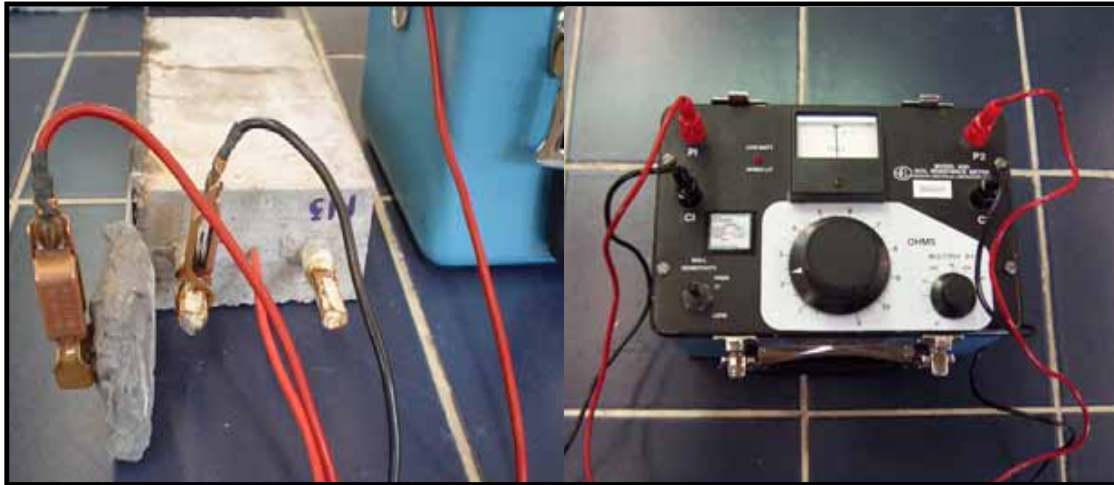


Figura 3.29
Medición de la resistencia eléctrica (CFRP+polímero conductor vs barra protegida)

3.8.3 Medición de la resistencia eléctrica del CFRP

Para determinar indirectamente la posible degradación del CFRP se realizó durante la aplicación de la corriente anódica, la medición de la resistencia eléctrica del CFRP; esta se realizó conectando la terminal P1/C1 a un extremo del CFRP y la terminal P2/C2 al extremo opuesto de CFRP, y midiendo el valor de la resistencia a través del compuesto mediante el resistómetro ya descrito (fig 3.30).



Figura 3.30
Medición de la resistencia eléctrica del CFRP antes de su colocación



Figura 3.31
Medición de la resistencia eléctrica del CFRP antes de su colocación utilizando el resistómetro Nilsson

Las mediciones de resistencia eléctrica que se observan en las figs 3.30 y 3.31 se realizaron antes que las platinas de CFRP fueran incorporadas a los elementos de concreto (prismas); esto con la finalidad de tener los valores de su resistencia eléctrica inicial y así poder comparar esos valores con los valores de resistencia eléctrica al final del proyecto. La comparación respectiva dará información importante acerca de la posible degradación de las platinas de CFRP debido al paso de las corrientes de protección previstas.

En la fig 3.32 se observan las mediciones de resistencia eléctrica de las platinas de CFRP, una vez que fueron incorporadas a los prismas.

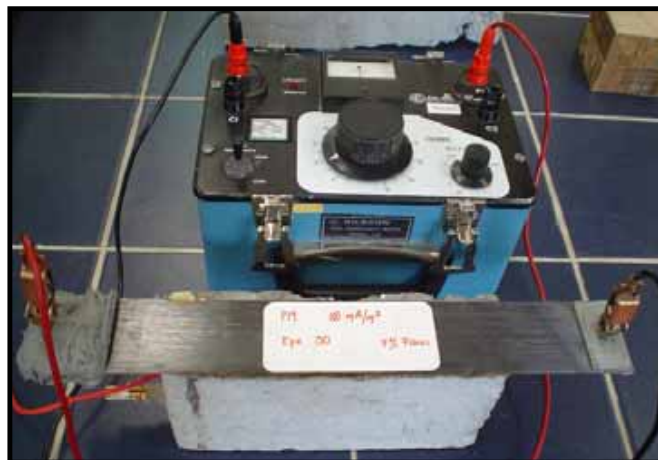


Figura 3.32
Medición de la resistencia eléctrica de la platina de CFRP incorporada al prisma, utilizando el resistómetro Nilsson

3.9 Medición de la fuerza de adherencia del sistema

Las mediciones de fuerza de adherencia se realizaron con la máquina servo-hidráulica Instron 8503, con una celda de carga de 500 kN. Para ello fue necesario construir un dispositivo mecánico para sujetar los prismas de concreto a la máquina de prueba (fig 3.33 y 3.34). Esto con la finalidad de a través de la prueba de tensión, obtener la carga máxima resistente por el sistema propuesto antes de la falla.

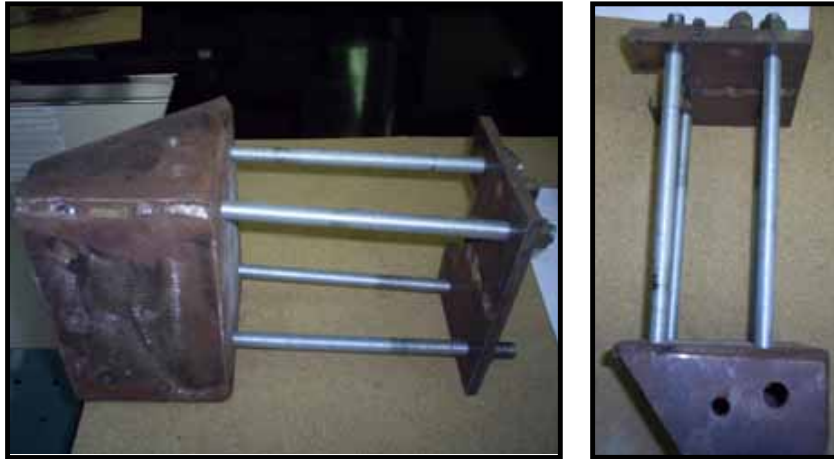


Figura 3.33 y 3.34
Dispositivo mecánico de sujeción

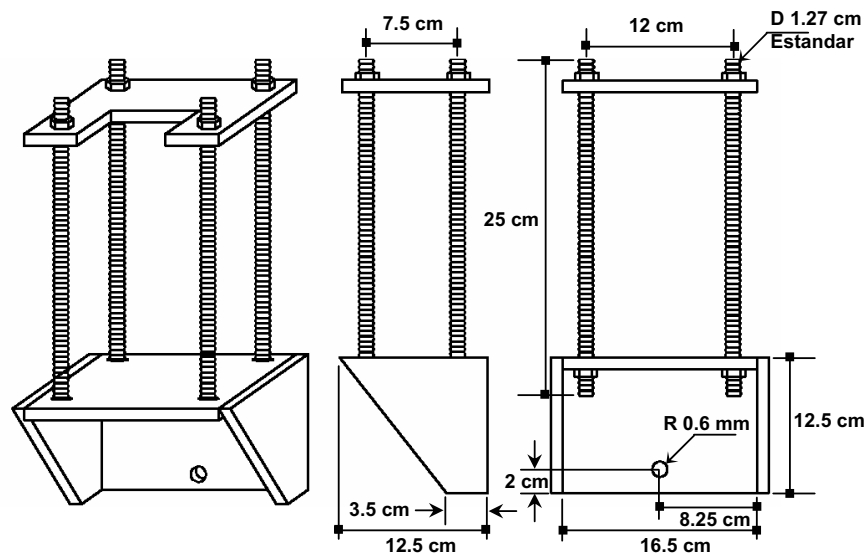


Figura 3.35
Dimensiones del dispositivo mecánico

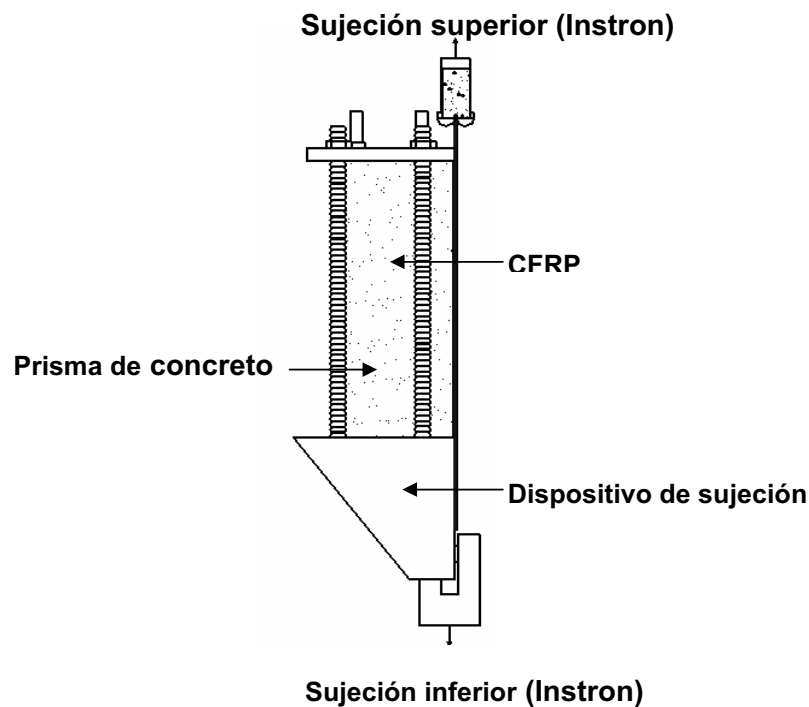


Figura 3.36
Prisma colocado en el dispositivo de sujeción

El dispositivo de sujeción se fabricó con elementos de acero de 1cm de espesor. Una vez colocado el prisma dentro del dispositivo de sujeción, se procedió a ubicarlo en su posición final en la máquina servo-hidráulica para realizar la prueba de tensión (fig 3.36, 3.37 y 3.38). La prueba se llevó a cabo mediante un control de desplazamiento de de carga de 0.004 mm/s.



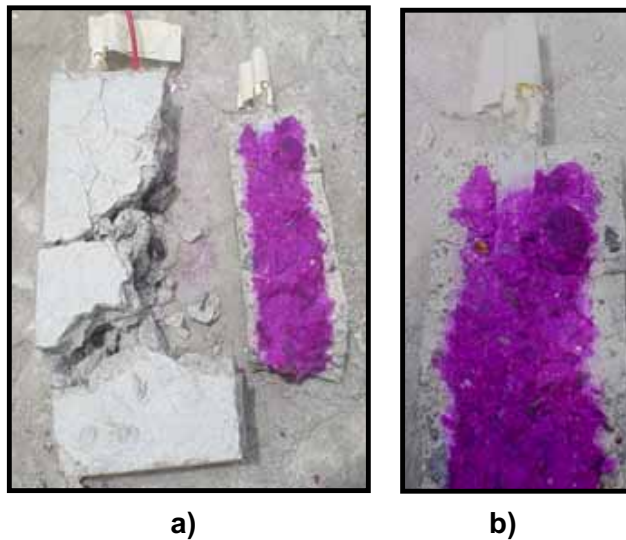
Figura 3.37 y 3.38

Imágenes del dispositivo instalado en la Instron

3.10 Inspección visual (interfase y varillas de refuerzo)

La inspección visual de las interfases (CFRP -resina conductora, resina conductora – concreto), se llevó a cabo después de haber determinado la carga máxima resistente, antes de que el sistema híbrido propuesto falle por adherencia.

Después de la inspección visual de las interfases, se procedió a la inspección visual de la superficie de las varillas de refuerzo. Esto para verificar el grado de corrosión en cada una de ellas, y así corroborar junto con los otros parámetros utilizados, si las varillas estuvieron protegidas catódicamente o no. En la figs 3.39.a) y 3.39.b), se observa la extracción de las varillas de refuerzo.



a) b)
Figura 3.39 (a y b)
Extracción de las varillas de refuerzo

4 Resultados y discusiones

Se presentan los resultados y las discusiones de las diversas mediciones durante el desarrollo del proyecto, así como las gráficas y tablas representativas de las diferentes propiedades y configuraciones de los elementos estudiados. Las gráficas individuales se presentan en los anexos al final de esta presentación escrita.

4.1 Resistividad de las resinas epóxicas conductoras

La fig 4.0 muestra los resultados de los valores de resistividad de la resina A; en esta figura se presentan los valores de las dos probetas fabricadas con esta resina. Ambas probetas se colocaron en ambientes de laboratorio (65% HR), durante el cual las resinas alcanzaron su endurecimiento máximo; una segunda etapa fue el colocarlas en un ambiente de alta humedad relativa (100%HR) para evaluar su comportamiento bajo estas dos condiciones.

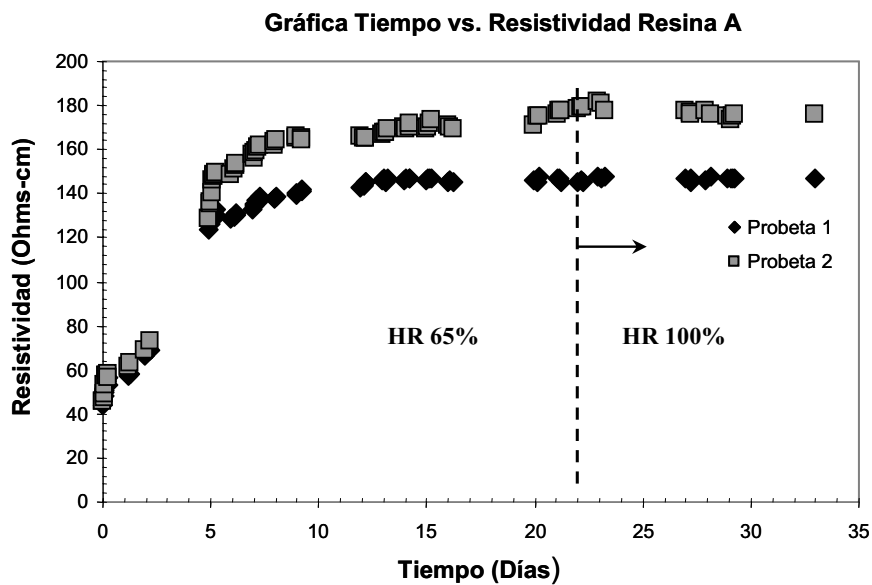


Figura 4.0
Valores de resistividad de la resina A (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%)

Los valores promedio de resistividad de todas las resinas evaluadas, tanto en ambiente de laboratorio (65% HR) como en ambiente de alta humedad relativa (100% HR) se presentan en el histograma de la fig 4.1, en la cual se observa que la resina A (resina epóxica de impregnación, de alto módulo y alta resistencia) presentó el valor máximo de resistividad en las mediciones (160 Ω -cm) en todas las configuraciones estudiadas. Se analizó la resina B (adhesivo epóxico tixotrópico) con varias combinaciones de fibra (cantidad y longitud), esta resina se utiliza

comúnmente para la colocación del sistema de refuerzo estructural estudiado en concreto. Por esta razón, se realizaron diferentes combinaciones de esta resina para verificar su comportamiento como polímero conductor.

Los valores obtenidos para la resina B variaron desde 76 Ω -cm hasta 14 Ω -cm como se observa en la fig 4.1. Estas variaciones fueron el producto de modificar el porcentaje total de fibras añadidas y la longitud de las mismas. La resina C (impregnante y puente de adherencia) presentó un valor promedio de 37.5 Ω -cm. La resina D (adhesivo epóxico multipropósito de baja viscosidad y alta resistencia) y la resina E (inyección epóxica para sellado de grietas), alcanzaron valores del orden de 20.5 y 17 Ω -cm, respectivamente.

De acuerdo con los valores, se tomó la decisión de seleccionar las resinas B en su configuración que presenta el valor más bajo de resistividad (14 Ω -cm); y las resinas D y E (resistividad de 20.5 y 17 Ω -cm respectivamente), debido al criterio de que una resina con una menor resistividad permite mayor conductividad eléctrica, que es lo óptimo para el desarrollo de este proyecto.

Una vez terminado el programa de selección de la resina más adecuada para ser utilizada en el sistema de PC, se continuó con la elaboración de las probetas de concreto las cuales se determinó tuvieran una sección prismática pequeña para su fácil manejo. El concreto utilizado fue también caracterizado mediante las pruebas de resistencia a la compresión a 28 días (ASTM C39/C39M-01) mediante cilindros de 100x200 mm. Se obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 20,5 MPa.

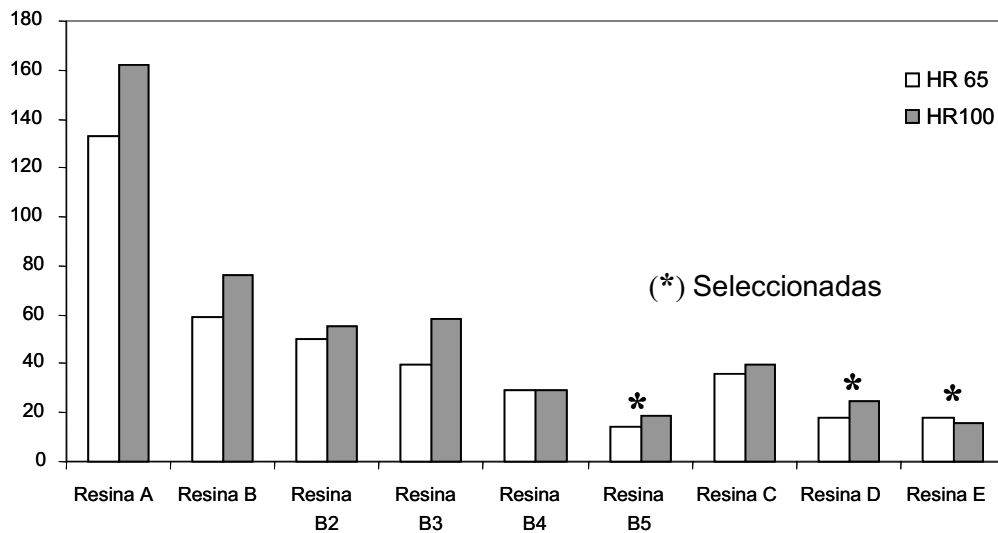


Figura 4.1.
Valores de resistividad de las resinas epóxicas estudiadas

Los valores individuales de resistividad para cada tipo de resina evaluada en esta investigación, se presentan en el Anexo 1.

Una vez concluido el programa de selección de la resina más adecuada para ser utilizada en el sistema de PC, se continuó con la fabricación de las probetas de concreto las cuales se determinó tuvieran una sección prismática pequeña para su fácil manejo.

El monitoreo electroquímico de los prismas de concreto reforzado y el sistema de PC fue realizado en diferentes etapas: A) curado: los prismas se humedecieron dentro de sus moldes por un periodo de 4 semanas (días 0 al 30); B) estabilización en laboratorio: se colocaron en un ambiente de laboratorio (65% de humedad relativa, $21 \pm 2^\circ \text{C}$) para secarse, y después colocar el compuesto (días 31 al 220); C) estabilización en cámaras de humedad controlada: se colocaron en las cámaras de humedad para simular un ambiente con características de una zona marina (días 221 al 295); D) conexión a distintas magnitudes de corrientes de protección (días 296 al 480); y (E) desconexión de los prismas de las corrientes de protección (días 481 al 512 aproximadamente).

Teniendo los valores necesarios para calcular las constantes geométricas de resistividad, se procedió a encontrar estos valores (tabla 4.1).

Tabla 4.1
Cálculo de la constante geométrica de resistividad para las probetas de resinas epóxicas estudiadas

Solución	Resistividad K ($\text{k}\Omega\text{-cm}$)	Resist elect. R (Ω)	Cte. geométrica B (cm)
KCl	785	2300	0.341
NaCl	970	2400	0.404
NiCl	500	1200	0.416
H ₂ O	2700	6000	0.45
Promedio =			0.4027

El valor promedio de las constantes geométricas de resistividad para las resinas epóxicas se utilizará en la conversión de los valores de resistencia eléctrica medidos a través del resistómetro Nilsson 400, a valores de resistividad con la finalidad de poder comparar los resultados de resistividad de las resinas epóxicas conductoras estudiadas, con otros resultados expuestos en la literatura. De acuerdo con los resultados obtenidos se seleccionaron 3 resinas, las cuales presentaron una menor resistividad y por ende una mayor conductividad eléctrica.

4.2 Potencial de media celda para corrientes alta, media y baja, (1000 mA/m²), (100 mA/m²) y (50 mA/m²)

En la fig 4.2 se observa el comportamiento del potencial de media celda de las varillas de acero de refuerzo en los prismas, teniendo como variable las diferentes magnitudes de corrientes de protección.

El monitoreo de los potenciales de media celda se llevó a cabo durante todas las etapas del proyecto. Se observa en la etapa A que los potenciales se mantienen estables en el rango de -0,5 V (vs CSC), el cual es característico de un potencial de acero en concreto con alta concentración de agua y cloruros en sus poros (Sagües y Poor 2003). En la etapa B (~65 % humedad relativa y 21± 2° C) se presentan valores de potencial que iniciaron en -0,57 hasta llegar a valores de -0,27 V (vs CSC) ocasionado estas diferencias de potencial por la pérdida de humedad en los prismas al transcurrir el tiempo. En la etapa C, los prismas se colocaron dentro de las cámaras de humedad controlada (~85 % humedad relativa); por tanto los potenciales descienden hasta valores de -0,5 V (vs CSC).

En la etapa D, los prismas se sometieron a tres corrientes de protección: 50, 100 y 1000 mA/m².

En esta etapa se observa que las diferencias son mínimas entre los valores de potencial "On" (o potencial al estar conectado ánodo y cátodo) de las barras de refuerzo protegidas y las no protegidas al inicio de la aplicación de la corriente eléctrica (-0,5 a -0,55 V vs CSC). Sin embargo, después de 180 días de aplicación de la corriente, los valores de potencial en las no protegidas se encuentran en el orden de -0,5 a -0,6 V (vs CSC); mientras que las barras de refuerzo protegidas se encuentran en valores de -0,82, -1,1 y -1,25 V (vs CSE) para las corrientes de protección baja, media y alta, respectivamente.

Los valores de potencial más negativos demuestran que el sistema de PC funcionó adecuadamente al proporcionar los electrones de excedencia en la barra de refuerzo, haciendo su potencial más negativo que el original.

En la etapa E los prismas fueron desconectados de las diferentes corrientes, y los potenciales de media celda tendieron a regresar a su estado original; es decir, a su estado de corrosión debido a las circunstancias del medio a la que están sujetos. En esta etapa se puede apreciar con mayor facilidad la eficiencia del sistema al notar que los potenciales de media celda se encuentran en un rango de (-0.2 a -0.36 V vs CSC), un valor casi dos veces más positivo que el del potencial de media celda una vez terminado el colado de las probetas (etapa A) al inicio del proyecto. Y casi tres veces más positivo que el valor del potencial de media celda de las varillas control (Control - NP), las cuales no tuvieron protección alguna. Lo que hace pensar que aún siendo pruebas aceleradas y con magnitudes de corrientes altas, el sistema presentó resultados satisfactorios.

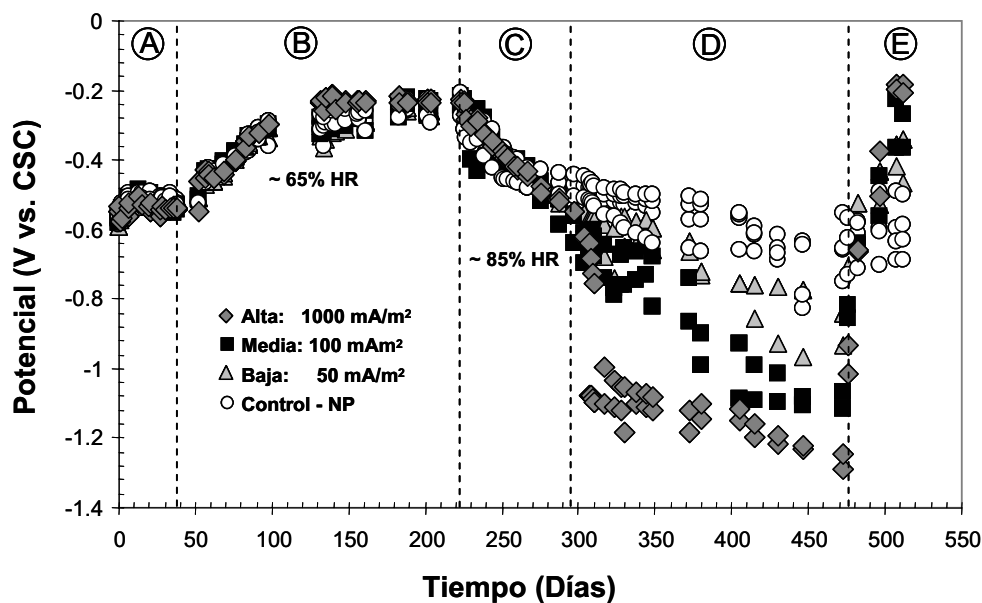


Figura 4.2

Valores de potencial de media celda de las probetas protegidas y no protegidas

4.3 Potencial de media celda para diferentes concentraciones de fibras añadidas.

En la fig 4.3 se presentan los valores de los potenciales de media celda de prismas en donde se tiene como variable la cantidad de fibra añadida a la resina seleccionada; estos porcentajes son 2, 3 y 4 % en peso de fibra. Los prismas estuvieron sujetos al momento de su conexión, a una corriente media (100 mA/m²).

Los valores de potencial de media celda permanecen similares durante las etapas A, B y C. Antes de la aplicación las tres configuraciones, parten de potenciales con un valor de -0.5 V vs CSC.

En la etapa E, que es la etapa en donde las corrientes mencionadas fueron aplicadas, los prismas con el 2% de fibras, durante el transcurso de aplicación de la corriente su valor se va tornando más negativo hasta llegar a un potencial de -1.36 V vs CSC. Los prismas con el 3% alcanzan valores de -1.09 V vs CSC. Mientras que aquellos con el 4% adquieren valores de -0.96 V vs CSC.

Después de ser desconectados los prismas, las 3 configuraciones regresan a valores similares en el rango de (-0.22 a -0.32 V vs CSC). Lo que hace pensar que existe cierta relación entre la conductividad del epóxico y el potencial eléctrico aplicado corriente media, al utilizar diferentes concentraciones de fibra en las resinas. Los prismas con resinas que con 2% de fibras de grafito, presentan un potencial eléctrico más negativo (-1.36 V) en comparación con las resinas con 3 y 4 % de fibras. Esto debido a que su conductividad es menor (mayor resistividad); lo cual se explica mediante la ley de Ohm, ya que teniendo una densidad de corriente constante (100 mA/m²) y una mayor resistividad en comparación con las otras configuraciones estudiadas, su potencial eléctrico se ve obligado a aumentar considerablemente (volverse más negativo).

Por otro lado, los prismas con una resina que contiene 3% de fibras presentan un comportamiento predecible, debido a su concentración media de fibras de grafito; por tanto su potencial eléctrico se ubicó en valores de -1.12 V. Para finalizar, los prismas con 4% de fibras presentaron un potencial menos negativo (-0.93 V), también ocasionado por la mayor concentración de fibras conductoras dentro de las resinas estudiadas. De mismo modo, para entender este fenómeno utilizaremos la ley de Ohm, en donde al tener una resistividad baja y una densidad de corriente constante, nos arroja como resultado un potencial eléctrico más positivo.

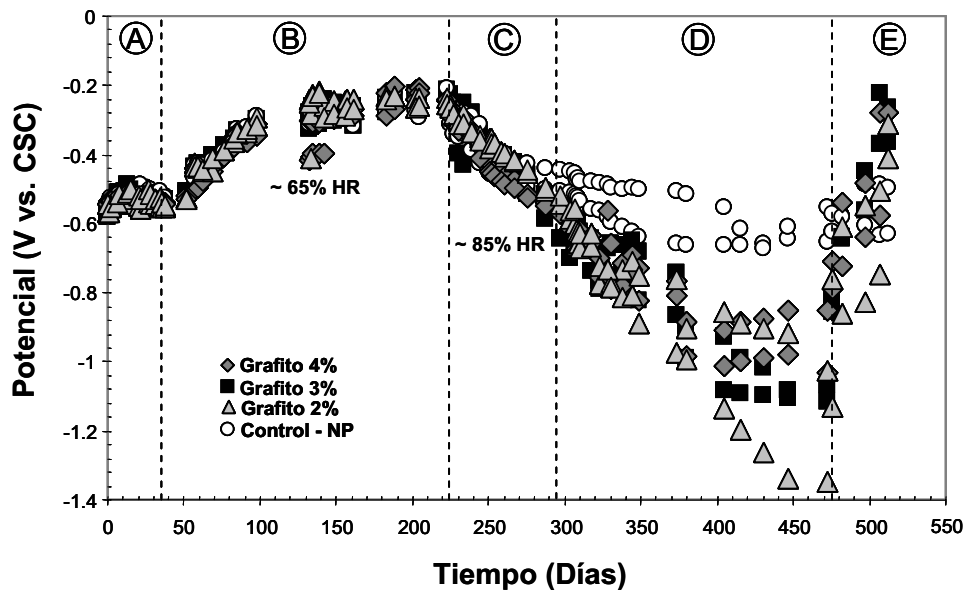


Figura 4.3
Valores de potencial de media celda de los prismas con diferentes concentraciones de fibras añadidas

4.4 Potencial de media celda para las 3 resinas seleccionadas.

La fig 4.4 corresponde a los valores de los potenciales de media celda de los prismas, en donde se tiene como variable las 3 resinas epóxicas seleccionadas (resina B, D y E).

Dichas resinas tienen la misma cantidad de fibras (3%) e igual cantidad de densidad de corriente aplicada (100 mA/m^2), por lo que de manera sencilla se puede observar que los prismas con la resina D presenta un valor de potencial eléctrico alto, es decir más negativo (-1.25 V), debido a que su resistividad es más alta ($36 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) en comparación con los valores de resistividad de las otras dos resinas (B y E). Por otro lado, las resinas B y E mostraron valores de potencial eléctrico medio (-1.06 V) al presentar una resistividad eléctrica media-baja ($17 \text{ k}\Omega\text{-cm}$).

Los valores de potencial de media celda de estos prismas permanecen similares durante las etapas A, B y C, igual que en el caso anterior. Antes de la aplicación, las tres configuraciones parten de potenciales con un valor de -0.5 V vs CSC. En la etapa E, que es en la que la corriente mencionada es aplicada, los prismas con la resina E presentan un valor de potencial de -1.03 V vs CSC, y una mediana dispersión en sus valores.

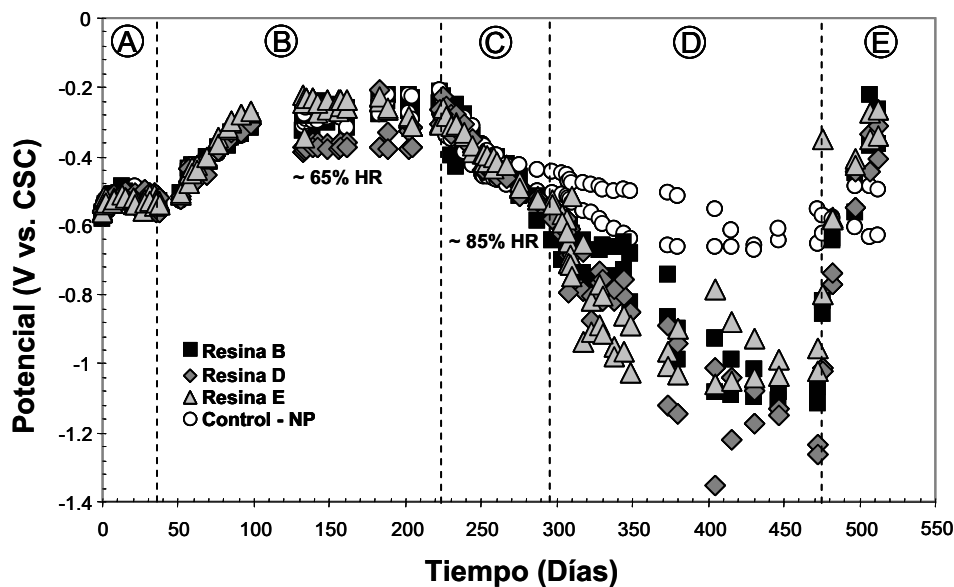


Figura 4.4
Valores de potencial de media celda de los prismas con las 3 resinas epóxicas conductoras seleccionadas

Los prismas con resina D alcanzaron valores de -1.25 V vs CSC y una alta dispersión en sus valores; mientras que los prismas con la resina B presentan valores de -1.09 V vs CSC y una baja dispersión, lo que indica un buen comportamiento de esta resina. Después de ser desconectados los prismas, las 3 configuraciones regresan a valores similares en el rango de (-0.22 a -0.36 V vs CSC).

Los valores individuales de potencial de media celda para cada prisma estudiado en la investigación se presentan en el Anexo 2.

Para conocer si un sistema de PC está funcionando se utilizan ciertos criterios de protección que a la fecha son los mismos utilizados para estructuras enterradas, o tuberías de conducción (NACE RP0290).

4.5 Resultados de las mediciones de despolarización

Los criterios de PC utilizados en esta investigación son: 1) criterio de los $0,85$ V vs potencial de conexión (On); y 2) criterio de los $0,1$ V vs potencial "Instant Off" de desconexión. Para el caso del criterio de los $0,85$ V medido entre la estructura y un electrodo de referencia de CSC, la determinación de ese voltaje se hace con la corriente de protección aplicada (NACE RP0290). Para el criterio de lo $0,1$ V debe determinarse interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización. Cuando la corriente es inicialmente interrumpida, ocurrirá un inmediato desplazamiento del voltaje.

Esta lectura de voltaje, después del inmediato desplazamiento será usada como lectura base de la cual se medirá el decaimiento de la polarización.

En la tabla 4.2 se incluyen los valores de las pruebas de despolarización realizadas en las barras de refuerzo protegidas. Analizando las mediciones de la tabla, se observa el cumplimiento o no de los criterios de protección mencionados ($0,85$ V y $0,1$ V).

Con base en los criterios anteriores, se aprecia que los prismas a los cuales se les aplicó densidades de corriente baja y media (50 y 100 mA/m²) sólo alcanzaron a cumplir el criterio de $0,1$ V. Por otra parte, los prismas a los que se le aplicó densidades de corriente altas ($1,000$ mA/m²) cumplen con los dos criterios de PC ($0,1$ V y $0,85$ V). Cabe aclarar que los prismas sujetos a densidades de corriente altas, los valores de potencial observados en la fig 4.2 resultaron más negativos que $1,0$ V. Estos valores han sido referidos como potenciales que conllevarán a dañar estructuralmente al acero de refuerzo al generar hidrógeno en la interfase acero/concreto, con lo que sería perjudicial a la resistencia del elemento estructural, por lo que debería evitarse llegar a estos valores de potencial (Enos y Williams, 1997).

La idea de haber utilizado estas corrientes fue única y exclusivamente para acelerar la posible degradación al CFRP por la corriente anódica aplicada y no para proteger la barra de refuerzo como cupla, por lo que se recomienda utilizar corrientes anódicas menores como las utilizadas de entre 50 y 100 mA/m², las cuales presentaron valores menores a -1,0 V (vs CSC).

Tabla 4.2
Resultados de las mediciones de despolarización de los prismas

	1000 mA/m ²	1000 mA/m ²	100 mA/m ²	100 mA/m ²	50 mA/m ²	50 mA/m ²
E _{CA} (mV)	-0.548	-0.549	-0.642	-0.562	-0.545	-0.535
E _{ON} (mV)	-2.7691	-3.284	-1.085	-0.928	-0.755	-0.754
E _{IOFF} (mV)	-1.4781	-1.651	-0.935	-0.825	-0.699	-0.681
ΔE ₄ (mV)	-0.8331	-0.866	-0.405	-0.385	-0.333	-0.356
ΔE ₂₄ (mV)	-0.9281	-1.149	-0.504	-0.52	-0.389	-0.407

E_{CA} = potencial de circuito abierto

E_{ON} = potencial cuando el sistema está conectado

E_{IOFF} = potencial de Instant Off

ΔE₄ = diferencia de potencial después de 4 h

ΔE₂₄ = diferencia de potencial después de 24 h

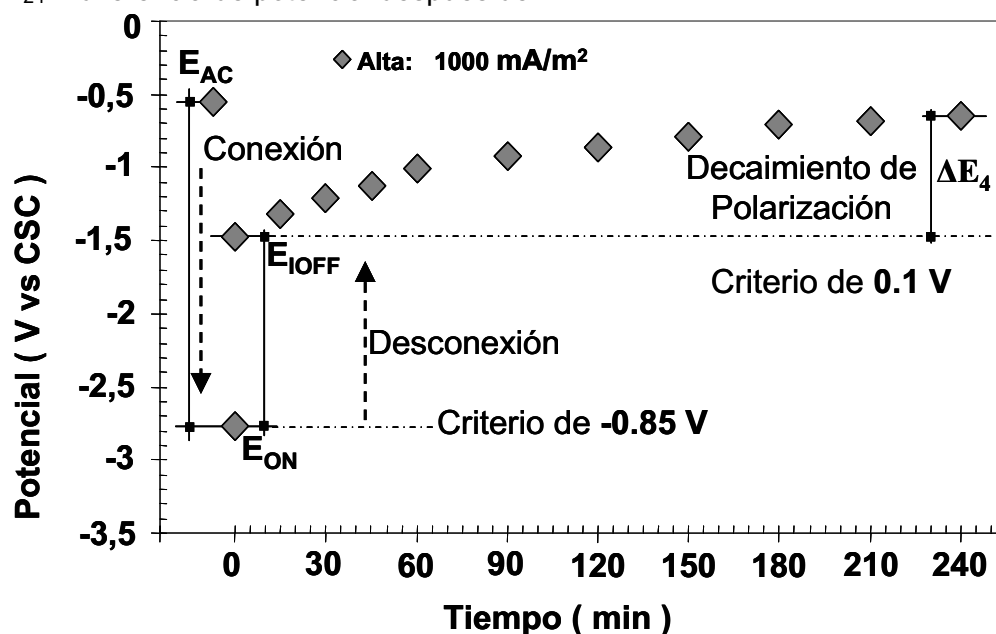


Figura 4.5
Prueba de despolarización en prismas con corriente alta, 1,000 mA/m²

Todavía queda determinar si las corrientes aplicadas al sistema de PC pudieran afectar la resistencia del CFRP, así como la adherencia de éste al concreto. Para la primera condición se deberán realizar pruebas de tensión al CFRP, las cuales se

obtendrán al término de este proyecto en un futuro próximo. Para el segundo caso, se realizaron mediciones de resistividad entre la barra de refuerzo y el CFRP. Se prevé que cuando la resina conductora pudiera mostrar separación con el concreto, la resistividad eléctrica entre la barra de refuerzo y el CFRP aumentaría.

4.6 Resistividad del sistema (CFRP + polímero Conductor vs Barra Protegida)

En la fig 4.6 se presentan los valores de las mediciones de resistividad entre el CFRP y la barra de refuerzo protegida.

Se observa que la resistividad es estable en el rango de 1,100 k Ω -cm durante la etapa de estabilización en ambiente laboratorio (etapa B), una vez que las probetas se colocaron dentro de las cámaras de humedad relativa (C), la resistividad disminuye a consecuencia de la hidratación del concreto hasta valores de (100 k Ω -cm).

Para cuando el sistema de PC fue puesto en funcionamiento (etapa D), la resistividad continuó disminuyendo hasta valores del orden de 20 k Ω -cm en los prismas con corrientes baja y media, mientras que aquellos con corriente alta el valor disminuyó hasta 35 k Ω -cm indicando que no hubo, al final de 400 días de experimentación, separación alguna del compuesto base carbón y la superficie de concreto, lo cual hace pensar que no ha habido una degradación del sistema de PC después de este tiempo de conexión.

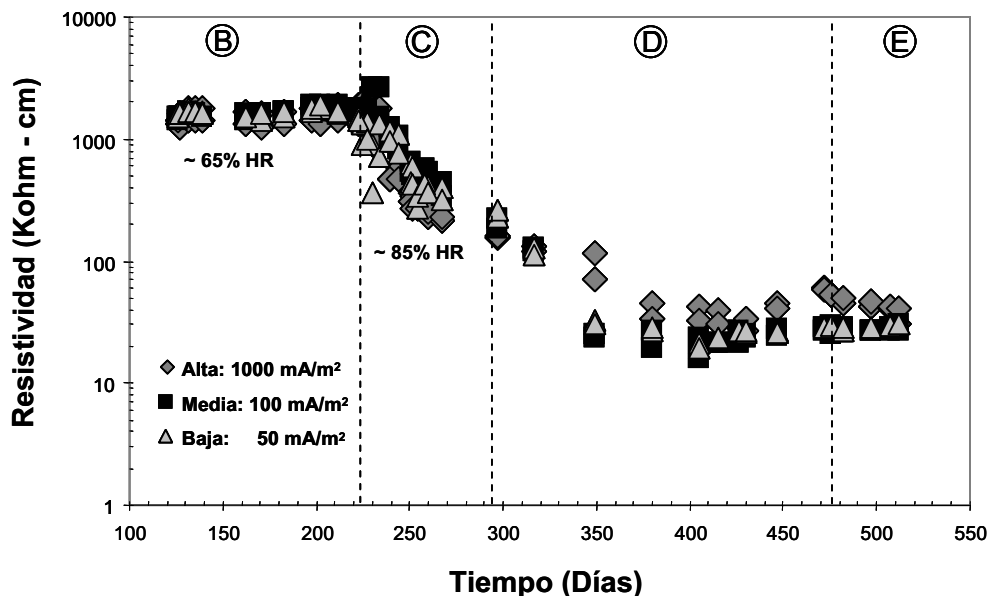


Figura 4.6 Resistividad entre el sistema (CFRP + polímero conductor) vs barra protegida

Los valores individuales de resistividad eléctrica para cada prisma estudiado en esta investigación se presentan en el Anexo 3.

Sin embargo, al término de la aplicación de las corrientes de protección, es decir a 480 días de experimentación se pudo observar visualmente que los valores de resistividad presentaron un aumento hasta valores de 30 k Ω -cm (corrientes baja y media) y un valor de 40 k Ω -cm, indicando una separación entre la platina de CFRP y el polímero conductor.

4.7 Resistencia eléctrica del CFRP (platinas)

En la fig 4.7 se presentan los valores de resistencia eléctrica del compuesto estudiado (CFRP). Antes de ser colocados sobre los prismas de concreto, los valores de resistencia eléctrica de estos compuestos oscilaban en valores de 0.2 a 0.36 Ω , una vez que fueron ubicados sobre un costado de los prismas estudiados, los valores de resistividad permanecen similares.

Un incremento en los valores de resistencia es notorio cuando los prismas se colocan colocados en las cámaras de humedad controlada, ya que los valores de resistencia aumentan hasta un rango de 0.41 a 0.70 Ω pero el incremento resultó más notorio cuando las corrientes de protección fueron aplicadas, llegando a valores desde 0.6 hasta 1 Ω de resistencia eléctrica.

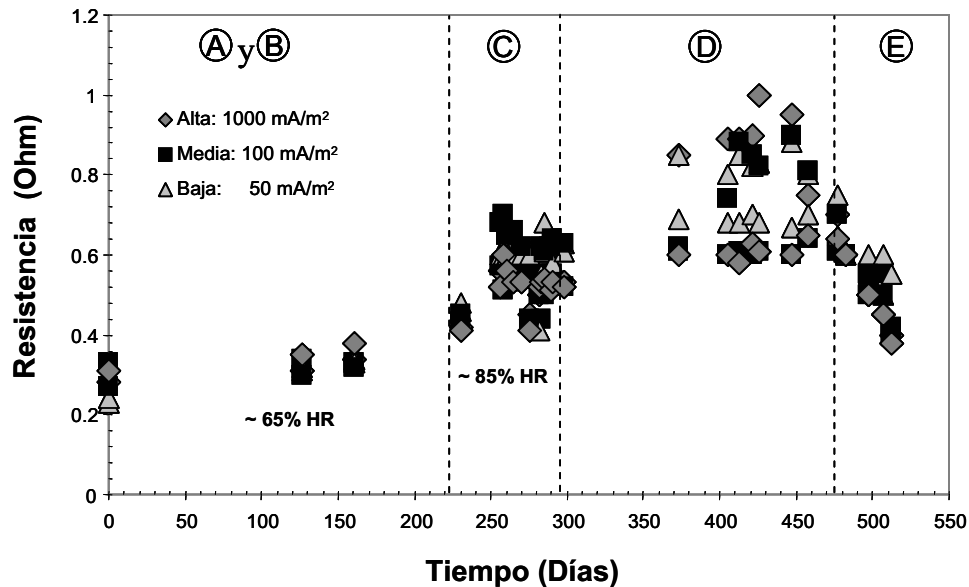


Figura 4.7
Resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP

Una vez que fueron desconectadas de las corrientes de protección, se realizó una limpieza manual en las conexiones eléctricas entre los extremos de las platinas de

CFRP, dando como resultado una disminución en los valores de resistencia, llegando estos al rango de 0.38 a 0.6 Ω

Lo que hace pensar que el incremento en la resistencia eléctrica fue provocado hasta cierto punto por los productos de corrosión y de sedimentación sobre las conexiones eléctricas del compuesto, debido a la humedad que se tiene dentro de las cámaras (~85% HR). Los valores individuales de resistencia eléctrica para cada prisma estudiado en esta investigación se presentan en el Anexo 4.

4.8 Resistividad del electrolito (concreto)

La fig 4.8 contiene los valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito (concreto) de los prismas sometidos a las corrientes de protección en sus diferentes magnitudes. Una vez finalizada la etapa de curado dieron principio estas mediciones, teniendo aproximadamente en el día 50 un valor inicial de entre 3 y 4.4 k Ω -cm. Debido a que los prismas estudiados se colocaron en un ambiente de laboratorio (~65 a 70 de HR, 21 \pm 2°C), la mediciones de resistividad presentan un aumento en sus valores como consecuencia de la pérdida de humedad en este ambiente (día 51 al 120), con valores de 23 a 25 k Ω -cm.

Una vez que el exceso de humedad fue perdido, sus valores permanecieron constantes prácticamente del día 121 al 190 en un rango de 14,000 a 18,000 k Ω -cm. A partir de esa fecha (día 191 al 222) presentaron un abrupto aumento en los valores de resistividad; ocasionado por la radiación directa del sol sobre un costado del laboratorio después de las 14:00 h, lugar en donde se encontraban las probetas para su estabilización, llegando a valores de 72 a 78 k Ω -cm. Los valores individuales de resistividad eléctrica del electrolito para cada prisma estudiado en esta investigación, se presentan en el Anexo 5.

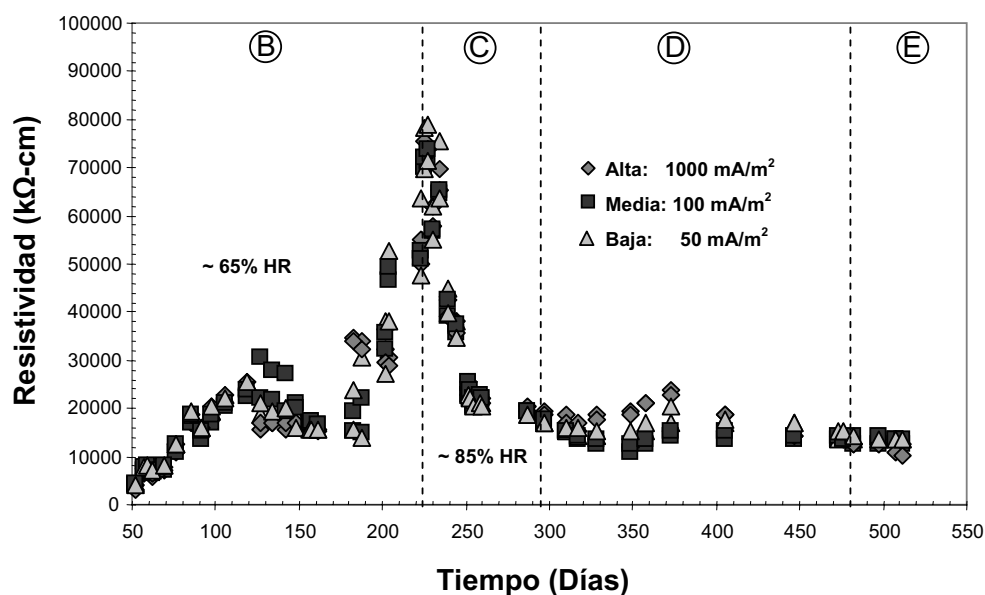


Figura 4.8.
Valores de resistividad del electrolito (concreto)

En el día 223, los prismas se colocaron en las cámaras de humedad relativa (~85 a 90% de HR); por tanto, los valores de resistividad presentaron una disminución considerable debido a la rehidratación del concreto. Dicho fenómeno se puede observar del día 223 al 250, en donde los valores descienden de 78 a 22 $k\Omega\text{-cm}$. Desde esta fecha hasta el inicio de la etapa de conexión a las corrientes de protección, los valores permanecen constantes en el rango de 21 a 22 $k\Omega\text{-cm}$.

Una vez que los prismas fueron conectados a las corrientes (día 295) los valores comienzan a mostrar una pequeña dispersión como consecuencia de la posible corrosión de las conexiones, o debido al depósito de minerales ocasionado por la humedad circundante en las cámaras.

Después de una limpieza en las conexiones (explicado anteriormente), los valores vuelven a ser prácticamente los mismos (12 a 14 $k\Omega\text{-cm}$) en cada prisma, aún después de desconectarse de las diferentes corrientes (día 481). Desconectados y permaneciendo dentro de las cámaras, los prismas siguieron manteniendo ese rango de valores de resistividad (12 a 14 $k\Omega\text{-cm}$), del día 482 al 512, fecha en la que se dio por finalizado el monitoreo de los prismas. Esto hace pensar que las corrientes suministradas no tuvieron incidencia alguna en los valores de resistividad obtenidos, sino en la degradación de las conexiones.

4.9 Envejecimiento electroquímico y vida de servicio estimada

El envejecimiento electroquímico del CFRP se llevó a cabo mediante la aplicación de diferentes magnitudes de densidad de corrientes: 1) 50 mA/m² hasta llegar a una carga eléctrica total de 214.8 A-h/m². Este envejecimiento acelerado es 24 veces más rápido que el utilizado por el Oregon DOT para instalaciones de protección catódica por corriente impresa en puentes de la costa (0.0021 A/m²); es decir, un equivalente de 11.6 años de operación en servicio del sistema de PC del Oregon DOT; 2) 100 mA/m² hasta llegar a una carga eléctrica total aplicada de 429.6 A-h/m², es decir 48 veces más rápido que lo empleado por el Oregon DOT y su equivalente en años de servicio es de 23.3 años; 3) 1000 mA/m² hasta llegar a una carga eléctrica total aplicada de 600 A-h/m², lo que corresponde a 480 veces más rápido que lo utilizado por el Oregon DOT y su equivalente en años de servicio es de 32.6 años (Covino, 1998).

Después de finalizar la aplicación de las respectivas corrientes de la tabla 4.3 se procedió a desconectar los prismas, y revisar visualmente el estado físico del sistema, principalmente la adherencia de la resina conductora y el compuesto de carbón. Se pudo observar que la resina epóxica conductora colocada en los prismas de alta densidad de corriente presentaron una separación entre la resina epóxica y el CFRP.

Lo anterior indica que para tiempos mayores de aplicación de corriente, se podría tener una degradación del sistema disminuyendo potencialmente su resistencia mecánica.

Tabla 4.3
Resultados del envejecimiento electroquímico acelerado del sistema propuesto.

Densidad de corriente	Tiempo de aplicación	Corriente total	Años de servicio
50 mA/m ²	179 días	214.8 A-h/m ²	11.6 años
100 mA/m ²	179 días	429.6 A-h/m ²	23.3 años
1000 mA/m ²	25 días	600 A-h/m ²	32.6 años

4.10 Fuerza de adherencia del sistema propuesto. (ensayo de tensión)

A continuación, en la tabla 4.4 se presentan los resultados de los ensayos de adherencia en la máquina Instron servo-hidráulica. Las cargas máximas antes de la falla fueron para determinar el esfuerzo de adherencia, como se indicó en la sección

Los valores obtenidos de esfuerzo de adherencia en todos los prismas estudiados, presentan una tendencia que se explica en los incisos siguientes.

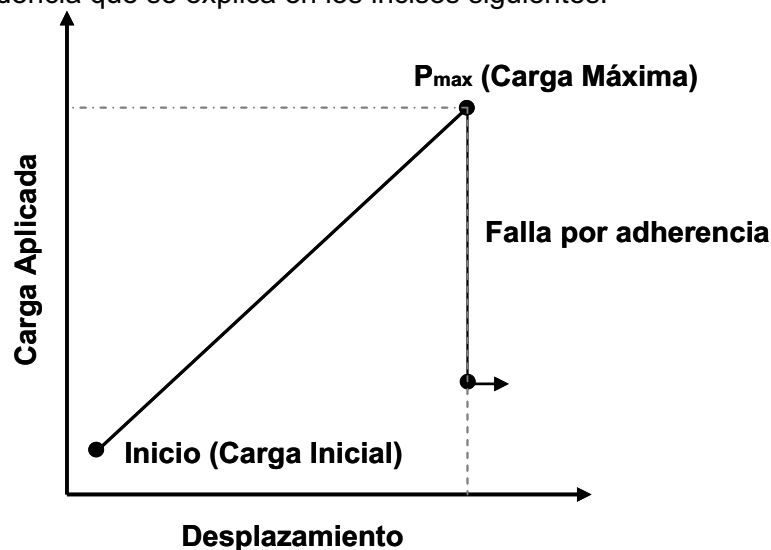


Figura 4.9
Comportamiento característico de los prismas estudiados en pruebas de tensión

Se realizaron pruebas en tensión de los prismas de concreto reforzado con fibras de carbono en la máquina servo hidráulica Instron; el comportamiento de éstos se incluyeron en la fig 4.9.

Se observa un comportamiento elástico lineal característico de materiales frágiles. Así mismo, en la gráfica se determina la carga máxima (P_{max}) que soporta el espécimen de prueba antes de la separación por cortante de ambos elementos (concreto, fibra de carbono). El esfuerzo de adherencia (τ_{adh}) por cada prueba se determinó mediante la siguiente formula:

$$\tau_{adh} = \frac{P_{max}}{A_{adh}} \quad (MPa)$$

Donde:

P_{max} = carga máxima, kN.

A_{adh} = superficie de adherencia en los prismas (5 x 20) cm²

4.10.1 Efecto del porcentaje de fibras

El efecto del porcentaje de fibras en la adherencia del sistema híbrido propuesto, se observó mediante mantener constantes los valores de cantidad de corriente aplicada (100mA/m²), y el tipo de resina epóxica conductora (resina tipo B): P22, P21, P20, P19, P16 y P15. Los resultados de las pruebas no arrojan información sobresaliente respecto a su efecto en la adherencia del sistema. Los valores promedios obtenidos de la tabla 4.4 son: para 2% (1.0185 MPa); para 3%(0.773 MPa); y para 4%(1.0035 MPa).

Estos valores no presentan alguna tendencia que ayude a elaborar alguna hipótesis respecto a las variaciones del esfuerzo de adherencia, debido a la cantidad de fibras conductoras añadidas.

4.10.2 Efecto del tipo de resina epóxica conductora

Ahora, manteniendo constante el porcentaje de fibras añadidas (3%) y la cantidad de corriente aplicada (100 mA/m²), se revisaron los valores de la tabla 4.3 para los prismas P22, P21, P18, P17, P12 y P11.

En cuanto a los valores obtenidos para la resina B (0.773 MPa), para la resina D (0.9347 MPa) y para la resina E (0.989 MPa), se puede observar que conforme la resina es más fluida, como es el caso de la resina E, esta propiedad permite unamejor distribución de la resina sobre la zona de contacto, disminuyendo las burbujas de aire al momento de preparar las resinas, debido a que éstas disminuyen el área de contacto.

4.10.3 Efecto de la variación de la corriente aplicada

El efecto de la variación de la corriente aplicada se puede observar de acuerdo con los valores promedios de la tabla 4.4 en los prismas estudiados: 50 mA/m² (0.7455 MPa); 100 mA/m² (0.773 MPa); y 1000 mA/m² (0.908 MPa). En esta ocasión los parámetros que se mantuvieron constante fueron: el porcentaje de fibras (3%) y el tipo de epóxico (resina B). A partir de estos valores es posible visualizar un discreto incremento en el esfuerzo de adherencia, cuando la corriente suministrada es mayor.

Los valores obtenidos en las pruebas de tensión se pueden observar con mayor claridad en la tabla 4.4.

Tabla 4.4
Valores obtenidos en las pruebas de adherencia en los prismas

Prismas	Resina	Fibras	P_{max}	C. protección	Adherencia
P24	B	3%	8.62 kN	50 mA/m ²	0.862 MPa
P23	B	3%	6.29 kN	50 mA/m ²	0.629 MPa
P22	B	3%	6.87 kN	100 mA/m ²	0.687 MPa
P21	B	3%	8.58 kN	100 mA/m ²	0.858 MPa
P20C	D	4%	8.56 kN	100 mA/m ²	0.856 MPa
P20	B	4%	10.98 kN	100 mA/m ²	1.098 MPa
P19	B	4%	9.09 kN	100 mA/m ²	0.909 MPa
P18	D	3%	9.31 kN	100 mA/m ²	0.931 MPa
P17	D	3%	9.92 kN	100 mA/m ²	0.992 MPa
P16C	D	3%	11.92 kN	100 mA/m ²	1.192 MPa
P16	B	2%	9.80 kN	100 mA/m ²	0.980 MPa
P15C	D	2%	7.56 kN	100 mA/m ²	0.756 MPa
P15	B	3%	10.57 kN	100 mA/m ²	1.057 MPa
P14	B	3%	8.80 kN	1000 mA/m ²	0.880 MPa
P13	B	3%	9.37 kN	1000 mA/m ²	0.937 MPa
P12	E	3%	9.98 kN	100 mA/m ²	0.998 MPa
P11	E	3%	9.80 kN	100 mA/m ²	0.980 MPa

4.11 Inspección visual

Como resultado de la inspección visual y de un análisis fotográfico de los prismas ensayados, se lograron observar dos tipos de fallas importantes: 1) la falla se produce en la interfase *compuesto (CFRP)-resina conductora*, (fig 4.9.a y 4.9.b); 2) la falla se presenta en la interfase *resina conductora-concreto*, (fig 4.10.a y 4.10.b).

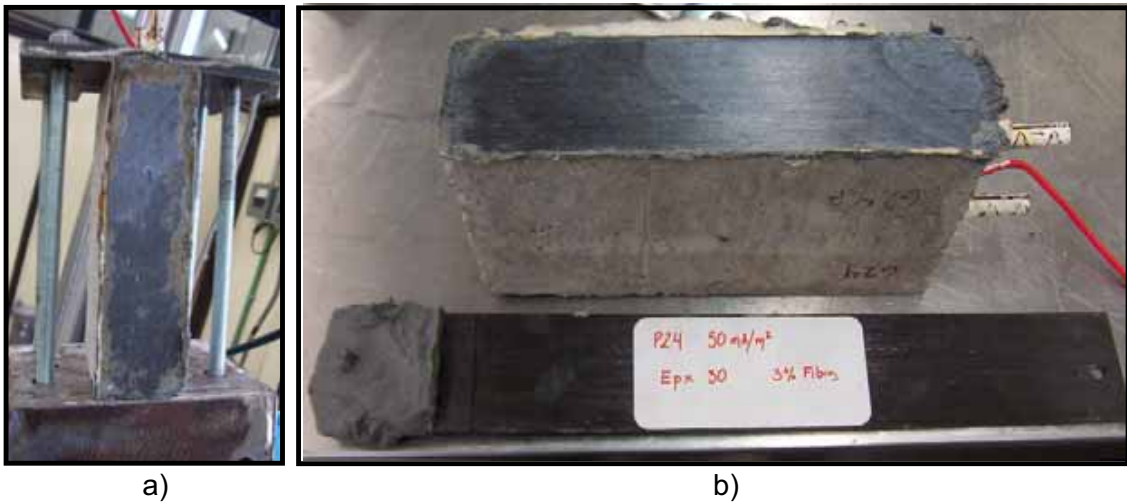


Figura 4.9.a y 4.9.b
Falla de la interfase compuesto-resina

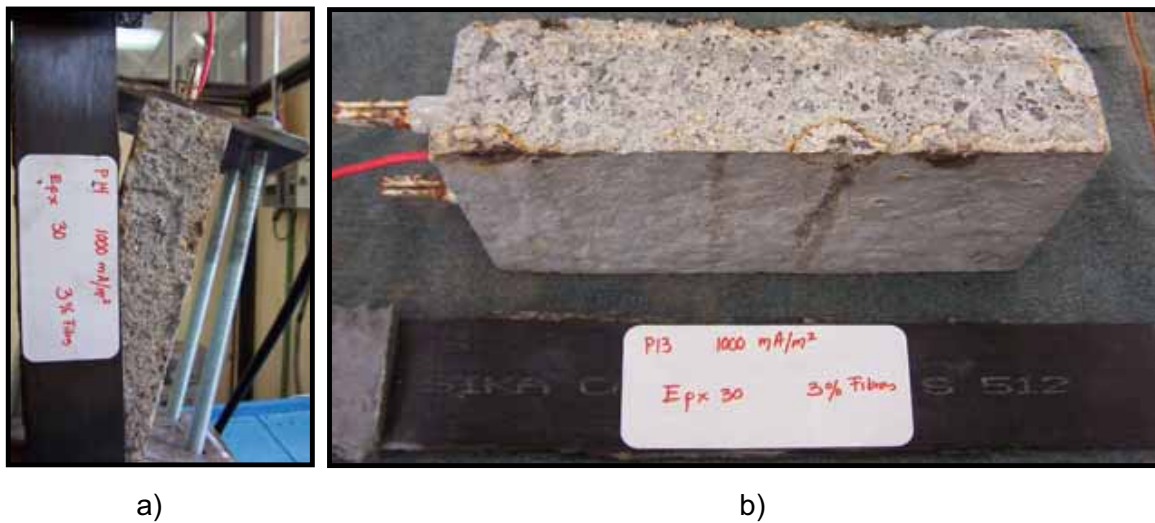


Figura 4.10. a y b.
Falla de la interfase resina-concreto

Después de realizarse el análisis de falla por adherencia de la interfase, se procedió a la inspección visual de las varillas de refuerzo, y tras de la destrucción por medios mecánicos de los prismas, se extrajeron los elementos de refuerzo y se fotografiaron (fig 4.11).

El objetivo principal era verificar el estado físico de las varillas de refuerzo y corroborar visualmente la diferencia entre los elementos protegidos y no protegidos

catódicamente. Esta diferencia consistiría en que los elementos no protegidos presentarían un grado de corrosión mayor a los que fueron protegidos, (fig 4.12.a y b).



Figura 4.11
Inspección visual de los elementos de refuerzo



a)

b)

Figura 4.12.a y b.
Diferencias entre los elementos protegidos y los elementos que no fueron protegidos

Conclusiones

Una vez generada la información que a la fecha se cuenta, y después de haber analizado con detenimiento, se llegó a las siguientes conclusiones:

- La resina B con la configuración de 4% de fibras y una longitud de 6 mm de fibras de grafito presentó un mejor desempeño en las pruebas de resistividad, es decir su conductividad eléctrica fue la mayor de todas las evaluadas. Además de que este tipo de resina epóxica es la recomendada por el fabricante para adherir el CFRP al concreto.
- Las cantidades de las fibras añadidas a los prismas con un corriente media (100 mA/m^2), tiene una notable influencia en los valores de potenciales de media celda de los elementos protegidos. Es decir, entre menor sea la cantidad de fibras, mayor será el voltaje que se tendrá que suministrar al sistema, y así mantener la corriente de protección necesaria para pasivar la barra de refuerzo.
- Los potenciales eléctricos alcanzados por los prismas con corrientes altas ($1,000 \text{ mA/m}^2$) sobrepasaron el límite recomendado por la NACE (más negativo que -1.0 V), lo cual no es recomendable. Debido a que estos potenciales se han referido como perjudiciales en las estructuras de concreto reforzado, por los problemas que podrían ocasionar ante la fragilización por hidrógeno del acero de refuerzo.
- La resistencia eléctrica del CFRP presentó un ligero aumento en sus valores, comparando las mediciones antes y después de la aplicación de las corrientes. Esto debido en gran parte a la corrosión de las conexiones y de los sedimentos depositados en estos elementos ocasionado por la alta humedad relativa en las cámaras, y no a la degradación del sistema (epóxico + compuesto) como se esperaba debido a la aplicación de la corriente anódica.
- Los prismas con corrientes de protección acelerada baja y media (50 y 100 mA/m^2 respectivamente); sólo cumplieron con el criterio de protección de la NACE de los $+0.1 \text{ V}$ de depolarización, mientras que los prismas con corrientes de protección alta (1000 mA/m^2) cumplieron con los ambos criterios de protección de la NACE ($+0.1$ y -0.85 V) establecidos.
- Los valores de resistividad del electrolito al final del monitoreo de los prismas (días después de la desconexión), indican que se tiene una alta probabilidad de problemas de corrosión en los elementos no protegidos, y esto se corrobora con los potenciales de las varillas no protegidas, y las grietas ocasionadas por la expansión de los productos de corrosión en estos elementos, lo cual indica una alta actividad por corrosión.

- Después del término del monitoreo electroquímico y de acuerdo con los valores de resistividad del sistema (CFRP+ polímero conductor + concreto), se pudo inferir que no ocurrió alguna degradación considerable del sistema (epóxico + compuesto), aun aplicando las corrientes de protección en forma acelerada. Se estima que con los valores de corriente utilizados, la vida útil del sistema sería de 11.6, 23.3 y 32.6 años de servicio para las diferentes corrientes aplicadas (50, 100 y 1,000 mA/m² respectivamente).
- El sistema híbrido propuesto demostró funcionar como un sistema de protección catódica sobre las varillas sujetas a dicho sistema, tal como se había previsto. Esto se corroboró, ya que los potenciales de media celda de las varillas después de la desconexión de las corrientes de protección, se encontraron mucho más positivos (más pasivas) que los valores que presentaban estas de refuerzo durante el período de estabilización, justo antes de conectarlas al ánodo. Las varillas no protegidas mostraron valores de potencial eléctrico característicos del acero de refuerzo que presenta problemas de corrosión debido a la alta humedad relativa circundante.
- El esfuerzo de adherencia no fue afectado considerablemente, variando la cantidad de fibras colocadas en las diferentes resinas epóxicas utilizadas.
- La adherencia del sistema se mejoró al aumentar la densidad de corriente anódica total. Esto se pudo corroborar con la carga máxima y el modo de falla obtenidos. Los prismas a los cuales se les aplicó mayor densidad de corriente, presentaron un incremento del 15% en su esfuerzo de adherencia con respecto a los prismas con corrientes medias, (100 mA/m²). Además, la falla se presentó en el concreto y no en la interfase CFRP/resina, indicando una mejoría en la resistencia de ésta interfase.

Referencias

1. Del Valle, A. et al., Instituto Mexicano del Transporte, "El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado". Publicación Técnica No 182, Sanfandila, Qro, Méx (2001).
2. Torres-Acosta, A et al, "Aplicación de un sistema de información geoestadística para la evaluación ambiente-corrosión en la degradación de la infraestructura de puentes en México," Revista Ingeniería de Construcción, V 20, No 3, pp. 215-222, (2005).
3. Genescá, J, Ávila, M.J, "Más allá de la herrumbre. La lucha contra la corrosión". Ed. Fondo de la Cultura Económica, SA de C V, México (1986).
4. Mindess, S., and Young, J. F, "Concrete", Englewwod Cliffs, New Jersey, USA, (1981).
5. Li, L, Sagües, A A, and Poor, N "In-Situ Leaching Investigation of pH and Nitrate Concentration in Concrete Pore Solution", Cement and Concrete Research, Vol 29, No. 3, (Mar, 1999).
6. Torres Acosta, A. A, "Periodo de iniciación de la corrosión (T_1) en estructuras de concreto expuestas a un ambiente marino", Revista Internacional Construlink (RIC), V 2, No 5, Construlink (2004).
7. Fontana, M G, "Corrosion Engineering", Third Edition, Mc Graw-Hill, Publish Company, Chapter Three (1967).
8. DURAR, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico en Estructuras de Hormigón Armado". CYTED Programa iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Troconis, O, Ed Maracaibo, Venezuela (1998).
9. CEB, "Durable Concrete Structures, Design Guide, Eurointernational Committee for Concrete", London, UK, Thomas Thelford Services Ltd, (1992).
10. ACI-201, "Proposed Revision of Guide to Durable Concrete," ACI Materials Journal, 88, vol 5, (1991).
11. Carrión-Viramontes, F et al, Instituto Mexicano del Transporte, Estudios de Corrosión en puentes de concreto pre-esforzado. Publicación Técnica No 122, Sanfandila, Qro, Méx (1999).
12. Kunsenberg, F. N and Barton, J.R "Detection Flaws in Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Bridge Member". Report No FHWA/RD-81/087, Federal Highway Administration, Washington DC, (1981).

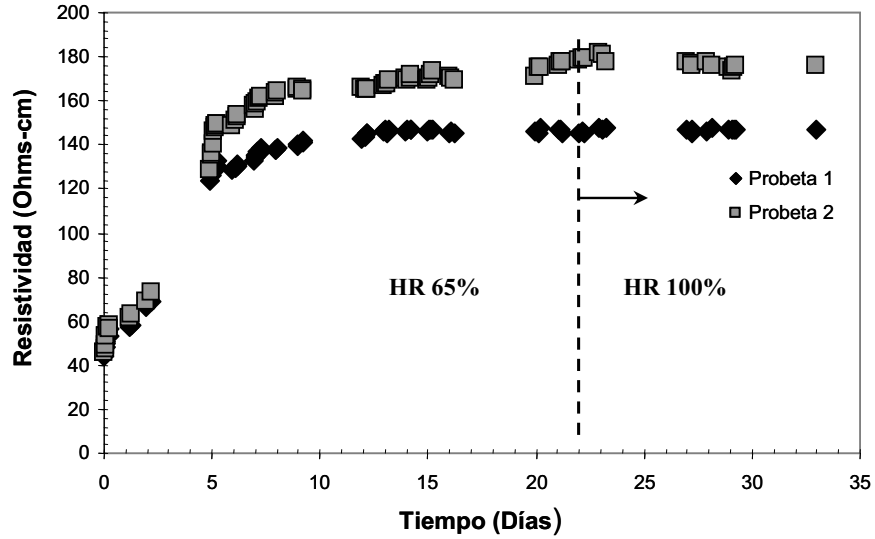
13. Del Valle, A. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, (2004).
14. Poblano Salas, C. Instituto Mexicano del Transporte, Sistemas de protección contra la corrosión, investigaciones recientes, Publicación Técnica No 158, Sanfandila, Qro, Méx (2000).
15. Pérez-Quiroz, Tesis de Maestría. Facultad de Química, Universidad Autónoma de México. (2002).
16. NACE, "Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems", Standard Test Method, NACE Standard TM0497-97, Item No.21231.
17. Catálogo SIKA, www.sika.com.mx, (2007).
18. Nilsson Inc, Instruction manual Nilsson Model 400, 4 pin soil resistance meter, Nilsson Electrical Laboratory. New Jersey, USA, (1984).
19. Webster, R P, Fontana J. "Electrically conductive polymer concrete overlays". Report No. FHWA/RD -84/033, Federal Highway Administration, Washington D.C, (1987).
20. ASTM, "Standard Test Method for half-cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete". C876-91(reapproved 1999), Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, USA, (1991).
21. ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical concrete specimens". C39/C39M-01. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02, USA, (2001).
22. Sagües, A A, Peach-Canul M A, "Corrosion macrocell behavior or reinforcing steel in partially submerged concrete columns". Corrosion Science, Vol 45, Pp 7-32, (2003).
23. NACE, "Cathodic protection of reinforcing steel in atmospherically exposed concrete structures". NACE Standard RP0290-90, Item No 21043, USA, (1990).
24. Enos, D G, Williams, A J, "Impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete pilings: Protection criteria and the threshold for Hydrogen embrittlement". NACE, Corrosion 97, Paper No. 241, Texas, USA, (1997).
25. Covino, B S et al, "Consumable and non-consumable thermal spray anodes for impressed current Cathodic protection in reinforced concrete structures". Corrosion 98, NACE, Paper No. 658, Texas, USA, (1998).

Anexos

Anexo 1

Se presentan las gráficas de los valores de resistividad de las resinas conductoras analizadas.

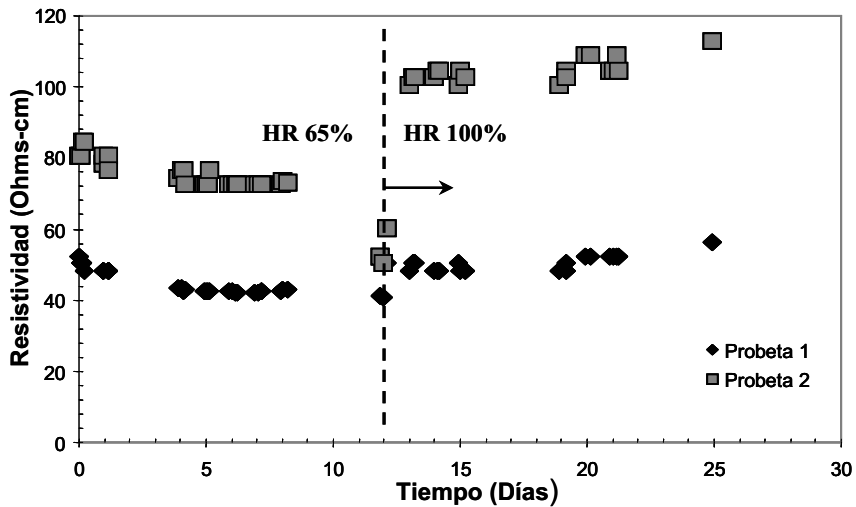
Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina A



A1.1

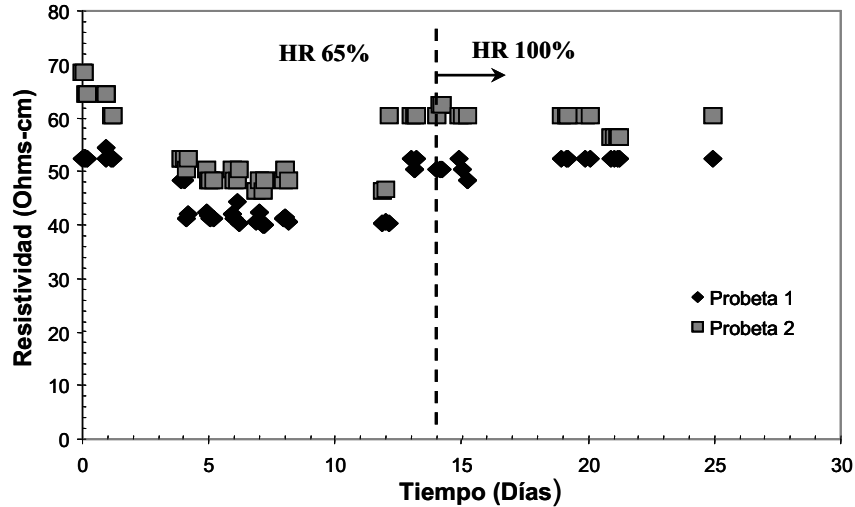
Valores de resistividad de la resina A (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).

Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina B



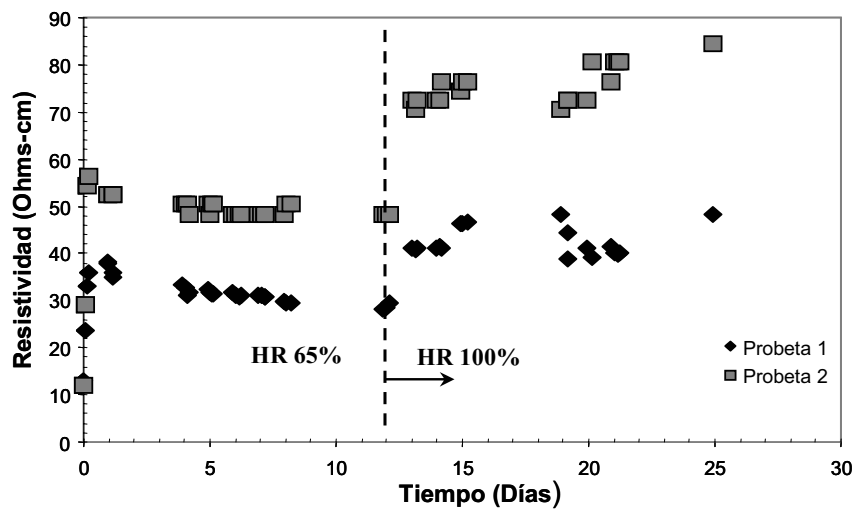
A1.2 Valores de resistividad de la resina B (12mm, 3%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).

Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina B2



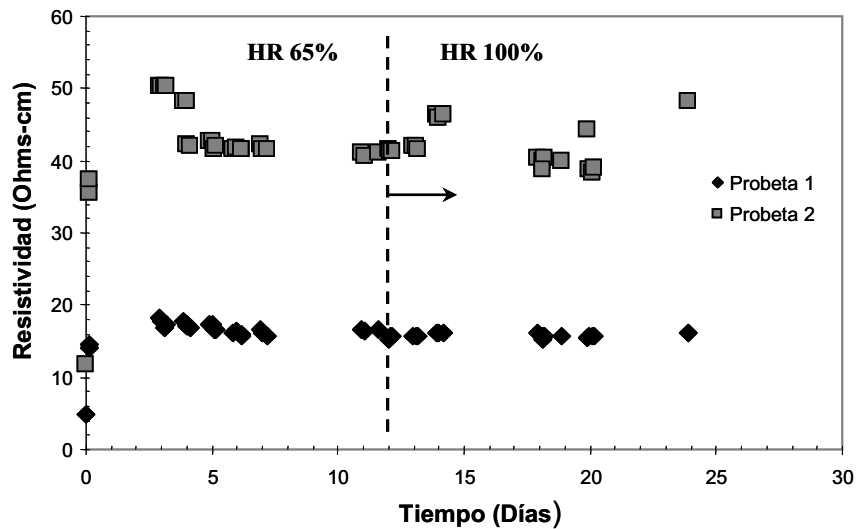
A1.3 Valores de resistividad de la resina B2 (3mm, 3%), en ambientes de humedad relativa (65y 100%).

Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina B3



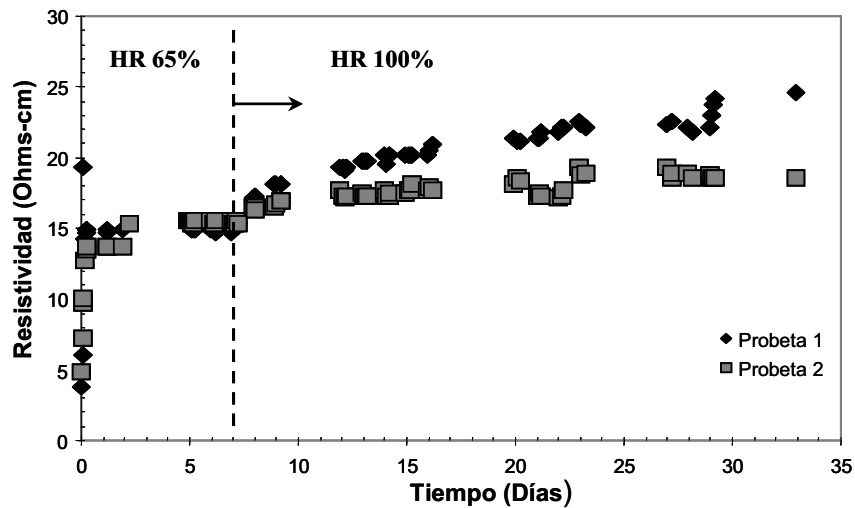
A1.4 Valores de resistividad de la resina B3 (6mm, 3%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).

Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina B4

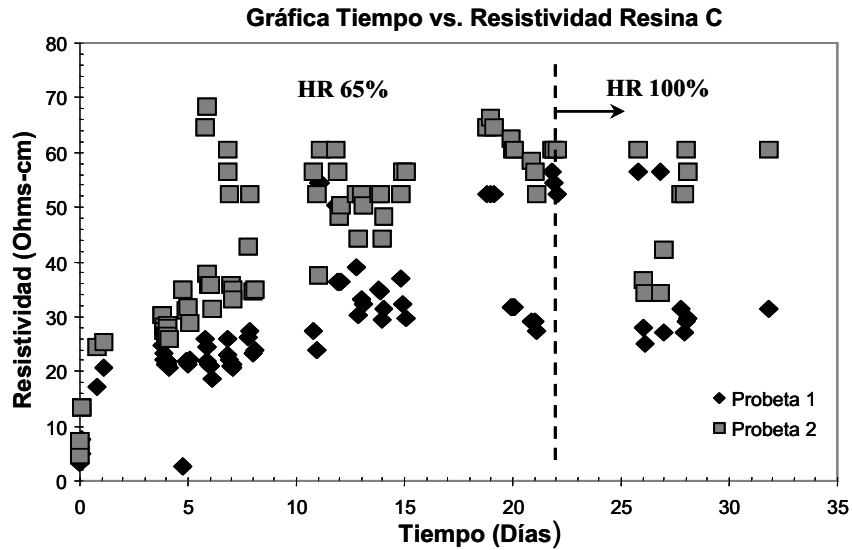


A1.5 Valores de resistividad de la resina B4 (12mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).

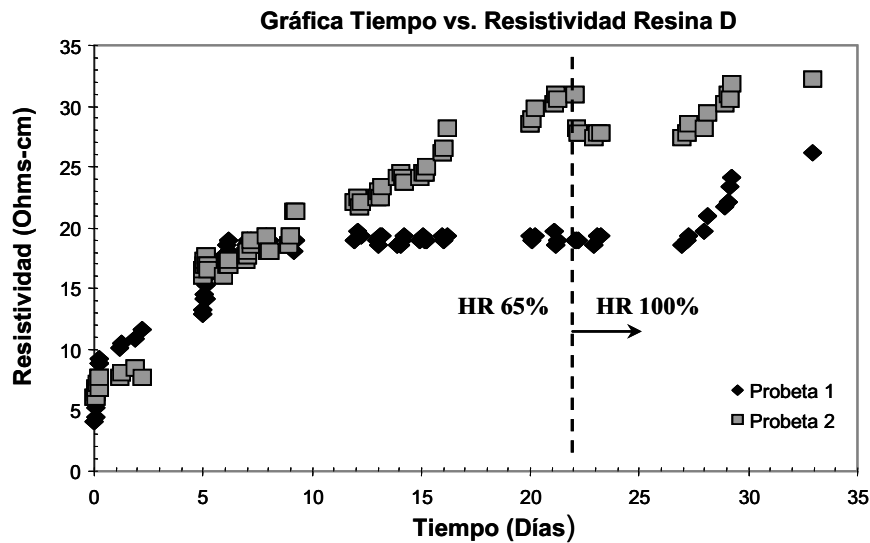
Gráfica Tiempo vs. Resistividad Resina B5



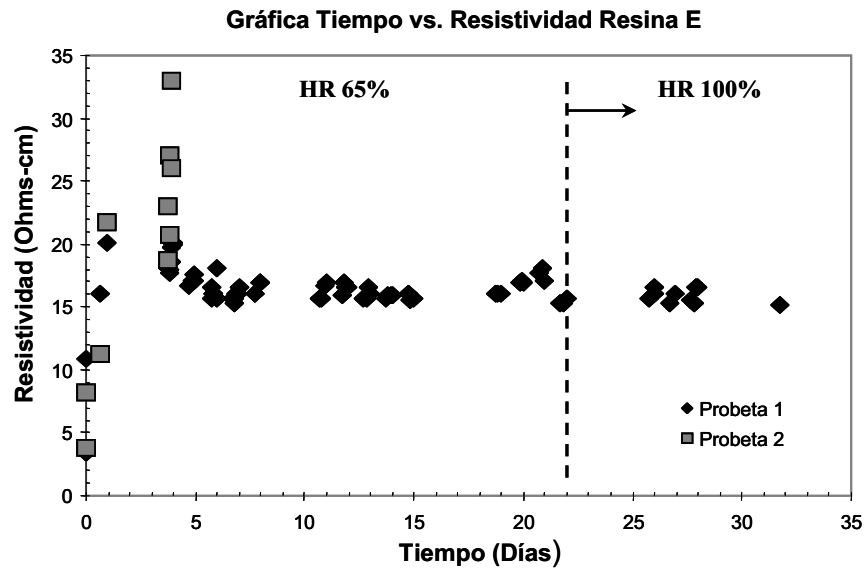
A1.6 Valores de resistividad de la resina B5 (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).



A1.7 Valores de resistividad de la resina C (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).



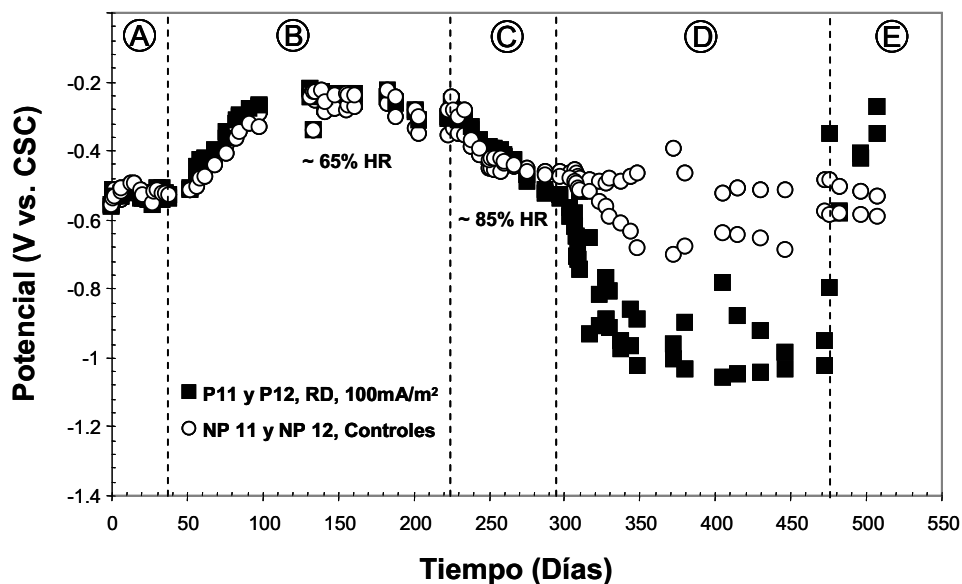
A1.8 Valores de resistividad de la resina D (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65 y 100%).



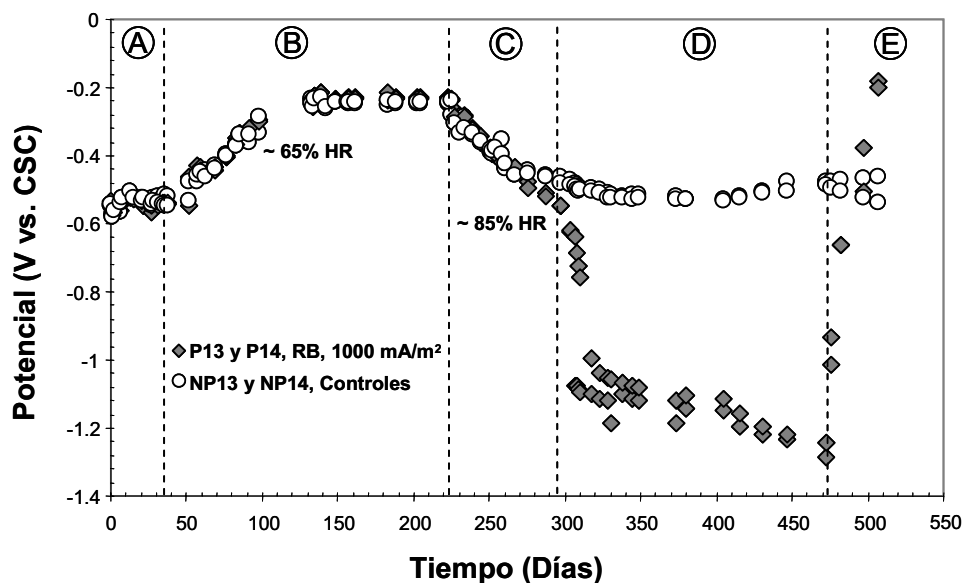
A1.8 Valores de resistividad de la resina E (6mm, 4%), en ambientes de humedad relativa (65y 100%).

Anexo 2

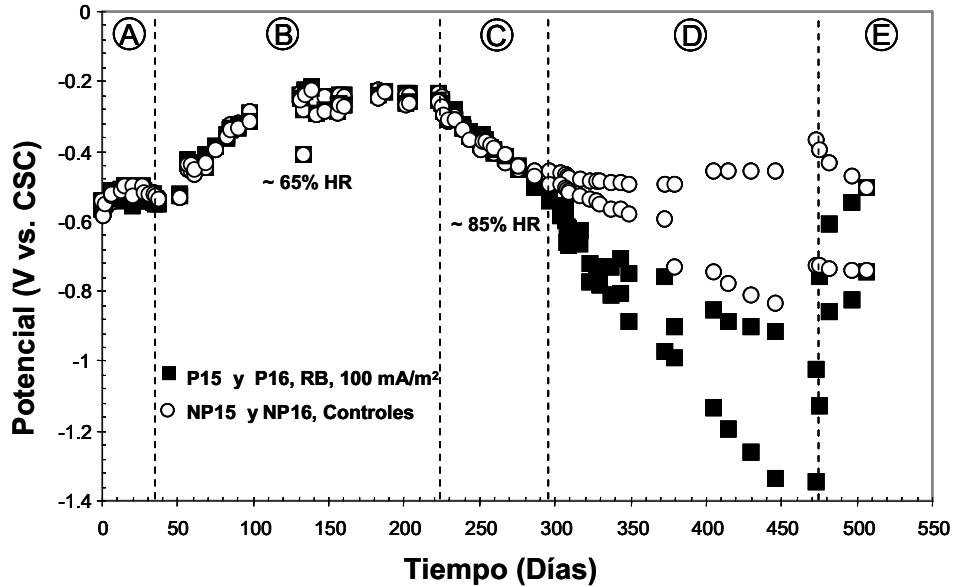
A continuación se presentan los valores de potencial de media celda obtenidos para cada par de prismas en estudio.



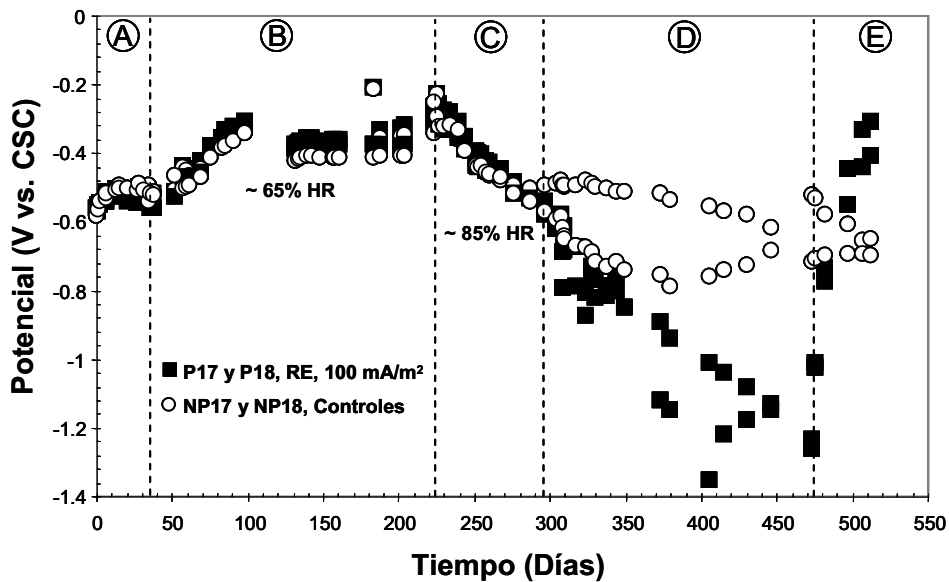
A2.1 Valores de potencial de media celda de los prismas P11 y P12, resina D y una corriente suministrada de 100 mA/m².



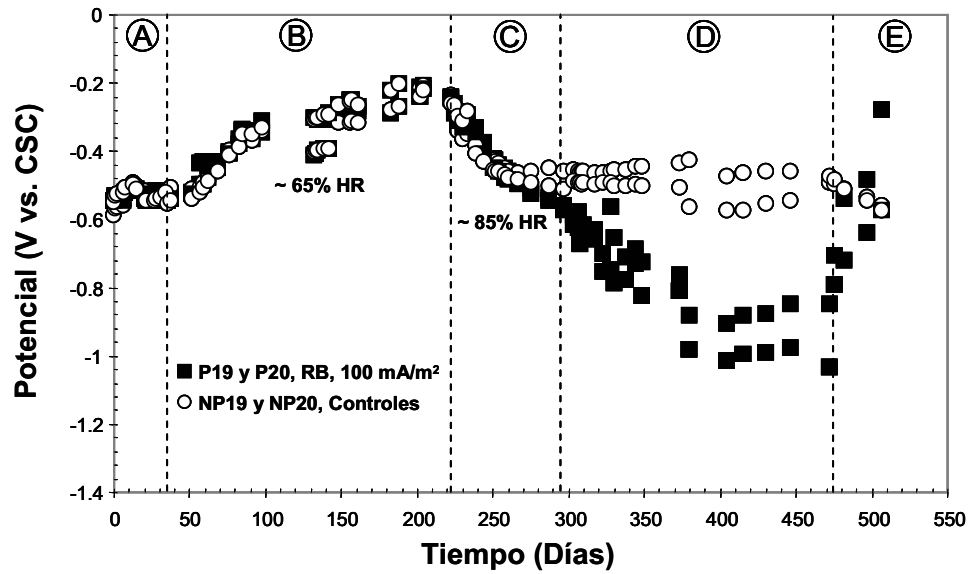
A2.2. Valores de potencial de media celda de los prismas P13 y P14, resina B y una corriente suministrada de 1000 mA/m².



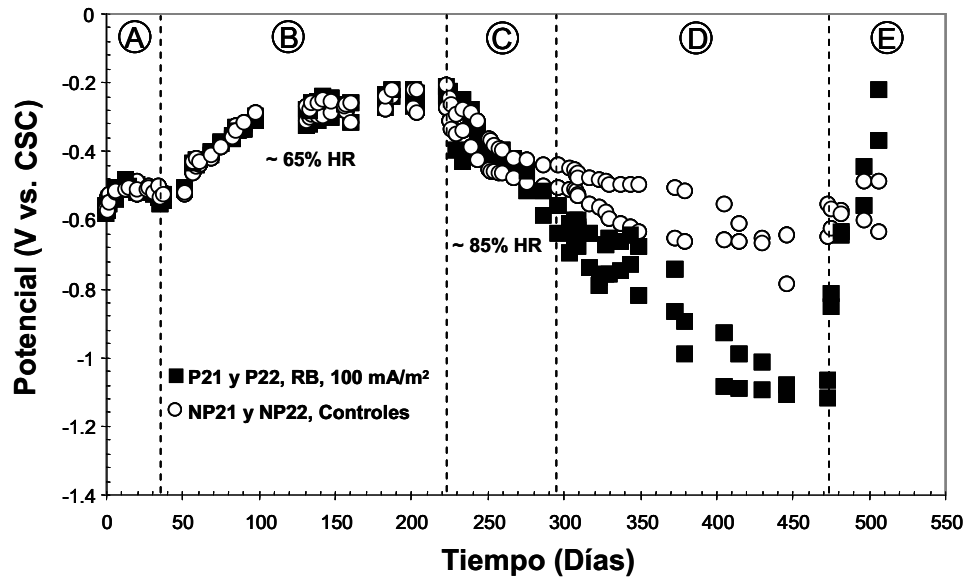
A2.3. Valores de potencial de media celda de los prismas P15 y P16, resina B y una corriente suministrada de 100 mA/m^2 .



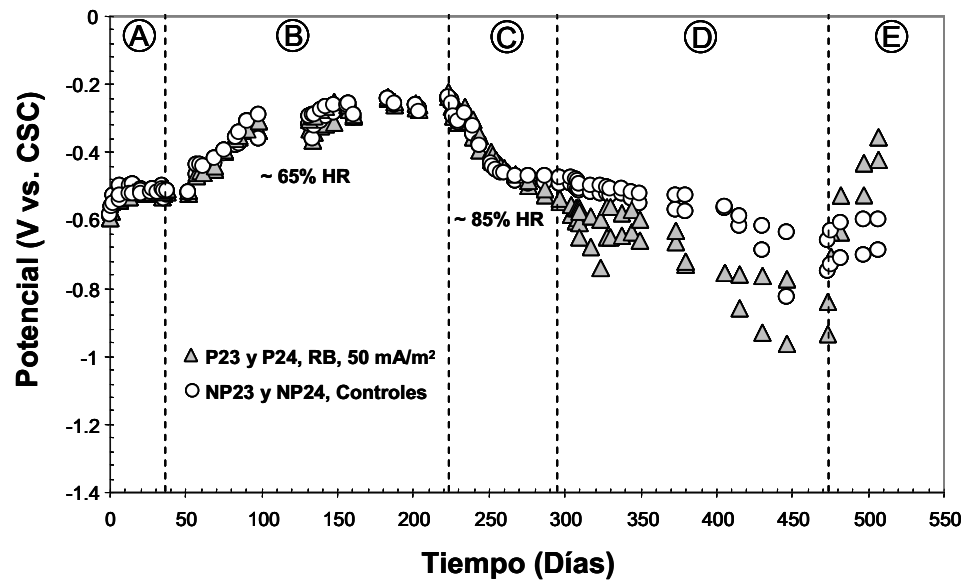
A2.4. Valores de potencial de media celda de los prismas P17 y P18, resina E y una corriente suministrada de 100 mA/m^2 .



A2.5. Valores de potencial de media celda de los prismas P19 y P20, resina B y una corriente suministrada de 100 mA/m^2 .



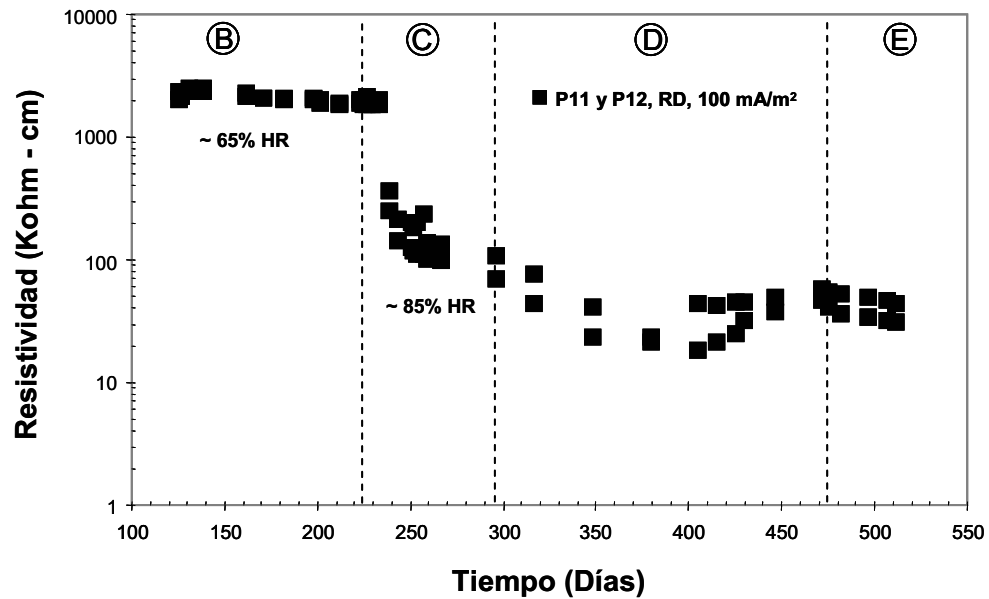
A2.6. Valores de potencial de media celda de los prismas P21 y P22, resina B y una corriente suministrada de 100 mA/m^2 .



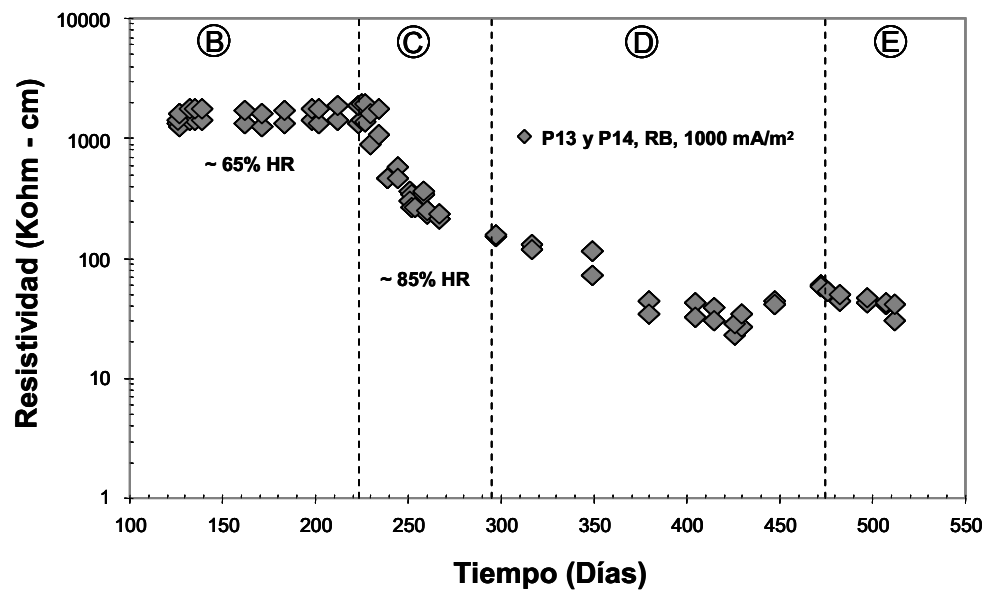
A2.7 Valores de potencial de media celda de los prismas P23 y P24, resina B y una corriente suministrada de 50 mA/m².

Anexo 3

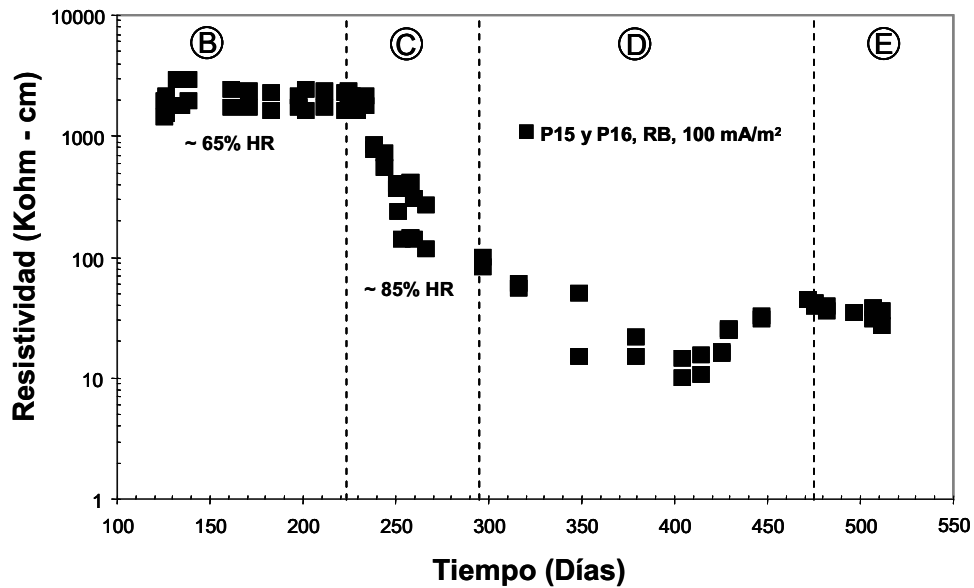
Se presentan los valores de las mediciones de resistividad entre el CFRP y la barra de refuerzo protegida.



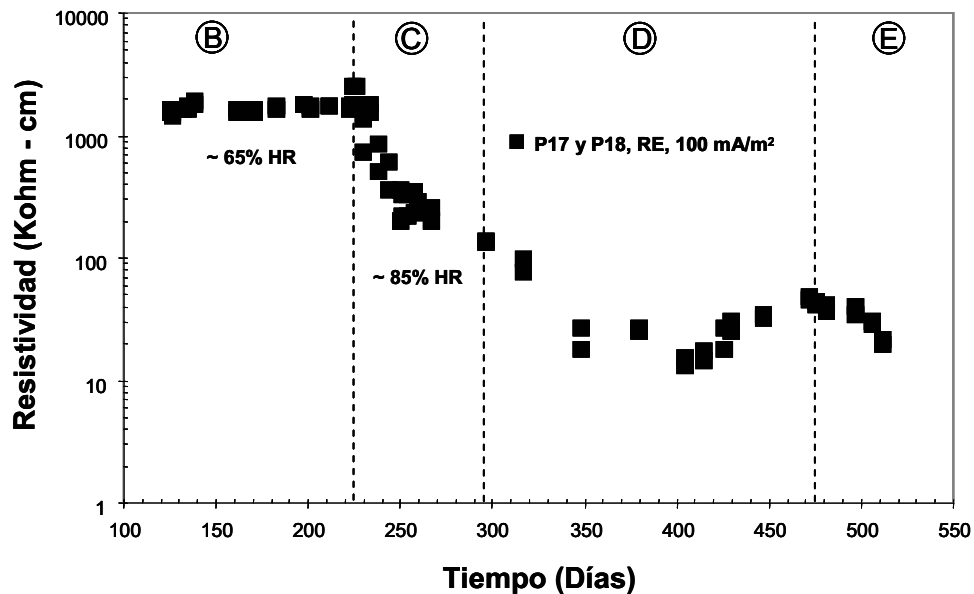
A3.1. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P11 y P12, resina D y 100 mA/m².



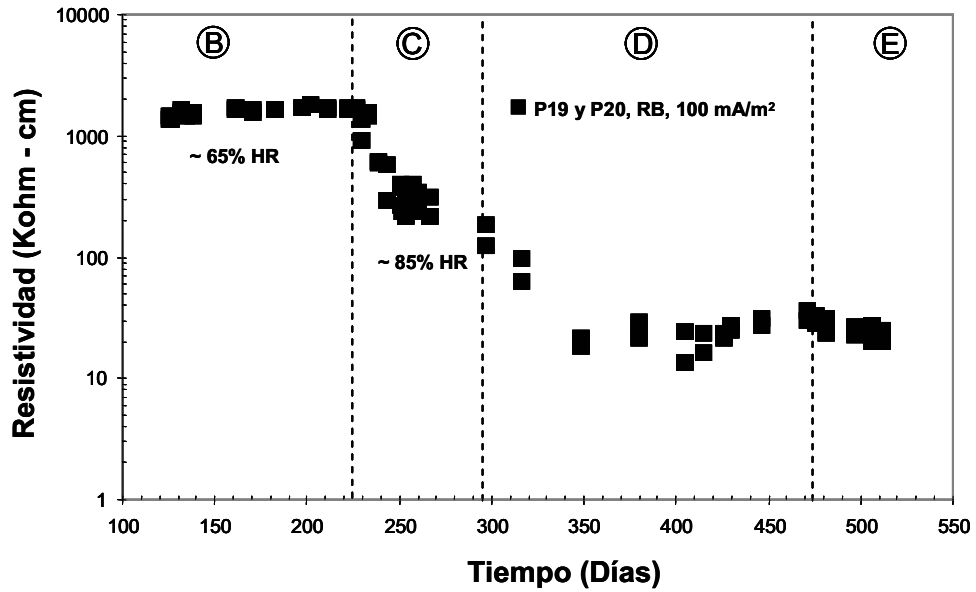
A3.2. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P13 y P14, resina B y 1000 mA/m².



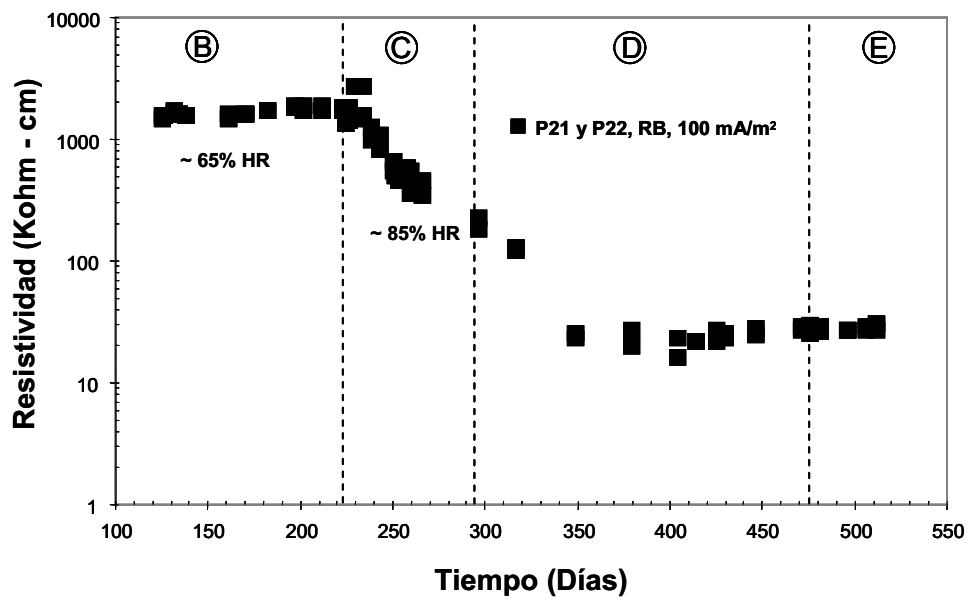
A3.3. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P15 y P16, resina B y 100 mA/m².



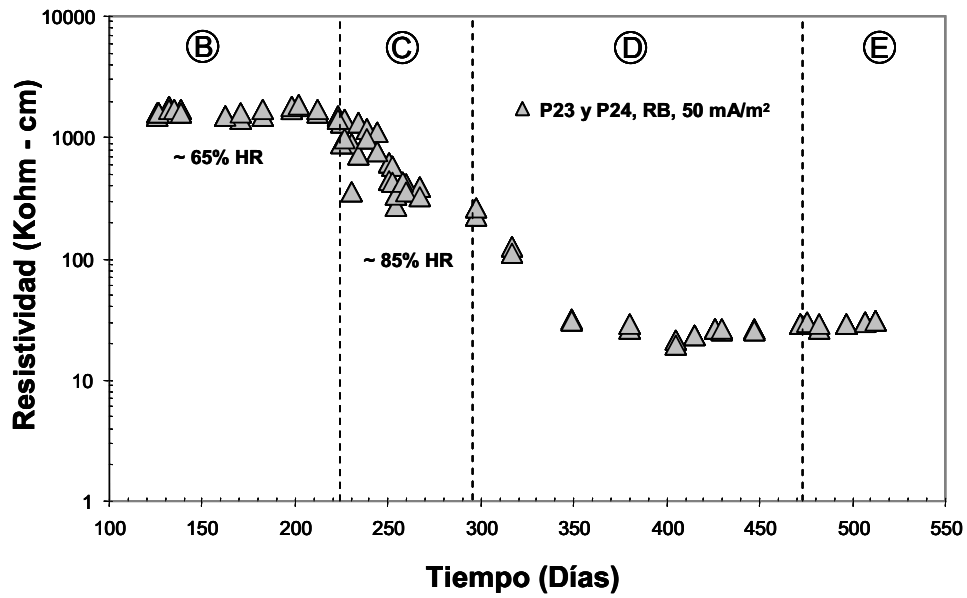
A3.4. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P17 y P18, resina E y 100 mA/m².



A3.5. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P19 y P20, resina B y 100 mA/m^2 .



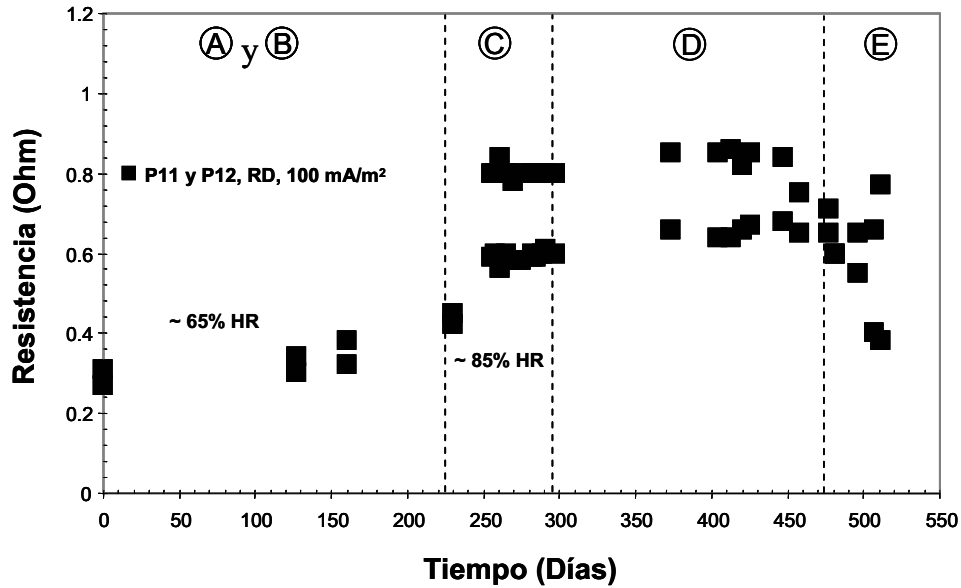
A3.6. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P21 y P22, resina B y 100 mA/m².



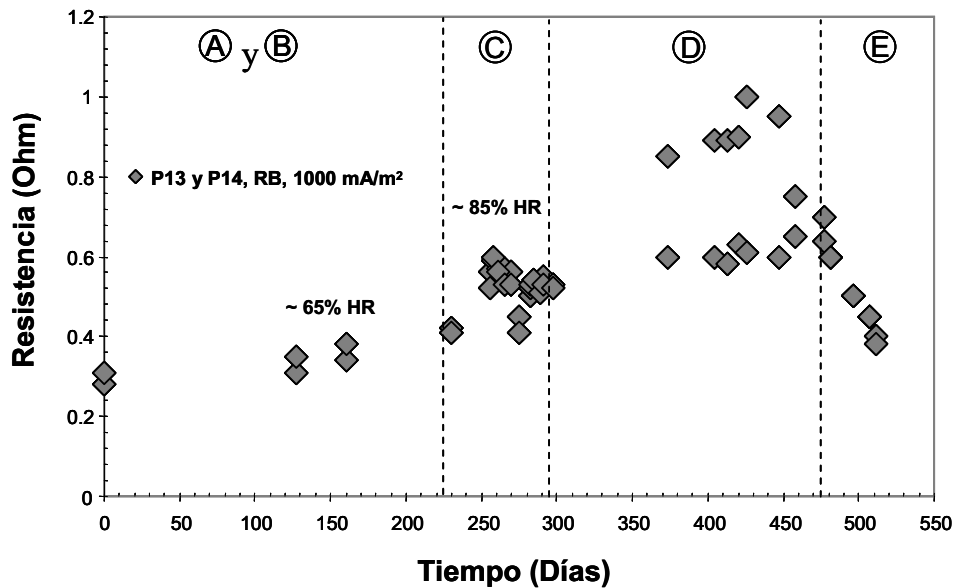
A3.7. Valores de las mediciones de resistividad entre el compuesto CFRP y la barra protegida de los prismas P23 y P24, resina B y 50 mA/m².

Anexo 4

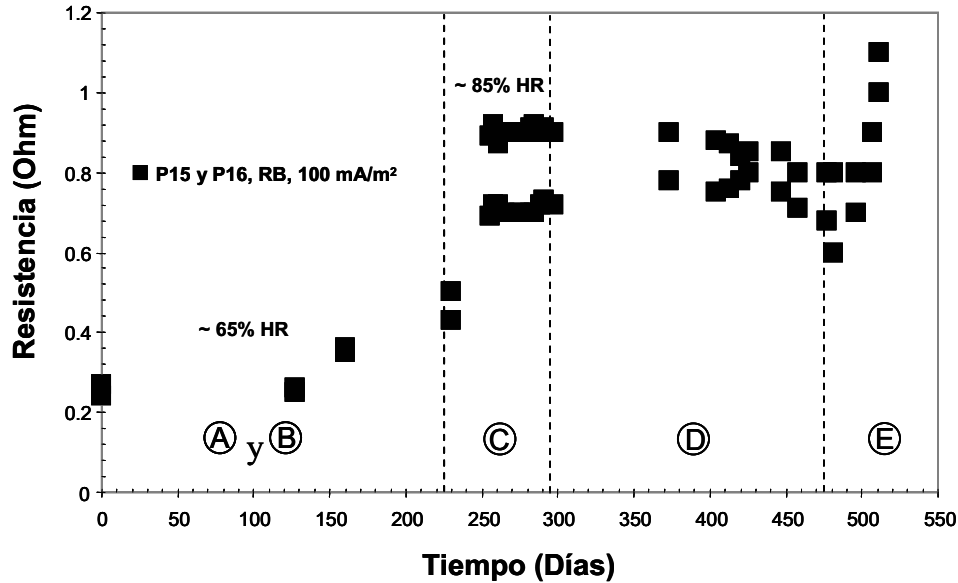
A continuación se presentan los valores de resistencia eléctrica del compuesto (CFRP), para cada uno de los prismas estudiados.



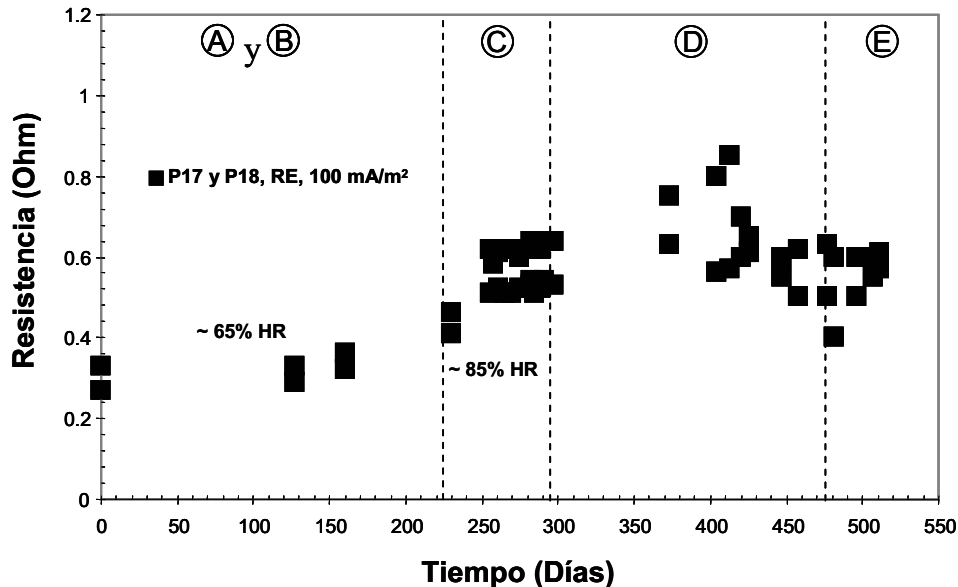
A4.1. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P11 y P12, resina D, 100 mA/m².



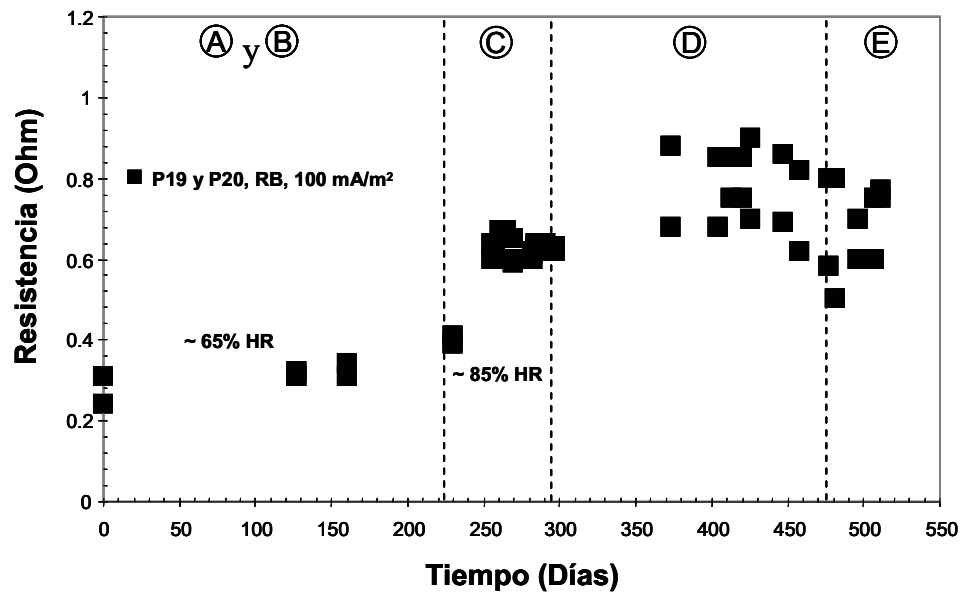
A4.2. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P13 y P14, resina B, 1000 mA/m².



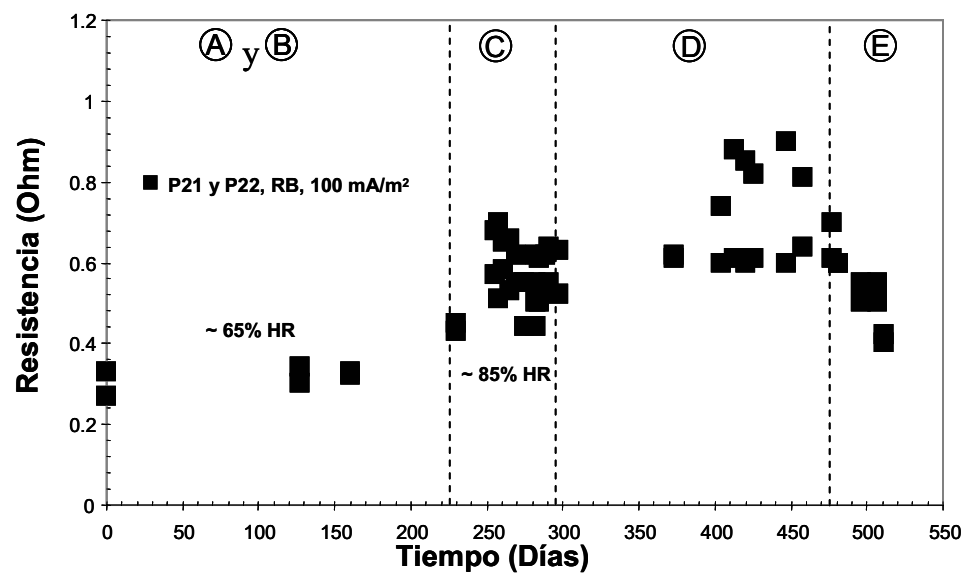
A4.3. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P15 y P16, resina B, 100 mA/m².



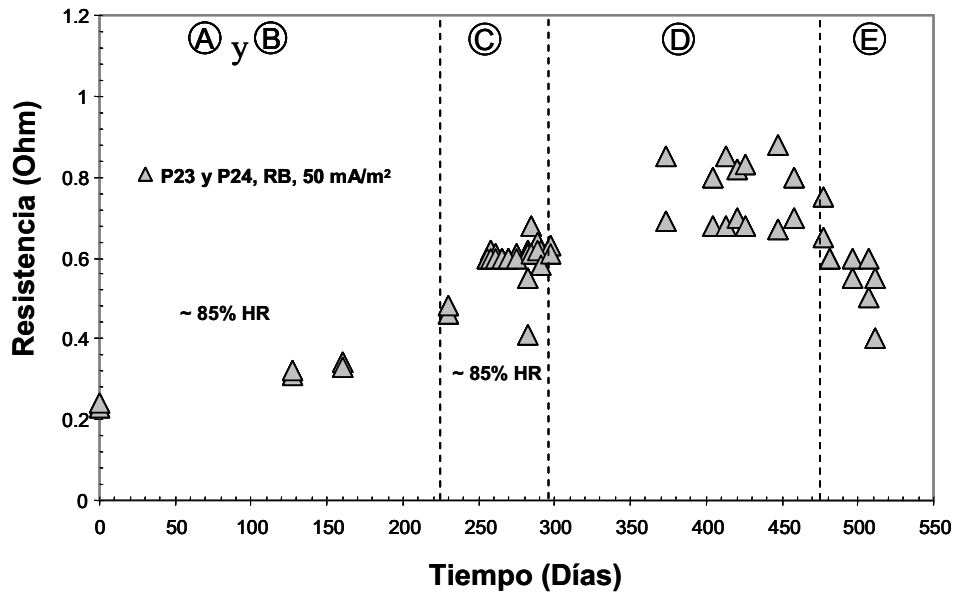
A4.4. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P17 y P18, resina B, 100 mA/m².



A4.5. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P19 y P20, resina B, 100 mA/m².



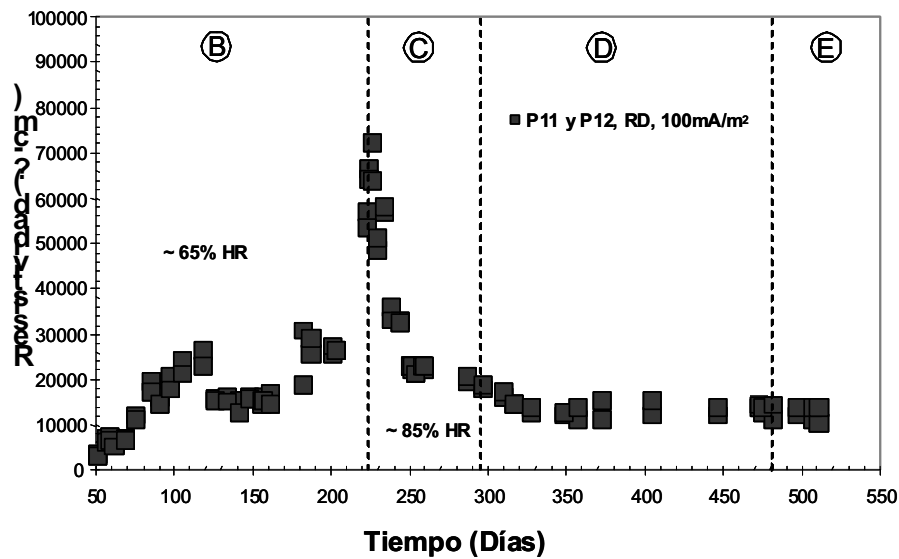
A4.6. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P21 y P22, resina B, 100 mA/m².



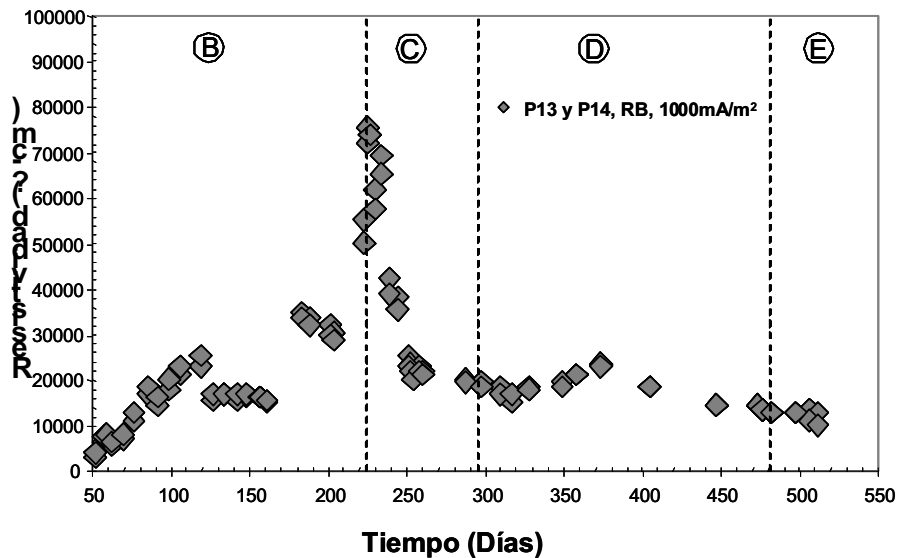
A4.7. Valores de las mediciones de resistencia eléctrica entre los extremos de las platinas de CFRP, de los prismas P23 y P24, resina B, 50 mA/m².

Anexo 5

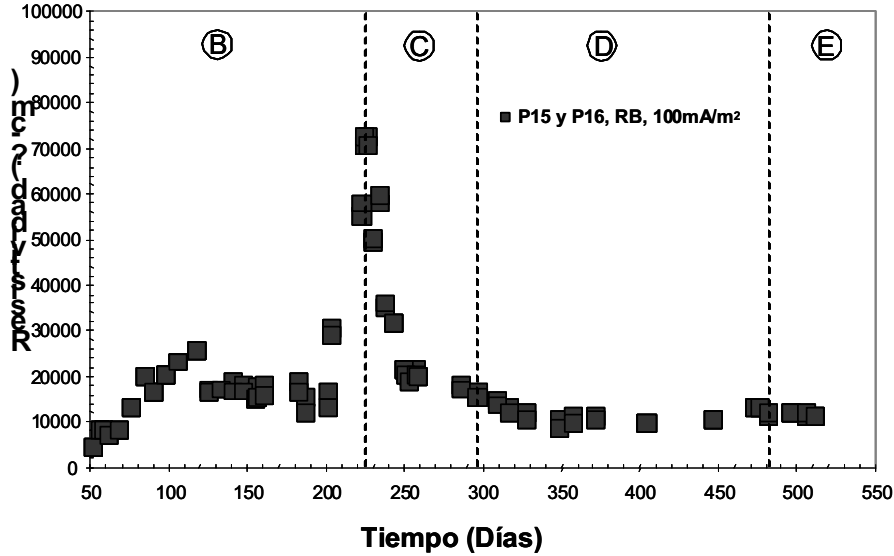
A continuación se presentan los valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito (concreto), para cada uno de los prismas estudiados.



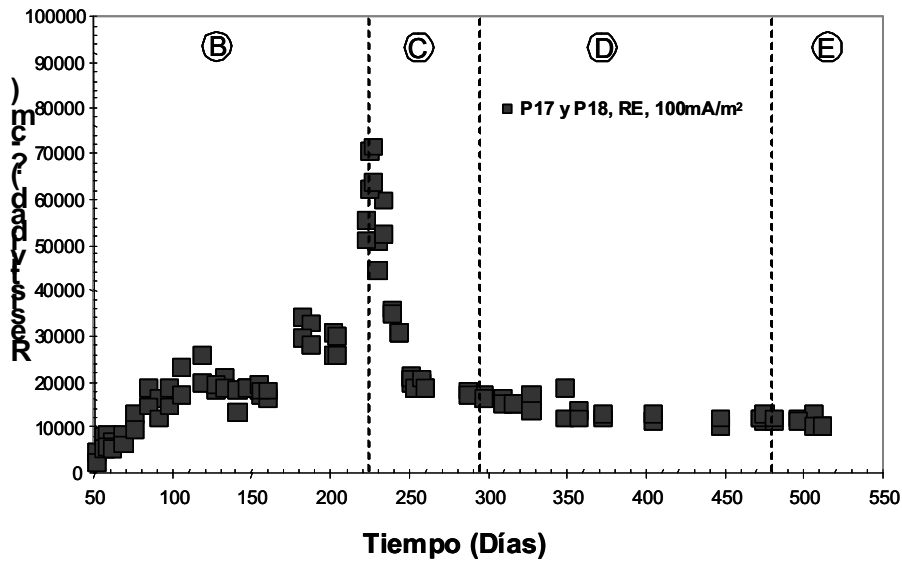
A5.1. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P11 y P12, resina D, 100 mA/m².



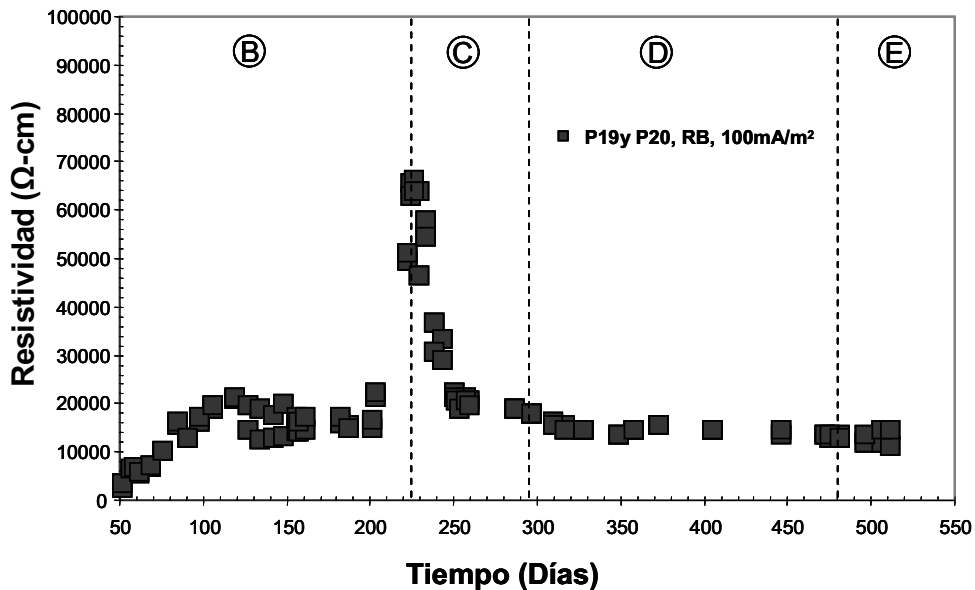
A5.2. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P13 y P14, resina B, 1000 mA/m².



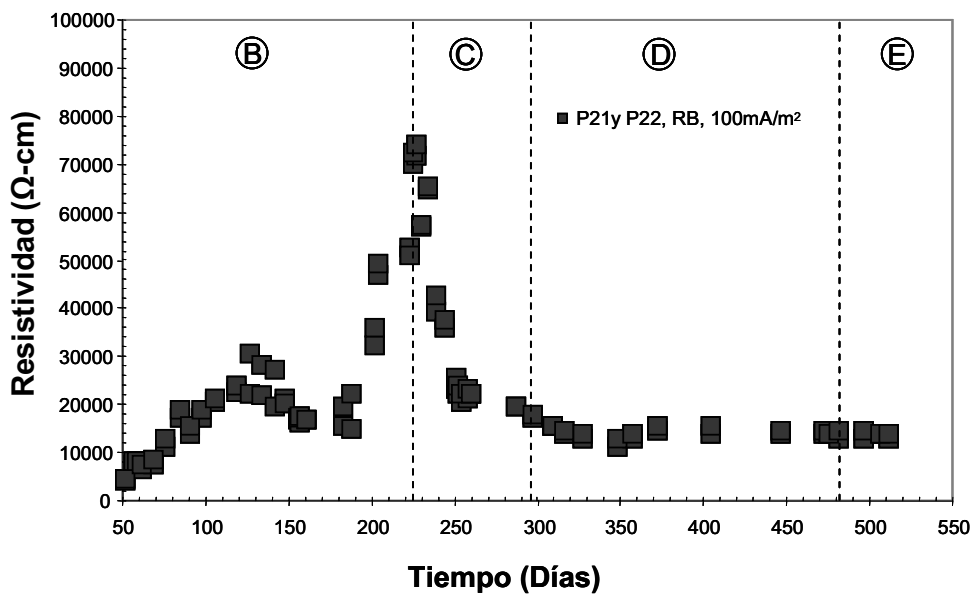
A5.3. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P15 y P16, Resina B, 100 mA/m².



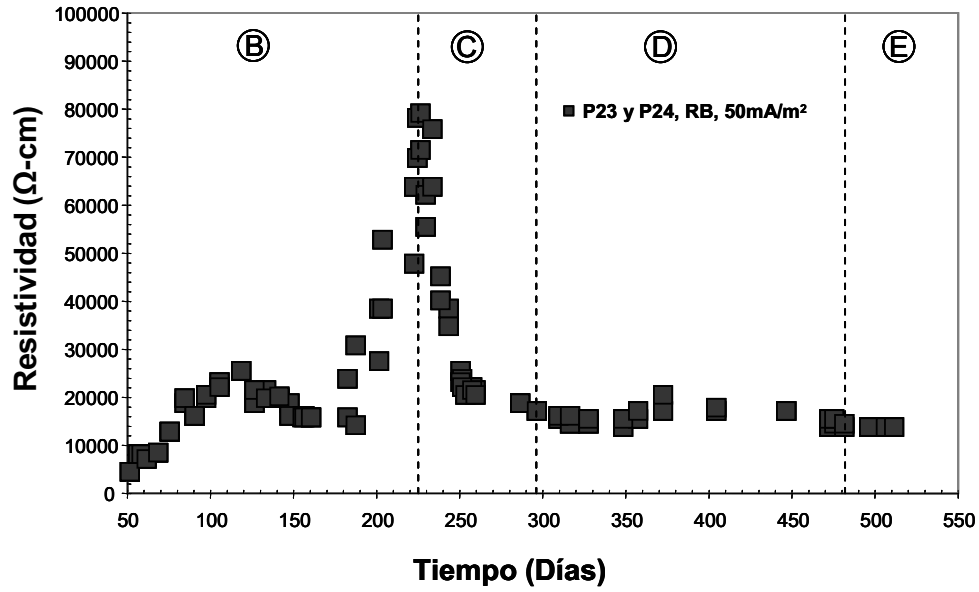
A5.4. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P17 y P18, Resina E, 100 mA/m².



A5.5. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P19 y P20, resina B, 100 mA/m².



A5.6. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P21 y P22, resina B, 100 mA/m².



A5.7. Valores de las mediciones de resistividad eléctrica del electrolito, de los prismas P23 y P24, resina B, 50 mA/m².



‡ 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