

Refuerzo y protección catódica en elementos de concreto dañados por corrosión usando compuestos base fibras de carbón

Reinforcement and cathodic protection on corroding concrete elements using carbon fibers based composites

Francisco Lee-Orantes*, Andrés A. Torres-Acosta*, Miguel Martínez-Madrid* y Carlos López-Cajún*

* Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, BRASIL
flee@imt.mx

Fecha de recepción: 10/ 06/ 2006
Fecha de aceptación: 17/ 11/ 2006
PAG. 169 - 178

Resumen

En este estudio, compuestos de fibra de carbón (CFRP) fueron utilizados como reforzamiento y a la vez como protección catódica en elementos de concreto con corrosión. Diferentes resinas conductoras fueron analizadas variando la cantidad de fibras de carbón y la longitud de estas fibras añadidas para aumentar la conductividad eléctrica/iónica de estas resinas. Los compuestos de CFRP 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 fue aplicada entre el compuesto de carbón (ánodo) y unas de las barras de refuerzo (cátodo) en diferentes magnitudes (50, 100 y 1000 mA/m²) durante 200 días. Los resultados obtenidos a la fecha han demostrado que el compuesto base fibra de carbón utilizado para reforzamiento de elementos de concreto, puede también funcionar como sistema de protección catódica (PC). Después estar en funcionamiento el sistema de PC, no se encontró degradación en el compuesto en el compuesto aunque las corrientes aplicadas excesivamente mayores que las utilizadas en estructuras reales.

Palabras Clave: Protección catódica, corrosión, reforzamiento estructural externo, concreto reforzado, materiales compuestos, CFRP

Abstract

A Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite was used as external reinforcement and as a cathodic protection (CP) system of steel in concrete elements. Electrical conductivity was tested for different epoxy resins by varying the amount and length of the carbon fibers used. Three of them were chosen for the testing program in concrete elements. The CFRP composites were glued to the concrete specimens using such selected conductive resins, then electrically connected with one of the rebars and used as impressed current anodes. A direct electrical current was applied between the CFRP composite (anode) and the rebar (cathode) at different current density magnitudes (50, 100, and 1000 mA/m²) during 200 days. The results obtained so far have demonstrated that the CFRP external reinforcement used in this investigation can also work as an anode in a cathodic protection system (CP). No mechanical adverse effect was found on the composite and the epoxy resin selected, although the current densities applied were greater than those used in real structures.

Keywords: Cathodic protection, corrosion, external structural reinforcement, reinforced concrete, composite materials, CFRP

1. Introducción

El concreto reforzado con varillas de acero es uno de los materiales de construcción más utilizado en todo el mundo, sin embargo presenta el inconveniente de ser susceptible a fallar por corrosión (Del Valle et al., 2001).

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se consume una capa pasiva de la superficie del acero y se forma otra de productos de corrosión (óxidos Fe₃O₄ o hidróxidos Fe(OH)₂ de Hierro en el perimetro

de la barra. El volumen ocupado por los óxidos expansivos es mayor al que ocupaba el acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero, lo que propicia la formación de grietas y desprendimientos del concreto (Torres-Acosta, 2004). Estas grietas o delaminaciones del recubrimiento de concreto además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero y potencialmente, la resistencia del elemento estructural (Torres-Acosta y Martínez-Madrid, 2003).

2. Reforzamiento estructural con CFRP

La larga experiencia y extenso conocimiento que se tiene en la actualidad sobre el concreto, han confirmado que es un material de construcción confiable y durable cuando se expone a los ambientes normales o aún en ambientes moderadamente agresivos. Unas de las propiedades más importantes del material es su alcalinidad, proporcionando un mecanismo protector, un ambiente seguro, anticorrosivo para el refuerzo de acero embebido en él. Sin embargo, a pesar de estas ventajas inherentes, la corrosión del refuerzo se ha convertido en la causa principal del deterioro y a veces de las tempranas y prematuras fallas de las estructuras de concreto reforzado por todo el mundo (Swamy, 2001).

En este contexto, la tecnología de reforzamiento con fibras ha tenido gran progreso en los últimos años. Por ejemplo, las placas de refuerzo externamente adheridas sobre las superficies de los elementos de concreto, se utiliza como un método estructural eficiente y rentable de rehabilitación de estructuras; más recientemente, los polímeros reforzados con fibras (FRP), y particularmente, los polímeros reforzados con fibras de carbón (CFRP), se han considerado y utilizado como una alternativa al acero, sobre todo debido a su ligereza, resistencia a ataques químicos y otras características favorables en ingeniería, con respecto al acero (Spadea y Swamy, 2001)

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 y rigidez muy altas, así como excelente comportamiento a la fatiga, mejor inclusive a la del acero y además su densidad es muy baja. Las fibras están colocadas en dirección longitudinal correspondiendo a la dirección de la sollicitación, de esta forma la lámina tiene una estructura unidireccional. Las fibras son los elementos con capacidad de carga y la matriz epóxica sirve para unir las fibras entre sí. La matriz permite la transferencia de carga entre las fibras y las protege del medio ambiente (Ari de Paula, 2005).

La resistencia en dirección transversal a las fibras así como la resistencia a cortante son bajas. Tiene excelente resistencia a la fluencia plástica en tracción. Las características mecánicas en dirección longitudinal son determinadas por el tipo de fibra y por el contenido en volumen de fibras. 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 (Ari de Paula, 2005).

3. Protección catódica (PC) en concreto

La PC es un sistema contra el proceso de degradación de los metales que ha sido utilizado desde hace mucho tiempo en numerosas instalaciones e infraestructuras, que debido a sus condiciones de operación, requieren una integridad absoluta. En las últimas tres décadas se empieza a utilizar este medio de protección en sistemas de estructuras de concreto-metal (del Valle, 2005). El nombre de PC se atribuye porque el metal a proteger es obligado a comportarse como cátodo, es decir, la zona donde se lleva a cabo la reacción de reducción (Genescá y Avila, 1986).

La corrosión u oxidación se traduce en términos prácticos como una pérdida de electrones en el metal, provocando la formación de iones metálicos en la superficie del propio metal (Genescá y Avila, 1986). Por lo tanto el propósito principal de la PC es proveer al metal de los electrones que él mismo pierde debido al proceso de oxidación. El suministro de los electrones se puede realizar por 2 vías: 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 preesfuerzo), de esta forma los electrones que éste último pierde, le sirven al acero de refuerzo para mantenerse en buen estado; 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 (Genescá y Avila, 1986).

El sistema por corriente impresa suministra al metal a proteger, la corriente necesaria para que se mantenga en estado pasivo o inmune. Lo que se hace es suministrar electrones mediante una fuente de poder externa a la barra de refuerzo, de tal forma que se favorezca en su superficie la reacción de reducción del ion hierro a hierro metálico. Este tipo de sistemas es el que se utiliza de 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, sin embargo su uso implica una instalación inicial costosa por requerir rectificadores de corriente y un sistema de monitoreo continuo (del Valle, 2005).

El sistema propuesto en esta investigación posee las bondades de un doble sistema, es decir, un sistema de reforzamiento estructural en base a la utilización de

un material compuesto de fibra de carbón (CFRP en sus siglas en inglés) como agente reforzador, así como también la posibilidad de trabajar como ánodo por corriente impresa mediante la adherencia de éste CFRP al elemento estructural por medio de un polímero conductor en una matriz base epóxica. El polímero conductor se fabricó adicionando fibras de carbono a una resina epóxica comercial, la cual se utiliza para adherir las laminas de carbono al elemento de concreto reforzado. Este trabajo 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.

4. Procedimiento experimental

La primera etapa en el procedimiento experimental fue desarrollar una resina epóxica conductora. Para lograr que el polímero base resina epóxica se convirtiera en un polímero conductor, se le añadió fibras de carbón como material conductor eléctrico (filler). Las fibras añadidas a la resina epóxica fueron obtenidas de un sistema de reforzamiento estructural a base de tejido de fibra de carbono. El tejido fue cortado hasta obtener fibras de carbón individuales de diferentes longitudes. Éstas fueron mezcladas al momento de la preparación del epóxico, formulando así un elemento adhesivo que a su vez permite el flujo de electrones, debido a la presencia de las fibras de carbón. Se fabricaron un total de 16 probetas de resinas epóxicas, teniendo como variables el porcentaje de fibras (2, 3, y 4% en peso) y la longitud de las mismas (3, 6 y 12mm). Diferentes resinas epóxicas comerciales fueron evaluadas, teniendo éstas diferentes aplicaciones, que van desde sellador de grietas hasta adhesivos de sistemas de reforzamiento estructural.

Después evaluar la resistividad eléctrica de las diferentes resinas epóxicas, se procedió a la fabricación de los prismas de concreto reforzado (50 x 100 x 200 mm). El cemento utilizado para la fabricación de estos prismas fue un cemento CPP 30R (nomenclatura Mexicana para cemento Pórtland puzolánico con resistencia a la compresión de 20,5 MPa a 28 días), y una relación de agua cemento de 0,65. Se les añadió también el 3% en peso de cemento de cloruros, usando NaCl para activar las barras de refuerzo por corrosión. La Figura 1, presenta las dimensiones de los prismas utilizados y la ubicación

de las barras de refuerzo en el prisma.

Una vez caracterizado el polímero conductor a utilizar y fabricar los prismas, se procedió a pegar sobre una de las caras de las probetas, el sistema de reforzamiento estructural con el polímero conductor seleccionado. Adherido el CFRP al prisma de concreto, se procedió a la etapa de endurecimiento de la resina epóxica, logrando su dureza máxima en cinco días. La Figura 1 presenta la posición del sistema de refuerzo-protección catódico estudiado después del endurecimiento del sistema.

Después de alcanzar las resinas su dureza máxima, se colocaron los prismas dentro de cámaras de humedad controlada, estas se habilitaron con cajas de plástico transparente de dimensiones 690 x 480 x 410 cm. En las cámaras se colocaron las conexiones eléctricas necesarias para realizar las mediciones electroquímicas requeridas sin mover los prismas y así perturbar con menor frecuencia el ambiente de las cámaras, durante las mediciones electroquímicas. Las mediciones realizadas para determinar la efectividad del sistema se basaron en pruebas electroquímicas comunes: (1) potenciales de media celda; (2) resistividad eléctrica entre el cátodo (refuerzo) y ánodo (compuesto de carbón); y (3) resistencia eléctrica entre la barra protegida y la no protegida, (4) depolarización del sistema propuesto, (5) corriente eléctrica entre ánodo y cátodo. La medición de potencial de media celda del refuerzo fue realizada para conocer la actividad por corrosión de la barra. Éstas fueron obtenidas utilizando un voltímetro de alta impedancia interna (10 a 200 M Ω , marca M.C Miller, modelo LC-4) y la barra de titanio como electrodo de referencia (Ti/TiO₂). Éste valor fue convertido a potencial vs. un electrodo de Cobre -Sulfato de Cobre (CSC) para comparar los valores experimentales con los obtenidos en la literatura. Las mediciones de corriente eléctrica fueron realizadas en la etapa de conexión del sistema de PC únicamente.

Esas mediciones fueron realizadas utilizando un multímetro gráfico de resistencia interna nula, desconectando el sistema de PC por unos segundos y midiendo el valor de corriente que fluía en el sistema de PC (Instant on-off). Además se realizaron mediciones de resistividad eléctrica del sistema de PC empleado utilizando el método de resistencia eléctrica entre dos electrodos. Las mediciones fueron realizadas con un resistómetro.

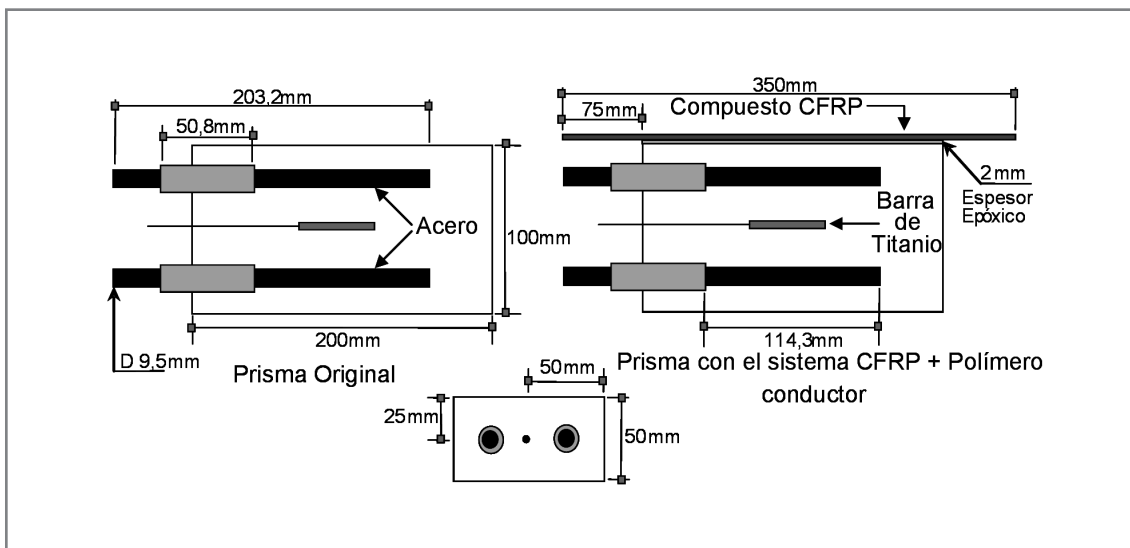


Figura 1. Representación esquemática de los prismas de concreto estudiados

Cuando las mediciones de potencial de media celda fueron estables dentro de las cámaras de humedad controlada, se procedió a la aplicación de la corriente eléctrica de protección entre el CFRP (ánodo) y la varilla de refuerzo seleccionada (cátodo) con los valores de 50, 100 y 1000 mA/m² durante 150, 75 y 7,5 días respectivamente, mediante una fuente de poder (0-60 V, 0-15 A) y un galvanostato de veinte canales construido en el laboratorio (capacidad por canal de 0-300 mA). El monitoreo electroquímico de los prismas de concreto reforzado y el sistema de PC fue realizado en diferentes etapas. Estas etapas fueron: (A) curado: los prismas fueron humedecidos 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 ± 2° 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).

Para las pruebas de depolarización se desconectaron las barras de refuerzo protegidas y se midieron los potenciales de media celda vs el ERI

(Electrodo de Referencia Interno) en varias ocasiones. El primer valor se tomó dos segundos después de la desconexión. A este valor de potencial se le llamó potencial "Instant Off". Después se midió el potencial a las cuatro y veinticuatro horas de haberse desconectado. Al finalizar el periodo de veinticuatro horas se reconectó el sistema de protección para continuar los estudios. Estas pruebas se realizaron a los 311, 345 y 401 días de fabricación de los prismas, durante la interconexión del sistema.

Como etapa final dentro del proyecto, se procedió a las mediciones de fuerza de adherencia del sistema propuesto. Estas mediciones se realizaron con una máquina servo-hidráulica Instron 8503, con una celda de carga de 500 kN. Para poder realizar las pruebas de adherencia fue necesario el construir un dispositivo mecánico para la sujeción de los prismas de concreto a la máquina de prueba similar al mostrado en la Figura 2. Esto con la finalidad de, a través de la prueba de tracción obtener la carga máxima resistente de adherencia por el sistema propuesto antes de la falla. Colocado el prisma dentro del dispositivo de sujeción, se procedió a ubicar este elemento en su posición final en la máquina servo-hidráulica para realizar la prueba de tracción, (ver Figura 3). La prueba se llevó a cabo mediante un control de desplazamiento de de carga de 0,004 mm/s.

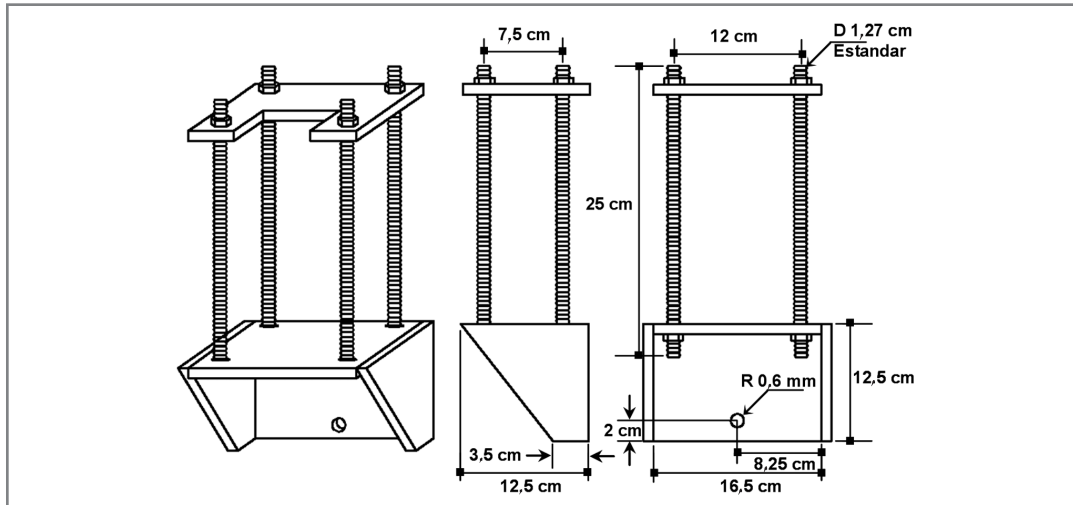


Figura 2. Dispositivo de sujeción para las pruebas de adherencia

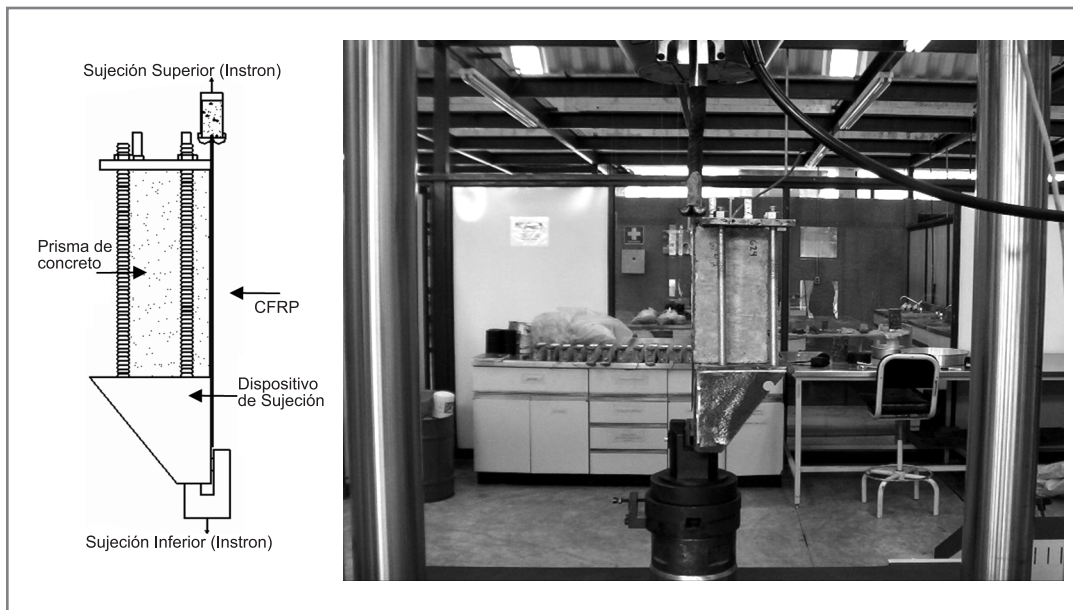


Figura 3. Imágenes del dispositivo instalado en la Instron

5. Resultados y discusiones

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de los valores de resistividad en las diferentes resinas epóxicas analizadas así como en sus diferentes configuraciones. De acuerdo a los valores presentados, se tomó la decisión de seleccionar a la Resina B5, esta presentó un valor de (14 Ohm-cm) y las Resinas D y E (resistividad de 20,5 y 17 Ohm-cm), debido al criterio de que una resina con una menor resistividad, permite una mayor conductividad eléctrica, que es lo óptimo para el desarrollo de este proyecto.

En la Figura 5, se puede observar 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. Las letras (A-E) corresponden a las etapas del proyecto que se explican en la sección de procedimiento experimental.

El monitoreo de los potenciales de media celda se llevo 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. [Mindess y Young, 1981].

En la etapa B (~65 % humedad relativa y $21 \pm 2^\circ \text{C}$) se presenta 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) y por lo tanto los potenciales descienden hasta valores de -0,5 V (vs CSC).

En la etapa D, los prismas fueron sometidos a tres corrientes de protección: 50, 100 y 1000 mA/m². En esta etapa se observa que la diferencia son mínimas entre los valores de potencial "On" (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 del tiempo de aplicación de las corrientes de protección, 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. (50, 100 y 1000 mA/m²) respectivamente.

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

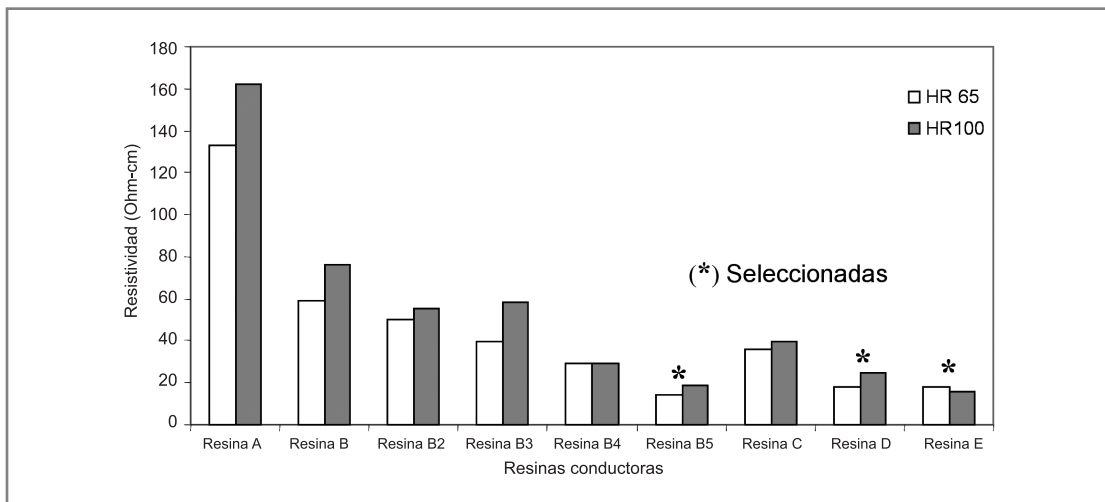


Figura 4. Gráfica de valores de resistividad de las resinas epóxicas estudiadas

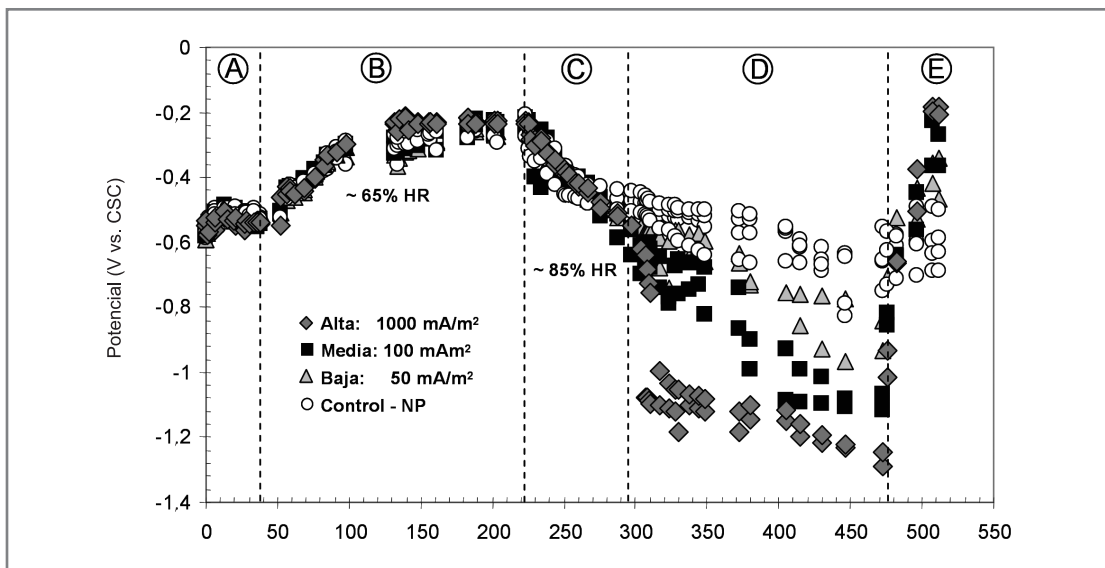


Figura 5. Gráfica de valores de potencial de media celda de los prismas

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 de este sistema, ya 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 valor 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 anterior hace pensar que aún siendo pruebas aceleradas y con magnitudes de corrientes altas, el sistema presentó resultados satisfactorios de protección contra la corrosión.

Para establecer si un sistema de PC está funcionando se verifica que se cumplan ciertos criterios de protección que a la fecha son los mismos utilizados para estructuras de concreto que para estructuras enterradas o tuberías de conducción. 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. Para el criterio de lo 0,1 V es

determinado interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización.

En la Tabla 1 se presentan los valores de las pruebas de depolarización realizadas en las barras de refuerzo protegidas, donde se puede observar el cumplimiento o no de los criterios de protección antes mencionados (0,85 V y 0,1 V). En base a 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 cuales se le aplicó densidades de corriente altas (1000 mA/m²) cumplen con los dos criterios de PC (0,1 V y 0,85 V). Cabe aclarar que los prismas a los cuales se les aplicaron densidades de corriente altas, los valores de potencial observados en la Figura 5 son más negativos que 1,0 V. Estos valores han sido referidos como potenciales que pueden dañar estructuralmente al acero de refuerzo por que pueden generar hidrógeno en la interfase acero/concreto, con lo que sería perjudicial a la resistencia del elemento estructural, por lo que debería de 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 a 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 1. 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

Note: E_{CA} = Potencial de circuito abierto
 E_{ON} = Potencial sistema conectado
 E_{IOFF} = Potencial Instant Off
 ΔE₄ = Diferencia de potencial después de 4 horas
 ΔE₂₄ = Diferencia de potencial después de 24 horas

Todavía queda el determinar si las corrientes aplicadas al sistema de PC pudieran afectar la resistencia del CFRP así como la adherencia de los elementos de refuerzo al concreto. Para la primera condición se deberán realizar pruebas de tracción directa 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. En la Figura 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 KOhm-cm durante la etapa de estabilización en ambiente laboratorio, una vez ubicadas las probetas dentro de las cámaras de humedad controlada, la resistividad disminuye a consecuencia de la hidratación del concreto hasta valores de únicamente 100 KOhm-cm.

Para cuando el sistema de PC fue puesto en funcionamiento, la resistividad continuó disminuyendo hasta valores del orden de 20 KOhm-cm, indicando que no hubo, al final de los 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.

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 KOhm-cm (corrientes baja y media) y un valor de 40 KOhm-cm (corriente alta), indicando un posible indicio de separación de los elementos. Para corroborar este efecto se realizaron las pruebas de adherencia del sistema y a continuación se presentan los resultados obtenidos.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas de adherencia realizadas en esta investigación. Con estos resultados, se verificó primero el efecto de la adición de las fibras en la adherencia del sistema híbrido propuesto. Manteniendo constantes los valores de cantidad de corriente aplicada (100 mA/m^2) y el tipo de resina epóxica conductora (resina tipo B5), los resultados obtenidos no arrojan diferencias significativas de la adherencia del sistema y la variación del porcentaje de fibras adicionadas a la resina de unión. Los valores promedios (de dos probetas) obtenidos para 2% (P15 y P16), 3% (P21 y P22) y 4% (P19 y P20) fueron 0,87 MPa, 0,77 MPa y 1,00 MPa, respectivamente.

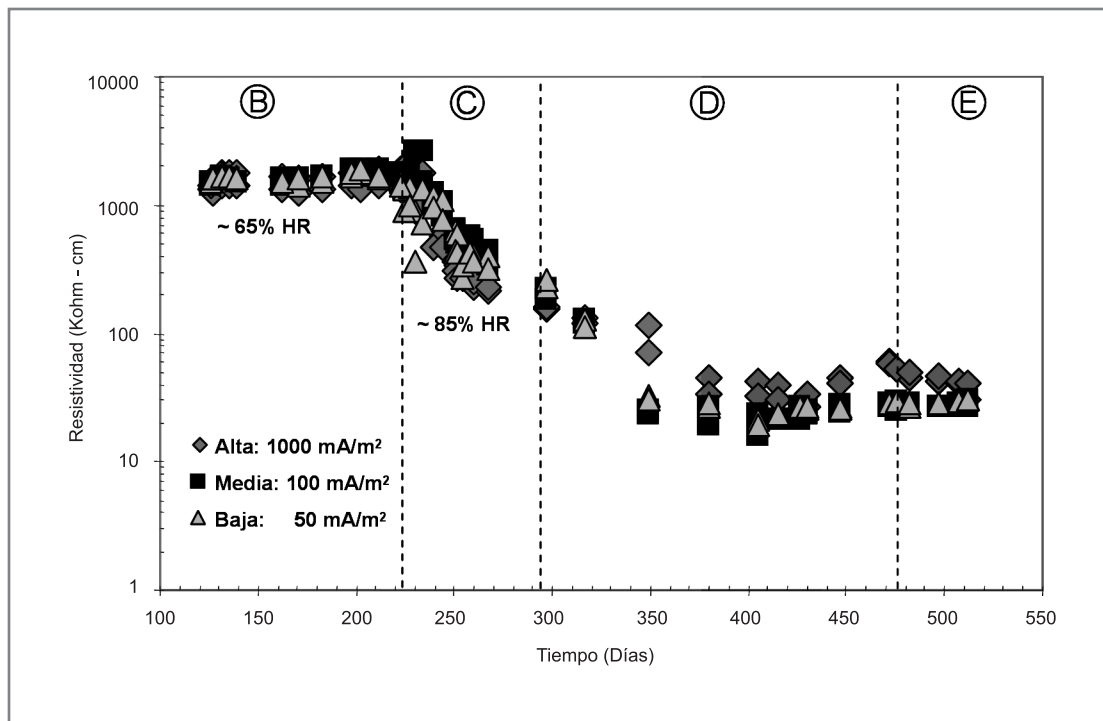


Figura 6. Resistividad entre el sistema (CFRP + resina conductora) vs. Barra protegida

Ahora, manteniendo constantes el porcentaje de fibras añadidas (3%) y la cantidad de corriente aplicada (100 mA/m^2), los valores promedio obtenidos para la resina B5 (P21 y P22), para la resina D (P17 y P18) y para la resina E (P11 y P12) fueron 0,77 MPa, 0,93 MPa y 0,99 MPa, respectivamente. Los resultados obtenidos en las pruebas de adherencia son relativamente bajos con respecto a los valores (4 MPa) que reporta el fabricante de las diferentes resinas comerciales (Sika Mexicana, 2005). Se observa que conforme la resina es más fluida (resina E), el esfuerzo máximo de adherencia obtenido antes de la separación del sistema con el concreto es mayor. Esta alta fluidez de la resina aparentemente permitió una mejor distribución de la misma, sobre la zona de contacto, disminuyendo las burbujas de aire al momento de colocarla sobre el prisma de concreto y una mayor penetración en el mismo.

Los valores promedios presentados en la Tabla

2 nos muestran los efectos de la variación de la corriente aplicada en la adherencia del sistema al concreto. Los valores promedios de adherencia obtenidos para 50 mA/m^2 (P23 y P24), 100 mA/m^2 (P21 y P22) y 1000 mA/m^2 (P13 y P14) fueron 0,75 MPa, 0,77 MPa y 0,91 MPa, respectivamente. En esta ocasión los parámetros que se mantuvieron constantes fueron: el porcentaje de fibras añadidas (3%) y el tipo de epóxico Resina B5. A partir de estos valores, es posible visualizar un discreto incremento en el esfuerzo máximo de adherencia, cuando la corriente suministrada es mayor. Esto nos indica que la aplicación de la corriente de protección aparentemente no afecta las propiedades mecánicas del sistema concreto/resina/CFRP, por lo que los cambios de resistividad del sistema (como en la Figura 6) pudieron ser efecto de la corrosión de las conexiones y no de el desprendimiento del sistema utilizado.

Tabla 2. Valores de esfuerzo de adherencia de los prismas estudiados

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	2%	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

6. Conclusiones

El compuesto base fibra de carbón utilizado para refuerzo estructural externo, puede también funcionar como sistema mixto de protección catódica (PC). Después de más de 100 días de estar en funcionamiento el sistema de PC, no se encontró ningún efecto adverso en el sistema concreto/resina conductora/compuesto aunque las corrientes aplicadas fueron 24, 48 y 480 veces más que las utilizadas en estructuras reales.

Las pruebas de adherencia, permiten inferir que la cantidad de fibras añadidas a las resinas conductoras, no afectaron significativamente la adherencia del CFRP al elemento de concreto. El esfuerzo máximo de adherencia del sistema estudiado fue mayor cuando la resina conductora evaluada presenta una mayor fluidez. Así mismo se observó un aumento marginal en el esfuerzo de adherencia cuando la corriente aplicada al sistema fue mayor.

7. Recomendaciones

Se recomienda el uso de este sistema de PC siempre y cuando el valor de potencial "ON" no rebase el límite de -0,1 V (vs CSC) y para ello se tendrá que aplicar, en geometrías similares, densidades de corriente anódica de entre 50 y 100 mA/m².

8. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la empresa SIKA Mexicana S.A. de C.V., por haber suministrado los materiales compuestos para la fabricación de los sistemas de PC estudiados. Así mismo, los autores agradecen el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, vía el proyecto de Colaboración Interamericana de Materiales CIAM 2002 con N°. U42362-K.

9. Referencias

- Ari de Paula Machado (2005)*, "Refuerzo de Estructuras de Concreto Armado con Fibras de Carbón", Degussa Construction Chemicals Latin America. Degussa Company.
- DURAR (1998)*, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico en Estructuras de Hormigón Armado", CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales. (Maracaibo, Venezuela: CYTED, 1997)
- del Valle, A. (2005)*, "Estudio de la modelación electroquímica de la cinética de la corrosión en sistemas protegidos catódicamente por ánodos galvánicos". Tesis doctoral, UAQ, Facultad de ingeniería.
- del Valle A., Pérez López T. y Martínez Madrid M.(2001)*, "El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado". Publicación Técnica No. 182. Instituto Mexicano del Transporte.
- Enos D. G. y Williams A.J. (1997)*, "Impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete pilings: Protection criteria and the threshold for Hydrogen embrittlement". NACE, Corrosion 97, Paper No. 241.
- Genescá J. y Ávila M.J. (1986)*, "Más allá de la herrumbre. La lucha contra la corrosión". Ed. Fondo de la cultura económica. S.A. de C.V., México.
- Mindess S. y Young J. F (1981)*, "Concrete". Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Sika Mexicana (2005)*, www.sika.com.mx. Soporte Técnico, Reforzamiento de Estructuras, Fichas Técnicas: DCT-HT-PC300000-02-05, DCT-HT-PF310500-03-05, DCT-HT-PC310200-03-05.
- Spadea G. y Swamy R.N. (2001)*, "Strength and Ductility of RC Beams Repaired with Bonded CFRP Laminates". Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 5, Paper No.19496, Sep/October.
- Swamy R. N. (2001)*, "Interface Shear Stress: A New Design Criterion for Plate Debonding". Journal of Composites for Construction, Vol. 5, No. 1, Paper No. 20604. February.
- Torres-Acosta, A.A. (2004)*, "Periodo de Iniciación de la Corrosión (T₁) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino," Revista Internacional Construlink (RIC), V. 2, No.5, febrero 2004, Construlink, ISSN 1645-5576, pp.58-69.
- Torres-Acosta, A.A. y Martínez-Madrid, M. (2003)*, "Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no. 4, July-August, pp. 344-353.