



**12-14 de Noviembre del 2012**  
**Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa**

## **PROTECCION CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA DEL ACERO DE REFUERZO UTILIZANDO UN ANODO DE PASTA DE CEMENTO CONDUCTOR**

R. Soto Salazar<sup>1</sup>, C.P. Barrios-Durstewitz<sup>1\*</sup>, E. E. Saenz Angulo<sup>1</sup>, R. E. Núñez-Jaquez<sup>1</sup>, M.A. Baltazar-Zamora<sup>2</sup>, E.E. Maldonado-Bandala<sup>2</sup>, F. Almeraya Calderón<sup>3,4</sup>, J.H. Castorena-González<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa. Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores s/n, Ciudad Universitaria 81223, Los Mochis, Sinaloa, México.

<sup>2</sup> Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil-Xalapa, Circuito Gonzalo Aguirre Beltran s/n, Zona Universitaria 91090, Xalapa, Veracruz, México.

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Física de Materiales, Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih. C.P. 31109, Mexico.

<sup>4</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. FIME – Centro de Innovación e Investigación en Ingeniería Aeronáutica. Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

### **RESUMEN**

En los últimos años se han estudiado las propiedades eléctricas de materiales conductores a base de cemento con adiciones de fibras o polvo de carbono. Una de las posibles aplicaciones de estos materiales es como una capa en la superficie del concreto y desempeñar la función de ánodo en un sistema de protección catódica por corriente impresa para el control de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Un ánodo de pasta de cemento conductor presenta ventajas sobre los materiales utilizados comúnmente en esta técnica. En el presente trabajo se estudió la distribución de corriente en el acero de refuerzo al emplear como ánodo una capa de una pasta de cemento adicionada con polvo de grafito (tamaño de partícula  $\leq 1\text{mm}$  y relación 1:1 con el cemento) y fibra de carbono (longitud  $\leq 1\text{cm}$ , diámetro de  $7\mu\text{m}$  y 1% en vol. en la mezcla)

**Palabras Clave:** Protección catódica, concreto, electrodo auxiliar, corriente, polvo de grafito

### **INTRODUCCIÓN**

Actualmente el desarrollo de nuevos sistemas de ánodos en la protección catódica para detener la corrosión en estructuras de concreto es un área de gran interés entre ingenieros y científicos en corrosión. Algunos ejemplos de sistemas anódicos que se han desarrollado incluyen la utilización de una malla de titanio activado, cinc termo-rociado, polímeros conductores y

pinturas conductoras. Todos estos sistemas presentan desventajas como alto costo de instalación, una alta resistencia eléctrica de contacto, diferencias en los coeficientes de expansión térmica en comparación con el concreto y una pobre resistencia a los agentes climáticos a mediano y largo plazo [1].

Además de los sistemas anódicos, mencionados en el párrafo anterior, se incluye la utilización de un revestimiento de mortero o pasta de cemento conductor, como electrodo secundario, adicionado con materiales de carbono.

Generalmente la conducción eléctrica en la pasta de cemento es debida al movimiento de los iones presentes en la solución de poro [2, 3]. El concreto seco no es un buen conductor de la electricidad, ya que la resistividad eléctrica de este material se encuentra en el orden de  $10^4$  Ohm-cm (exteriores) a  $10^8$  Ohm-cm (secado en horno) [4]. De hecho el concreto puede ser considerado como un material semiconductor. La diferencia en la resistividad eléctrica se debe al agua atrapada en la estructura de poros del concreto y los productos de hidratación disueltos en ella; por lo cual la pasta de cemento puede ser considerada como un conductor iónico. Un mejoramiento en sus propiedades eléctricas se puede lograr con la adición a la mezcla de materiales conductores de carbono (fibras de carbono, polvo de coque y polvo de grafito), los cuales con conductores electrónicos.

En estudios realizados en morteros y pastas de cemento adicionadas con fibras de carbono y polvos de grafito Chung D.D.L.[5] reporta valores de conductividad eléctrica de  $1.41 \times 10^{-1}$  S/m en mezclas adicionadas con 1% de fibra de carbono con un diámetro de  $10 \mu\text{m}$ ; y valores de conductividad de  $4 \times 10^{-3}$  S/m para una mezcla conteniendo 9.18% vol. de polvo de coque con tamaño de partícula  $< 75 \mu\text{m}$ . Algunas de las aplicaciones que se la han dado a morteros conductores y pastas de cemento incluyen su utilización como elementos en la puesta a tierra de sistemas eléctricos en edificios, protección contra rayos, sistemas de descongelamiento en caminos y puentes, monitoreo de trafico, apantallamiento electromagnético en edificios, sensores de deformación y pisos conductores para disipación de cargas electroestáticas.

La utilización de una capa de mortero conductor como ánodo en técnicas electroquímicas para el control de la corrosión en estructuras de concreto reforzado presenta ciertas ventajas sobre los materiales empleados comúnmente en estas técnicas, entre las que se encuentran: un menor precio en comparación con la malla de titanio activada o cinc termo-rociado, la capa de mortero conductor puede quedar instalado de forma permanente sobre la superficie de la estructura y ser reutilizada en tratamientos posteriores; además se puede lograr una mejor distribución de la densidad e corriente de protección, ya que la capa de mortero se puede aplicar sobre la totalidad de la superficie de la estructura como una delgada.

En base a lo anterior el objetivo del presente estudio es determinar el desempeño de este material compuesto como ánodo en la protección catódica por corriente impresa del acero de refuerzo, al utilizar como electrodo primario barras de grafito y un espesor de PCC de 10mm.

## **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

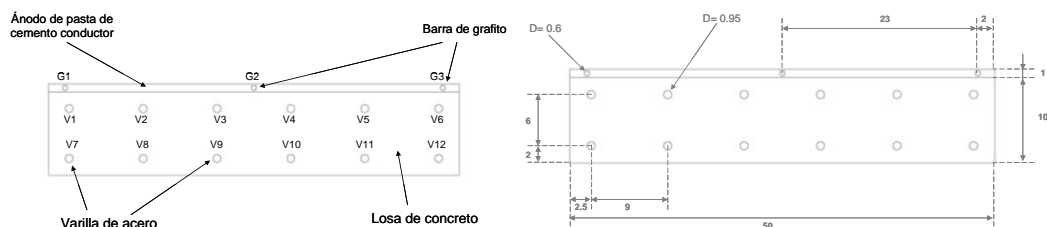
El presente estudio se llevo acabo en 2 losas de concreto (50 x50 x 10 cm) con relación a/c de 0.5, las proporciones de la mezcla se observa en la Tabla I, el cemento utilizado fue CPC30R. En cada losa se colocaron 12 varillas de acero (diámetro nominal de 3/8 de pulgada, 0.95 cm) con

una longitud cada una de 55cm y se pintó una longitud de 10 cm de los extremos con pintura epóxica como recubrimiento anticorrosivo del acero de refuerzo, dejando un área expuesta de 104.7 cm<sup>2</sup> por varilla. Una de las losas se contaminó con Cl<sup>-</sup>, utilizando como agua de amasado una solución de NaCl al 5%, la losa que no se contaminó se considera como blanco.

En la figura 1 se muestra la nomenclatura de las varillas en la losa de concreto, así como las dimensiones y separación de las varillas.

**Tabla I.** Proporciones de los materiales en relación del peso del cemento para concreto

Volumen (m <sup>3</sup> )	Agua (kg)	Agregados gruesos(kg)	Agregados finos (kg)	Cemento (kg)	Relación a/c
1	260	1441.7	839.8	520	0.5

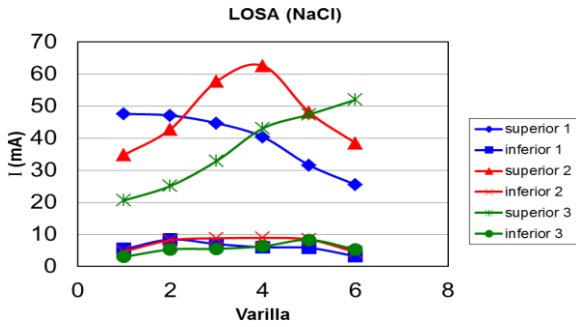


**Figura 1.** Losa de concreto y nomenclatura de las varillas de acero y barras de grafito (der.). Dimensiones del arreglo de varillas de acero y ánodo de pasta de cemento conductor (izq.).

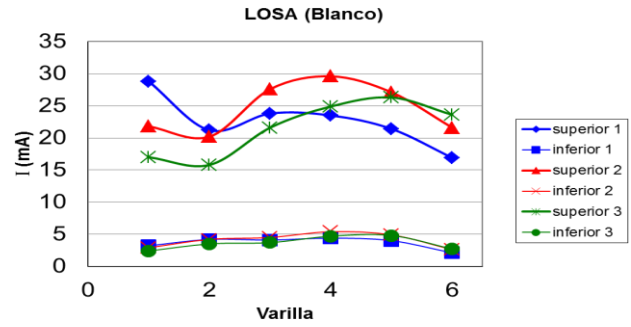
Como ánodo se aplicó sobre cada losa una capa de 1 cm de espesor de pasta de cemento conductora (PCC) con una conductividad eléctrica aparente de 64.4 mS/cm, medida por el método de 4 puntas de corriente directa [6]. Como electrodos primarios se utilizaron tres barras de grafito con un diámetro de ¼ de pulgada (0.635cm). Se energizó el sistema aplicando una densidad de corriente mínima de 20mA/m<sup>2</sup> sobre las varillas V7 y V12. La fuente de corriente empleada fue marca Steren modelo PRL-25 (15V-30A). Se midió la demanda de corriente de cada varilla para determinar la distribución de corriente, así como el potencial con respecto al electrodo de referencia calomel

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Distibución de corriente.** Un aspecto de gran relevancia en la aplicación de a PC en una estructura de concreto reforzado es lograr una distribución uniforme de la densidad de corriente aplicada en la totalidad de las varillas de refuerzo. Por este motivo al recubrimiento PCC se le embobieron tres barras de grafito como electrodos primarios (Figura 1) con la finalidad de garantizar la uniformidad de la densidad de corriente. Para poder determinar la distribución de corriente sellevo a cabo un estudio en el cual se aplicó una diferencia de voltaje de ocho volts entre el las doce varillas de acero y la PCC en cada losa; tomando en cuenta que las superiores son las que están más cerca a la PCC y las inferiores son las varillas que están más separadas de la pasta. La serie de color rojo es cuando se le aplico corriente por medio del electrodo primario central (G2); la de color azul el electrodo primario izquierdo (G1) y la verde el derecho (G3) (figura 2 y 3).



**Figura 2.** Intensidad de corriente contra varillas para losa cloruros

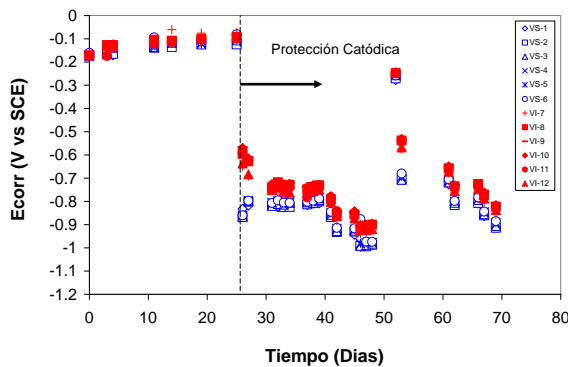


**Figura 3.** Intensidad de corriente contra varillas para losa blanco

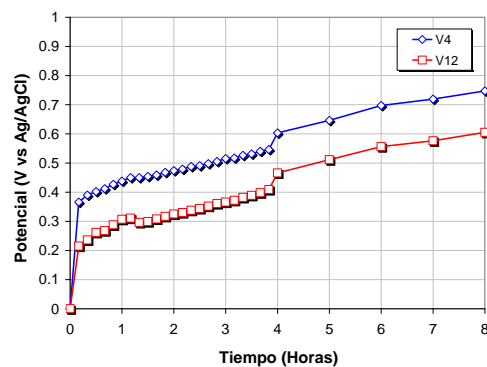
Se puede apreciar que para el caso de la losa contaminada con NaCl (Figura 2) la distribución de la corriente al aplicar la diferencia de voltaje en el electrodo primario central se alcanza un valor de 62 mA en la varilla 4, mientras que en las varillas VS1 y VS6 una corriente entre 35 y 40 mA, como se puede apreciar la varilla mas cercana al electrodo central drena una mayor cantidad de corriente, esto se puede atribuir a que la presencia de Cl<sup>-</sup> en el concreto incremento la conductividad eléctrica y el camino entre la V4 y G2 es el de menor resistencia eléctrica, dejando a los extremos con una menor intensidad de corriente. Ahora la situación de las varillas situadas en la línea inferior (V7-V12) muestra una distribución de corriente mas uniforme, presentando una variación entre 5 mA y 2mA.

Se observa que a las barras de acero que están en el lado superior, entendiéndose que son las que están más separadas, son las que casi no tienen intensidad de corriente.

**Protección catódica en losa blanco (sin contaminantes).** Se tomaron lecturas de los potenciales al aplicar la protección catódica por 36 días, se considera que para que las varillas estén protegidas, el potencial de corrosión debe de ser de  $-0.800$  mV; la intensidad de corriente por cada varilla es de 2 mA. En las gráficas siguientes, se observan los resultados de lo realizado anteriormente.



**Figura 4.** Potencial de Corrosión contra Tiempo para la losa Blanco.



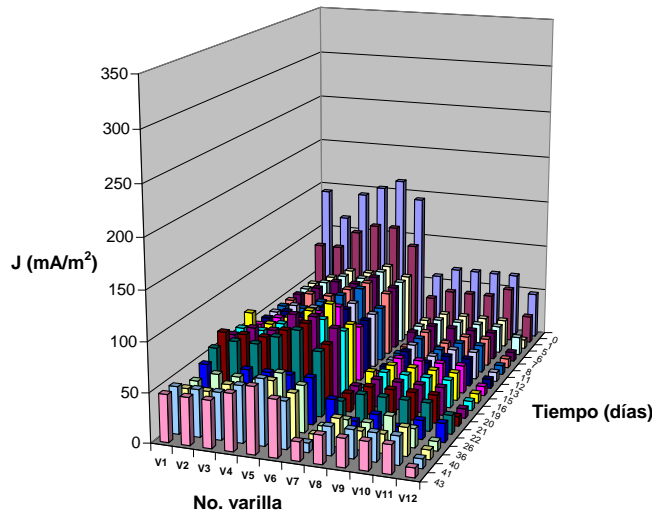
**Figura 5.** Depolarización contra Tiempo para la losa Blanco

En la figura 4 anterior se muestran los resultados antes y después de la aplicación de la protección catódica en donde las figuras de color rojo se refiere a las varillas mas retiradas del ánodo

mientras que las del color azul son las que están mas cerca de la entrada de corriente por lo tanto estas tienden a ser mas negativa. Esto ocurrió en la losa blanco.

Para estudiar la depolarización del potencial de corrosión, selecciono cual de las varillas era la que tenia mas intensidad de corriente y cual es la que tenia menos intensidad de corriente, en el caso de las losas, la varilla No. 4 es la que recibía mas corriente mientras que la varilla No. 12 era la que menos recibía.

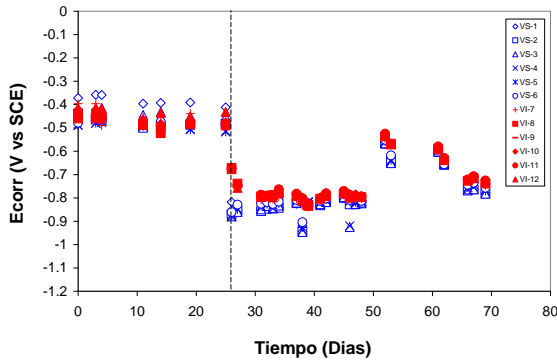
En al Figura 5 se muestra la depolarización de corrosión para la losa blanco tomando en cuenta que se estudiaron dos varillas, la de menos y mas intensidad de corriente, obteniéndose la grafica anterior, desconectándose las fuente por cuatro horas y tomándose lecturas a cada diez para después monitorearlas a cada hora durante 4 horas, buscándose una recuperación de 100 mV. Como se muestra las dos varillas tienen la misma tendencia.



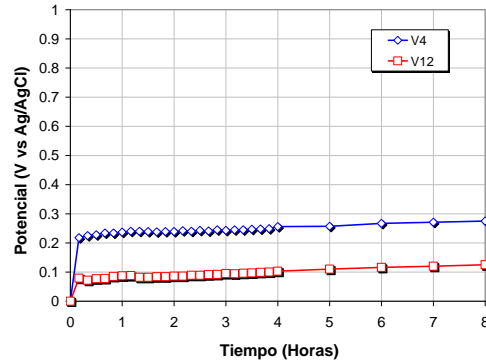
**Figura 6** Distribución de densidad de corriente en cada una de las varillas de la losa blanco

**Protección catódica en losa NaCl (contaminada con NaCl 5%).** En la Figura 6 se habla de la densidad de corriente que sufrieron las varillas, se muestra que durante los primeros días la densidad de corriente para todas las varillas de la losa blanco fue alta, mientras el tiempo de exposición pasaba la intensidad de corriente fue decayendo uniformemente.

Ahora hablando de la losa contaminada con cloruros se muestran a continuación las graficas correspondientes.



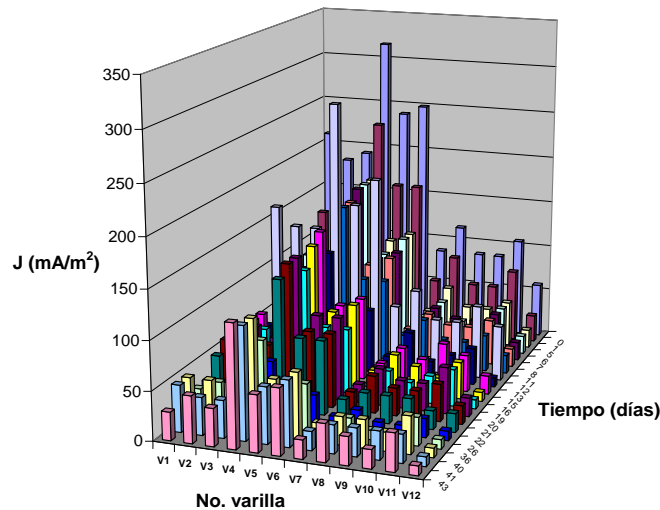
**Figura 7** Potencial de Corrosión contra Tiempo para la losa Cloruros.



**Figura 8** Depolarización contra Tiempo para la losa Cloruros.

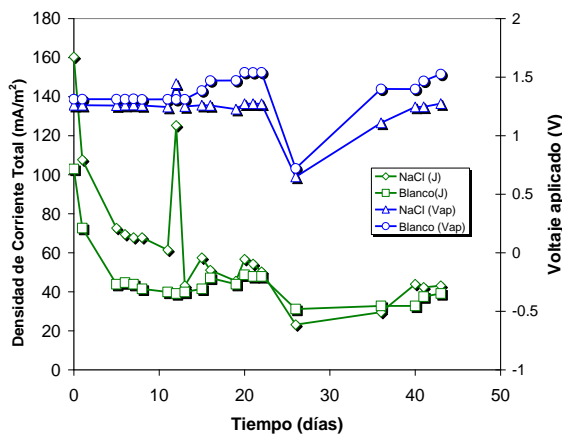
Como se mostró en la Figura 4, lo mismo paso para la losa cloruros, como se muestra en la Figura 7 tienen la misma tendencia, las varillas mas cercanas al ánodo son mas negativas mientras que las otras son un poco mas positivas, en esta grafica no se ve tanto la decaída que existe en el antes y el después de la protección (línea punteada) como en la de la losa blanco, esto es por la contaminación de los cloruros.

Para la depolarización que se habla en la figura 8 se nota mucho la comparación con la figura 5 de la losa blanco. Para esta losa contaminada no se nota tanto el despunte de potencial, no hay mucha diferencia de depolarización en cuento a las cuatro horas de estar conectada hasta continuar con las ocho horas, pero la tendencia y los resultados son muy similares.

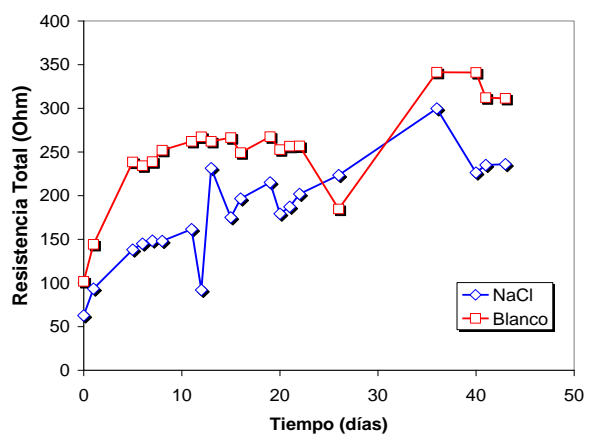


**Figura 9.** Distribución de densidad de corriente en cada una de las varillas de la losa cloruro.

En la figura 9 anterior se muestra la densidad de corriente en donde se observa un poco de desorden y variación de amperaje para las varillas, esto por el contenido de cloruro de la losa, pero en comparación con la losa blanco la tendencia es la misma, mientras pasa el tiempo la corriente es menos densa.



**Figura 10** Densidad de corriente total y voltaje total aplicado.



**Figura 11.** Resistencia total del circuito.

En la Figura 10 se representa la distribución de la densidad y el voltaje total aplicado a las losas, con la figura correspondiente a cada losa. Para el voltaje aplicado se muestra prácticamente una secuencia uniforme excepto por la decaída que existe aproximadamente en el día veinticinco, pero manejan un rango de voltaje entre 1.5 y 1. Para la densidad de corriente se muestra una decadencia conforme los días de exposición, todavía un poco mas en la losa blanco.

En la Figura 11 se muestran las resistencias totales, como se puede notar en la losa blanco existe mas resistencia que la de cloruros, pero manteniendo la misma secuencia.

La protección catódica se llevó a cabo con éxito gracias a que cumplió con los parámetros tales como: se llevaron los potenciales hasta -800 mV y una corriente de por varilla de 0.2 mA, llevando al acero a una zona de pasividad y de esta manera controlar la corrosión del acero. La aplicación de una pasta de cemento conductor con un espesor de 10 mm es capaz de proteger catódicamente una estructura reforzada con acero y contaminada con cloruros, gracias a que; como se muestra en las graficas 3.6 y 3.9 con forme pasaba el tiempo va disminuyendo la densidad de corriente, siendo notorias las varillas superiores e inferiores; los cloruros llevaron a la varillas a alanzar una densidad de corriente entre 300 y 350 mA/m<sup>2</sup> mientras que la losa blanco fue mas bajo.

## **CONCLUSIONES**

Después de haber realizado los estudios correspondientes e interpretado los resultados obtenidos en este estudio, conforme a la hipótesis estipulada al inicio de la investigación se lograron los objetivos deseados, teniendo como conclusiones los siguientes puntos:

1. Se comprobó que la protección catódica si cumple como método eficaz para eliminar o disminuir la corrosión es estructuras de concreto reforzado contaminadas con cloruros. Llevando al acero a una zona de pasividad.
2. El ánodo de pasta de cemento conductora adicionada con polvo de grafito y fibra de carbono que fue capaz de proteger catódicamente el acero de refuerzo en el concreto contaminado con cloruros.
3. La distribución de corriente se logro con éxito para las 12 varillas de acero de refuerzo gracias al recubrimiento de cemento conductor de 10 mm de espesor y a la corriente aplicada.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo financiero mediante el proyecto PROFAPI 2010/024. También se agradece al Ing. Rafael Rendón de Zoltek Mexico S.A. de C.V. por la facilidades otorgadas para la obtención de la fibra de carbono utilizada en este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] J.P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete: understanding, investigation and repair, 2nd edition, Taylor and Francis Group, (2007).
- [2] Ping Xie, Ping Gu, J.J. Beaudion, J. Materials Sci., 31 (1996) 4093.
- [3] E.J. Garboczi, L.M. Schwartz, D.P. Bentz, Advanced Cement Base Materials, 2 (1995) 169.
- [4] D. A. Whiting, M.A. Nagi, Electrical Resistivity of Concrete-A Literature Review, R&D Serial No. 2457, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA (2003).
- [5] D.L.L. Chung, Advances in Cement Research, 16 (2004) 167.