



**PERDIDA DE ADHERENCIA EN LA INTERFASE ACERO-CONCRETO DEBIDO AL ION  $K^+$  Y  $Na^+$  EN UNA MEZCLA MODIFICADA CON FLY ASH BAJO PROTECCION CATODICA**

**J. García.<sup>1</sup>, C. Barrios.<sup>2</sup>, F. Almeraya.<sup>1</sup>, I. López.<sup>1</sup>, C. Gaona.<sup>1</sup>, A. Martínez.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Depto. de Física de Materiales/Grupo corrosión. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31109, Chihuahua, Chih., México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa Campus Los Mochis, UAS, Facultad de Ingeniería, Fuente de Poseidon y Prol. Angel Flores SN, Fracc. Las Fuentes, C.P. 81223, Los Mochis Sinaloa, México,

**RESUMEN**

En este trabajo se estudio la degradación de adherencia en la interfase acero-concreto bajo condición de protección catódica por corriente impresa, en dos mezclas elaboradas de cemento portland ordinario (CPO) y sustituyendo un 15% de cemento por ceniza volante (fly ash) (CPOFA). Los especímenes se evaluaron con dos niveles de protección: protección ( $-900 \pm 100$  mV vs Ag/AgCl) y sobreprotección ( $-1,200 \pm 100$  mV vs Ag/AgCl). De acuerdo a el análisis químico mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) realizado a la pasta de concreto en la interfase acero-concreto, se observa mayor concentración de ion potasio ( $K^+$ ) y ion sodio ( $Na^+$ ) en los especímenes con nivel de sobreprotección, lo cual presenta una perdida de adherencia de acuerdo a los resultados por las pruebas de tensión.

**Palabras clave:** Protección Catódica, Corriente Impresa, Adherencia acero-concreto,  $K^+$ ,  $Na^+$ , Fly ash.

In this work is studied the degradation of adhesion in the interphase steel-concrete under impressed current cathodic protection condition on two mixtures made with ordinary Portland cement (OPC) and replacing a 15% of cement by (fly ash) (OPCFA). The specimens were evaluated with two levels of protection: protection ( $-900 \pm 100$  mV vs Ag/AgCl) and over protection ( $-1,200 \pm 100$  mV vs Ag/AgCl). According to chemical analysis by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) realized to the concrete powder in the interphase steel-concrete is observed a higher concentration of potassium ( $K^+$ ) and sodium ( $Na^+$ ) in specimens with overprotection level, which present a smaller adherence according to the results by the pull out test.

**Key words:** cathodic protection, impressed current, rebar-concrete adhesion,  $K^+$ ,  $Na^+$ , Fly ash.



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



### INTRODUCCION

El esfuerzo de adherencia se presenta principalmente como consecuencia de la fuerza cortante, entre el elemento de refuerzo y el concreto que lo envuelve, y se puede describir como un esfuerzo local de cortante por unidad de área de la superficie de la varilla<sup>1</sup>. La adherencia cumple fundamentalmente dos objetivos: asegurar el anclaje de las varillas y transmitir las tensiones tangentes periféricas que aparecen en la armadura principal como consecuencia de las variaciones de su tensión longitudinal. El fenómeno de la adherencia esta originado por dos tipos de causas, una de naturaleza físico-química y la otra de carácter netamente mecánica<sup>2</sup>. Las primeras provocan la adhesión del acero con el concreto a través de fuerzas capilares y moleculares desarrolladas en la interface, las de origen mecánico son mas importantes y están constituidas por la resistencia al deslizamiento debida a la penetración de pasta de cemento en las irregularidades de las varilla de acero. El mecanismo de la adherencia puede asignarse a tres causas: adhesión, rozamiento (tensiones tangentes en el concreto) y acuñaamiento (en caso de varilla corrugadas).

Por otro lado una de las causas principales considerada en la limitada duración de las estructuras de concreto reforzado es la corrosión por penetración de cloruros  $\text{NaCl}$ <sup>3</sup>. Por lo cual se recurren en la práctica a diferentes técnicas para combatir este problema, entre estas, las más utilizadas es la técnica de protección catódica la cual involucra la supresión del flujo de corriente en la celda galvánica, ya sea por la provisión externa de corriente en la dirección opuesta o por el uso de ánodos de sacrificio. El método de la corriente impresa es aplicado comúnmente para la protección contra la corrosión en estructuras de concreto reforzado contaminado con cloruros<sup>4,5</sup>. Sin embargo pueden existir efectos secundarios sobre estas que afecten el enlace que existe entre la interfase del acero de refuerzo y el concreto. Física y químicamente la no homogeneidad de la distribución de la corriente de protección catódica puede no ser uniforme y quedan áreas sin protección en la estructura<sup>6,7</sup>. De acuerdo a estudios realizados se ha reportado que la fuerza de adherencia disminuye debido a la corriente de protección y sobreprotección catódica, Ya que esta produce un suavizamiento en los silicatos de calcio hidratados (C-S-H gel)<sup>8-9</sup>. Se ha encontrado que este fenómeno es ocasionado por la emigración de iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  entre la interfase acero concreto, durante la polarización catódica de la varilla ocasionando este suavizamiento en el C-S-H gel<sup>10-11</sup>.

En este trabajo se estudia la fuerza de adherencia que pierde el acero de refuerzo embebido en el concreto al estar bajo condición de protección y sobreprotección catódica por corriente impresa. Considerando para esto dos tipos de mezcla: cemento portland ordinario y la otra sustituyendo un 15 % del cemento por fly ash, ambas con una relación agua-cemento  $a/c= 0.66$ . Las cenizas volantes (fly ash) se utilizan en el concreto por varias razones económicas y ambientales. Por otra parte, las partículas de las cenizas volantes reaccionan con el hidróxido de calcio, produciendo productos de hidratación que disminuyen fuertemente la porosidad del concreto<sup>12</sup>. Estudios han reportado la alta calidad de adhesión y el mejoramiento mecánico al utilizar estas cenizas y la escoria de alto horno (BFS) debido al incremento de los volúmenes del C-S-H gel<sup>13</sup>

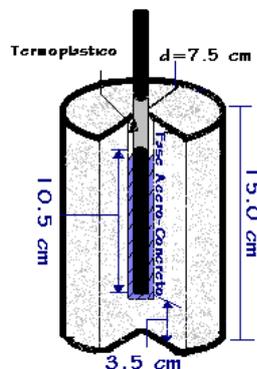
## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Se elaboraron 14 especímenes cilíndricos de concreto, con relación a/c de 0.66 utilizando como refuerzo una varilla de acero al carbono 1018, embebida 10.5 cm en el centro de estos cilindros, con un diámetro de 3/8 in (0.95 cm), un extremo de la varilla se recubrió con cinta aislante termoplástica dejando un área expuesta de 31.42 cm<sup>2</sup>. Las dimensiones del espécimen cilíndrico fue de 15 cm de alto por 7.5 cm de diámetro como lo muestra la fig. 1. De los cuales en 6 de ellos se reemplazó un 15% de cemento por fly ash, y dos no tuvieron ningún tipo de exposición siendo las muestras control. Los 14 especímenes se sometieron a 28 días de curado sumergidos en agua.

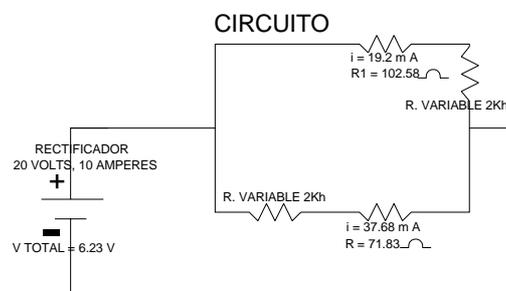
**TABLA 1.- Dosificación de las mezclas para la relación a/c de 0.66, cemento portland Tipo 1.**

Mezcla	Agua kg/m <sup>3</sup>	Cemento kg/m <sup>3</sup>	Agregado grueso kg/m <sup>3</sup>	Agregado fino kg/m <sup>3</sup>	Fly ash kg/m <sup>3</sup>
CPOFA	205	263.5	1049	781	46.5
CPO	205	310	1049	781	---

Posterior a la etapa de curado los cilindros de ambas mezclas se sumergieron en una solución de NaCl al 3.5% con la nomenclatura mostrada en la tabla 2, y se les instaló un sistema de protección catódica por corriente impresa. Como ánodo se utilizaron barras de grafito de 1/4 in. (0.635 cm) de diámetro y una longitud de 15 cm. El rectificador utilizado fue de 20 V 10 A, seis de los cilindros se les sometió a un criterio de potencial de protección de  $-900 \pm 100$  mV, y al resto de sobreprotección de  $-1,200 \pm 100$  mV vs Ag/AgCl<sup>14</sup>. El tiempo de exposición fue de dos, tres y cinco meses durante este tiempo se mantuvieron con potenciales de protección y sobreprotección, para lograr esto se realizo un circuito eléctrico y dejar fluir la corriente necesaria para obtener estos potenciales como lo muestra la Fig.2, utilizando como electrodo de referencia Ag/AgCl y obteniendo el arreglo experimental final de la fig. 3



**Figura 1.- Dimensiones del cilindro de experimentación.**



**Figura 2.- Circuito para mantener los especímenes en potenciales de protección y sobreprotección.**

Después de los tiempos de exposición bajo condición de protección y sobreprotección catódica se extrajeron los especímenes de ambas mezclas y se les realizó una prueba de tensión con la maquina Instron 4469 como lo muestra la fig. 4, este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM E8<sup>15</sup>. Posteriormente se extrae un gramo de polvo a una profundidad de 1cm y un gramo de la interfase que existe entre el acero y el concreto en ambas mezclas. A estas se les realiza un aforamiento de 1g en 100 ml de solución y se les deja agitando mediante 24 horas; Esto con el fin de alcanzar una mejor disolución, a estas muestras se les realizo un análisis químico para conocer la concentración de iones  $K^+$  y  $Na^+$  mediante espectrofotometría de absorción atómica (FAAS) el análisis se realizo con un espectrofotómetro modelo Avanta Sigma. Una vez realizado esto, se cortan pequeñas muestras de concreto de ambas mezclas, en la interfase que existe entre el acero de refuerzo y el concreto, y se hacen pruebas de microscopia electrónica de barrido (MEB). El análisis se realizo con un microscopio marca Jeol JSM-5800LV, con el objetivo de conocer la microestructura de la mezcla con ceniza volante (fly ash) en la interfase acero-concreto a diferencia del cemento portland ordinario.

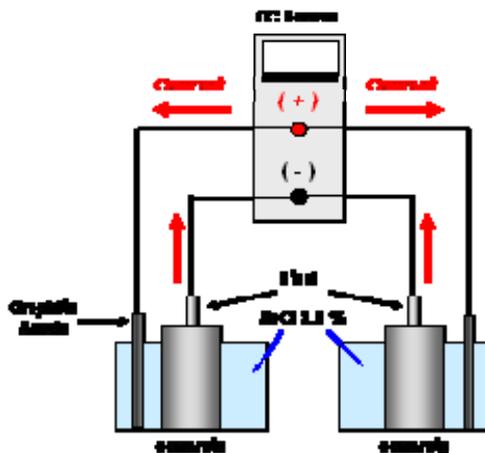


Figura 3.- Arreglo experimental del sistema de protección catódica para los especímenes



Figura 4.- Maquina universal para realizar pruebas de tensión, Modelo instron 4469

**TABLA 2.- NOMENCLATURA DE CILINDROS EXPUESTOS**

Nomenclatura	Tipo de cilindro
CPOP	Cemento Portland ordinario protegido
CPOSP	Cemento Portland ordinario sobreprotegido
CPOFAP	Cemento Portland mas fly ash protegido
CPOFASP	Cemento Portland mas fly ash sobreprotegido

### DISCUSION DE RESULTADOS

En la fig. 5 Se observa como al suministrarle la corriente de protección catódica adecuada y con un potencial de protección, la emigración de iones  $K^+$  son menores que cuando se le suministra un flujo de corriente mayor y por lo tanto un potencial de sobreprotección, Para tiempos de exposición de dos meses. Por otra parte se visualiza que la emigración de iones  $K^+$  son mayores



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



en el CPO, que en la mezclas hechas con ceniza volante (fly ash) CPOFA en la interfase acero-concreto con sobreprotección.

En la fig. 6 se puede ver como la emigración de los iones  $\text{Na}^+$  es en mayor cantidad que en los iones  $\text{K}^+$ . Es notorio que al tener mayor flujo de corriente emigran con mayor facilidad hacia la interfase acero-concreto en ambas mezclas. Sin embargo también nos muestra como en las mezclas hechas con fly ash tiene mayor flujo de iones  $\text{Na}^+$ , En los tiempos de dos y cinco meses, tanto en la protección como en la sobreprotección que en el CPO, esto puede ser porque la estructura atómica del ion  $\text{Na}^+$  es mas pequeña que la del ion  $\text{K}^+$  y por lo tanto puede migrar hacia la interfase acero-concreto en los pequeños poros de la mezcla de CPOFA, lo cual no sucede con el ion  $\text{K}^+$ . A diferencia de tres meses de exposición que solo fue mayor la de protección. Es notario que en los especímenes expuestos a dos y cinco meses la emigración de iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , no se comportaron de una forma homogénea, a diferencia de los especímenes expuestos a tres meses, que si lo mantuvieron de acuerdo a las figuras 5,6.

En la figura 7 se observa la concentración de  $\text{K}^+$  a un centímetro de profundidad y se puede observar que en los especímenes con potencial de protección tienen mayor concentración de iones, esto posiblemente por que no tienen la suficiente facilidad de fluidez hacia la interfase acero-concreto. Por otra parte en los especímenes con potencial de sobreprotección se tiene menos concentración esto se le puede atribuir a que como se le aplica mas corriente los iones  $\text{K}^+$  pueden migrar de una manera mas fácil. Por otro lado en la concentración de iones  $\text{Na}^+$  se puede notar que estos se concentran más en los especímenes con sobreprotección debido a que la aplicación de mayor corriente facilita el flujo de iones  $\text{Na}^+$  por mecanismo de difusión<sup>16</sup>, provenientes del medio acuoso NaCl hacia la masa de concreto como lo muestra la fig. 8.

La Figura 9 muestra los resultados de pérdida de adherencia obtenidos de las pruebas de tensión, comparándolos con las mezclas control. Se puede observar que a dos meses de exposición la mezcla de CPO tanto en protección como en sobreprotección tuvieron perdida, siendo más considerable la del espécimen en sobreprotección, a diferencia de la mezcla de CPOFA que solo tuvo perdida en el nivel de sobreprotección. En cuanto a tres meses de exposición se puede notar solo perdida de adherencia en el espécimen CPO sobreprotegido y que de acuerdo a los resultado obtenidos por análisis químico este espécimen tuvo mayor concentración de ion  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , a cinco meses de exposición se puede notar que la perdida de adherencia se refleja en ambos niveles de protección para la mezcla CPOFA, ya que en la mezcla de CPO solo fue en el nivel de sobreprotección, lo cual esto refuerza nuestros resultados del análisis químico debido a que estos en promedio tuvieron mayor concentración de iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  en la interfase acero-concreto.

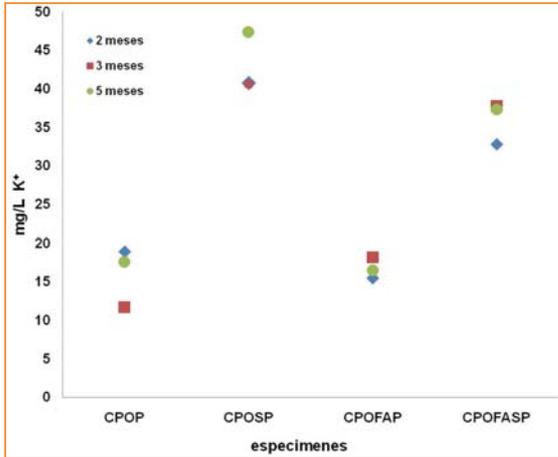


Figura 5.- Penetración de iones  $K^+$  en la interfase acero- concreto.

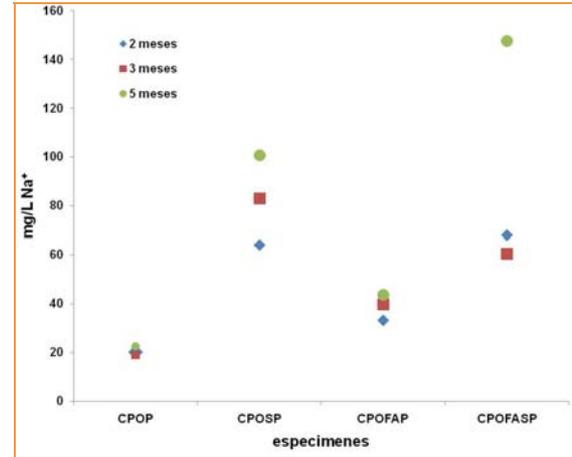


Figura 6.- Penetración de iones  $Na^+$  en la interfase acero- concreto.

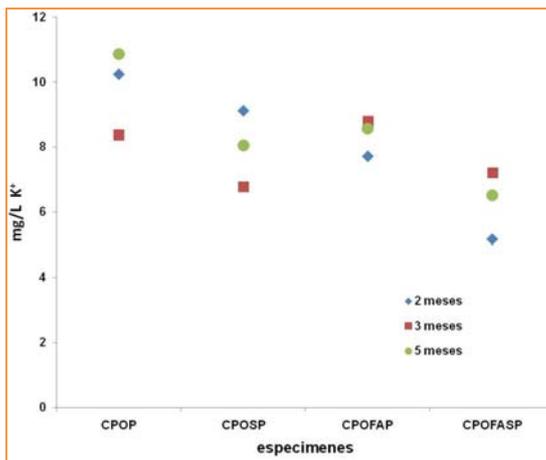


Figura 7.- iones  $K^+$  a un cm de profundidad

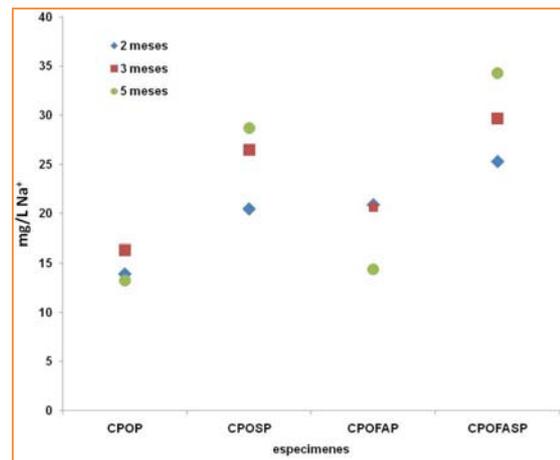


Figura 8.- iones  $Na^+$  a 1 cm de profundidad.

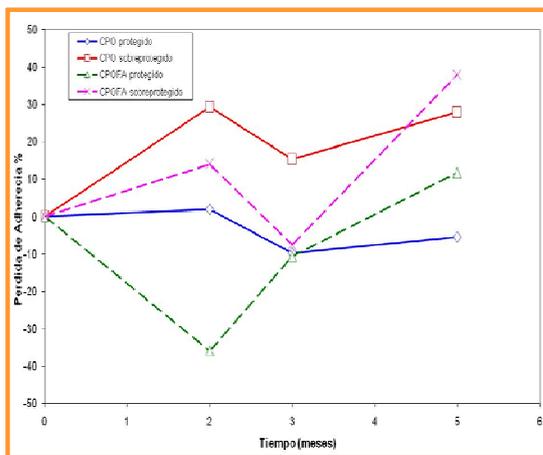


Figura 9.- Pérdida de adherencia en especímenes

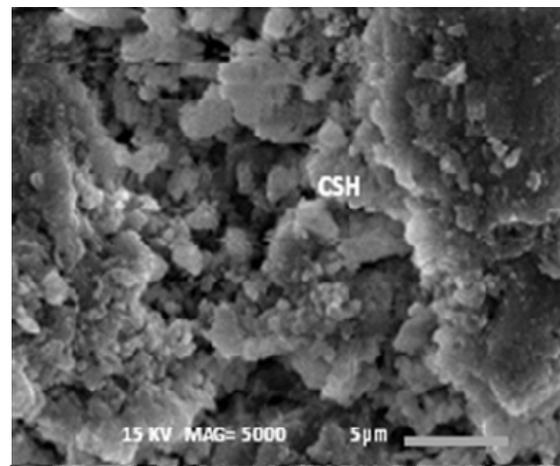


Figura 10.- CPOFA protegido. 5000x

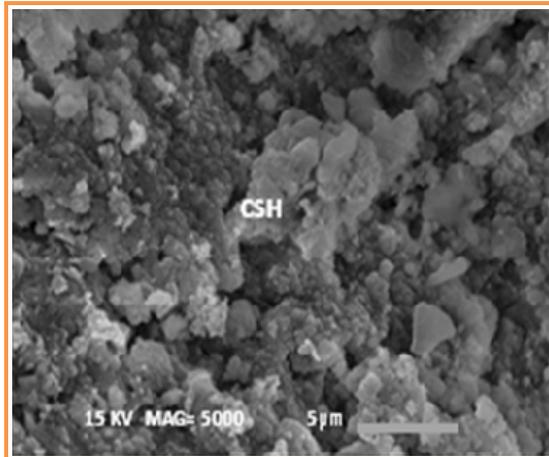


Figura 11.- CPO protegido. 5000x

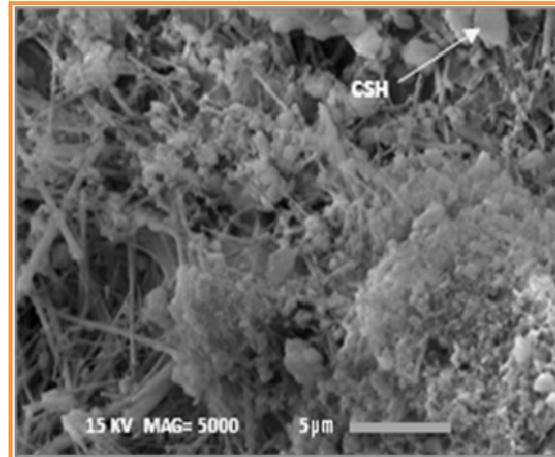


Figura 12.- CPO sobreprotegido. 5000x

En la fig 10. Se puede visualizar la forma homogénea de C-S-H gel con potencial de protección y con mezcla realizada con CPOFA, por otro lado se puede notar también en la fig. 11 la microestructura de un espécimen con potencial de protección y mezcla de CPO la cual contiene productos de hidratación como etringita<sup>13</sup> en forma de aguja y C-S-H gel, pero es notoria la diferencia contra el espécimen hecho con CPOFA ya que su microestructura es mucho mas homogénea con respecto al CPO. De acuerdo a los datos arrojados por las pruebas de tensión (pull out) y los de análisis químico (FAAS), se puede reforzar estos resultados con la fig. 12 en la cual se muestra la escasa cantidad de productos de hidratación en un espécimen con potencial de sobreprotección y una mezcla de CPO. Con estos resultados se puede afirmar que la corriente de sobreprotección catódica tiene efecto en el suavizamiento del C-S-H gel.

## CONCLUSIONES

La pérdida de adherencia esta relacionada a un incremento en la concentración de iones  $K^+$  y  $Na^+$ , en la interfase acero concreto. Provocado por el incremento de corriente al estar en condición de sobreprotección.

El incremento en la concentración de los iones  $K^+$  y  $Na^+$  debido a la condición de sobreprotección influyo en el suavizamiento del gel C-S-H con esto tener una mayor perdida de adherencia en la interfase acero concreto.

En los especímenes con mezcla CPO se observo un mejor comportamiento en cuanto a perdida de adherencia a 5 meses de exposición que la mezcla de CPOFA, esto se soporta con los resultados de FAAS ya que en este tiempo de exposición la penetración de los iones  $Na^+$  fueron mayores en esta mezcla.

En los especímenes con CPOFA tuvieron resultados mejores a dos y tres meses de exposición, en la que la diferencia de perdida de adherencia a dos meses si fue considerable. Por lo cual la



## 3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



mezcla de CPOFA arrojó los mejores resultados de pérdida de adherencia a diferencia de los obtenidos de la mezcla de CPO.

### AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen al Ing. Arturo Hernández del Laboratorio de Pruebas Mecánicas del CIMAV por el apoyo brindado para la realización de los ensayos de tensión (pull out) requeridos para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### BIBLIOGRAFIA

- [1]. Edward G. Nawy, *Concreto Reforzado un Enfoque Básico*, 10 (409-417) 1988.
- [2]. P. Jiménez, A. Garcia Meseguer, F. Moran Cabre, *El hormigón Montoya-Mesenguer-Moran 1*(145-168)
- [3]. C. Andrade, *Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from ionic Migration Cement and Concrete Research*, 23(724-742) 1993.
- [4]. P. Pedferri, *Cathodic Protection and Cathodic Prevention*, *Constr. Build. Mater.*10, 391–402 (1996).
- [5]. Svolvær, Norway, *Cathodic Protection of Reinforced Concrete—Principles and Applications*, *Proceedings of the International Conference on Repair of Concrete Structures. From Theory to Practice in a Marine Environment*, (123–131) 1997.
- [6]. B.S Wyatt, D.J. Irvine, *A review of Cathodic Protection of Reinforced Concrete*, *Mater. Perform.* 26 (12-21) (1987).
- [7]. J.A. Lehmann, *Cathodic Protection of Reinforced concrete structures*, *Mater. Perform.* 26 79-81 (1987).
- [8]. C.E. Locke, C. Dehghanian, L. Gibbs, *Effect of Impressed Current on Bond Strength Between Steel Rebar and Concrete*, *NACE Corrosion* 83, Paper No. 178, pp 178/1–178/16 , (1983).
- [9]. J.J. Chang, W. Yeih, R. Huang, *Degradation of the Bond Strength Between Rebar and Concrete due to the Impressed Cathodic Current*, *J. Mar. Sci. Tech.* 7 (2), 89– 93 (1999).
- [10]. J.J. Chang, *A study of the Bond Degradation of Rebar due to Cathodic Protection Current*, *Cement and Concrete Research*, 32 (657–663) 2002.
- [11]. Rasheeduzzafar, M.G. Ali, G.J. Al-Sulaimani, *Degradation of Bond Between Reinforcing Steel and Concrete due to Cathodic Protection Current*, *ACI Mater. J.* 90 (1) 8– 15 (1993).
- [12]. A.L.A. Fraay, J.M. Bijen, Y.M. de Haan, *Cem. Concr. Res.* 19, 235 (1989).
- [13]. Hanifi Binicia, Ismail H. Cagatayb, Tahir Shahc, Selim Kapurd, *Mineralogy of Plain Portland and Blended Cement Pastes*, *Building and Environment*,(2007)
- [14]. J. H Morgan, Imber Grove, Esher July, *Cathodic Protection* , 10 (448-449) 1959.
- [15]. ASTM E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]1, 2 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.02., 3 Annual Book of ASTM Standards, Vol 01.03., 2000



**3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008**  
Chihuahua; Chih. México  
Del 12 al 14 de Noviembre



- [16]. C. Andrade, M.A. San Juan, A. Recuero and O. Rio, Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from Migration Experiments, in non Steady-State Conditions, Cemen and Concrete Research, 24(1214-1228) 1994.