

## PROTECCION CATODICA POR ANODOS DE SACRIFICIO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

O. T. de Rincón, A. R. de Carruyo y O. García  
División de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Universidad del Zulia  
Maracaibo, Venezuela

### RESUMEN

En los últimos años, los Ingenieros en Corrosión en varias partes del mundo han desarrollado e instalado Sistemas de Protección Catódica para el control de la corrosión del acero de refuerzo del concreto. La mayor aplicación, con el sistema de Corriente Impresa, in embargo, en áreas donde no se dispone de corriente continua, donde el mantenimiento periódico de control del Sistema de Protección (rectificadores por ejemplo) no es predecible, como es el caso, o donde se pierde tiempo debido al mal funcionamiento de los rectificadores o vandalismo, un sistema basado en Anodos de Sacrificio puede ser preferible. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue el de investigar si la protección catódica por Anodos de Sacrificio podía ser utilizada para la protección del acero de refuerzo del concreto con aplicación específica a los pilotes del Puente sobre el Lago de Maracaibo.

Se realizaron pruebas tanto a nivel de laboratorio, como de campo para determinar si este sistema era o no factible. En el laboratorio, se prepararon bloques de concreto reforzado con Protección Catódica, por Anodos de aleaciones de aluminio y Zinc, embebidas en el concreto.

A nivel de campo, se instaló, en los pilotes de prueba situados al norte del Puente, un sistema de Protección Catódica con ánodos de la aleación de aluminio. Los resultados indican, que el ánodo de aluminio puede ser utilizado para la protección catódica de este sistema, siempre y cuando el concreto esté humedecido, no así el Zinc. En caso contrario, en concreto seco, Protección Catódica por ánodos de sacrificio no debe usarse.

### ABSTRACT

In the last few years, the Corrosion Engineers in different part of the world had been developing and installing Cathodic Protection Systems to control the corrosion of reinforced concrete structures. Most of the work on application of cathodic protection of steel reinforced concrete structures has centered on the use of impressed current systems. However, in areas where AC current is not available, where periodic maintenance of control rectifiers will be costly, or where down time due to rectifier malfunctions or vandalism is to be

expected, a system based on sacrificial anodes may be preferable. Therefore, the objective of this work was to investigate if Sacrificial Anodes Cathodic Protection System can be used to protect the steel reinforced concrete structures with particular application to the piling of the bridge over Lake Maracaibo.

Some tests were done in the laboratory level and in the field to assess whether this system can be applied. In the laboratory, reinforced concrete blocks were prepared with cathodic protection, using Al and Zn alloys as sacrificial anodes embedded in concrete.

In the field, it was installed a cathodic protection system, using an Aluminium alloy as sacrificial anode, on two test piling located north of the bridge.

The results of this study indicate that a sacrificial anode cathodic protection system based on Aluminium alloy can be used to protect the steel in reinforced concrete, if there is enough humidity in it. The zinc alloy did not show good results. On the other hand, on dry concrete, cathodic protection using sacrificial anodes can not be used.

### INTRODUCCION/ANTECEDENTES

En los últimos años, ha habido un auge en el uso de estructuras de acero recubiertas con concreto, por lo cual se ha hecho especial hincapié en el estudio de las causas y los problemas asociados a estas estructuras, por efectos del medio en el que se encuentren y por el paso del tiempo. Dentro de estas investigaciones es la corrosión del refuerzo del acero en el concreto, uno de los factores principalmente estudiados, en especial en Venezuela, específicamente en la Región Zuliana, donde se encuentra una de las estructuras de mayor importancia socio económica del país, como es el caso del Puente Sobre el Lago de Maracaibo "General Rafael Urdeneta" Foto 1.

En líneas generales, bajo condiciones normales de exposición, se ha aceptado que la corrosión del acero de refuerzo en el concreto es despreciable, debido a que el acero se encuentra pasivado por la formación de una fina película protectora de óxido de Hierro ( $Fe_2O_3 \cdot \gamma$ ); alcanzando un potencial,  $>-250$  mV respecto al electrodo de  $Cu/SO_4$  saturado. Sin embargo, cuando se introduce una con-



Foto No. 1.- Puente Sobre el Lago de Maracaibo

dición anormal, la corrosión puede comenzar y progresivamente causar gran deterioro del refuerzo. Esta condición anormal podría ser un medio con alto contenido de  $Cl^-$  y especialmente si el espesor de la cubierta de concreto sobre el refuerzo es inadecuado o si el concreto no es completamente compacto y no forma un revestimiento continuo sobre la superficie del refuerzo. Bajo estas condiciones puede ocurrir una alta corrosión del mismo.

Quando los niveles de cloruros son mayores de 0,65 a 0,77  $Kg/m^3$  (1), se produce la corrosión del refuerzo como ya ha sido estudiado y demostrado. La detección de la presencia del acero corroyéndose en concreto puede ser realizada midiendo el potencial del acero con respecto a un electrodo de  $Cu/SO_4Cu$  saturado, Stratfull (2) y Arup (3) indican que la corrosión del acero, en concreto armado, ocurre a potenciales de éste más negativos que  $-350 mV$  vs.  $Cu/SO_4Cu$  saturado.

Actualmente existen estructuras de concreto reforzado, que se encuentran en medios particularmente agresivos, por la excesiva presencia de  $Cl^-$ ; como es el caso de puentes y plataformas costera fuera, que presentan un gran deterioro a causa de la corrosión.

Por tal motivo, algunos investigadores se han dedicado al estudio y aplicación de diversas técnicas con el fin de prevenir o detener la corrosión del acero de refuerzo. Sin embargo, en estructuras viejas, donde ya el proceso es irreversible, Protección Catódica sería la única técnica que pudiese frenar ese deterioro.

Resultados emitidos por organismos internacionales de alta jerarquía en vialidad (4), indican que la protección catódica es el único sistema de protección que realmente detiene el proceso de corrosión y adicionalmente es un sistema económico en comparación con otros métodos de reparación de estructuras de concreto corroídas.

La protección catódica del acero embebido en

concreto es relativamente reciente, por lo cual no existen criterios, claramente definidos de protección. Sin embargo, en la actualidad, se vienen aplicando los comúnmente utilizados en suelos y agua de mar (5). Pero, como las características de estos medios con respecto a las del concreto (6, 7, 8) son extremadamente diferentes, especialmente en cuanto a pH y resistividad, la aplicación de estos criterios en algunos casos no han dado buenos resultados. Debido a esto, investigadores como Hausman (5), Ward (9), Vrable (10,11), Whiting (12, 13, 14) y Slater (6), entre otros; se han dedicado a la obtención de criterios de protección utilizables en aceros revestidos por concreto contaminado con cloruros, como en ausencia de éstos.

Mucho del trabajo sobre aplicación de protección catódica, a estructuras de concreto reforzado se ha centrado en sistemas de corriente impresa debido a que se asumía que la alta resistividad del concreto no permitía el uso de ánodos de sacrificio. Ahora bien, en áreas donde no se dispone de corriente continua, donde el mantenimiento periódico de control de rectificadores sería muy costoso o donde se pierde tiempo debido al mal funcionamiento de los rectificadores o vandalismo, un sistema basado en ánodos de sacrificio puede ser preferible. D. Whiting y D. Stark (14) han estudiado por mucho tiempo ánodos de Cinc para su uso en concreto con resultados satisfactorios.

Evaluaciones de ánodos de sacrificio de Aluminio, Cinc y Magnesio, efectuados por Fernández y Romero (15) indican que sólo los dos primeros son de factible uso para la protección del refuerzo de acero del concreto, lo cual fue posteriormente corroborado por Rincón, Carruyo y Romero (16) quienes en estudios realizados a nivel de laboratorio, usando aleaciones de Aluminio, aleación de Magnesio y aleación de Cinc como ánodos de sacrificio, han determinado que Aluminio-Cinc-Indio presenta el mejor comportamiento en este medio.

Se ha indicado (17) que los pilotes del Puente General Rafael Urdaneta presentan actualmente problemas que en parte son debidos a la corrosión del refuerzo. Si este es el caso, es necesario ensayar un sistema de protección que detenga la corrosión del refuerzo del concreto con miras a su uso efectivo en la protección de los pilotes del Puente sobre el Lago "General Rafael Urdaneta".

## PARTE EXPERIMENTAL

### PRUEBAS DE LABORATORIO

Se construyeron seis bloques de concreto reforzado, de forma rectangular con 62.5 cms. de largo, 34.0 cms. de ancho y 20 cms. de altura (composición Tabla No.1).

El electrodo de trabajo consistió en la estructura de acero, para refuerzo de los bloques, la cual era la estructura a proteger. Esta era de ca-

billas de acero de 1/4 de pulgada con longitudes de 54 y 27 cm. soldados para garantizar continuidad eléctrica.

Se utilizaron electrodos de referencia de Molibdeno/Oxido de Molibdeno ( $Mo/O_2Mo$ ) y Mercurio/Oxido de Mercurio ( $Hg/OHg$ ). Estos fueron colocados a 3 mm de separación de una de las cabillas de acero, embebidos en el concreto junto con ésta. Adicionalmente, se empleó un electrodo de Cobre/Sulfato

de Cobre ( $Cu/SO_4Cu$ ), externo al concreto.

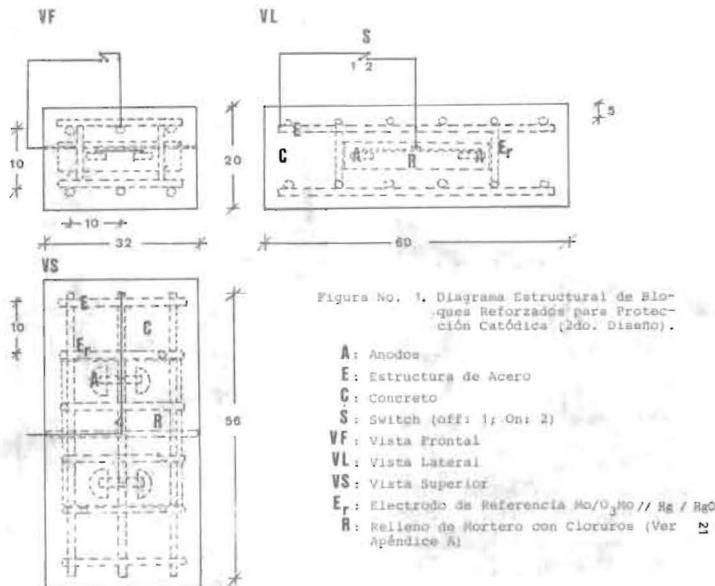
Como electrodos auxiliares se emplearon probetas de Aluminio y Zinc los cuales vinieron a fungir como los ánodos de sacrificio. (Ver composición Tabla No. 2). Estos constituyeron el sistema de Protección Catódica el cual se configuró de tal forma que, centrados los ánodos, no se conectaron al refuerzo sino a través de la conexión preparada para tal fin. Ver figura 1.

CEMENTO (t)	AGREGADO (t)	ARENA (t)	AGUA (t)
14,60	45,60	30,40	9,40

TABLA No. 1: Composición de la mezcla usada en la construcción de los bloques de concreto en % p/p.

ALEACION	Fe (%)	Cu (%)	Si (%)	Ni (%)	Mn (%)	Hg (%)	In (%)	Zn (%)	Al (%)	Mg (%)
Aluminio	-	-	-	-	-	-	0,004	2-10	Resto	-
Zinc	0,006	0,005	0,125	-	-	-	-	Resto	0,1 a 0,5	-

TABLA No. 2: Composición de los Anodos utilizados



Las conexiones ánodo/cable y cable / estructura fueron debidamente aisladas con resina epóxica.

De los seis bloques construídos, tres se prepararon con ánodos de Aluminio y tres con ánodos de Cinc. Dos de ellos, uno de Aluminio y uno de Cinc, se prepararon adicionándole 0.5% de ClNa en base a cemento. Los ánodos utilizados fueron embebidos en un mortero con 0.5% de Cloruro de Sodio, el cual sirve para disminuir su resistencia al concreto(14).

Construídos los bloques de concreto se curaron en cámara húmeda y al cabo de 28 días, se procedió a conectar el ánodo a la estructura a cuatro de ellos, los otros dos uno con ánodo de Aluminio y otro con ánodo de Cinc, ambos con 0% de ClNa, no se conectaron a la estructura para así comparar el comportamiento del ánodo, cuando éste se conecta a una estructura pasivada respecto a una estructura corroída. Los mismos se conectaron 132 días después de haber sido activados mediante la adición de solución de NaCl al 3,5%. Momento para el cual ya el potencial indicaba corrosión del acero (2,3): ( $\approx -350$  mv vs Cu/CuSO<sub>4</sub>).

Antes y después de la conexión se tomaron medidas de potencial del refuerzo, con un multímetro; después de la conexión se tomaron también medidas de la corriente drenada por cada ánodo.

Las medidas tanto de potencial como de corriente fueron realizadas diariamente durante cierto período, luego cada dos días y así hasta hacerlas semanalmente, para caracterizar el comportamiento de éstos. Los bloques fueron bañados diariamente con solución salina de NaCl al 3,5%.

Foto No. 2.- Pilotes de prueba situados al Norte del Puente.



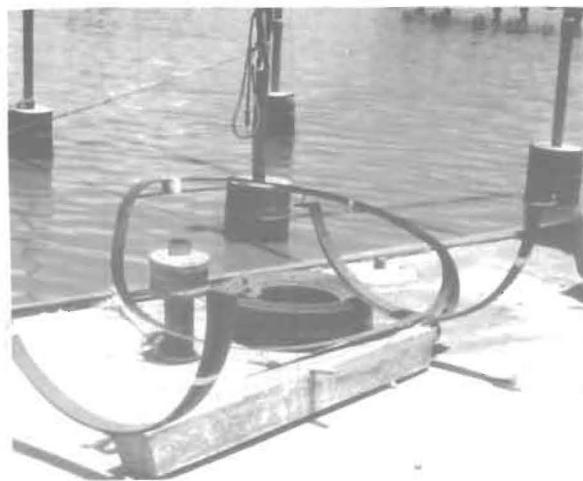
#### PRUEBAS DE CAMPO

Para determinar si era o no posible el uso de Protección Catódica por Anodos de Sacrificio en los pilotes del Puente sobre el Lago de Maracaibo se llevaron a cabo varias pruebas en dos pilotes de 91.4 y 135 cm de diámetro, similares a los del puente y situados al Norte de éste a unos 200 metros de distancia (Ver Foto No. 2).

Las primeras pruebas consistieron en proteger estos pilotes utilizando un ánodo de una aleación de Al - Zn - In de 146 cm x 15.2 cm x 17,1 cm de 111 kg de peso el cual tiene una salida de corriente de 4 amp y una vida de 10 - 12 años en agua de mar (Ver Foto No. 3). Con esta prueba se determinaría no únicamente si la Protección Catódica era factible sino también si estos pilotes tenían continuidad eléctrica. La profundidad del Lago, donde se encuentran los pilotes, es de 5 mts. y el centro del ánodo se coloca 2.5 mts de profundidad por medio de dos abrazaderas soldadas a las pletinas de los extremos del mismo. La conexión eléctrica, se hizo por medio de una pletina de acero de 6 mts. de largo y 2" x 1/2" soldada al ánodo.

Se utilizó un electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu saturado y uno de Ag/Cl Ag para la determinación de los potenciales de la estructura, según norma ASTM C876 - 80. En cada pilote se realizaron dos agujeros para descubrir el refuerzo de acero. En el de 91.4 cm de diámetro se descubrieron 5 cabillas verticales y 2 pasos de espiral y en el de 135 cm. de diámetro se descubrieron 4 cabillas verticales y una espiral.

Foto No. 3.- Anodo de Aluminio - Indio - Cinc utilizado en la Protección Catódica de los pilotes de prueba.



Por último se utilizó un sistema de Protección Catódica por Anodos de Sacrificio de Al - Zn - In (16) en la zona no sumergida del pilote. El principal objetivo de ésta era para determinar si lo encontrado en la fase del programa de laboratorio (16) podría ser implementado a nivel de campo. Para ello se escogió uno de los pilotes (135 cm de diámetro) ya protegido en la zona sumergida, instalándose un brazalete de acero con diez ánodos de Aluminio - Cinc - Indio colocados en forma anular cada 35°, embebidos en un mortero salado (Ver Figura No. 2). Las Fotos 4 a 7 muestran el sistema utiliza-

do y la forma como quedó el sistema luego de vaciado el mortero usado como electrolito. La técnica utilizada está bien documentada en trabajo de los autores (17).

Para medir los potenciales del refuerzo se utilizaron electrodos de Mo/O<sub>3</sub>Mo y Hg/0hg embebidos en el concreto, los cuales se muestran en las Fotos 8 y 9, y un electrodo de Cu/SO<sub>4</sub> Cu saturado externo al concreto al cual se colocaba en los huecos dejados para tal fin, en el mortero que revestía a los ánodos de sacrificio (Ver Foto No. 10).

Foto No. 4.- Se observa el brazalete con los ánodos de sacrificio de aluminio - cinc - Indio a utilizar en la zona de salpique y mareas en el pilote de prueba No. 1 (135 cm. de diámetro)

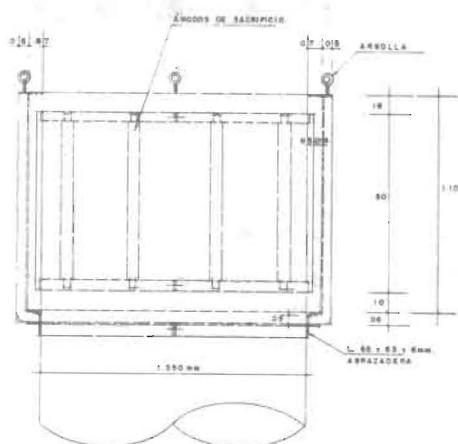
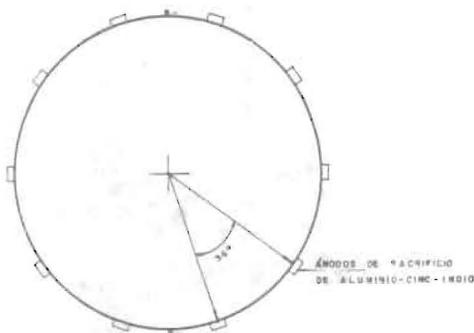


Fig. 2: Detalle de los ánodos tipo brazalete.



Foto No. 5.- Se muestra la forma final de colocación del brazalete. Obsérvese los cables utilizados para la conexión de la estructura con el ánodo sumergido (Protección de la zona sumergida y la soldadura del brazalete con pletina del ánodo sumergido para conexión del primero con la estructura).



Foto No. 7.- Se muestra el acabado final del mortero utilizado como electrolito. Obsérvese los huecos dejados para colocar el electrodo de  $\text{Cu}/\text{SO}_4$   $\text{Cu}$  saturado.

Foto No. 6.- Encofrado utilizado para recibir el mortero que sirve de electrolito entre ánodo y estructura en la zona de salpique y mareas.

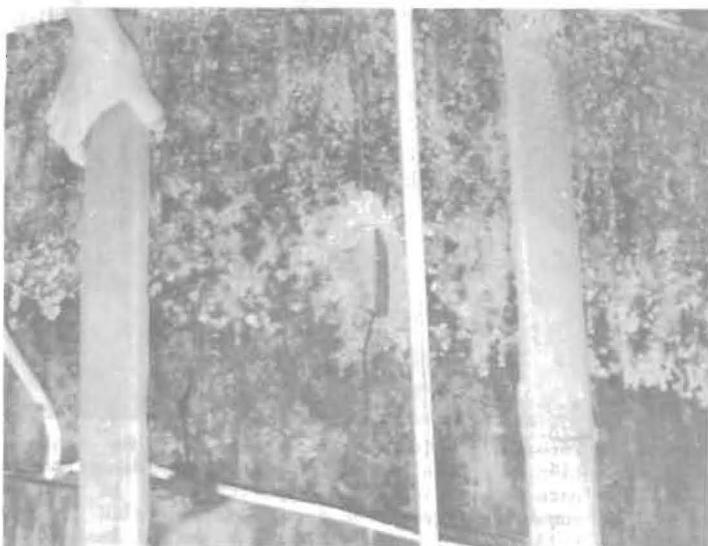


Foto No. 8.- Electrodo de referencia de  $\text{Hg}/\text{HgO}$  utilizado, (embebidos en el mortero) en el pilote de prueba No. 1 en la zona de salpique (E), para el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio es esa zona. Se observa parte del brazaletes con los ánodos de Aluminio - Cinc - Indio.

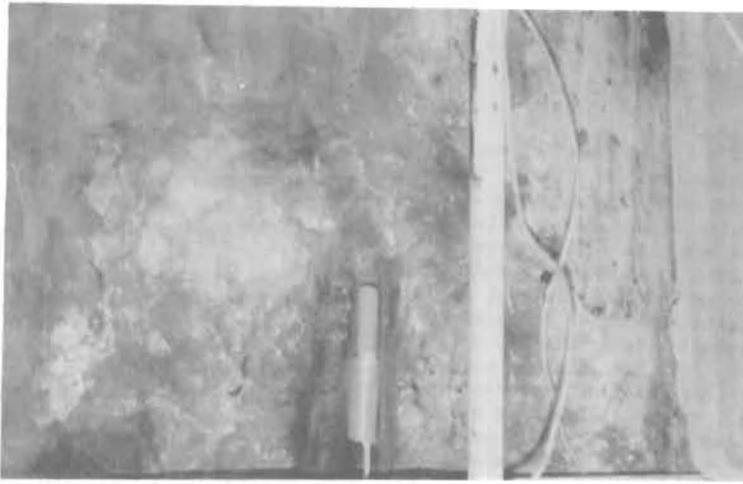


Foto No. 9.- Electrodo de referencia de Mo/Mo O<sub>3</sub> utilizado, (embebido en el mortero) en el pilote de prueba No. 1 en la zona de salpique (Noroeste) para el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio en esa zona. Se observa parte del brazaletes con los ánodos de Aluminio - Zinc - Indio.

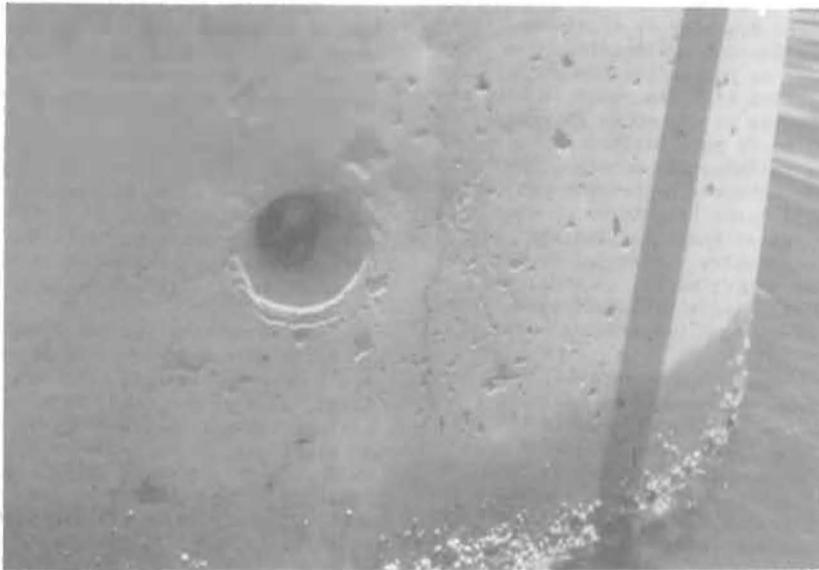


Foto No. 10.- Se observa el orificio dejado en el mortero, que sirve como electrolito para colocar el electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu saturado.

PRUEBA DE LABORATORIO

Las Figuras Nos. 3 y 4 muestran la variación del potencial y la corriente con el tiempo, respectivamente, para los bloques contaminados con 0.5% de NaCl que contienen los ánodos de Aluminio y Cinc. Se puede observar que para el bloque que contiene el ánodo de Aluminio se alcanzan potenciales de protección ( $< -770$  mv vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) lo cual se corresponde con la corriente drenada de 39 ma/m<sup>2</sup> compaginándose con los criterios de Apostolos, Carello y Howell de 32, 3 ma/m<sup>2</sup> (18). Sin embargo, para el bloque que contiene el ánodo de Cinc, como lo muestran las mismas figuras, no se alcanzan los niveles mínimos de protección del acero; (E  $< -770$  mv, i = 32,3 ma/m<sup>2</sup>) aún cuando el concreto está contaminado.

Las Figuras Nos. 5 y 6 muestran los cambios de potenciales y drenajes de corriente respectivamente en concreto con 0% de ClNa para el ánodo de Aluminio y el ánodo de Cinc. Las mismas muestran que después de varios días de bañar los bloques con solución de ClNa al 3,5%, los potenciales y drenajes de corriente del ánodo de Aluminio comienzan a variar hasta llegar a niveles de protección para el acero en concreto; el Cinc por el contrario no satisface estos criterios.

Las Figuras Nos. 7 y 8 muestran la variación del potencial y los drenajes de corriente respectivamente, de los ánodos de Aluminio y Cinc con 0% de NaCl, pero que no fueron conectados a la estructura hasta pasados 132 días, esto se hizo con el propósito de comparar el efecto de la protección del ánodo cuando el acero está pasivado a cuando el acero ya se está corroyendo. Sin embargo, durante todo este tiempo sin conectar se bañaron con solución de NaCl al 3,5% hasta conectarse, y como se observa en las figuras el ánodo de Aluminio tendió inmediatamente a potenciales y drenajes de corriente de protección del acero; no así el Cinc, que en ningún momento dió resultados satisfactorios para la protección del acero como refuerzo del concreto.

Como se puede observar tanto para los conectados inicialmente, como los conectados al cabo de cierto tiempo, en ambos casos el Al cumple los criterios de protección indicados por Stratful (19) que indican que si el acero está pasivado éste se protege a potenciales  $< -600$  mv. vs. Cu/SO<sub>4</sub> Cu pero que, si está activo, el potencial debe ser  $< -770$  mv. vs. Cu/SO<sub>4</sub> Cu Saturado.

De estos resultados, también se concluye de que el grado de humedad del concreto, o sea su resistividad, es importante para la protección eficaz por los ánodos de Aluminio.

Se realizaron mapas de potenciales correspondientes a las medidas realizadas sobre la superficie de los bloques con el electrodo de Cu/SO<sub>4</sub> Cu saturado.

Las Figuras Nos. 9 a 11 muestran las medidas efectuadas sobre el bloque que contenía el ánodo de Aluminio contaminado con 0,5% de NaCl, de los cuales la figura No. 9 muestra las lecturas antes de la conexión del ánodo, la Figura 10 después de 168 días de hecha la conexión y la figura 11 al final del tiempo de este estudio.

Las medidas realizadas sobre el bloque de Cinc contaminado con 0,5% de NaCl, en la misma oportunidad que las efectuadas en el bloque con el ánodo de Aluminio, así como para los bloques con ánodo de Aluminio con 0% de NaCl y para los ánodos de Cinc con 0% de NaCl, se muestran las Figuras 12 al 20.

Se observan potenciales de protección para el acero en los bloques que contenían los ánodos de Aluminio, no así los que contenían los ánodos de Cinc que no lograron alcanzar potenciales de protección, debido a su bajo potencial, el cual no es suficiente como para polarizar el acero de refuerzo a niveles de protección, aún en los casos de alta contaminación de Cl<sup>-</sup>, en los bloques con 0.5% NaCl.

También se realizaron perforaciones en los bloques de prueba una vez transcurrido el tiempo de estudio (aproximadamente 13 meses).

Todos los bloques presentaron grietas, las cuales, en los bloques conteniendo el ánodo de Aluminio aparecen sin ninguna dirección preferencial no así para los bloques que contenían Cinc, donde éstas seguían la dirección del refuerzo.

Se perforaron, un bloque de Cinc con 0,5% de cloruro de sodio y dos de Aluminio con 0% y 0,5% de cloruro de sodio respectivamente. Se hicieron determinaciones de cloruro a diferentes profundidades, tal como lo muestra la Tabla No.3. Se observa la difusión de los cloruros en el bloque que contiene el ánodo de Al (0,45%-0,04%).

Se observaron las cabillas, las cuales estaban en perfecto estado para los bloques que contenían los ánodos de Aluminio (Ver Foto No. 11), sin embargo, para el que contenía el ánodo de Cinc la perforación se realizó sobre la grieta presentada en el bloque, donde se observó que era debido a la oxidación del refuerzo (Ver Foto No. 12). Estos resultados hacen pensar que protección catódica por ánodos de sacrificio utilizando Cinc como ánodo no es factible, pero si utilizando Aluminio.

Sin embargo, se debe estudiar el efecto de los productos de corrosión del Aluminio sobre el concreto. En general se observó que el producto de corrosión formado no había agrietado el mortero donde el ánodo fue embebido, pero si había producido la grieta en el concreto, posiblemente por la presencia del agregado grueso que pone una barrera a la difusión del producto a través de él, por lo tanto debe continuarse el estudio del sistema.

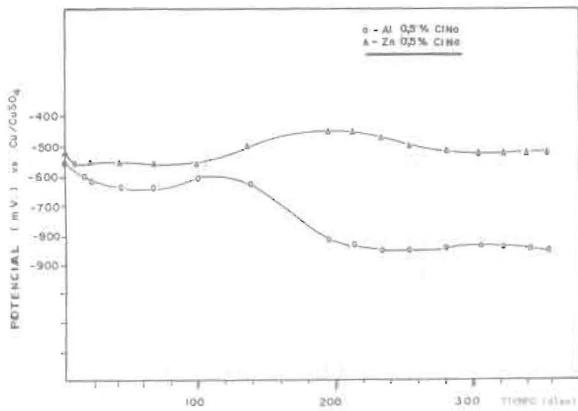


FIG. 10 - Variación con el tiempo del potencial de protección de los ánodos después de conectarlos a la estructura.

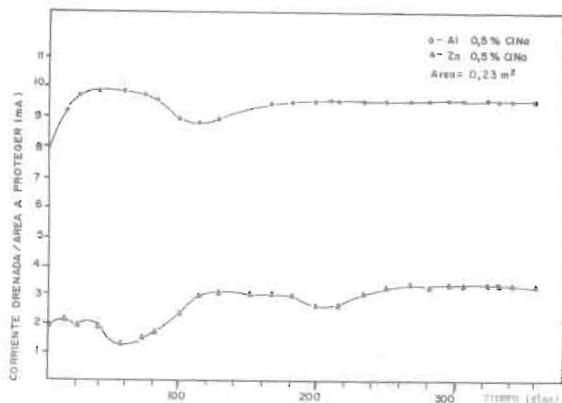


FIG. 10A - Variación con el tiempo de la corriente drenada por el ánodo por unidad de superficie a proteger.

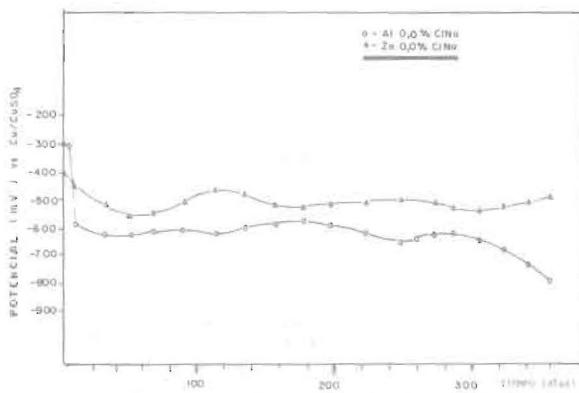


FIG. 11 - Variación con el tiempo del potencial de protección de los ánodos después de conectarlos a la estructura.

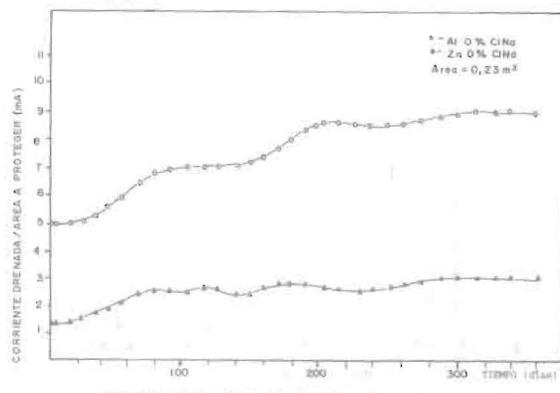


FIG. 11A - Variación con el tiempo de la corriente drenada por el ánodo por unidad de superficie a proteger.

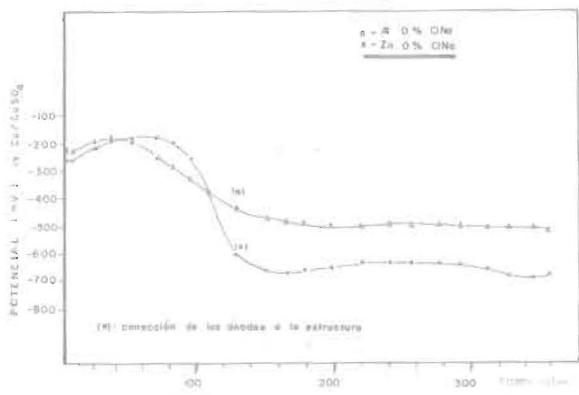


FIG. 12 - Variación con el tiempo del potencial de protección de los ánodos después de conectarlos a la estructura.

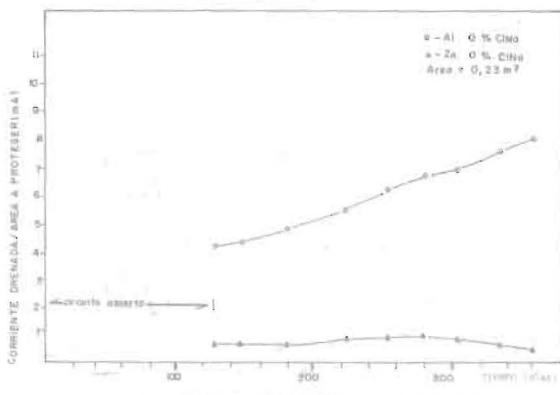


FIG. 12A - Variación con el tiempo de la corriente drenada por el ánodo por unidad de superficie a proteger.

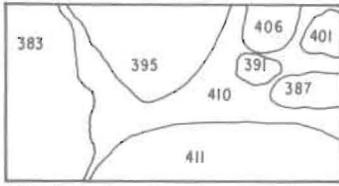


Fig. N° 9. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0.5% de ClNa. Antes de conectar el ánodo a la estructura.

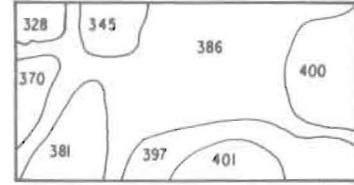


Fig. N° 12. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Zinc con 0.5% de ClNa. Antes de conectar el ánodo a la estructura.

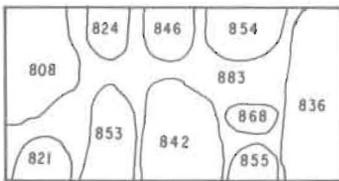


Fig. N° 10. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0.5% de ClNa. Después de 168 días de conectado el ánodo.

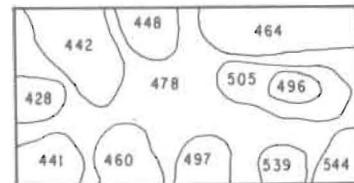


Fig. N° 13. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de cinc con 0.5% de ClNa. Después de 168 días de conectado el ánodo.

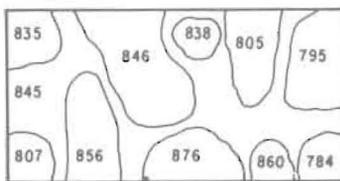


Fig. N° 11. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0.5% de ClNa. Al final del periodo de prueba.

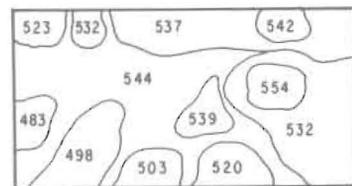


Fig. N° 14. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de cinc con 0.5% de ClNa. Al final del periodo de prueba.

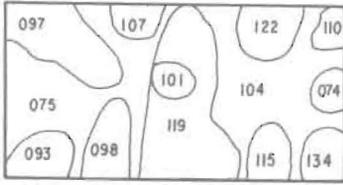


Fig. Nº 15. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0% de ClNa. Antes de conectar el ánodo a la estructura.

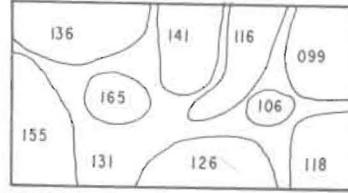


Fig. Nº 18. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de cinc. con 0% de ClNa. Antes de conectar el ánodo a la estructura.

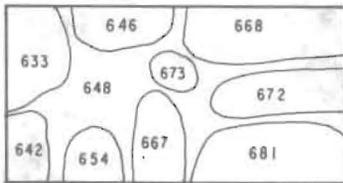


Fig. Nº 16. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0% de ClNa. Después de 168 días de conectado el ánodo.

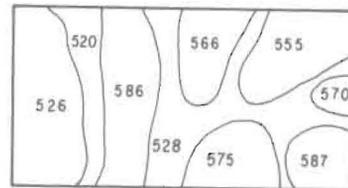


Fig. Nº 19. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de cinc con 0% de ClNa. Después de 168 días de conectado el ánodo.

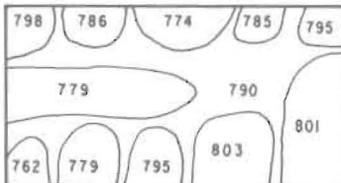


Fig. Nº 17. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de Aluminio con 0% de ClNa. Al final del periodo de prueba.



Fig. Nº 20. Potenciales de media celda para el bloque con el ánodo de cinc con 0% de ClNa. Al final del periodo de prueba.

Muestra	Profundidad del Muestreo (Cm.)	Concentración de Cloruro (g. P.P.P.)
Al con 0,5% Cl Na	0 - 0,5	0,26
	1 - 2	0,27
	2,5 - 3,5	0,37
	3,8 - 4,5	0,31
Al con 0,6 Cl Na	0 - 0,5	0,46
	0,8 - 1,5	0,18
	1,8 - 2,5	0,09
	2,8 - 3,8	0,26
Zn con 0,5% Cl Na	0 - 0,5	0,26
	0,8 - 1,5	0,11
	1,8 - 2,8	0,20
	2,8 - 3,8	0,15

Tabla No. 3: Contenido de Cloruros en los bloques al cabo de 13 meses.

Tabla No. 3.- Contenido de Cloruros en los bloques al cabo de 13 meses.

Fig. No. 11.- Foto que muestra las cabillas en perfecto estado en el bloque que contiene el ánodo de aluminio al cabo de 372 días.

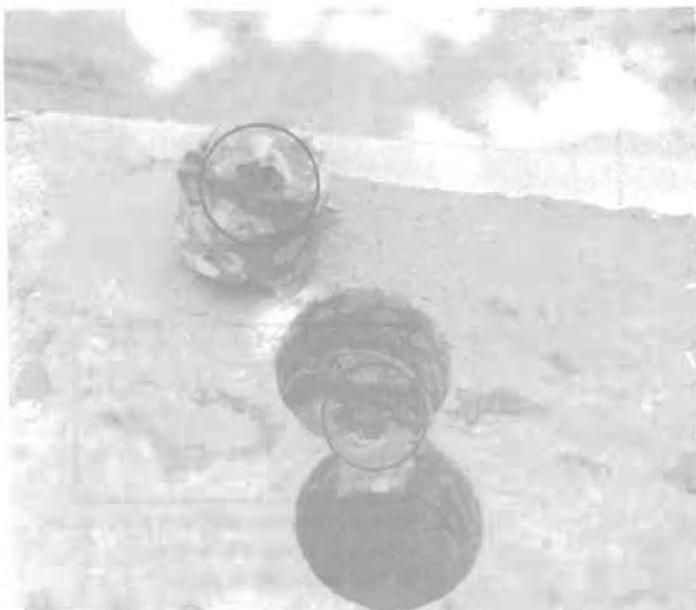


Fig. No. 12.- Foto que muestra la oxidación de las cabillas en el bloque que contiene el ánodo de zinc al cabo de 372 días.

**PRUEBA DE CAMPO**

Las Tablas 4 y 5 muestran los resultados obtenidos hasta el presente para las pruebas de Protección Catódica de los pilotes de 91.4 y 134 cm de diámetro respectivamente en las zonas sumergidas. Se puede observar que los potenciales alcanzados ( $<-850$  mV vs Cu/SO<sub>4</sub> Cu) indican la protección del pilote luego de 4 años de instalación del sistema.

La Tabla No. 6 muestra los resultados obtenidos para la protección del pilote de 134 cm. de diámetro, en la zona de salpique. Se puede obser-

var que durante el tiempo de estudio (Dos años) los resultados indican protección del pilote aún en zonas alejadas del nivel del agua del lago (-800 mV vs Cu/SO<sub>4</sub> Cu.) Estos resultados concuerdan con los obtenidos (17) en la etapa de laboratorio.

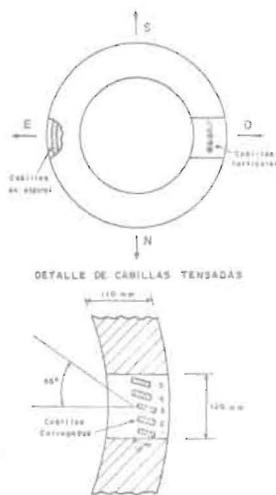
Sin embargo, se observaron algunas fisuras, aparentemente debidas al mal curado del concreto ayudado por los productos de oxidación del Aluminio. El estudio del efecto de los productos de corrosión se encuentra actualmente en investigación en el Laboratorio de Corrosión de La Facultad de Ingeniería, de L.U.Z.

Cabillos Fecha (hora)	POTENCIALES EN mV. vs. Ag/ClAg						
	1	2	3	4	5	6	7
10/2/80 * (15h. 50')	-560	-560	-580	-580	-580	-580	-580
10/9/80 ** (7h. 30')	-680	-680	-680	-680	-680	-680	-680
11/29/80 (10h. 12')	-950	-950	-950	-950	-950	-950	-950
11/29/80 *** (11h. 22')	-1010	-1010	-1010	-1010	-1010	-1010	-1010
2/10/80 (9h. 11')	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
2/11/81 (11h. 45')	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
2/25/81 (9h. 10')	-990	-990	-990	-990	-990	-990	-990

\* Sin conectar el ánodo  
 \*\* Se conecta el ánodo  
 \*\*\* Se suelda el ánodo a la estructura a través de la cabillos No. 4

Tabla No. 4 Resultados de la protección catódica del Pilote de prueba No. 8 situado al Norte del Puente Sobre el Lago de Maracaibo, (5 cabillos verticales (tensadas) y 2 pasos de la espiral).

VISTA TRANSVERSAL DEL PILOTE



Cabillos Fecha (hora)	POTENCIALES EN mV. vs. Ag/ClAg.				
	1	2	3	4	5
04/9/80 - (13h. )	-620	-620	-620	-620	-620
24/9/80 - (11h. 15')	-750	-750	-750	-750	-750
25/9/80 (11h. 50')	-840	-840	-840	-840	-840
03/10/80 (9h. 50')	-920	-920	-920	-920	-920
20/11/81 (11h. 30')	-1011	-1011	-1011	-1011	-1011
2/25/81 (9h. 20')	-990	-990	-990	-990	-990

- Antes de conectar el ánodo.  
 -- Luego de conectar el ánodo.

Tabla No. 5 Resultados de la protección catódica del Pilote de prueba No. 1 (135 cm. de diámetro) situado al Norte del Puente sobre el Lago de Maracaibo, (6 cabillos verticales tensadas y 1 paso de espiral).

VISTA TRANSVERSAL DEL PILOTE

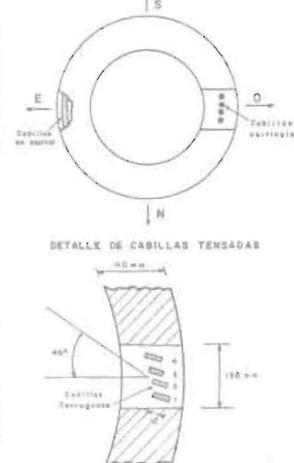


TABLA Nº 5: Resultados de la Protección Catódica en la Zona de Salpique y Oleaje del Pilote Nº 1 (135 cms. de diámetro). Situado al Norte del Puente sobre El Lago de Maracaibo.

		POTENCIALES EN mV. vs Cu/SO <sub>4</sub> Cu SATURADO					
Situación del Electrodo	Fecha	POSICION DEL ELECTRODO-ALTURA DESDE EL BORDE SUPERIOR DEL BRAZALETE DE ANODOS (Cms).					
		1-E (10)	2-E (60)	3-E (100)	4-0 (110)	5-0 (60)	6-0 (100)
	12/4/84 *	-430	-600	-900	-430	-600	-900
	14/4/84**	-948	-1032	-1038	-740	-1105	-1000
	19/5/84	-860	-913	-928	-705	-950	-953
	18/4/85	-875	-873	-812	-820	-896	-856
	18/4/86	-875	-856	-812	-815	-830	-880

- \* Antes de vaciar el mortero al ánodo.
- \*\* Luego de vaciar el mortero al ánodo protegido catódicamente.

TABLA Nº 6 (CONTINUACION).

ELECTRODO DE REFERENCIA DE Mo/MoO <sub>3</sub> y Hg/HgO EMBERIDOS EN UN MORTERO DE CEMENTO PORTLAND (mV.)				
Situación del Electrodo	7	8	9	10
Fecha				
12/4/84 *	+086	-472	NO ESTABLE	+041
12/4/84**	-346	-833	-996	-424
14/4/84**	-430	-854	-781	-252
05/07/85	-266	-691	-618	-107
18/4/86	-4447	-602	-545	-200

- \* Antes de vaciar el mortero al ánodo.
- \*\* Luego de vaciar el mortero al ánodo-protegido catódicamente.
- 7.- Electrodo de Mo/MoO<sub>3</sub> situado aprox. 40 cms. desde el borde superior del brazalet de ánodos (Norte).
- 8.- Electrodo de Hg/HgO situado aprox. 60 cms. desde el borde superior del brazalet de ánodos (Este).
- 9.- Electrodo de Hg/HgO contaminado con 0.5% de Cl<sup>-</sup> situado aprox. 70 cms. desde el borde superior del brazalet de ánodos (Noroeste).
- 10.- Electrodo de Mo/MoO<sub>3</sub> situado aprox. 10 cms. del borde superior del brazalet de ánodos (Noroeste).

## CONCLUSIONES

- 1.- El Anodo de Aluminio podría ser utilizado como ánodo de sacrificio, embebido en concreto, para la protección del refuerzo de éste, siempre y cuando exista humedad permanente en el concreto.
- 2.- Al Anodo de Cinc no puede utilizarse como ánodo de sacrificio, embebido en concreto, para la protección del refuerzo de éste.
- 3.- Es necesario una buena distribución de los ánodos para lograr una protección uniforme del acero de refuerzo del concreto.

## RECOMENDACION

REALIZAR UN ESTUDIO EXHAUSTIVO DEL EFECTO DE LOS PRODUCTOS DE CORROSION DEL ALUMINIO SOBRE EL MORTERO A SER UTILIZADO COMO ELECTROLITO.

## AGRADECIMIENTO

Al CONICIT por su soporte económico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) CLEAR, K.C. and HAY, R.E. : "Federal Highway Administration Report N." FHW RD-73-32, Vol. 1, 1973.
- 2) STRATFULL, R. : "Half - Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete". Highway Research Record 433 (1973).
- 3) ARUP, H. : "Steel in Concrete" Newsletter publication. Korrosion Centralen, The Danish Corrosion Center Denmark No. 7, January 1981.
- 4) The Federal Highway Administrator's Memorandum, to Regional Federal Highway Administrator, dated April 23, 1982.
- 5) HAUSMAN, D.A. : "Criteria for Cathodic Protection of Steel in Concrete Structures". Materials Protection, Vol. 8, No 10, October 1969.
- 6) SLATER, J.E. : "Criteria for adequate Cathodic Protection of Steel in Concrete", paper 132, N.A.C.E. Corrosion 79, Atlanta, Georgia, March 12 - 16; 1979.
- 7) GJORV, O.E. and VENNESLAND, O. : "Cathodic Protection of Steel in Off-Shore Concrete Platforms". Paper 139, N.A.C.E. Corrosion/79. Atlanta Georgia, March 12-16, 1979.
- 8) DEGHANIN, Changiz and LOCKE, Carl E. : "Electrochemical Behaviour of Steel in Salt Contaminated Concrete Part I". Paper No. 60 N.A.C.E. Corrosion/81. Toronto, Ontario, Canadá. April 6-10, 1981.

- 9) WARD, P.M. : "Cathodic Protection : A User's perspective". ASTM Special Technical Publication 629. Editorial Staff Chicago, III, 27 June - 2 July 1976.
- 10) VRABLE, J.B.; WILD, B.E. : "Electrical Potential requirements for Cathodic Protection of Steel in Concrete". Paper No. 135 N.A.C.E. Corrosion 79 Atlanta. Georgia, March 12-16, 1979.
- 11) VRABLE, J.B. : "Cathodic Protection for Reinforcing Steel in Concrete". ASTM Special Technical Publication 629. Editorial Staff. Chicago, III, 27 June - 2 July, 1976.
- 12) WHITING, D.; PERENCHIO, W.F.; STARK, A. : "A galvanic Cathodic Protection System for Reinforced Bridge Decks Interim results". Paper No. 137, N.A.C.E. Corrosion 79, Atlanta Georgia. March 12 - 16, 1979.
- 13) WHITING, D. and STARK, O. : SHULT, W. : "Galvanic Anode Cathodic Protection System for Bridge Decks - Updated results", paper No. 41, N.A.C.E. Corrosion, 81 Toronto, Ontario, Canadá, April 6 - 10, 1981.
- 14) WHITING, D. and STARK, D. : "Galvanic Cathodic Protection for Reinforced Concrete Bridge Decks - Field Evaluation". National Cooperative Highway Research Program Report 234. Transportation Research Board. National Research Council.
- 15) FERNANDEZ, V., Matilde y ROMERO OCANDO, Aleida: "Determinación de la Eficiencia de Anodos de Sacrificio para la Protección Catódica en Concreto Reforzado". Universidad del Zulia (L.U.Z.) Facultad de Ingeniería. Escuela de Química. (Tesis de Grado). Maracaibo, 1981.
- 16) RINCON, O. de; CARRUYO, A. de y ROMERO, M. de: "Anodos de Sacrificio. Una alternativa para la protección del refuerzo de Acero en Concreto". I Congreso Iberoamericano y III Nacional de Corrosión y Protección, Madrid - España, Junio 1983.
- 17) RINCON, O. de : " Corrosión del Refuerzo de Acero del Concreto - Caso Histórico. Puente Sobre el Lago de Maracaibo en Venezuela". Revista Técnica de Ingeniería, Vol. 6, Edición Especial, 1983.
- 18) APOSTOLOS, John A., CARELLO, RICHARD A. y HOWELL, Kerry M., California Department of Transportation, Sacramento, California. Progress Report : "Cathodic Protection Using a Metallic-Sprayed Anode". Proceeding of the : Conference on Cathodic Protection of Reinforced Concrete Bridge Decks. San Antonio, Texas, February 12-13-1985. Sponsored by : American Association of State Highway Administration N.A.C.E.
- 19) STRATFULL, R.F. : "The Corrosion of Steel in a Reinforced Concrete Bridge". Corrosion Vol.3, No. 3. Marzo 1975.

Recibido el 31 de Marzo de 1987