

Oladis de Rincón  
Laboratorio de Corrosión - Escuela de Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad del Zulia

## CORROSION DEL REFUERZO DE ACERO DEL CONCRETO

### CASO HISTORICO "PUENTE SOBRE EL LAGO DE MARACAIBO EN VENEZUELA"

(Al Libertador Simón Bolívar,  
en el bicentenario de su nacimiento)

#### ABSTRACT

A brief review is given on the corrosion of reinforcing steel in concrete structures exposed to salt water action. The influence of the chemical and physical factors on the corrosion of steel in concrete is discussed. The corrosion of the reinforcing steel detected in the Lake of Maracaibo Bridge - "General Rafael Urdaneta" is used to illustrate the causes and the mechanism under which this bridge is deteriorating. The methods for preventing corrosion in this structure were also studied on laboratory and field scales. The results indicate that the corrosion in this bridge is due to the penetration of the chloride ions from environment because of the low thickness of concrete covering of the steel structure. In addition, it is shown that the cathodic protection with Aluminium-Zinc-Indio anodes can be used in some parts of the bridge.

#### SUMARIO

En este trabajo se da una breve descripción sobre la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto expuestas a la acción de medios salinos. Se describen los factores físicos y químicos que influyen en este fenómeno de deterioro. Específicamente, se discute un caso histórico "Puente sobre el Lago de Maracaibo en Venezuela", estudiándose las causas y el mecanismo por el cual la estructura de concreto reforzado y pretensado se está deteriorando debido a procesos de corrosión, así como también, los posibles métodos de protección estudiados tanto en el laboratorio como en el puente mismo. Los resultados encontrados hasta el momento indican, que el problema de corrosión del refuerzo de concreto se debe básicamente a la penetración de cloruros del medio ambiente, debido al poco recubrimiento de concreto sobre la armadura. También se determinó que la Protección Catódica por ánodos de Aluminio-Indio-Cinc podría ser utilizada en algunas partes del puente.

#### INTRODUCCION

El empleo de acero con concreto para formar materiales compuestos, ha sido uno de los hechos más importantes en la historia de la tecnología de la construcción. Esta práctica comenzó alrededor de la mitad del siglo pasado con el invento de concreto

reforzado y su uso se extendió durante el presente siglo por el desarrollo de varias formas de concreto pretensado. La gran durabilidad ha sido una de las causas de este desarrollo. Sin embargo, desde hace años, algunas de estas estructuras han comenzado a mostrar signos evidentes de deterioro prematuro, principalmente por corrosión del acero de refuerzo (Figuras 1 y 2). Esto ha llegado a constituir un grave problema en todo el mundo. Los puentes, facilidades sanitarias, diques, plataformas y otras estructuras de concreto armado y pretensado están siendo severamente afectadas por la corrosión de las cabillas. La corrosión del refuerzo del concreto y la fisuración resultante está costando millones de dólares cada año. Por ejemplo, en U.S.A.



Figura No. 1

Delaminación del concreto por corrosión de la armadura de la estructura de un hospital en Maracaibo, Venezuela. Uso de arenas con alto contenido de iones cloruro.

el costo de este problema en puentes, ocasionado por el uso de sales para deshielar en épocas de invierno, está en el rango de 165 a 500 millones de dólares<sup>(1)</sup>.

La corrosión y protección de aceros de refuerzo en medios conteniendo cloruros (provenientes de un medio marino o sales para deshielar), sigue siendo un campo de estudio que día a día merece ser considerado con mayor profundidad por sus implicaciones económicas y logísticas.

Los distintos procesos que ocurren, en aceros con y sin cubierta de concreto, en presencia de aguas salinas están vinculados a las siguientes zonas de exposición.

- a.- Atmosférica
- b.- Oleaje con Salpicadura
- c.- Niveles de Marea
- d.- Inmersión completa
- e.- Suelo y barrm marino

El efecto de la corrosión sobre cualquier estructura en cada una de estas zonas dependerá claramente de su ubicación, rango de mareas y estabilidad del suelo por efecto del dragado, acción hidrodinámica, especialmente en aguas poco profundas, etc. Las estructuras en contacto con las zonas c y d están generalmente cubiertas con gruesos depósitos de animales marinos y plantas. El límite superior de estas acumulaciones, constituido por caracoles y algas verdes, define la zona de marea alta y el inferior la zona de rompimiento de ola. Esta última lleva a definir gradualmente la zona atmosférica donde las salpicaduras, viento, sol y lluvias ejercen distintos efectos. Como es lógico pensar, cada una de estas zonas tendría características especiales con velocidades de corrosión diferentes.

La visualización de los fenómenos de corrosión en concreto armado está dada por la aparición de manchas de herrumbre y fisuras superficiales originadas por el aumento de volumen, del acero del refuerzo, consecuencia de la conversión electroquímica de Hierro metálico a herrumbre. Para el caso del

concreto pretensado, esta evidencia visible de deterioro no es común, pese a que los efectos de la alterabilidad pueden ser mucho mayores, llevando a fallas estructurales por corrosión localizada del tipo fisurante.

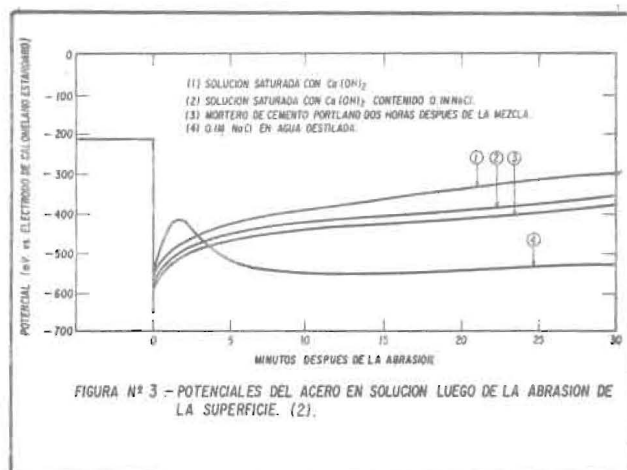
La corrosión del acero de refuerzo, originando óxido hidratado de hierro, tiene lugar en presencia de Oxígeno y Agua. Sin embargo, este proceso de naturaleza electroquímica, es inhibido en medios alcalinos con valores de pH entre 10 y 13 por la rápida formación de una fina película protectora de óxido de Hierro ( $Fe_2O_3$ ) sobre la superficie metálica la cual lo pasiva. Pese, entonces, a que el Agua y el Oxígeno se encuentren normalmente presentes en el concreto, la alta alcalinidad producida durante la hidratación del cemento Portland lleva a la solución dentro del material poroso a valores de pH de 12,5, como resultado de la formación de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), induciendo la pasividad del acero. La pasivación de la superficie de acero desnudo ocurre rápidamente, como fue demostrado por Hausman<sup>(2)</sup> tanto en  $Ca(OH)_2$  saturado como en concreto de cemento Portland (Ver Figura 3). Como se observa en la Figura 3, los potenciales de corrosión del acero en todas las soluciones de pH altos llegan a ser más positivos (más nobles) con el tiempo, donde en soluciones de agua neutra (pH=7) comienzan a ser pasivos para luego ser rápidamente activos.

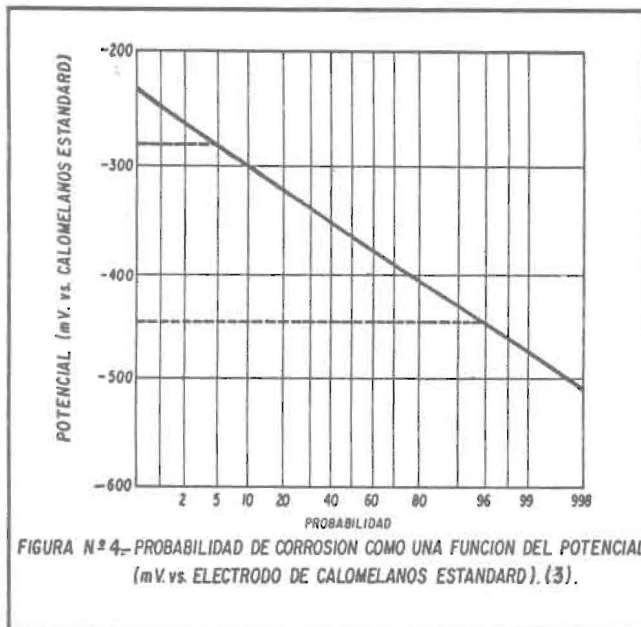
Stratfull<sup>(3)</sup> y Arup<sup>(4)</sup> indican que la corrosión del acero, en concreto aereado, ocurre a potenciales de éste más negativos que -350 mv. vs.  $Cu/SO_4Cu$ . En la Figura 4 se observa que a este potencial existe un 10% de probabilidad de corrosión del acero.<sup>(3)</sup> Los problemas de corrosión del acero estructural están, entonces, íntimamente asociados a la despasivación del mismo, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico, sobre las distintas interfases concreto / acero y a las diferencias metalúrgicas y mecánicas del metal. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes eléctricas llevando a la formación de áreas anódicas y catódicas con la formación de pilas de corrosión.



Figura No. 2

Delaminación del concreto por corrosión de la armadura de una plataforma situada en el Lago de Maracaibo en Venezuela.





#### FACTORES QUE AFECTAN ESTE PROCESO DE CORROSION

El alcance de estas reacciones electroquímicas y, por ende, la velocidad de corrosión del acero en el concreto está gobernada por muchos factores diferentes entre sí, pero íntimamente relacionados, que pueden agruparse en dos categorías:

- a) Factores físicos y ambientales asociados con la calidad y propiedades estructurales del concreto.
- b) Factores químicos, tales como composición del acero y concreto, alcalinidad del agua en los poros y presencia de sustancias agresivas, especialmente iones cloruro libres.

##### a) Influencia de los factores físicos y ambientales

La permeabilidad del concreto al agua, oxígeno, dióxido de carbono e iones cloruro está regida tanto por las propiedades físicas estructurales resultantes de los componentes empleados, como por la técnica de preparación. La permeabilidad, sea de líquidos o de gases, no es una simple función de la porosidad, sino que depende del tamaño, distribución y continuidad de los poros.

La permeabilidad es función de la relación agua/cemento, de las condiciones de fraguado, dureza del concreto, tipo de agregados, mezclado, etc. Es entonces muy importante el factor de permeabilidad de la cubierta de concreto entre acero/medio corrosivo, regulada por el espesor mínimo para proteger de la corrosión especialmente a aceros tensionados.

El parámetro espesor mínimo es función de la permeabilidad pudiendo ocurrir que un espesor de un concreto poco permeable proteja completamente de la corrosión más que otro de baja calidad con un espesor cuatro veces mayor.

Si por cualquiera de los factores anteriores, el concreto posee una gran permeabilidad, es posible que la alta alcalinidad de la interfase concreto/armadura de acero disminuya por lixiviado de los hidróxidos alcalinos, haciendo perder las propiedades pasivantes del sistema.

##### b) Influencia de los factores químicos

La composición química y tipo de cemento en el concreto tendrán influencia sobre el fenómeno de corrosión de la armadura de acero, particularmente en presencia de iones cloruro. La acción agresiva de este anión deriva de su tendencia a promover la ruptura de la película de óxido pasivamente, dando lugar a corrosión por picaduras. Los iones cloruro presentes en el concreto provienen de los constituyentes de la mezcla original y, por difusión, del medio exterior, dependiendo esto último de las propiedades de permeabilidad antes mencionadas.

Es evidente que el umbral de concentración de ión cloruro no es un valor constante en diferentes estructuras o aún en la misma estructura, por su dependencia, de factores tales como pH, contenido de humedad, permeabilidad, uniformidad y contenido de iones cloruro, en especial por complejos procesos de difusión según las cinco zonas de exposición antes mencionadas. Consecuentemente, no es adecuado definir un umbral o contenido mínimo de iones cloruro para concreto. Sin embargo, Clear y Hay<sup>(5)</sup> reportan niveles de 0.65 a 0.77 Kgs de Cl/m<sup>3</sup> de concreto, como valores umbrales para la corrosión del refuerzo de concreto, pero Locke<sup>(6)</sup> indica 1.54 a 3.1 Kg/m<sup>3</sup> (0.1 a 0.2 por ciento de iones cloruro por peso de concreto), lo cual es de dos a tres veces ese valor.

Se puede resumir dentro de estas consideraciones generales, que la capacidad protectora del concreto contra la corrosión del acero en estructuras de concreto armado se debe a:

- 1.- Alta alcalinidad
- 2.- Baja permeabilidad
- 3.- Baja densidad de fisuras
- 4.- Resistencia al pase de corriente

La corrosión del acero es un fenómeno físico-químico y tiene lugar si los siguientes agentes promotores están presentes:

- 1) Presencia de humedad sobre la superficie del acero para constituir el medio electrolítico.
- 2) Diferencia de potencial eléctrico.
- 3) Acceso de oxígeno a las zonas catódicas.
- 4) Presencia de sales en el concreto (cloruro de calcio como acelerante de fraguado, arenas no lavadas, agua con cloruro)
- 5) Presencia de sustancias químicamente agresivas en el medio exterior (cloruros, sulfuros, sulfatos, nitratos, acidez, etc.).
- 6) Permeabilidad del concreto.
- 7) Huecos entre el concreto y la armadura de acero.
- 8) Insuficiente espesor del revestimiento de con-

creto.

- 9) Presencia de sustancias extrañas, incluyendo la herrumbre sobre el acero en el momento de llenado.

#### PROTECCION ANTICORROSIVA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Los métodos empleados están basados en el mejoramiento de las propiedades de los componentes de la estructura tales como: concreto de polímeros, concreto impregnado con polímeros orgánicos, sellado interno con ceras sintéticas, pintado de la armadura con resinas epoxídicas, galvanizado del acero, cubiertas a base de membranas asfálticas y epoxi-bituminosas, inhibidores de corrosión y protección catódica.

Estos sistemas de protección se aplicarán dependiendo de si se trata de estructuras nuevas o viejas. Para el caso de estas últimas la protección catódica, que es la única forma de detener la corrosión, ha sido utilizada<sup>(7,8,9)</sup> con resultados halagadores.

#### CASO HISTORICO - PUENTE SOBRE EL LAGO DE MARACAIBO

Venezuela es un país situado al Norte de América del Sur frente al Mar Caribe. El lago de Maracaibo se encuentra al Noroeste de Venezuela, cerca del límite con Colombia. Hacia el Norte del Lago y en una de las zonas más angostas del mismo está situado el Puente General Rafael Urdaneta, como se muestra en las Figuras 5 y 6.



Figura No. 5  
Mapa de Venezuela.

La existencia de centros de gran importancia para la economía actual y futura del país, como la zona petrolera (costa oriental) y la zona agrícola (Suroeste del Lago), así como, una pujante zona in-



Figura No. 6  
Puente sobre el Lago de Maracaibo " General Rafael Urdaneta ".

dustrial y otra también agrícola en las inmediaciones de la segunda ciudad de Venezuela ( Maracaibo ) en la costa occidental, fueron las principales razones para la construcción de este puente. Internacionalmente, como vía de comunicación, tiene influencia en la región occidental de Venezuela especialmente para la ciudad de Maracaibo, y los países hermanos de Colombia y Panamá. Su construcción favoreció indiscutiblemente el desarrollo integral de la zona y acercó definitivamente a Maracaibo con el resto del país.

Los estudios para la construcción de este puente se comenzaron en 1956, desde entonces se consideró que debía hacerse en concreto armado y pretensado y no de acero, debido al medio ambiente corrosivo (alta concentración de oxígeno y alta temperatura), aunque, la concentración de  $Cl^-$  para aquella época era de apenas 400 p.p.m.<sup>(10)</sup> Este puente tiene una longitud de 8.678.600 mts. y un ancho de 17.4 mts. Se puso en funcionamiento en 1962, y para ese entonces un estudio realizado por Finley<sup>(10)</sup>, de la Creole Petroleum Corporation, indicaba que el agua del lago era tres veces más corrosiva ( velocidad de corrosión = 16 mpy) que el agua de mar ( velocidad de corrosión = 5 mpy) pudiendo llegar en las zonas de salpique a velocidades de corrosión del acero tan altas como 60 mpy (ver Figura 7).

Desde 1964 se observó que la estructura comenzaba a tener problemas de corrosión, no únicamente en el concreto armado y pretensado, sino también en los cables que lo sostienen (ver Figuras 8 y 9). El deterioro de la estructura tiene como principal razón la corrosión de los cables y de las cabillas de acero que la refuerzan (ver Figuras 10, 11 y 12).

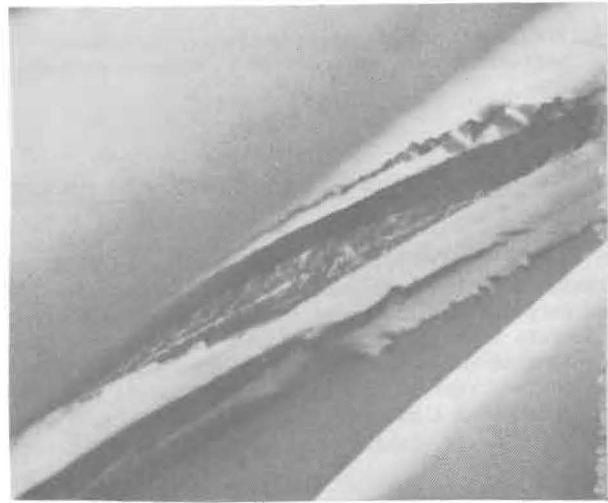
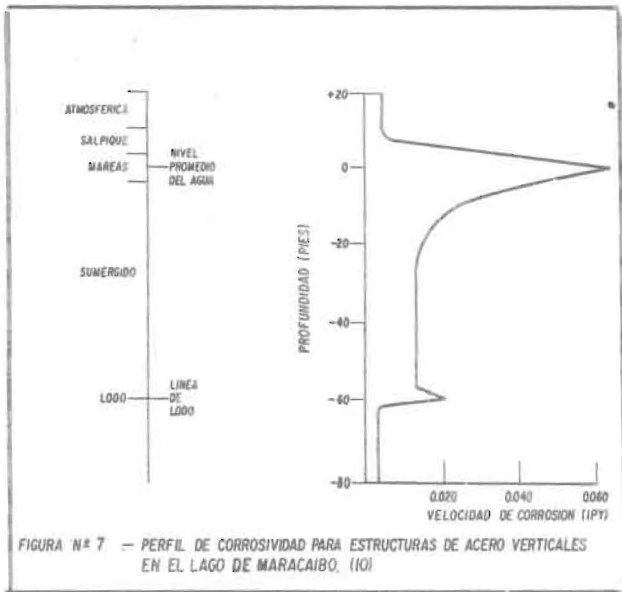


Figura No. 9

Vista de cerca de un cable muy deteriorado por corrosión. Se observa la herrumbre debajo de la pintura.

La iniciación y el progreso de la corrosión puede ser observado a través de tres etapas separadas. La primera etapa representa un problema estético, pues las manchas producidas por productos de corrosión (Oxido de Hierro) aparecen en la superficie del concreto dañando considerablemente la buena apariencia de la estructura (ver Figura 13). La segunda etapa está caracterizada por la aparición de grietas longitudinales a lo largo de los refuerzos (ver Figura 14). Estas grietas son a veces tan profundas que afectan las cabillas más allá de toda posible reparación. Si la estructura se deja sin la protección necesaria para detener el avance de la

corrosión, entrará en la tercera etapa, en la cual la disminución del diámetro de las cabillas y el agrietamiento del concreto pueden constituir problemas estructurales serios.

Hasta el presente se han ensayado varias soluciones de las cuales podemos mencionar: a) La aplicación de pinturas protectoras a la superficie del concreto. La experiencia ha demostrado que este método no es satisfactorio puesto que la estructura así tratada muestra actualmente signos evidentes de corrosión y en número tal que no hacen mayor diferencia con las estructuras no tratadas. b) El des-



Figura No. 8

Corrosión de los cables del Puente sobre el Lago de Maracaibo en el sitio de anclaje.

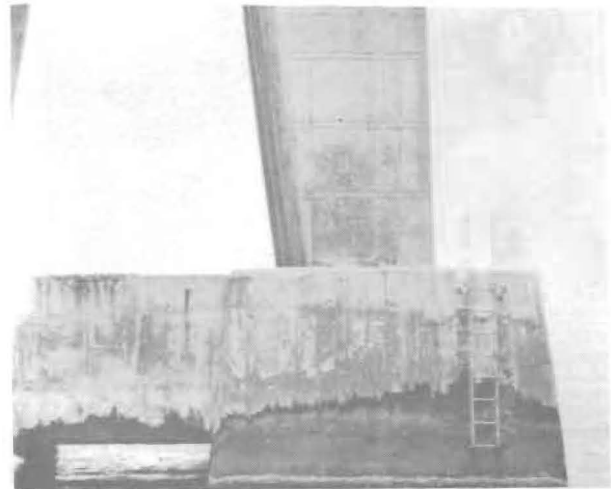


Figura No. 10

Delaminación del concreto debido a la corrosión del refuerzo. Lado Sur de la Pila. Zona de marea y salpique.

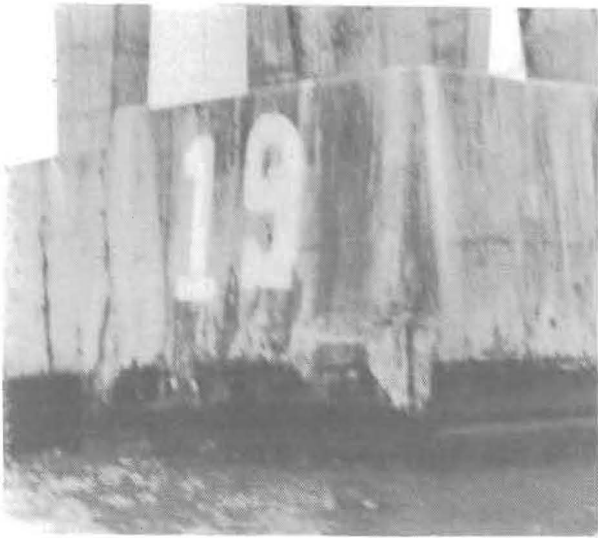


Figura No. 11

Gran deterioro en la zapata y camisa. Lado Sur de la Pila. Zona de marea y salpique.

cubrimiento de las cabillas, su limpieza y reparación con la posterior aplicación de una nueva capa de concreto. En esta operación se han tratado recubrimientos especiales sin mayor éxito. Por otra parte este sistema implica la reconstrucción del puente en muchas pequeñas etapas consecutivas, sin ningún sentido de protección.

En conocimiento de todo lo anteriormente expuesto, es indiscutible la necesidad de utilizar otro tipo de protección.

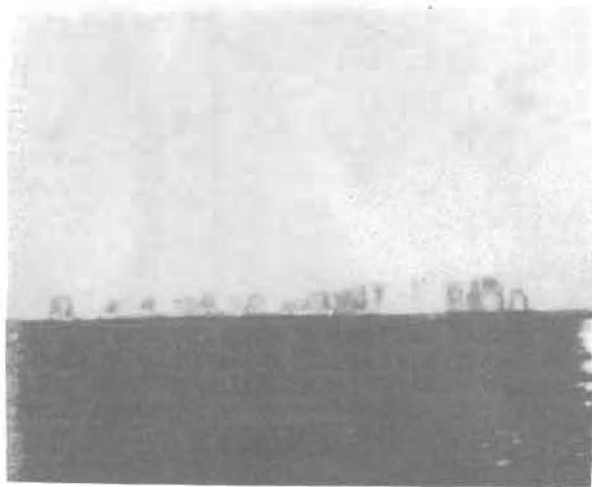


Figura No. 13

Manchas producidas por corrosión del refuerzo del concreto en la zona de marea.

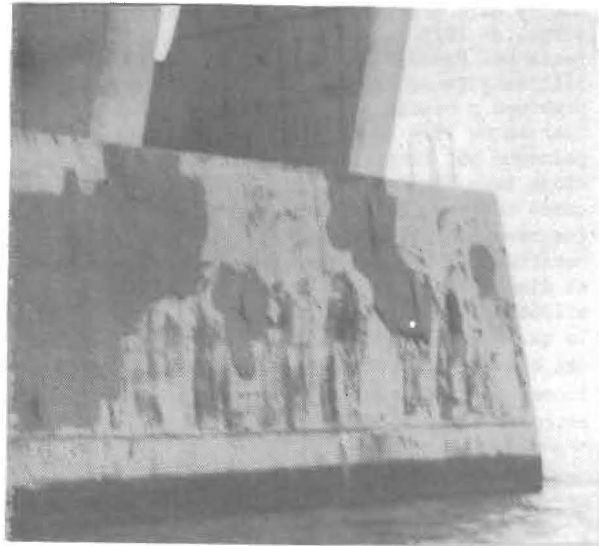


Figura No. 12

Delaminación del concreto, tanto en lugares reparados como no reparados, de una zapata en una Pila cercana a la costa Este del Puente.

En 1976 La Universidad del Zulia (L.U.Z.) (11) trata de lograr un convenio con el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (M.T.C.), para el estu-



Figura No. 14

Grietas en el concreto de un Fuste debido a la co-corrosión del refuerzo.

dio de este problema sin mayores progresos. Sin embargo, en 1978 se obtiene el financiamiento por parte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) para estudiar el problema y buscar soluciones. Ahora bien, el 8 de febrero de 1979 se rompe el primer cable, principalmente por corrosión en la zona de entrada al anclaje (ver Figuras 15, 16 y 17), rompiéndose un segundo cable el 2 de agosto de 1979. Este problema fue resuelto por una compañía privada (la misma que construyó el Puente) cambiando todos los cables y el diseño de éstos por un costo de alrededor de 230 millones de bolívares (~ 54 millones de dólares), lo que equivale aproximadamente a un 70 por ciento del costo del puente cuando se construyó (330 millones de bolívares). No obstante, respecto a la estructura de concreto no se hizo nada.



Figura No. 15

Falla de los cables del Puente sobre el Lago de Maracaibo, debido a corrosión en el sitio de anclaje de éstos. (tapón de madera)

En estudios realizados en 1968 y 1976, a través del M.T.C., se determinó que el factor principal en el deterioro del refuerzo del puente son los cloruros provenientes del Lago, los cuales en los actuales momentos, según evaluaciones efectuadas por L.U.Z.<sup>(12)</sup> están en el orden de 2500 a 3000 p.p.m. (ver Figura 18), (aumentando en 2000 p.p.m. al valor inicial de 400 p.p.m.). El avance en el deterioro se debe principalmente al bajo espesor de revestimiento de concreto sobre la armadura (< 4 cm), y no al concreto mismo ya que este era de buena calidad (ver Tabla 1). Como puede observarse en las



Figura No. 16

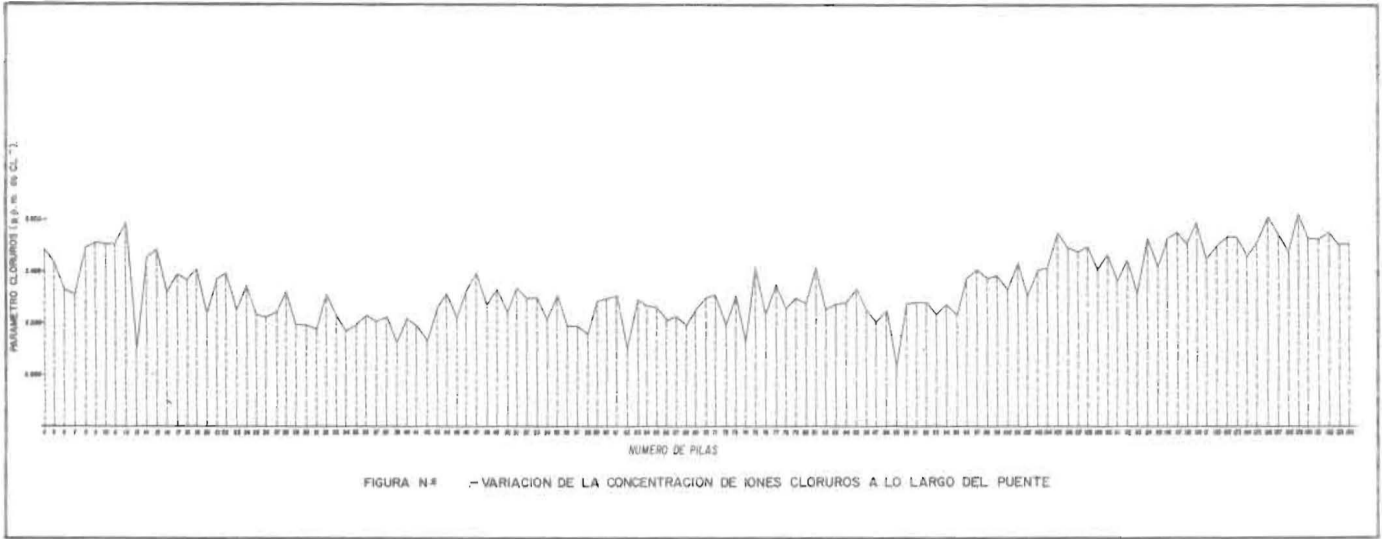
Rompimiento de varios hilos de uno de los cables del Puente en el sitio de anclaje.

Figuras anteriores, aún cuando el origen del problema es el mismo, las soluciones deben ser diferentes según las distintas zonas afectadas.



Figura No. 17

Rompimiento del primer cable del Puente en el sitio de anclaje.



L.U.Z. (11) ha clasificado los problemas y las formas de resolverlos como se indica a continuación.

**PROBLEMAS A SER ESTUDIADOS Y OBJETIVOS**

Existen varios métodos para combatir este problema de corrosión. En estructuras viejas, los métodos más usados son el uso de concreto con polímeros, protección catódica y revestimiento del acero de refuerzo bien sea con un polímero orgánico (epoxi) o con un metal (Zn), el cual protege por acción galvánica. La protección catódica se ha utilizado extensivamente para proteger tuberías conectadas a las plataformas para la producción de petróleo. Más recientemente, la protección catódica ha sido utilizada para la protección del refuerzo de acero en la carpeta de rodamiento en puentes. (7-9)

De los métodos antes mencionados se usarán los dos primeros. No se tratarán los dos últimos debido a que con cabillas revestidas con cinc no se han obtenido resultados congruentes, además de que es necesario reemplazar todo el sistema de acero para lograr una vida útil considerable. Las cabillas revestidas con epoxi necesitan un manejo muy cuidadoso siendo este muy difícil de lograr. La protección catódica se hará específicamente por ánodos de sacrificio debido a que con corriente impresa el control no se podría lograr.

**Los Problemas**

Existen varios problemas que serán atacados dependiendo del sitio de la estructura a ser protegida (Figura 19) así tenemos:

(i) Fustes en las pilas altas donde la zapata tiene 5 mts. de altura y baranda. (zona alejada de la zona de salpique).

En estas zonas se observa delaminación del concreto debido a la corrosión del acero de refuerzo. Esto se debe al poco espesor del recubrimiento del concreto sobre el refuerzo (ver Figura 20).

En estas zonas se harán las siguientes medidas:

- a) Utilizando el método del sonido (martillo) se puede determinar las zonas afectadas por corrosión.
- b) Luego de realizar este análisis se procederá a la reparación utilizando concreto con polímeros.

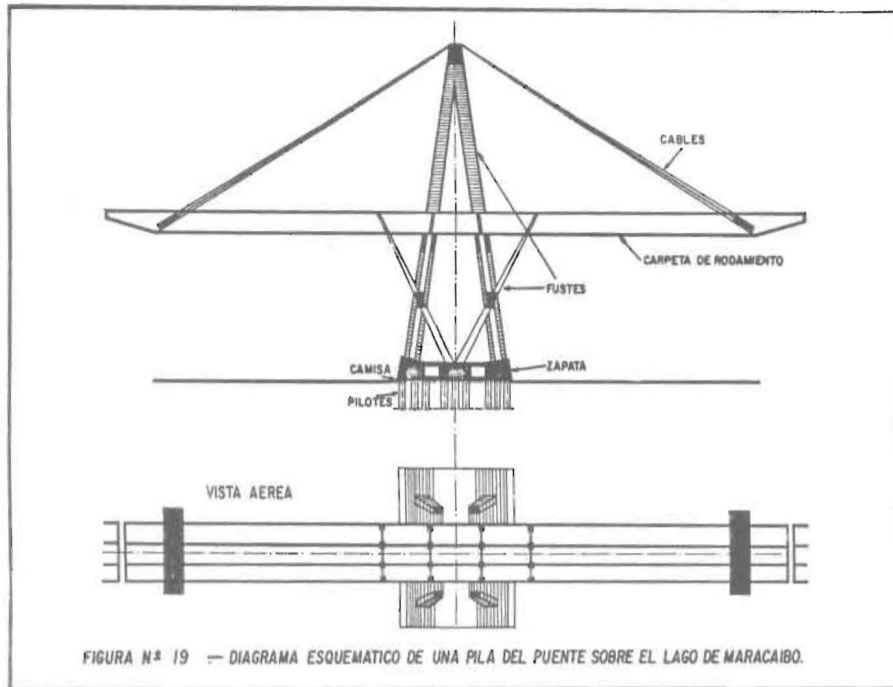
(ii) Zapatas y fustes situados en las pilas cercanas a la costa (zona de salpique).

Las figuras 21 y 22 muestran el gran deterioro que están sufriendo las zapatas y algunos fustes especialmente los que se encuentran cercanos a las costas. Se ha observado que en estas zonas el grado de corrosión es mayor, lo cual concuerda con el hecho de que en esas zonas el contenido de iones

| UBICACION             | PESO UNITARIO<br>lb/pies <sup>3</sup> |                       | ABSORCION<br>%<br>En 48<br>Horas | RESISTENCIA<br>A LA<br>COMPRESION<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--|
|                       | Seco<br>al horno                      | Seco Su-<br>perficial |                                  |  |
| Zapata de<br>pila 23  | 145.4                                 | 152.4                 | 4.9                              | 575  |
|                       | 144.5                                 | 152.9                 | 4.5                              |  |
|                       | 144.8                                 | 151.9                 | 4.9                              |  |
| Zapata de<br>pila 31  | 134.0                                 | 146.4                 | 9.2                              | 457  |
|                       | 144.5                                 | 153.3                 | 6.1                              | 437  |
|                       | 144.7                                 | 152.8                 | 5.6                              | 413  |
| Fuste de<br>pila 31   | 131.5                                 | 144.1                 | 9.6                              | 588  |
|                       | 141.9                                 | 150.6                 | 6.2                              | 551  |
|                       | 139.0                                 | 147.4                 | 6.1                              |  |
| Zapata de<br>pila 120 | 147.0                                 | 153.9                 | 4.6                              | 205  |
|                       | 144.0                                 | 152.6                 | 6.0                              | 229  |
|                       | 141.3                                 | 149.3                 | 5.7                              |  |
| Zapata de<br>pila 10  | 142.6                                 | 152.8                 | 7.2                              | 341  |
|                       | 137.1                                 | 146.9                 | 7.2                              | 381  |
|                       | 138.2                                 | 148.5                 | 7.4                              |  |
| Fuste de<br>pila 22   | 145.6                                 | 152.2                 | 4.5                              | 596  |
|                       | 142.3                                 | 149.5                 | 5.1                              |  |
|                       | 141.5                                 | 148.0                 | 4.5                              | 628  |

TABLA No.1.- Características Físicas del Concreto en el Puente Sobre el Lago de Maracaibo. Datos suministrados por el Ministerio de transporte y Comunicaciones (M.T.C.).





cloruro es mayor (ver Figura 18). Aquí también se puede observar el poco espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo, lo cual permite que el daño sea mayor.



Figura No. 20

Delaminación del concreto por corrosión del refuerzo en la zona alta de un fuste donde se observa el poco recubrimiento de concreto sobre la armadura. (<2cm).

En estas zonas también se llevarán a cabo varios análisis antes de la protección, entre ellos tenemos:

- Utilizar el método del sonido para detectar las zonas que tienen problemas de corrosión.
- Análisis de cloruros a distintos niveles de profundidad dentro de la estructura en las zonas detectadas en (a).
- Mediciones de potenciales con electrodos de referencias embebidos y externos al concreto.

(iii) Parte exterior de la camisa

La zona de la camisa que queda en contacto

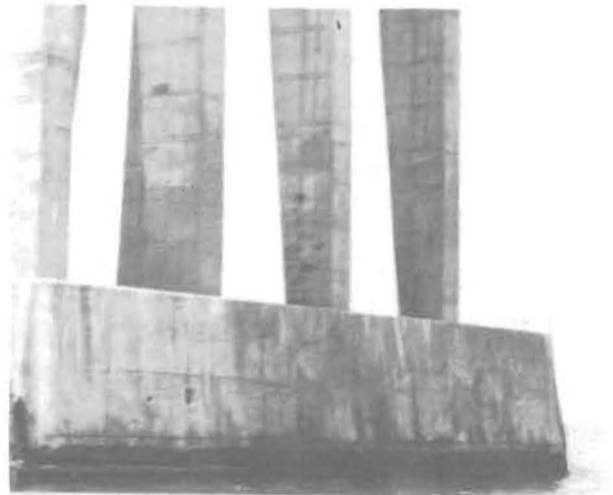


Figura No. 21

Corrosión en la zapata y fuste de una pila cercana a la costa Este del Puente.



Figura No. 22

Gran deterioro de un fuste de una pila cercana a la Posta Oeste del Puente. Zona de salpique ya reparada.

con el medio exterior, es una de las zonas más corroídas, lo cual es lógico por su situación (zona situada entre marea alta y baja). La Figura 23 muestra el estado de gran deterioro que presenta esta parte de la estructura. Aún cuando esta zona no forma parte de la estructura, está protegida al pilote y por lo tanto es necesario darle una buena protección. Aquí se puede observar el mínimo espesor (<2 cms.) de recubrimiento de concreto que tiene la estructura.

En esta zona se hará un estudio de potenciales y en algunas que no presenten el deterioro mostrado en la Figura 23 se le harán análisis de cloruros a diferentes profundidades. En algunas pilas será necesario remover casi todo el concreto en estas zonas.

(iv) Parte interior de la camisa y pilotes en la parte no sumergida

En estas zonas hay evidencias de que existe corrosión (ver Figuras 24 y 25). Esto es lógico ya que es una zona en donde hay suficiente oxígeno disponible como para que difunda a través del concreto. Las fotografías muestran grietas en algunos pilotes que según la empresa que tuvo a su cargo la construcción del puente, se deben a que hubo que alargar algunos pilotes que quedaron cortos utilizando un cilindro de acero como encofrado, siendo éste el que se corroe (ver Figura 26). Sin embargo,

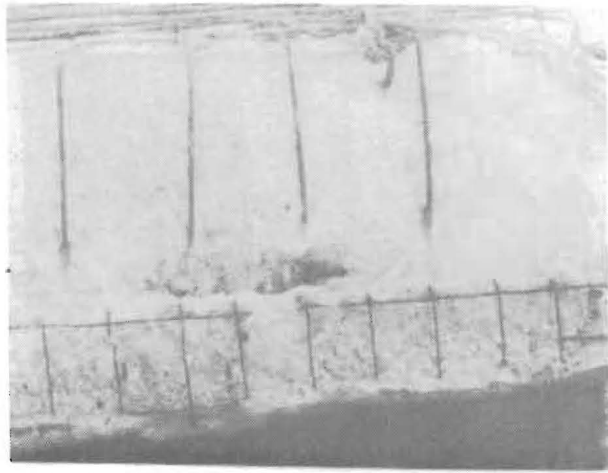


Figura No. 23

Zapata y camisa muy deterioradas en una pila del lado Este del Puente en la zona de marea.

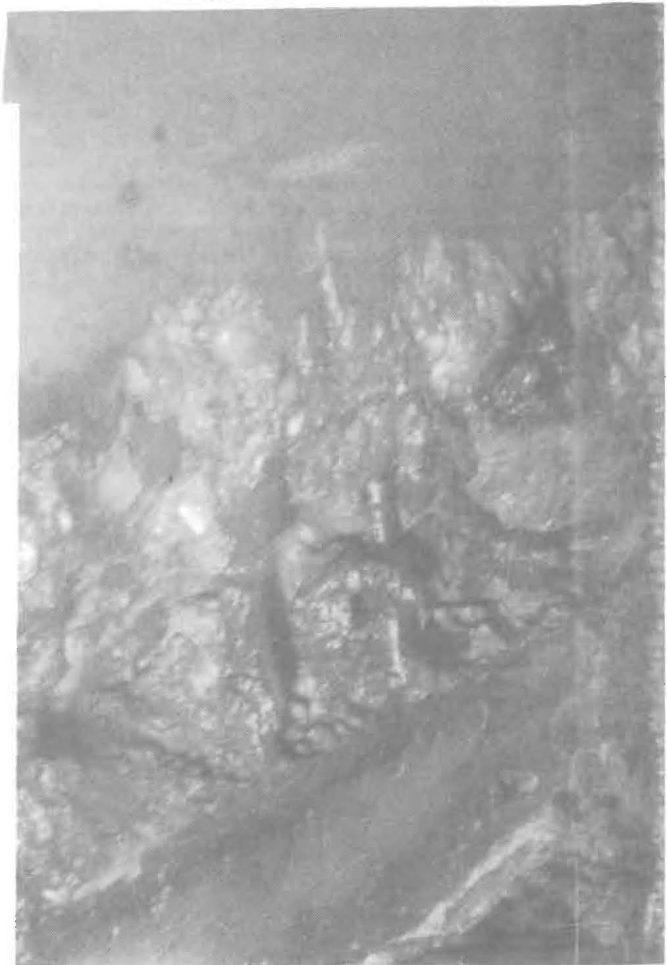


Figura No. 24

Interior de la camisa. Delaminación del concreto por corrosión del refuerzo.

(v) Pilotes sumergidos



Figura No. 25

Grietas en un pilote. Zona no sumergida. Se observa al buzo con la mano introducida en la grieta.

por el sitio y la magnitud de la grieta como se observa en la Figura 25, es posible que el refuerzo haya comenzado a corroerse. Por lo tanto, es necesario proteger esa zona también lo cual se debe llevar a cabo con protección catódica por ánodos de sacrificio embebidos en el concreto. Luego, la parte interior de la camisa se puede proteger con ánodos en forma de barra (no requiriendo ningún diseño especial ya que esa parte no se ve).

Ahora bien, en el pilote se hará lo siguiente: remover el cilindro de acero (ver Figura 26) y proteger el refuerzo con un brazalet de ánodo de sacrificio embebido en concreto.



Figura No. 26

Pedazos de cilindro que servían como encofrado para el alargamiento de los pilotes.

En estas zonas no se tienen evidencias, hasta el momento, de problemas de corrosión, pero es necesario hacerles una inspección muy cuidadosa para ver si existen grietas debido al hincado del pilote o a otros factores. Esto es necesario debido a que se tienen valores de velocidades de corrosión de acero sumergido y estos valores llegan a velocidades tan altas como 30 mpy. Esto se debe a que el contenido de oxígeno a distintos niveles de profundidad es aproximadamente constante hasta 55 ft. (4 ppm).

Como se conoce, en esta zona los trabajos son difíciles y no se sabe con seguridad si sería posible el control de potenciales, de ser necesario aplicar protección catódica. Por lo tanto se propone lo siguiente:

a) Realizar un estudio muy cuidadoso de algunos de los pilotes, por lo menos uno en cada pila para ver si existen grietas. (limpieza de la incrustación biológica).

b) Utilizar los pilotes de ensayo que fueron dejados sumergidos en el lago para hacer estudios de:

1) Análisis de iones cloruro y medición de potenciales con electrodos de referencia embebidos y externos al concreto.

2) Aplicar protección catódica al pilote con ánodos de Al y medir potenciales con los dos sistemas de electrodos de referencia mencionados anteriormente.

Una vez realizado esto se podrá saber si hay posibilidades de que exista corrosión en el refuerzo y si el sistema de protección catódica puede ser monitorizado por medición de potenciales en esta parte de la estructura, la cual es importante.

Es de hacer notar que se pueden observar diferentes grados de corrosión, dependiendo de las zonas. En los fustes y en las barandas se observa una corrosión muy localizada, mientras que en las zapatas y camisas se observa una corrosión más generalizada. Esto se debe a que éstas son las zonas de salpique y las zonas entre marea alta y baja.

RESULTADOS

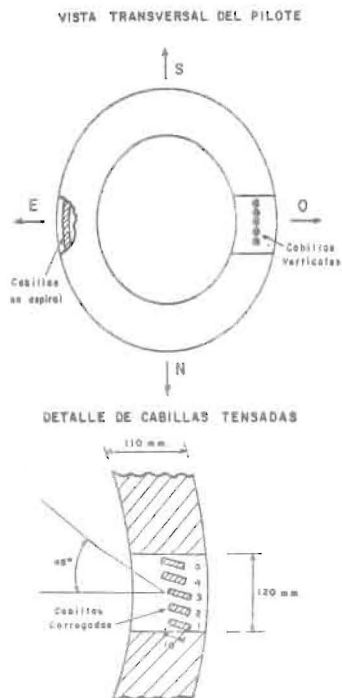
La inspección visual como muestran las fotografías anteriores, los análisis de cloruros y las determinaciones de potenciales (ver tabla No.2) indican un gran deterioro del puente. Obsérvese que tanto los potenciales como la concentración de iones cloruro están por encima de los niveles establecidos (-350 m.v. vs.  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}^{(3)}$  y <0.2 por ciento de iones cloruro por peso de concreto respectivamente (5-6)).

Para el uso de protección catódica en los pilotes sumergidos era necesario determinar si existía continuidad eléctrica en la armadura y si los ánodos de sacrificio (Aluminio con Indio y Cinc) daban suficiente protección<sup>(13)</sup>. Para ello se utilizaron 2 pilotes de prueba situados al lado del puente y los cuales fueron de prueba cuando éste se constru-

| POTENCIALES EN mV. Vs. Ag/ClAg         |       |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cabilla No.                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| 10/9/80 +<br>(15h. 56')                | -580  | -580  | -580  | -580  | -580  | -580  | -580  |
| 10/9/80 + *<br>(15h. 56')<br>I= 350 mA | -680  | -680  | -680  | -680  | -680  | -680  | -680  |
| 11/9/80<br>(10h. 12')<br>I= 330 mA     | -950  | -950  | -950  | -950  | -950  | -950  | -950  |
| 11/9/80 ***<br>(11h. 72')<br>I= 270 mA | -1010 | -1010 | -1010 | -1010 | -1010 | -1010 | -1010 |
| 23/10/80<br>(9h. 11')                  | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 |
| 20/1/81<br>(11h. 45')                  | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 | -1000 |
| 15/83<br>h. 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 cabilla No. 4

TABLA No. 3 Resultados de la protección catódica del Pilote de prueba No. 8 situado al Norte del Puente sobre el Lago de Maracaibo, (5 cabillas verticales (tensadas) y 2 pasos de la espiral).



yó (ver Figura 27). Se leyeron potenciales antes de la protección, notándose que estaban en la zona de corrosión (-580 m.v. vs. Ag/ClAg) y después de la misma, alcanzándose potenciales superiores en valo-

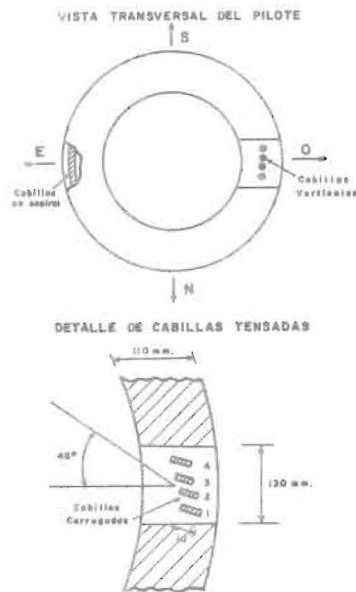
res absolutos a -800 m.v. (ver tablas 3 y 4). Ver Figuras 28, 29 y 30 para la instalación del sistema.

Con estas pruebas se lograron dos objetivos:

| POTENCIALES EN mV. vs. Ag/ClAg.        |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cabilla No.                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 24/9/80 -<br>(13h.)                    | -620  | -620  | -620  | -620  | -620  |
| 24/9/80 - -<br>(13h. 15')<br>I= 750 mA | -750  | -750  | -750  | -750  | -750  |
| 25/9/80<br>(10h. 50')<br>I= 400 mA     | -840  | -840  | -840  | -840  | -840  |
| 23/10/80<br>(8h. 59')                  | -920  | -920  | -920  | -920  | -920  |
| 20/1/81<br>(10h. 30')                  | -1011 | -1011 | -1011 | -1011 | -1011 |
| 2/5/83<br>(9h. 30')                    | -990  | -990  | -990  | -990  | -990  |

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

TABLA No. 4 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, (4 cabillas verticales tensadas y 1 paso de espiral).



| Pila No. | Parte de la pila y Orientación                  | Potencial (mV. vs. Cu/SO <sub>4</sub> Cu) | Profundidad del muestreo *            | Concentración de Cloruro % p/p | Observaciones  |
|----------|---|---|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| 13       | Zona baja del Fuste junto a zapata-Norte        | -540                                      | Superficial<br>Profunda               | 0.669<br>0.512                 | Cabillas corroida y ya no existía                          |
| 16       | Zona baja del Fuste junto a la zapata-Norte     | -448                                      | Superficial<br>Intermedia<br>profunda | 0.317<br>0.730<br>0.781        | La muestra tomada en superficie reparada-refuerzo corroido |
| 16       | En un Fuste interno de la Pila - Oeste.         | -545                                      | Superficial<br>Profunda               | 0.616<br>0.313                 | Refuerzo corroido  |
| 16       | En un Fuste externo de la pila lado interno-Sur | -424                                      | Superficial<br>Profunda               | 0.454<br>0.385                 | Refuerzo corroido  |
| 16       | Zapata Norte                                    | No se pudo medir                          | Superficial<br>profunda               | 0.287<br>0.235                 | Refuerzo corroido a profundidad de 1 cm.                   |
| 23       | Zapata zona de Salpique Norte                   | -466                                      | -                                     | -                              | Refuerzo corroido-algunas cabillas no existentes           |

\* Muestras tomadas en lugares donde el concreto se delaminaba (cubierta de concreto sobre el refuerzo).

TABLA No. 2 Medidas de Potenciales en milivoltios vs. electrodo de Cu/SO<sub>4</sub>Cu y Concentración de Cloruro en % p/p (en base a concreto seco). Pilas del Puente sobre el Lago de Maracaibo.

- 1) Proteger todas las cabillas que fueron destapadas, con lo cual se demostró que la protección era adecuada.
- 2) Se observó la continuidad que existe entre estas cabillas ya que la inyección de corriente

se hizo siempre por una sola cabilla, apareciendo protegidas todas las demás por igual.

Luego este sistema, el cual es el único que



Figura No. 27  
Pilotes de prueba situados al Norte del Puente.

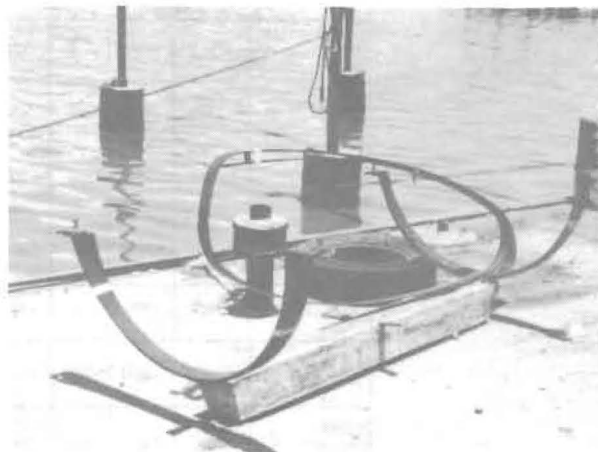


Figura No. 28  
Anodo de Aluminio-Indio-Cinc utilizado en la Protección Catódica de los pilotes de prueba.

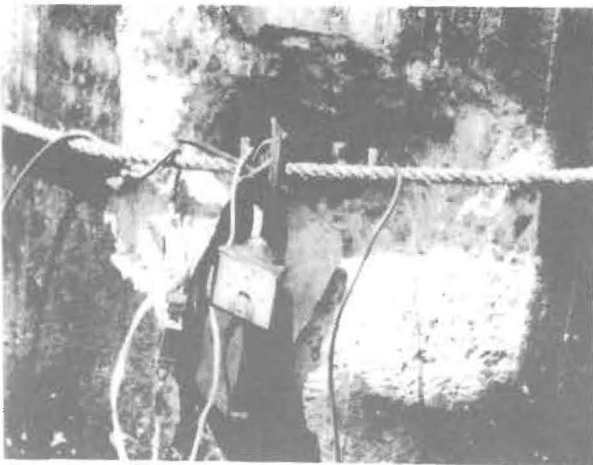


Figura No. 29

Instalación del sistema de Protección Catódica al Pilote.



Figura No. 30

Aplicación de la soldadura del ánodo al refuerzo.

puede controlar este proceso irreversible de corrosión, puede ser utilizado en los pilotes del puente.

Para el uso de protección catódica por ánodos de sacrificio en las camisas era necesario ensayar a nivel de laboratorio ánodos de Aluminio y Zinc (comparados con Magnesio), para ver cual resultaba mejor y así diseñar un sistema adecuado para tal fin. En esta sección los ánodos deben estar embebidos en concreto y, además existía un problema estético.

tico.

Los resultados obtenidos en el Laboratorio (14-15) indican que los ánodos de Aluminio y Zinc aleado prometen dar una mejor protección al sistema siempre y cuando los ánodos sean embebidos en un buen relleno y se haga un buen diseño del sistema para una distribución uniforme de corriente hacia toda la estructura. Sin embargo, el Aluminio promete mejor protección que el Zinc. Las Figuras 31 y 32 muestran las variaciones de potenciales y corrientes con el tiempo para bloques de concreto reforzados.

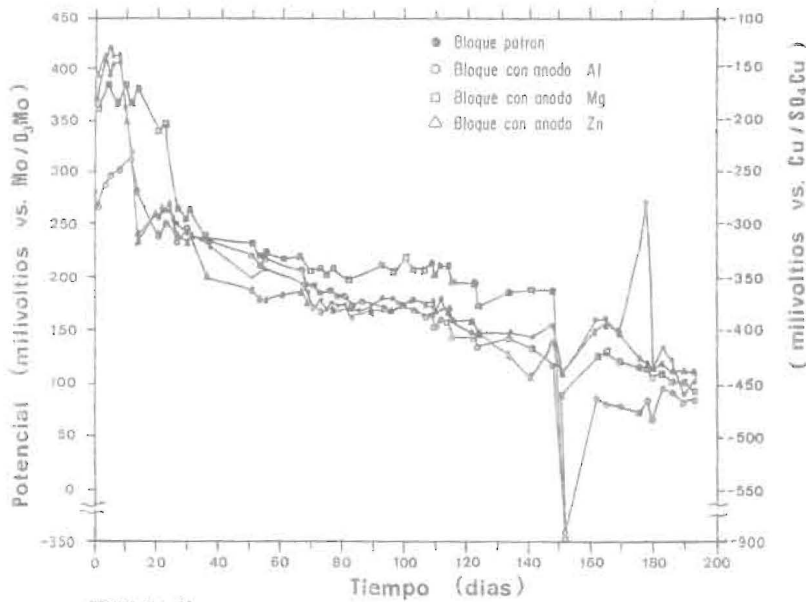


FIGURA No. 31

Variación con el tiempo del potencial del refuerzo de los bloques antes y después de conectar los ánodos (15).

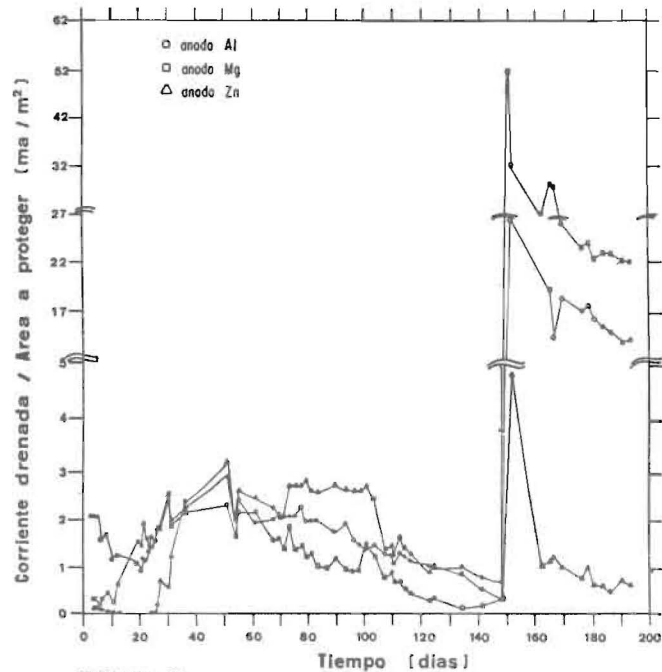


FIGURA No. 32

Variación con el tiempo de la corriente drenada por el ánodo por unidad de superficie a proteger (15).

do protegidos con ánodos de Aluminio, Magnesio y Cinc respectivamente (15). Es de hacer notar que aún cuando los ánodos de Magnesio pueden proteger el refuerzo, el gran volumen de sus productos de co-

rosión agrietan al concreto.

Este trabajo fué financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) mediante el proyecto N°DDCT-520.

#### LITERATURA CITADA

- 1) BROWN, R. y KESSLER, R.: "A new Concept in cathodic Protection of Steel in Concrete- The use of Conductive Materials". Paper number 179, presentado en Corrosión 83, Abril 18-22, 1983.
- 2) HAUSMAN, D.: "Steel Corrosion in Concrete". Materials Protection, Vol. 6, No. 11, 1967.
- 3) STRATFULL, R.: "Half-Cell Potentials and the corrosion of steel in Concrete". Highway research Record 433 (1973).
- 4) ARUP, H.: "Steel in Concrete". Newsletter publicada por Korrosions-centralen, The Danish corrosion Center - Denmark, No. 7, January 1981.
- 5) CLEAR, K. y HAY, R.: Federal Highway Administration, Report No. FHWARD-73-32, Vol. 1, 1973.
- 6) LOCKE, C. y SIMAN, A.: "Electrochemistry of reinforcing Steel in Salt-Contaminated Concrete". STP-713. ASTM Publication, pag. 13, Agosto 1980.
- 7) STRATFULL, R.: "Experimental Cathodic Protection of a Bridge Deck". TRB Research Record 500 (1974).
- 8) FROM, H.: "Cathodic Protection of Rebar in concrete Bridge Decks". Materials Performance, Vol. 16, No. 11 (1977).
- 9) WHITING, D. y STARK, D.: "Galvanic Cathodic Protection for Reinforced Concrete Bridge Decks- Field Evaluation". National Cooperative Highway Research Program, Report 234, June 1981.
- 10) FINLEY, H.: "Corrosion Problems in Lake Maracaibo". Corrosion Prevention and Control, Septiembre, 1963.
- 11) RINCON, O.: Laboratorio de Corrosión - Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia (L.U.Z.), Maracaibo, Venezuela.
- 12) CLIMASTONE, P. y MACHADO, H.: "Determinación de los elementos agresivos para el Concreto presentes en el agua del Lago de Maracaibo en Función del tiempo y lugar". Tesis de Grado, Universidad del Zulia (L.U.Z.), Maracaibo, Noviembre, 1978.
- 13) RINCON, O. y SANCHEZ, M.: "Protección Catódica de Pilotes de Prueba del Puente sobre el Lago de Maracaibo". Reporte presentado al CONICIT, Julio, 1981.
- 14) ROMERO, A. y FERNANDEZ, M.: "Determinación de

la eficiencia de Anodos de Sacrificio para la protección Catódica en Concreto Reforzado". Trabajo Especial de Grado, Universidad del Zulia (L.U.Z.), Maracaibo, 1982.

15) RINCON, O.: "Anodos de Sacrificio - Una alternativa para la Protección del Refuerzo del Concreto". Trabajo de Ascenso a Profesor Asociado. Universidad del Zulia (L.U.Z.), Maracaibo, 1982.

Recibido el 10 de junio de 1983