

# **“INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA APLICACIONES PORTUARIAS. CASO: PANTALLAS DE PROTECCIÓN DEL MUELLE DE ESPIGÓN DE AUTORIDAD PORTUARIA DE PUERTO BOLÍVAR”**

Jimmy Rubén González Armijos<sup>1</sup>, Jorge Julián Peña Estrella<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Mecánico, 2003.

<sup>2</sup>Director de Tesis, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1987.

## **RESUMEN**

Como material para la construcción se pensó que el hormigón armado tenía una vida útil ilimitada, pero hoy en día se reportan un número creciente de estructuras deterioradas por la corrosión del acero embebido en el hormigón. Dado lo anterior, presentaremos una Inspección realizada en el Sistema de Protección del Muelle de Espigón de Puerto Bolívar, donde se realizó ensayos en el agua de mar, hormigón y refuerzo, por separado.

Los ensayos realizados en Agua de Mar: Concentración de Cloruros y Sulfatos, Resistividad Eléctrica, Medición de pH y Salinidad. En el Sistema de Protección: Concentración de Cloruros y Sulfatos, Carbonatación, Ultrasonido y Medición de Potenciales de la Armadura. Se complementa con Inspección Visual y diagnóstico de los ensayos realizados en la estructura armada. Finalmente, se contaron con datos suficientes que permitieron poder conocer el estado actual, desde el punto de vista de la corrosión, de las Pantallas de Protección. Así, se emitieron recomendaciones para una correcta reparación de los muros de contención.

## **INTRODUCCIÓN**

Autoridad Portuaria de Puerto Bolívar, es una Institución que presta servicios al Estado en materia de exportación de productos agrícolas. Para el efecto, consta con dos Muelles: El Muelle Marginal y El Muelle de Espigón. Nuestro estudio lo desarrollamos en el Muelle de Espigón. Éste, con 260 metros de largo, 720 pilotes pretensados de hormigón, ubicado perpendicularmente a la costa y, con un Sistema de Defensa que contiene 14 Pantallas de Protección del Lado Norte, 28 del Lado Sur y 2 Pantallas Curvas Frontales, registra en el año colisiones con navieras que obligan a la Institución a realizar reparaciones de su estructura armada.

Dados estos antecedentes, el medio agresivo en el cual se encuentran instaladas las Pantallas de Protección, el poco o nada mantenimiento que se lleva a cabo y, con el agravante, que en sus 19 años de vida útil (construcción de Pantallas, 1984) no se ha realizado jamás una Inspección, desde el punto de vista de la corrosión, conlleva a que éste tipo de estudio sea inminente.

## **CONTENIDO**

### **ESTUDIO Y MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN LAS ARMADURAS DE HORMIGÓN PARA APLICACIONES PORTUARIAS**

El hormigón reforzado es el material de construcción más utilizado en el mundo de la construcción, debido a que confiere una protección de doble naturaleza al acero embebido: 1) Proporciona una barrera física que separa al acero del medio ambiente (agua de mar) y 2) El líquido encerrado en los poros ofrece la suficiente alcalinidad que permite al acero permanecer en estado de pasivación.

El Hormigón es una mezcla de pasta y agregados. De aquí, que existen Normas Internacionales que recomiendan el tipo de cemento, utilizado en la pasta de hormigón, las exigencias a cumplir en cuanto al nivel de cloruros, sulfatos, aluminato tricálcico, espesor de recubrimiento de capa, dosificación, diseño, entre otros.

Para hormigones instalados en agua de mar, dada su agresividad, acelera los procesos de corrosión, en donde la concentración de cloruros y carbonatación, son los mecanismos de corrosión más comunes en esta clase de estructuras.

Debido al riesgo que involucra el ataque del agua de mar, en estructuras de concreto, se han desarrollado métodos de prevención, contra la corrosión, que permiten al acero situarse en la zona de pasividad. Entre esos métodos podemos citar: Sistemas de Protección Catódica, Realcalinización, Desalinización, Recubrimientos sobre la armadura y sobre el hormigón, inhibidores, entre los más conocidos.

### **DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE INSPECCIÓN - PANTALLAS MUELLE DE ESPIGÓN (AUTORIDAD PORTUARIA DE PUERTO BOLÍVAR - ECUADOR)**

Existen dos tipos de inspecciones a realizar, para conocer el verdadero origen de la corrosión, si existiese: Inspección Detallada e Inspección Preliminar. La aplicación de cualquiera dependerá de la cantidad de información requerida.

Los ensayos a llevar a cabo en la Inspección Detallada contemplan:

#### **Agua de Mar:**

- 1) Resistividad Eléctrica.**
- 2) Concentración de Cloruros.**
- 3) Concentración de Sulfatos.**
- 4) Ensayo pH.**

### Hormigón:

- 5) Resistividad Eléctrica.
- 6) Ultrasonido.
- 7) Densidad, Absorción y Porosidad.
- 8) Profundidad de Carbonatación.
- 9) Concentración de Cloruros.
- 10) Concentración de Sulfatos.

### Armadura:

- 11) Ubicación y Localización de la Armadura.
- 12) Medición de la Velocidad de Corrosión.
- 13) Medición de Potenciales.

Acompañada con una Inspección Visual total de todos los elementos. En cambio, la Inspección Preliminar se acompaña de los ensayos No. 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11 y 13. Una Inspección Visual general es suficiente en esta clase de inspección.



**FIGURA 1 Y 2. VISTA LATERAL: 28 Y 14 PANTALLAS DE PROTECCIÓN DEL MUELLE DE ESPIGÓN, A.P.P.B.**

Para nuestro caso, realizamos un análisis **R.B.I. (RISK BASED INSPECTION)**<sup>(12)</sup>, para conocer el riesgo al cual están sometidas las Pantallas de Protección. El resultado de dicho análisis dio como resultado que el riesgo era **Moderado**. Por ende, se decidió por la **Inspección Preliminar** de los Muros de Contención. El total de número de muros a ser ensayados fueron de 3 (para esta selección se utilizó Norma Civil ANSI/ASQC Z1.4)<sup>(14)</sup>.

A continuación presentaremos los resultados de los análisis/ensayos realizados.

### **Análisis del Agua de Mar y Atmósfera**

Todos los ensayos se realizaron en Laboratorio Homologado.

**TABLA I**  
**FORMULARIO DEL AGUA DE MAR Y ATMÓSFERA (RESULTADOS)**

**Atmósfera**

**Agua**

Humedad Ambiental: <u>&gt; 70%</u>	Cloruros: <u>14393.30 ppm</u>
Temperatura: <u>25° C – 33° C</u>	Sulfatos: <u>2479.16 ppm</u>
Régimen de Vientos: <u>Variable</u>	pH: <u>7.641</u>
	Temperatura: <u>&gt; 20° C</u>
	Resist.Eléct.: <u>51.35 Ohm-cm</u>
	Salinidad: <u>29.92 gr/ml</u>
	Densidad: <u>1019.20 Kg/m<sup>3</sup></u>

**Análisis Físico-Químico del Hormigón**

**Ultrasonido (ASTM C 597)**

Equipos, criterios de evaluación y procedimientos utilizados para el presente ensayo, según Normativa ASTM C 597. Ahora, presentamos los resultados promedios encontrados en las Pantallas seleccionadas (Pantalla No. 20 – Lado Norte, Pantalla No. 4 – Lado Norte y Pantalla Frontal Curva Izquierda – Lado Oeste) del presente ensayo.



**FIGURA 3. MEDICIÓN INDIRECTA DE ULTRASONIDO EN PANTALLA CURVA  
FRONTAL IZQUIERDA, LADO OESTE, COTA + 4.300 MSNR, CARA  
SUPERIOR**

**TABLA II**  
**RESULTADOS DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LAS PANTALLAS**

INSPECCIÓN TÉCNICA							
Fecha de Inspección: (21-23)/06/03							
Temp. Amb.: 29°C				HR > 70 %			
Dimensiones: 4300 x 1800 x 700							
No. Ensayo	Cota MSNR	L (mm)	t (μs)	V (m/s)	σ <sub>k</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) (MPa)	Observaciones	
						Calidad del Hormigón	Durabilidad del Hormigón
RESULTADOS PROMEDIOS							
1	1.200	Var.	Var.	4500	35	Durable	Intermedio
2	2.100	Var.	Var.	4400	35	Durable	Intermedio
3	4.300	Var.	Var.	3000	14	Normal	Bajo

**Nota:**

MSNR: Metros sobre el Nivel de Referencia (Nivel cero de referencia donde empieza la Pantalla de 4.3 m de altura; zona ubicada a 1.5 m sobre el nivel de marea baja del mar).

L: Distancia de separación de los transductores.

T: Tiempo de vuelo de la onda en el hormigón.

V: Velocidad de la onda en el hormigón.

σ<sub>k</sub>: Resistencia del hormigón.

**Ensayo de Carbonatación**

Se utilizó una solución de fenolftaleína al 1%. A continuación, los resultados encontrados.



**FIGURA 4. PRUEBA CON FENOLFTALEÍNA EN PANTALLA No. 20, LADO SUR, COTA + 2.400 MSNR, CARA INTERIOR**

**TABLA III  
RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARBONATACIÓN**

<b>INSPECCIÓN TÉCNICA</b>					
Fecha de Inspección: (1-23)/07/03					
Temp.Amb.: 29 <sup>0</sup> C			HR > 70 %		
Dimensiones: 4300 x 1800 x 700					
No. Ensayo	Prof. (mm)	Cota MSNR	Coloración Observada	pH	Observación
<b>PANTALLA No. 20 - LADO SUR, PANTALLA No.4 - LADO NORTE, PANTALLA CURVA FRONTAL IZQUIERDA – LADO OESTE</b>					
<b>RESULTADOS PROMEDIOS</b>					
1	0-7	2.400 1.200	Rosado a rojo púrpura	9.0 - 8.2	Existe carbonato CO <sub>3</sub> , Nada de CO <sub>2</sub> libre, Nada de alcalinidad caústica OH <sup>-</sup> .
2	8-30	2.400 1.200	Rojo Púrpura	> 9.8	Nada de Bicarbonato HCO <sub>3</sub> , Nada de Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub> .
3	31-60	2.400 1.200	Rojo Púrpura	> 9.8	Nada de Bicarbonato HCO <sub>3</sub> , Nada de Dióxido de Carbono CO <sub>2</sub> .

Adicional se evaluó la velocidad de penetración del frente carbonatado. He aquí, los resultados.

**TABLA IV  
RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE CARBONATACIÓN**

Esesor Carbonatado X (mm)	Tiempo de Carbonatación t (años)	Constante de Carbonatación K (mm/año <sup>0.5</sup> )	Esesor de Recubrimiento Armadura (mm)	Tiempo de Carbonat. Armadura (años).
7	19	1.60591	10	38.78
<b>PREDICCIÓN DE CARBONATACIÓN EN EL TIEMPO</b>			20	155.10
			30	348.98
			40	620.41
			50	969.39
			60	1395.92
			70	1900.00

### Concentración de Cloruros (Cl<sup>-</sup>)

Pruebas y materiales utilizados, según Normativa ASTM C 1411. Criterios de Evaluación según UNE – 2001. A continuación, a manera de ejemplo, presentamos los resultados encontrados en la Pantalla No. 4, cara interior izquierda.

**TABLA V**  
**RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS EN PANTALLA No. 4**

INSPECCIÓN TÉCNICA				
Fecha de Inspección: (01-20)/07/03				
Temp. Amb.: 29°C		HR > 70 %		
Dimensiones: 4300 x 1800 x 700				
No. Muestra	Prof. (cm)	Cota MSNR	Conc. de Cl <sup>-</sup> (% / cem)	Observaciones Porcentaje < 0.1% ?
PANTALLA No. 4 - LADO NORTE				
CARA INTERIOR - IZQUIERDA				
1	0.0-1.0	2.400	0.98847	NO
2	1.0-3.0	2.400	0.68214	NO
3	3.0-6.5	2.400	<b>0.43129</b>	<b>NO</b>
4	0.0-1.0	1.200	1.14336	NO
5	1.0-3.0	1.200	0.70354	NO
6	3.0-6.5	1.200	<b>0.49336</b>	<b>NO</b>

**Nota:**

Cem: Cemento

Prof: Profundidad

### Concentración de Sulfatos(SO<sub>3</sub><sup>-2</sup>)

Prueba y criterios de evaluación utilizados según Normativa UNE – 2001. Los resultados encontrados, a manera de ejemplo, en la Pantalla No. 4, cara interior izquierda.



**FIGURA 5. EXTRACCIÓN DE HORMIGÓN PARA ENSAYO EN PANTALLA No. 4, LADO SUR, COTA + 0.900 MSNR, CARAS INTERIORES DERECHA E IZQUIERDA**

**TABLA VI**  
**RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS**

<b>INSPECCIÓN TÉCNICA</b>					
Fecha de Inspección: (01-20)/07/03					
Temp. Amb.: 29°C			HR > 70 %		
Dimensiones: 4300 x 1800 x 700					
No. Muestra	Prof. (cm)	Cota MSNR	Conc. de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (% / CEM)	Conc. de SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (% / CEM)	Observación. Porcentaje SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> < 3.5% ?
<b>PANTALLA No. 4 - LADO NORTE</b>					
<b>CARA INTERIOR - IZQUIERDA</b>					
1	0.0-1.0	2.400	0.73524	0.88583	SI
2	1.0-3.0	2.400	0.49817	0.60021	SI
3	3.0-6.5	2.400	0.42766	<b>0.51526</b>	<b>SI</b>
4	0.0-1.0	1.200	1.18636	1.42935	SI
5	1.0-3.0	1.200	0.63672	0.76713	SI
6	3.0-6.5	1.200	0.56238	<b>0.67756</b>	<b>SI</b>

### Ensayos con Respecto al Acero Embebido

#### Medición de Potenciales

Equipo, procedimiento y criterios de evaluación, según Normativa ASTM C 876. A continuación, exponemos los resultado promedios encontrados en las Pantallas No. 4 y No. 20.



**FIGURA 6. TOMA DE POTENCIALES NATURALES EN LA PANTALLA No. 20, LADO SUR, COTA +1.200 MSNR, CARA LATERAL IZQUIERDA**

**TABLA VII**  
**RESULTADOS POTENCIALES EN PANTALLAS No.4 y No. 20**

<b>INSPECCIÓN TÉCNICA</b>			
Fecha de Inspección: (10-12)/07/03			
T.amb.: 29		HR > 80 %	
Dimensiones: 4300 x 1800 x 700			
No. Ensayo	Cota MSNR	POT. Vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> mV	Observaciones Riesgo de Corrosión
1	0.600	-470	Alto
2	0.900	-420	Alto
3	1.200	-350	Alto
4	1.500	-250	Intermedio
5	1.800	-240	Intermedio
6	2.100	-250	Intermedio
7	2.400	-200	Bajo
8	2.700	-180	Bajo
9	3.000	-170	Bajo
10	3.300	-200	Bajo
11	3.600	-130	Bajo
12	3.900	-100	Bajo

Cabe indicar, que los potenciales en la Pantalla Frontal Izquierda abarcaron valores menores a  $-350$  mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub> en casi la totalidad la Pantalla de Protección.

### **CONCLUSIONES**

Se concluye lo siguiente:

- 1) Los resultados encontrados en los ensayos, practicados en el agua de mar, califican al medio como altamente agresivo.
- 2) Los ensayos de ultrasonido, practicados en las pantallas de protección No. 20, No. 4 y Curva Frontal Izquierda, tanto de velocidad de propagación de onda como de resistencia del material, denotan que el hormigón con que fueron construidas las pantallas de protección es de excelente calidad.
- 3) Los ensayos de sulfatos, practicados en las pantallas de protección No. 20, No. 4 y Curva Frontal Izquierda, dan como resultado que el riesgo por desmoronamiento de hormigón, es despreciable.
- 4) Los ensayos de cloruros, practicados en las pantallas de protección No. 20, No. 4 y Curva Frontal Izquierda, dan como resultado que el porcentaje de cloruros actual

se encuentra por encima del exigido por la Norma UNE 2001<sup>(4)</sup>. Por tanto, el acero está en un estado activo para un posible proceso de corrosión.

- 5) Los potenciales naturales de la armadura, en la zona de alta y baja marea, de las pantallas seleccionadas, bordean valores de  $< - 350$  mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, lo que indica, según Norma UNE 2001<sup>(4)</sup>, que el refuerzo tiene una probabilidad del 90% para que un posible proceso de corrosión ocurra.
- 6) El frente carbonatado alcanza la profundidad de 7 mm, en la zona de alta y baja marea, de las pantallas seleccionadas, en los 19 años de construcción de las mismas. Sin embargo, el frente carbonatado no ha alcanzado la armadura.
- 7) El método seleccionado, para evitar que la armadura de las pantallas de protección se corra, han sido los inhibidores. Aunque los cloruros y potenciales naturales son muy altos en la vecindad de la armadura, los inhibidores de corrosión están protegiéndola, de manera efectiva.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1) J. GONZÁLEZ, “Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado para Aplicaciones Portuarias” (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003).
- 2) ASTM. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 2002 Construction – Concrete and Aggregates, Vol. 04.02, Ensayos: ASTM C 597 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete), ASTM C 1411 (Concentración del Cloruros), C 876 (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)
- 3) CHANDLER KENNETH A., Marine and Offshore Corrosion, Primera Edición, Butterworth and Co. (Publishers) Ltd., 1985
- 4) Dirección Electrónica: [www.aenor.es](http://www.aenor.es)
- 5) DURAR, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, Red Temática XV.B – Durabilidad del Hormigón, España, 1997.
- 6) TWI AND ROYAL & SUNALLIANCE ENGINEERING FOR HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, Best Practice for Risk Based Inspection as a Part of Plant Integrity Management, Report 363/2001, Pág. A1 – A14.
- 7) PAUL CHESS, GRONVOLD AND KARNOV, Cathodic Protection of Steel in Concrete, Primera Edición, E & FN SPON Editores, 1998, Londres, UK.
- 8) JERRY BANKS, Control de Calidad, Primera Edición, Limusa – Noriega Editores, 1998.