

## DETECCIÓN PRECOZ DE FISURAS MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS NO LINEALES EN PROBETAS DE MORTERO DE CEMENTO ARMADO

PACS: 43.35.Zc

Ramis-Soriano, Jaime<sup>1</sup>; Carbajo-San-Martín, Jesús<sup>2</sup>; Poveda-Martínez, Pedro<sup>1</sup>; Segovia-Eulogio, Enrique<sup>2</sup>; Climent-Llorca, Miguel A.<sup>2</sup>; De-Vera, Guillem<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>DFISTS Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, 03080, San Vicente del Raspeig, España {jesus.carbajo,pedro.poveda@ua.es; [jramis@ua.es](mailto:jramis@ua.es); juagonru@ua.es}

<sup>2</sup>DIC. Universidad de Alicante. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n, 03080, San Vicente del Raspeig, España {enrique.gonzalo@ua.es}

**Palabras clave:** No linealidades, hormigón, corrosión, fisuración.

### ABSTRACT

In this work, the results obtained until the moment of applying nonlinear ultrasonic techniques to the early detection of the cracking caused by the corrosion, when hardly visually perceptible, in reinforced cement samples are presented. Corrosion has been accelerated by electrochemical methods to be able to carry the experiments over a reasonable period of time. In the experimental setup a Langevin type transducer with a fundamental frequency around 29 kHz has been used. Specifically, we studied the evolution of a nonlinear parameter related to the relative increase in the amplitude of the second and third harmonic. Although these are not definitive results, they can be considered promising.

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos hasta el momento de aplicar técnicas ultrasónicas no lineales a la detección temprana de la fisuración provocada por la corrosión, cuando apenas son perceptibles visualmente, en probetas de cemento armado. La corrosión se ha acelerado por métodos electroquímicos para poder llevar los experimentos en un periodo de tiempo prudencial. En la configuración experimental se ha utilizado un transductor emisor tipo Langevin con una frecuencia fundamental alrededor de 29 KHZ y, en concreto, se ha estudiado la evolución de un parámetro de no linealidad relacionado con el aumento de la amplitud del segundo y tercer armónico. Aunque no se trata de resultados definitivos, sí pueden considerarse prometedores.

## 1. INTRODUCCION Y PLANTEAMIENTO

Muchos procesos de degradación del hormigón conducen a la fisuración del material debida a tensiones generadas por expansiones de materiales embebidos, siendo uno de los casos paradigmáticos el de la corrosión del acero en el hormigón armado. Existen técnicas no destructivas que permiten detectar eventos importantes en el proceso de corrosión de armaduras en hormigón, por ejemplo, las técnicas electroquímicas permiten detectar la despasivación del acero (fin del periodo de iniciación y comienzo del periodo de propagación de la corrosión). Asimismo, dichas técnicas son útiles para inspecciones que persigan localizar las zonas de una estructura con mayor riesgo de corrosión o las zonas donde la corrosión es más activa. Sin embargo, no existen técnicas similares que permitan la detección temprana y eficiente del inicio del daño por corrosión, es decir de la fisuración. Por tanto, aunque existen modelos matemáticos de cálculo de la vida útil residual para una estructura aquejada de corrosión de armaduras, no es posible actualmente la detección temprana no destructiva del estado límite de durabilidad de las estructuras. Investigaciones recientes han demostrado que las técnicas Ultrasónicas No Lineales (UNL) pueden ser efectivas que las metodologías más clásicas en la detección de la aparición de microfisuras. Se trata por tanto de una propuesta alternativa y complementaria las técnicas que se utilizan en la actualidad [1].

El ensayo se lleva a cabo en el contexto de un proyecto cuyo objetivo es utilizar la no linealidad inducida en el medio cuando es excitado con señales ultrasónicas de alta potencia para cuantificar el grado de corrosión con el objetivo de detectar el inicio del proceso de corrosión para que se puedan tomar medidas correctoras.

El antecedente inmediato de este proyecto es de referencia es BIA2013-50297-EXP (Detección temprana del daño por corrosión en hormigón armado por medio de técnicas ultrasónicas no lineales). Algunas de las decisiones tomadas en el desarrollo de este proyecto han sido utilizadas en el actual [2, 3].

En la práctica la configuración experimental necesaria para llevar a cabo experimentos de ensayos no destructivos estaría formada por un generador de señal, un amplificador de potencia, un transductor emisor, uno o varios transductores receptores con sus respectivos preamplificadores, una tarjeta de adquisición de datos con las entradas suficientes. Los registros efectuados serían procesados en el espacio frecuencial. Si la estructura bajo estudio se excita con una señal tipo burst de una frecuencia central, la aparición a la salida de armónicos de orden superior al de la entrada (distorsión armónica), de orden inferior - concretamente la mitad (generación paramétrica) son síntomas de que se ha producido no linealidad en el medio. La aparición de los armónicos y su amplitud respecto al fundamental está relacionada con la aparición de microfisuras que, en este caso, están inducidas por la corrosión. También sería reflejo de la presencia de no linealidad en la propagación en el medio el hecho de que al excitar la estructura con dos señales de frecuencias cercanas aparezcan términos asociados a la intermodulación.

Los resultados que se presentan en este trabajo se centran exclusivamente en la evolución del aumento de la amplitud relativa de los armónicos segundo y tercero.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 2.1 Fabricación de las muestras

Se utilizó un mortero de cemento Portland ordinario, fabricado según las proporciones indicadas en la Tabla 1. Se añadió una cierta cantidad de cloruro de sodio, NaCl, disuelto en el agua de amasado, véase Tabla 1, equivalente a un 2% de ion cloruro, Cl<sup>-</sup>, (referido a la masa de cemento), con la finalidad de conseguir un proceso de corrosión aproximadamente generalizado.

Las probetas de mortero de cemento endurecido tenían unas dimensiones de 8 x 8 x 35 cm<sup>3</sup>, y llevaban embebida una barra de acero corrugado de construcción (acero dulce) de 1,2 cm de diámetro, y longitud de 40 cm. La barra estaba centrada, en las proximidades de una de las caras de 8 x 35 cm<sup>2</sup>, con un espesor de recubrimiento de 1 cm (distancia desde la superficie más externa de la barra a la superficie externa de la probeta de mortero). La superficie de contacto acero-mortero de cemento (aproximadamente 120 cm<sup>2</sup>), era la correspondiente al área lateral de la barra en una longitud de aproximadamente 32 cm.

Componente	Cantidad (g)	Observaciones
CEM I 52,5 R SR(3)	450	Cemento Portland de alta resistencia inicial y resistente a sulfatos
Arena silícea	1350	Arena normalizada
Agua	225	Relación agua/cemento = 0,5
NaCl	14,8	2% Cl- referido a la masa de cemento

Tabla 1. Composición del mortero de cemento

Para delimitar esta superficie de contacto se utilizó cinta aislante eléctrica, lo que también permitía evitar el triple contacto acero-mortero-aire. Los extremos de la barra, no embebidos en la probeta de mortero, permitían hacer las pertinentes conexiones eléctricas para el experimento de corrosión.

Después de la extracción del molde, las probetas de mortero armadas fueron curadas durante 7 días en cámara húmeda, (20°C y 95% humedad relativa). Después del curado se procedió a la colocación y prueba del equipamiento necesario para los ensayos con técnicas ultrasónicas no lineales (transductores emisores y receptores), previas al inicio de los ensayos de corrosión acelerada que se describen en esta misma sección en un apartado posterior. En la figura 1 se muestra una barra después del salir de la cámara húmeda (Izda) una vez instalados los transductores para realizar las medidas (Dcha).



Figura 1. (Izq) Probeta recién salida de la cámara húmeda. (Dch) Probeta con tres transductores instalados (un emisor y dos receptores).

## 2.2. Configuración de medida

Se presenta el diagrama de bloques en la figura 4. Está formado por una transductor emisor y dos receptores cuyas señales son recogidas por una tarjeta de adquisición de datos. La señal de prueba generada por la tarjeta, es amplificada y excita el transductor emisor que está pegado literalmente a la muestra. Como se puede apreciar en la figura 1 (dch), el transductor emisor y uno de los transductores receptores son del tipo Langevin, con una frecuencia fundamental alrededor de 29 kHz, como se puede apreciar en la figura 2 en la que se muestra la curva de impedancia eléctrica. El otro transductor receptor que se aprecia en la misma figura es del tipo IDK09 [4]. En la figura 4 se muestra la curva de respuesta en frecuencia que es relativamente plana en un gran ancho de banda que abarca el rango de interés que, en nuestro caso está por debajo de los 100 kHz (frecuencia fundamental y dos armónicos).

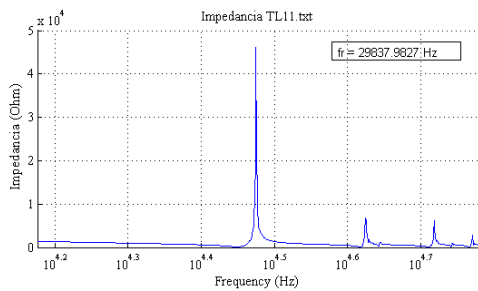


Figura 2. Impedancia eléctrica de un transductor Langevin de los utilizados como emisor

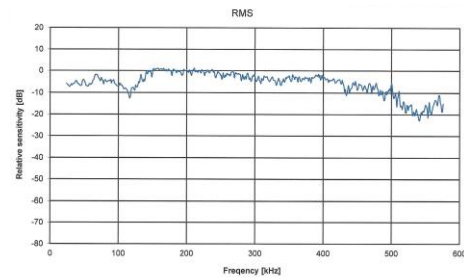


Figura 3. Respuesta en frecuencia de uno de los transductores utilizados como receptor

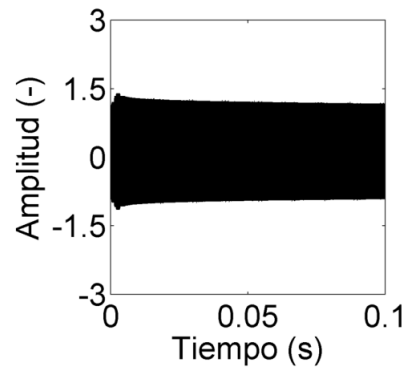
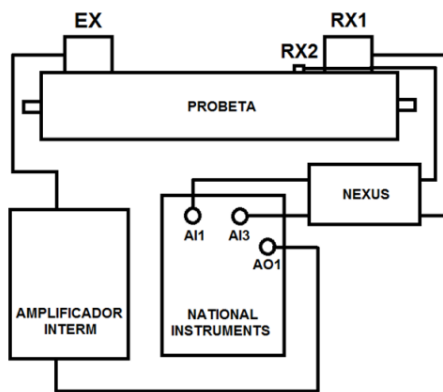


Figura 4. (Izq) Diagrama de bloques de la configuración experimental utilizada. (Dch) Señal tipo tono puro de 29 kHz emitido por la aplicación implementada en Labview© que se presenta en la figura 3.

Las medidas se llevaron a cabo por medio de una tarjeta National Instruments modelo USB-6361 [5], con frecuencia de muestreo de 500000 kHz y una resolución de entrada de 16 bits. Para controlar la adquisición de señal se desarrolló una herramienta de software capaz de automatizar el proceso de medida. La aplicación permite emitir de forma secuencial una señal tipo seno seguida de un pulso gaussiano. Para cada una de ellas, se realiza la adquisición de las señales procedentes de los transductores. La plataforma, cuya pantalla principal se muestra en la figura 5 permite configurar las características básicas de las señales emitidas (duración, amplitudes, parámetros del pulso gaussiano y frecuencia del tono) así como el tiempo de espera entre transductores y el tiempo de espera entre ciclos de medida seno-pulso gaussiano. Con objeto de monitorizar el proceso de medida, se establece una visualización gráfica de las señales adquiridas y sus espectros de frecuencias. La información correspondiente a cada una de las señales se almacena en ficheros para su posterior procesado.

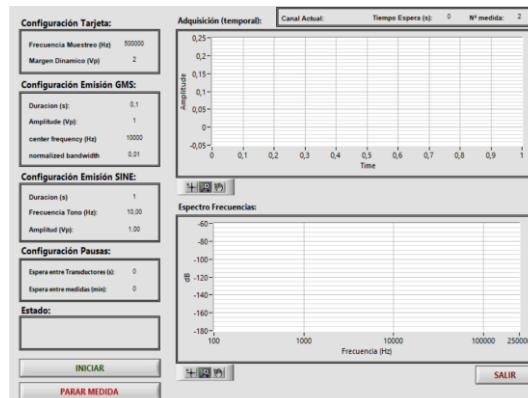


Figura 5. Pantalla principal de la aplicación implementada en Labview©

### 2.3. Procedimiento

El proceso de corrosión fue acelerado mediante aplicación de un campo eléctrico, en régimen galvanostático (intensidad de corriente constante). Para ello se utilizó una fuente de corriente continua de electroforesis, conectando la barra de acero (ánodo) al polo positivo, y un contraelectrodo (cátodo consistente en una malla de acero galvanizado) al polo negativo. La densidad de corriente utilizada, referida a la superficie expuesta de la barra de acero fue de  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Durante el experimento de corrosión, la base de la probeta de mortero se mantuvo en contacto permanente con agua potable, para mantener una conductividad eléctrica aceptable, y se interpuso una esponja de material polimérico entre el cátodo (malla galvanizada) y la probeta de mortero. En la fotografía de la figura 6, se muestran estos detalles. También se visualizan los tres transductores (un emisor y dos receptores).

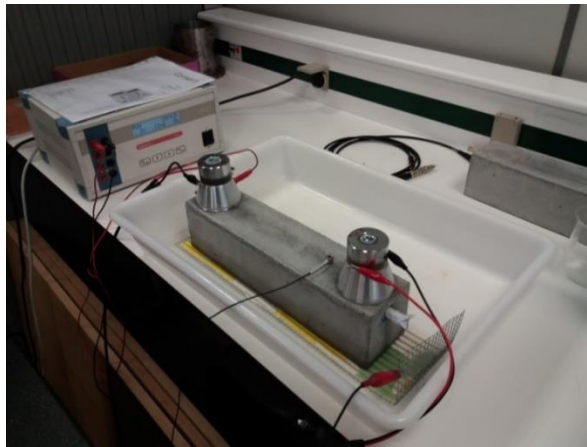


Figura 6. Configuración experimental en la que se aprecia la fuente de corriente continua de electroforesis, conectando la barra de acero (ánodo) al polo positivo, y un contra electrodo (cátodo consistente en una malla de acero galvanizado) al polo negativo. Para mantener una conductividad eléctrica aceptable, y se interpuso una esponja de material polimérico entre el cátodo (malla galvanizada) y la probeta de mortero

En la figura 7 (Izquierda) se puede observar el aspecto de la barra al finalizar el proceso de corrosión al que fue sometida. Se aprecia el fluido, subproducto del proceso de corrosión, que sale de la grieta.

Para posteriores comprobaciones y con la finalidad de poder evaluar cuantitativamente la corrosión en estos ensayos se utilizó la técnica clásica gravimétrica. Para ello antes del amasado de la probeta se procedió a la limpieza con ácido (decapado) de la capa de calamina existente sobre la barra de acero, y a su pesada. Finalizado el experimento de corrosión se procedió a la rotura de la probeta de mortero, con observación visual del estado de corrosión de la barra; y se procedió también al desprendimiento del mortero adherido, decapado de la capa de óxidos, y pesada final de la barra (ver figura 5 Derecha). Ello permitió el cálculo de la cantidad de acero oxidado y la estimación de la pérdida de radio de la barra.

Para documentar el proceso se tomaron fotografías con la ayuda de un microscopio. En la figura 8 se presenta la evolución del proceso de formación de una fisura para la segunda barra estudiada. Se puede apreciar que el 10 de julio (lunes) la fisura es patente cuando el viernes 7 de julio apenas era visible (téngase en cuenta que estas imágenes se realizan con una amplificación).



Figura 7. (Izq) Detalle de una barra al final del proceso de corrosión. Se aprecian subproductos de la corrosión que salen de la grieta. (Dch) Barra una vez desprendido el mortero adherido y la capa de óxidos.

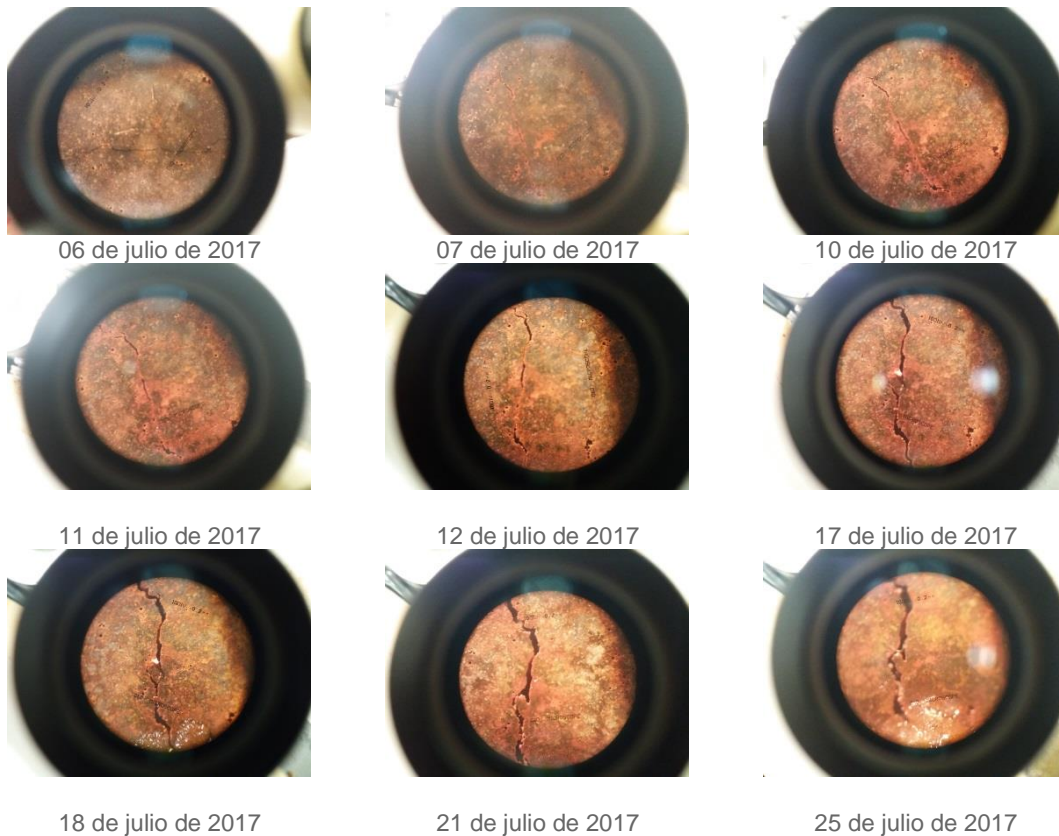


Figura 8. Evolución del proceso de formación de una fisura.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para dos transductores distintos (ID.2 e ID.5). Se aprecia que, entre tres y 4 días del comienzo de la fase de aceleración de la corrosión mediante aplicación de un campo eléctrico se produce un aumento en la amplitud relativa de los parámetros de no linealidad. También se aprecia, gráficas de la derecha, que la amplitud de los armónicos crece conforme pasa el tiempo

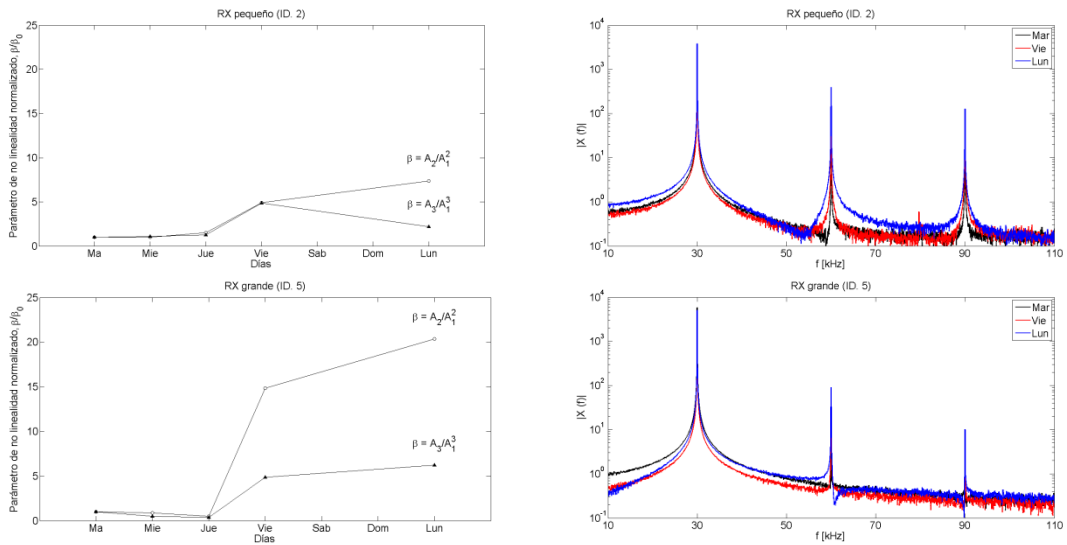


Figura 7. (Arriba izq.): Evaluación temporal de los parámetros de no linealidad para el transductor ID\_2. (Arriba dch.): Evolución del aumento de la amplitud de los armónicos en seis días para el transductor ID-5. (Abajo izq. y dch.) Ídem para el transductor ID\_5.

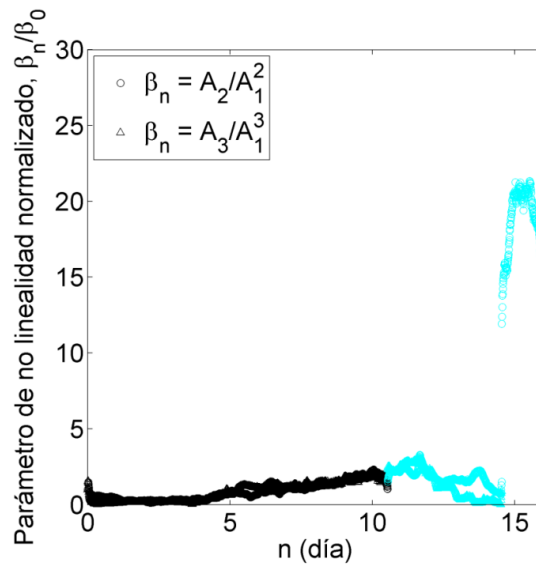


Figure 8. Evolución temporal del parámetro de no linealidad. El color azul indica el comienzo de la aceleración del proceso de corrosión electroquímicamente.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos hasta el momento son prometedores pero es necesario confirmar con los indicios con más muestras y analizar los registros en profundidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al soporte del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto cuya referencia es BIA2016-80982-R. Se agradece, por tanto, a la Agencia Estatal de Investigación y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional como entidades financiadoras (AEI/FEDER, UE).

## **REFERENCIAS**

- [1] K.Y.Jhang. Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of microdamage in material: a review. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 10(2009) 123–135.
- [2] Jaime Ramis; Jesús Carbajo; Pedro Poveda; Salvador Ivorra; M.P. López; Carlos Antón; M.A. Climent. Detection of cracks caused by corrosion in simple structural elements using nonlinear ultrasonic techniques. *Proceedings of the 22th International Congress of Sound and Vibration (ICSV22)*. Florencia (Italia) -, ISBN 978-88-88942-48-3.
- [3] Ramis, Jaime; Carbajo, Jesús; Poveda, Pedro; Ivorra, Salvador; López, M. Pilar; Antón. Detección de la corrosión en estructuras de hormigón armado mediante técnicas ultrasónicas no lineales. *Tecniacústica 2015*. Valencia. ISBN: 978-84-87985-26-3
- [4] Dakel. IDK09. (s.f.). Consultado en septiembre de 2015 en [www.dakel.cz](http://www.dakel.cz).
- [5] National Instruments. USB-6361. (2015). Consultado en septiembre de 2015 en [spain.ni.com](http://spain.ni.com).
- [6] American Society for Testing and Materials. (1990). "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens". ASTM G1-90, ASTM, Philadelphia, USA.