

## DETECCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS NO LINEALES

PACS: 43.40.Cw

Ramis, Jaime<sup>1</sup>; Carbajo, Jesús<sup>1</sup>; Poveda, Pedro<sup>1</sup>; Ivorra, Salvador<sup>2</sup>; López, M. Pilar<sup>2</sup>; Antón, Carlos<sup>2</sup>; Climent, M. Angel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil.

Universidad de Alicante.

Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.

Tel. 96 590 34 00

Fax. 96 590 34 64

Email: [jramis@ua.es](mailto:jramis@ua.es)

### ABSTRACT

This communication presents the results of a test performed to detect, in its early stages, the corrosion of reinforced concrete structures. Two types of structures have been used: one-meter-high pillars and two-meter-long beams. The corrosion has been accelerated by electrochemical methods. The experimental setup consists of two transmitter transducers (29 and 33 kHz) and several broadband receivers. The emergence and growth of corrosion is evaluated quantifying the amplitude of higher harmonics, intermodulation and the generation of subharmonics.

### RESUMEN

En la presente comunicación se presentan los resultados de un ensayo llevado a cabo con el objetivo de detectar, en su fase inicial, la corrosión en estructuras de hormigón armado. Se han construido dos tipos de estructuras: pilares, de un metro de altura y vigas de 2 metros de longitud. La corrosión se ha acelerado por métodos electroquímicos. La configuración experimental está formada por dos transductores emisores (de 29 y 32 kHz) y varios receptores de banda ancha. La aparición y el aumento de la corrosión se evalúa cuantificando la amplitud de los armónicos de orden superior, la intermodulación y la generación de subarmónicos.

### 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO

En el campo de la detección no destructiva de la corrosión del acero en el hormigón destacan, por sus prestaciones, las técnicas electroquímicas, que miden propiedades de la interfase acero-hormigón, tales como el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Esta última propiedad es la que permite cuantificar la intensidad de la corrosión. La aplicación de estas técnicas únicamente requiere el disponer de una conexión eléctrica a las armaduras, ya que su continuidad eléctrica permite realizar determinaciones incluso en puntos bastante alejados de dicha conexión. Por ello estas técnicas pueden calificarse de mínimamente disruptivas para la estructura en estudio, en comparación con otras técnicas que requieren la extracción de testigos o muestras sólidas de hormigón.

El potencial de corrosión de un metal, potencial electroquímico medido frente a un electrodo de referencia, proporciona información sobre la naturaleza de la interfase metal-medio electrolítico. Es decir dicho potencial adopta valores diferentes si la superficie metálica está pasivada, o si está experimentando o ha experimentado un proceso de corrosión generalizada o localizada [1]. En el caso del hierro y el acero al carbono las superficies pasivadas se caracterizan por un potencial de corrosión relativamente elevado, mientras que las superficies despasivadas, que están sufriendo corrosión, presentan potenciales de corrosión inferiores (aproximadamente 400 o 500 mV inferiores a los del metal pasivado) [2]. Por ello la medida del potencial de corrosión del acero se ha utilizado desde hace tiempo como técnica de detección de la corrosión en estructuras de hormigón armado y pretensado [3, 4].

La electroquímica ha proporcionado técnicas instrumentales sencillas para determinar la velocidad de corrosión de un metal sumergido en una disolución acuosa, tal como la medida de la resistencia de polarización [5]. Esta técnica está basada en la aplicación de una pequeña perturbación eléctrica a la muestra en estudio (pequeño pulso de corriente o barrido de potencial en el entorno del potencial de corrosión). De la respuesta obtenida (curva densidad de corriente-potencial) se puede determinar la resistencia de polarización y de ella la velocidad de corrosión, que normalmente viene expresada en unidades electroquímicas (microA/cm<sup>2</sup>), pero que permite su recálculo en términos de pérdida de masa del metal por unidad de tiempo y unidad de superficie (mg/(año cm<sup>2</sup>)), o bien en términos de avance de la corrosión (micras/año) en los casos de corrosión generalizada, mediante aplicación de las leyes de Faraday. Hace algún tiempo se demostró la aplicabilidad de dicha técnica a pequeñas probetas de acero embebidas en mortero y hormigón [6], y posteriormente al estudio de estructuras reales de hormigón armado y pretensado [7]. Ello abrió la puerta para la cuantificación de los daños por corrosión (pérdida de sección de las barras), al menos en los casos en que la corrosión es de tipo generalizado. Hoy en día existe bastante experiencia sobre su aplicación al estudio de estructuras reales [8, 9].

La determinación de la velocidad de corrosión del acero en estructuras, mediante la técnica de la resistencia de polarización, requiere la utilización de corrosímetros especiales [7] que permitan realizar compensaciones de la caída óhmica debida a la elevada resistividad del hormigón y que permitan confinar la señal eléctrica a una zona limitada de la barra de acero en estudio, para poder cuantificar la velocidad de corrosión en términos de la superficie de acero (microA/cm<sup>2</sup>).

Llegados a este punto, es necesario realizar algunos comentarios sobre el potencial de corrosión y de la Intensidad de Corrosión que son los dos parámetros habitualmente utilizados para caracterizar el estado de las estructuras desde el punto de vista de la corrosión.

El Potencial de Corrosión permite conocer de forma cualitativa el estado del acero en el momento en el que se realiza la medida. Su valor nos da una idea de la susceptibilidad del acero a estar sufriendo procesos de corrosión, y por tanto se habla de "probabilidad de estar sufriendo corrosión". Esta probabilidad es más alta, cuanto más negativo sea el valor de  $E_{corr}$ . La Intensidad de Corrosión es una medida de la velocidad a la que se están desarrollando las reacciones oxidación-reducción sobre la superficie del acero, en el momento en el que se lleva a cabo la medida. La velocidad de estas reacciones depende de muchos factores externos, como por el ejemplo el grado de humedad del hormigón, que pueden hacer que en determinados momentos la  $I_{corr}$  sea muy elevada y en otros muy baja.

Es posible que un acero haya sufrido daños por corrosión durante un largo periodo de tiempo, pero que por determinadas circunstancias (como el cese de aporte de humedad) llegue un momento en el que las reacciones de oxidación-reducción cesen su actividad. Si realizásemos entonces una medida, los valores de  $I_{corr}$  registrados serían muy pequeños. Sin embargo, el valor de  $E_{corr}$  sería negativo. Este hecho, junto con una inspección ocular de la zona, nos haría pensar que aunque la corrosión no es activa en el momento de la medida, el acero se encuentra en algún grado dañado por procesos de oxidación previos.

A la hora pues de evaluar una estructura que está sufriendo posibles daños por corrosión, no basta con la medida puntual del potencial y la intensidad de corrosión, sino que es necesario llevar a cabo una inspección visual de la zona detectando posibles daños ya visibles, presencia de grietas, manchas de óxido, posibles filtraciones de agua, etc. Asimismo, las medidas con el corrosímetro deben hacerse en forma de mapeo de manera que se cubra una superficie lo suficientemente representativa.

Si lo que se busca es un parámetro que mida en sí mismo el posible daño que ha sufrido una estructura por corrosión, esto es, el grado de fisuración interno desarrollado, este no existe tal

cual, de ahí la búsqueda de técnicas no destructivas que puedan complementar o mejorar la información que vienen aportando durante años las medidas in situ de  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$ . En las tablas 1 y 2 se recoge, de forma resumida, la relación entre el riesgo de corrosión y los parámetros  $E_{corr}$  e  $I_{corr}$  respectivamente.

Tabla 1: Riesgo de corrosión a partir del dato de  $E_{corr}$ . Fuente: ASTM C876

Potencial de corrosión $E_{corr}$ (mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> )	Riesgo de corrosión
< -350	Elevado
-350 a -200	Incierto
> -200	Bajo

Tabla 2: Nivel de corrosión en función del valor de  $I_{corr}$  registrado. Fuente: Test methods for on-site corrosion rate measurements of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion

Densidad de corriente de corrosión $I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	Nivel de corrosión
< 0,1	Despreciable
0,1 a 0,5	Moderado
0,5 a 1	Elevado
> 1	Muy elevado

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. Se trata, por tanto de una propuesta alternativa y complementaria las técnicas que se utilizan en la actualidad [10].

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.

Se han planteado plantean dos tipos de experimentos con elementos estructurales: una viga (figura 1) y el arranque de un pilar (figura 2). Se han fabricado cuatro especímenes de cada uno de ellos, de hormigón con unas características similares a las de una ejecución habitual (HA - 30 / B / 20 / IIa) armado con acero B500S. Se han analizado los valores del armado longitudinal y transversal para garantizar tanto las cuantías geométricas mínimas indicadas por la EH-08 como para verificar los estados límites de servicio en función de las cargas introducidas. En el caso de las vigas, el ensayo se ha realizado el ensayo con la viga biapoyada en L/4 de cada extremo introduciendo una carga uniforme mantenida en los tramos de la viga que quedan en voladizo. Como consecuencia de esta carga se obtiene en la sección central un diagrama de momentos constante lo que implicará que la cara superior ha estado sometida exclusivamente a esfuerzos normales de tracción constante durante el periodo de ejecución de los ensayos. Al mismo tiempo tanto las vigas como los pilares se han sometido a un proceso de corrosión acelerado en la sección central simulando un ambiente agresivo. En cuanto a la segunda configuración para el estudio de la evolución de la corrosión en un arranque de un pilar se han construido tres zapatas cuadradas de 75x75x40 cm en las que se dispondrán las esperas correspondientes de las que arranca un pilar en cada una de ellas de

30x30 cm y una altura de 1 m. Sobre la zapata se ha dispuesto un revestimiento a base de resina epoxi para impermeabilizarlo y se ha inducido la corrosión en esta zona como es habitual en algunos casos de patología estructural. En este caso el pilar estará sometido a su peso propio exclusivamente.

Con el objeto de acelerar la corrosión, el hormigón a utilizar en la confección de los elementos mencionados (vigas y pilares) ha sido aditivado, o contaminado electroquímicamente, con una cierta cantidad de cloruro (aproximadamente 2% Cl<sup>-</sup> referido a masa de cemento). Además, durante los experimentos la corrosión se ha forzado electroquímicamente mediante aplicación de una densidad de corriente anódica constante de valor entre 100 y 500  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

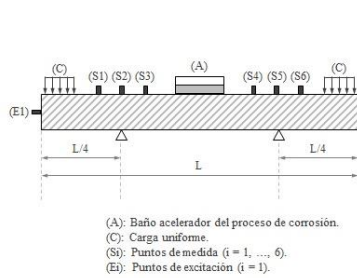


Figura 1: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

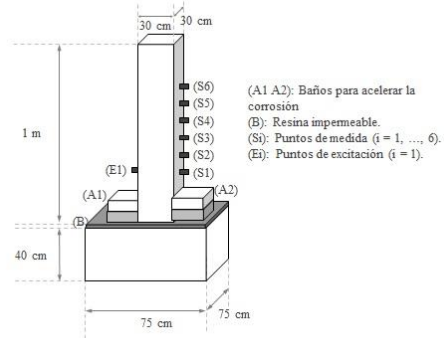


Figura 2: Uniones analizadas: a) LG. b) LF

El diagrama de bloques del proceso de caracterización se muestra en la figura 3. La señal de test es amplificada y excita los transductores emisores que están colocados en la estructura. Los transductores receptores recogen la señal que es preamplificada y registrada para se analizada.

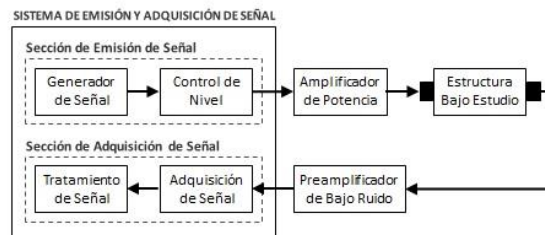


Figura 2: Diagrama de bloques de la configuración

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

En la fotografías 4 y 5 se muestran los pilares en el encofrado y, una vez desencofrados, pasado el periodo adecuado, listos para ser estudiados



Figura 4: Pilares en el encofrado



Figura 5: Pilares listos para comenzar el estudio

El primer paso es construir la cubeta que sirve de depósito para la disolución que acelera el proceso de corrosión tal como se muestra en las figuras 6 y 7, en las que se puede apreciar:

La ubicación de los transductores emisores y receptores, los puntos donde se coloca la carga (en el caso de las vigas), y en los que se realizan medidas de índices electroquímicos relacionados con la corrosión

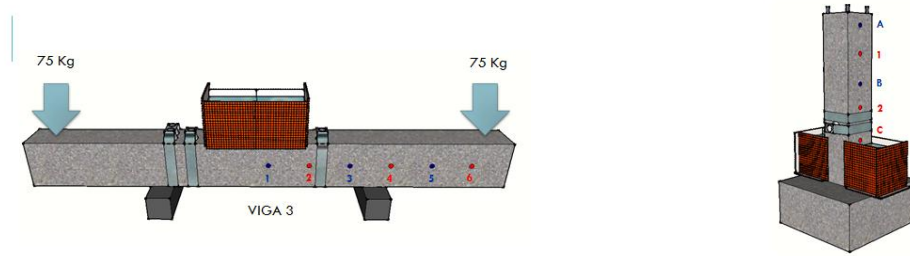


Figura 6 : Posicionamiento de los transductores en las estructura tipo viga y pilar y puntos de medida de parámetros electroquímicos

En las figuras 7 (Izquierda y derecha) se muestra en detalle la ubicación e instalación de los transductores emisores que son tipo Langevin fabricados con PZT8 como elemento activo, cuyas impedancias eléctricas se muestran en la figura 8. El transductor 1 se ha aplicado para excitar los elementos constructivos con el objeto de cuantificar la aparición de armónicos de orden superior (y, en su caso, inferior). Se han utilizado los dos transductores al mismo tiempo para excitar la estructura para provocar la aparición de intermodulaciones de primer orden (señales suma y resta de las dos señales de excitación)

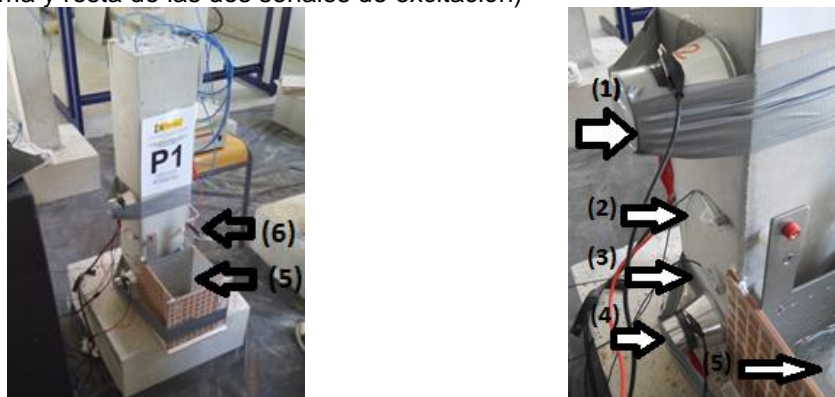


Figura 8: Detalles de colocación de los transductores emisores y receptores en uno de los pilares. (1), (2), (3) y (6) transductores receptores; (4) Transductor receptor; (5) Depósito que contiene la disolución que acelera la corrosión

En cuanto a los transductores receptores, se han utilizado de dos tipos: 1) Tipo Langevin, idénticos a los emisores y b) transductores de banda ancha Dakel IDK09 [11] con una respuesta en frecuencia plana en un gran ancho de banda que abarca el rango de interés que está por debajo de los 100 kHz

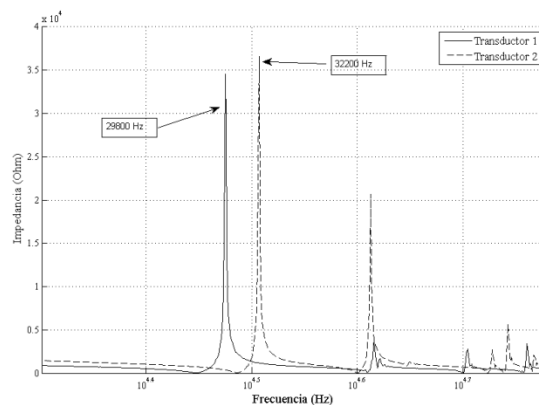


Figura 9: Impedancia eléctrica de los dos transductores tipo Langevin utilizados como emisores. Se aprecia que uno de ellos presenta la resonancia principal a 29800 Hz y el otro en 32200 Hz

El corazón de la configuración experimental es una tarjeta de NI USB-6361 [12] de la que se utilizan una o dos salidas y cuatro entradas activadas, dependiendo del tipo de medida a realizar. Para controlar el proceso de medición se ha desarrollado un programa en Labview® cuya pantalla principal se muestra en la figura 9. Como se puede apreciar, es posible seleccionar la frecuencia de emisión, los escalones de la tensión de salida de la tarjeta y otras características de la señal de salida cuya forma también se puede apreciar en la pantalla

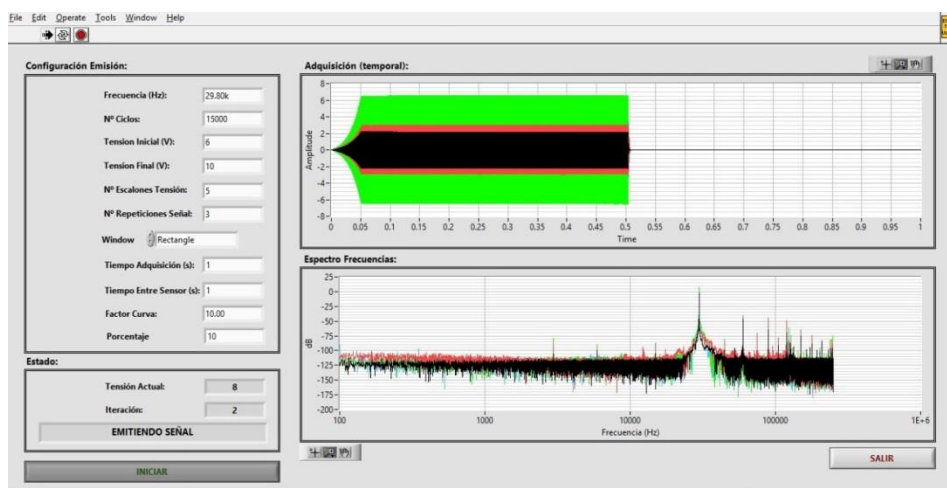


Figura 10: Pantalla principal del programa desarrollado en Labview® con el objeto de controlar la instrumentación en el proceso de medida. La parte izquierda está dedicada a la configuración. En la parte superior derecha se visualiza la señal en el tiempo y en la inferior en la frecuencia.

Por lo que respecta al ensayo de corrosión, éste se ha llevado a cabo cada vez que se realizaba un ensayo ultrasónico. Los parámetros electroquímicos de seguimiento han sido el potencial y la velocidad de corrosión del acero sin paso de corriente. En las fotografías de la figura 11 se muestra un detalle del proceso de medida.



Figura 11: Detalle del proceso de medida de Ecor e Icorr en un pilar (izquierda) y en una viga (derecha).

Los parámetros relativos a la corrosión de las armaduras se midieron mediante un corrosímetro GCOR8 desarrollado por GEOCISA en colaboración con el Instituto Torroja (CSIC). El equipo permite obtener valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) y Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) a través del método de la Resistencia de Polarización (ASTM C876).

Para llevar a cabo una medida, es necesario descubrir la armadura embebida en el hormigón y limpiar su superficie para eliminar los posibles restos de hormigón u óxido, garantizando así un buen contacto eléctrico. A continuación, se humedece la superficie de hormigón sobre la que se va a medir y se coloca en ella el electrodo de  $Cu/CuSO_4$ . Se introduce el dato del diámetro del acero en el equipo y éste lleva a cabo la medida. En primer lugar, registra el valor del potencial de corrosión y seguidamente efectúa un barrido en potenciales alrededor de dicho valor. A partir del barrido y mediante el método electroquímico de la resistencia de polarización (RILEM TC 154-EMC), se obtiene el valor de la intensidad de corrosión.

### 3. RESULTADOS

Se muestran a continuación algunos de los resultados más significativos.

En primer lugar, en las figuras 12 (Izquierda y derecha), se compara la respuesta en frecuencia de uno de los transductores tipo Langevin ante la señal de excitación correspondiente al inicio del proceso y al cabo de 15 días. Se puede apreciar que la amplitud de los armónicos 2º y 3º aumenta y la del primero baja. En la figura de la derecha se muestra la evolución de la respuesta en frecuencia de uno de los transductores receptores en forma de espectrograma.

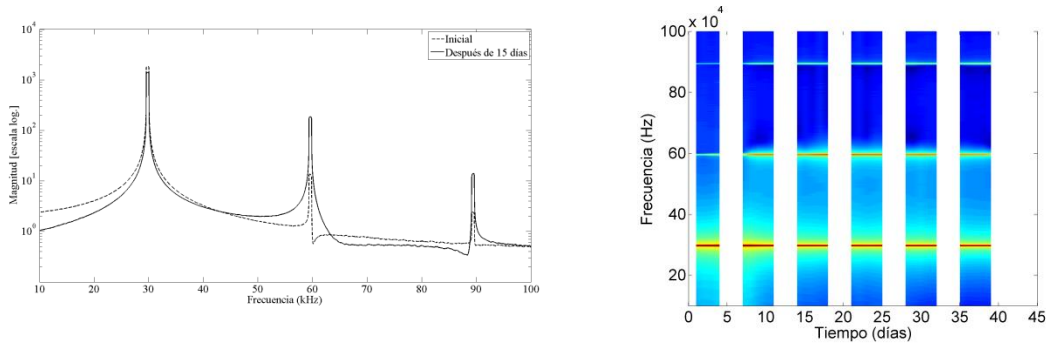


Figura 12: Izda. Respuesta en frecuencia de un transductor tipo Langevin ante la señal de excitación mostrada en la figura. Se puede apreciar que la amplitud de los armónicos 2º y 3º aumenta. Dcha: Evolución de la respuesta en frecuencia de uno de los transductores receptores

En la figura 13 se muestra la evolución temporal del parámetro  $A_3 / A_1^3$  (amplitud del tercer armónico respecto a la tercera potencia del fundamental), en función de la potencia de entrada. A partir de la primera semana se puede observar un crecimiento sostenido para cualquier potencia de excitación del transductor. Por tanto, esta proporción aumenta al aumentar la degradación por corrosión del material.

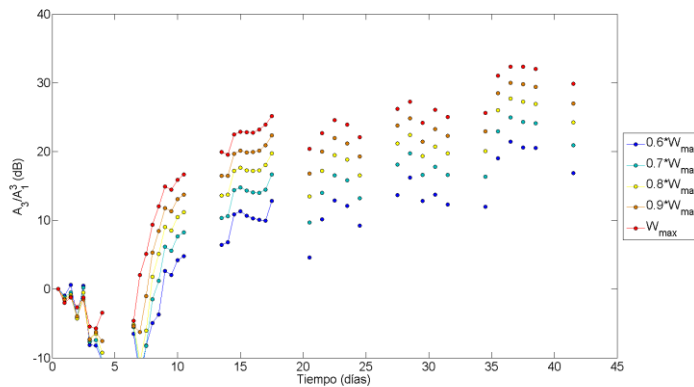


Figura 14: evolución temporal del parámetro (amplitud del tercer armónico respecto a la tercera potencia del fundamental), en función de la potencia de entrada

Cuando se excitan los dos transductores emisores a la vez, el procesamiento de los registros permite detectar la presencia de intermodulaciones de primer orden (superior). En la figura 15 se comparan las respuestas en frecuencia del mismo transductor receptor con un desfase temporal de 15 días. Se aprecia un aumento de la amplitud de los armónicos correspondientes a cada transductor y también la amplitud de la señal correspondiente a la frecuencia que es la suma de las fundamentales de excitación, del orden de 62 kHz.

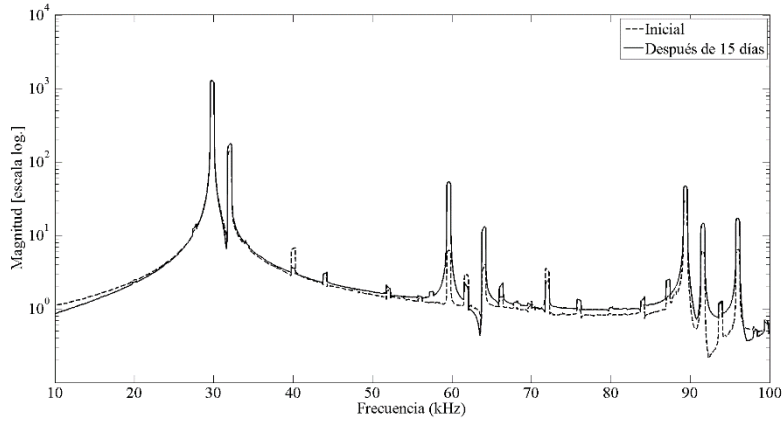


Figura 15: Comparativa de dos registros efectuados con 15 días de desfase. Se excitan a la vez los dos transductores emisores

Por lo que respecta a la relación entre las medidas  $I_{cor}$  y  $E_{cor}$  con los resultados de las medidas con la técnica propuesta, en las figuras 16 y 17 se ha representado la evolución temporal del parámetro  $A_n / A_1^n$  (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro  $E_{corr}$

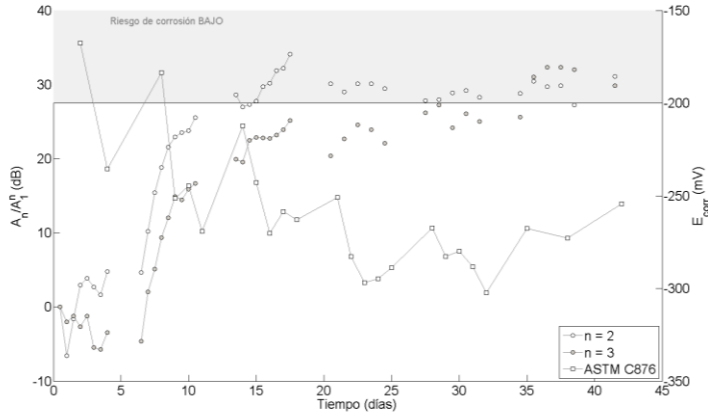


Figura 16: Evolución temporal del parámetro  $A_n / A_1^n$  (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro  $E_{corr}$

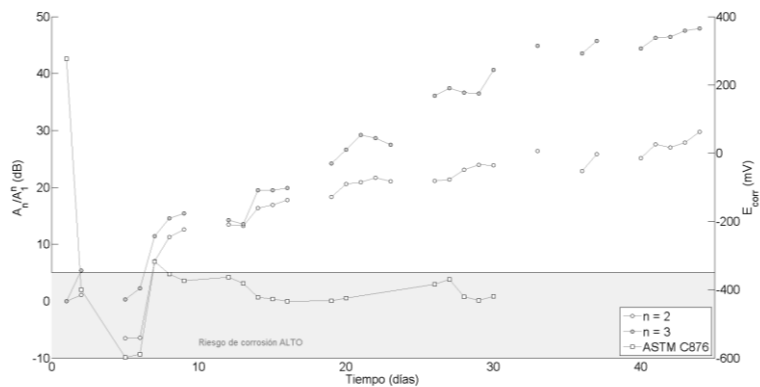


Figura 17: Evolución temporal del parámetro  $A_n / A_1^n$  (amplitud del armónico de orden n frente al fundamental al cubo) y del parámetro  $E_{corr}$



#### 4. CONCLUSIONES

Como se ha comentado más arriba, si lo que se busca es un parámetro que mida en sí mismo el posible daño que ha sufrido una estructura por corrosión, esto es, el grado de fisuración interno desarrollado, este no existe tal cual, de ahí la búsqueda de técnicas no destructivas que puedan complementar o mejorar la información que vienen aportando durante años las medidas in situ de *Ecorr* e *Icorr*.

Los resultados obtenidos hasta el momento, algunos de los cuales se han mostrado en las figuras 12 a 17, sin ser definitivos, muestran una correlación y pueden ser los que jueguen el papel complementario buscado.

#### Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al soporte del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto cuya referencia es BIA2013-50297-EXP (*Detección temprana del daño por corrosión en hormigón armado por medio de técnicas ultrasónicas no lineales*)

#### REFERENCIAS

- [1] M. Pourbaix, Lectures on Electrochemical Corrosion, Plenum Press, New York, London (1973).
- [2] M.A. Climent, C. Gutiérrez, Proof by UV-visible modulated reflectance spectroscopy of the breakdown by carbonation of the passivating layer on iron in alkaline solution, *Surface Science*, 330 (1995) L651-L656.
- [3] R.F. Stratfull, The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge, *Corrosion*, 13 (1957) 43-48.
- [4] B. Elsener, H. Böhni, Location of corrosion in reinforced concrete: potential mapping – Possibilities and limitations, *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 105 (1987) 528-533 (en alemán).
- [5] M. Stern, A.L. Geary, Electrochemical polarization: a theoretical analysis of the shape of polarization curves, *Journal of the Electrochemical Society*, 104 (1957) 56.
- [6] C. Andrade, J.A. González, Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements, *Werkstoffe und Korrosion*, 29 (1978) 515-519.
- [7] S. Feliuet Al. Confinement of the electrical signal for in situ measurement of the polarization resistance in reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 87 (5) (1990) 457-460.
- [8] Measurement and Interpretation of the On-site Corrosion Rate, Proceedings of the International Workshop MESINA, Eds. C. Andrade, C. Alonso, J. Fullea, J. Polimon, J. Rodríguez, RILEM Publications, Cachan, France (2000).
- [9] M.A. Climent et Al, Measurements of rebar corrosion rates in the concrete structure of a building with 40 years service life in a marine environment, in: C. Andrade, C. Alonso, J. Fullea, J. Polimon, J. Rodríguez (Eds.), Proceedings of the International Workshop MESINA, RILEM Publications, Cachan, France (2000) pp. 109-121.
- [10] 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.
- [11] Dakel. IDK09. (s.f.). Consultado en septiembre de 2015 en [www.dakel.cz](http://www.dakel.cz).
- [12] National Instruments. USB-6361. (2015). Consultado en septiembre de 2015 en [span.ni.com](http://span.ni.com).