

## EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN MEDIANTE ULTRASONIDOS DE BAJA FRECUENCIA

PACS: 43.35.Zc

López García, María Pilar<sup>1</sup>; Poveda Martínez, Pedro<sup>2</sup>; Antón Gil, Carlos<sup>1</sup>; Ramis Soriano, Jaime<sup>2</sup>; Climent Llorca, Miguel Ángel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil

<sup>2</sup>Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

Universidad de Alicante

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

Tel:96 590 34 00

Fax. 96 590 34 64

Email: mp.lopez@ua.es;pedro.poveda@ua.es; c.anton@ua.es; ma.climent@ua.es;

jramis@ua.es

### ABSTRACT

Steel corrosion in reinforced concrete structures can lead to damage, need to repair or substitution of the structure. Much effort is put on developing non-destructive techniques for evaluating the corrosion state before damage is too high. Microcracking of concrete, due to expansive forces generated by oxide layers formed on the steel surface, introduce non-linearities in the medium. Therefore, the acoustic wave propagation through concrete is modified due to corrosion phenomena. In this work, ultrasonic techniques have been employed for detecting changes induced in the system, in order to provide a non-destructive method for early detection of corrosion of reinforced concrete.

### RESUMEN

La corrosión de las armaduras que componen las estructuras de hormigón armado, puede llevar a situaciones de daño indeseables que requieren la reparación o incluso sustitución de partes de la estructura. Se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar técnicas no destructivas capaces de evaluar la corrosión antes de que el daño sea demasiado grande. Cuando el refuerzo se corroe, los productos de corrosión generan fuerzas expansivas que derivan en la aparición de microfisuras en el hormigón. Éstas a su vez, introducen no linealidades en el medio, lo que hace que la onda acústica de propagación a través del hormigón se modifique. En este trabajo, se han empleado técnicas de ultrasonidos para detectar cambios inducidos en el sistema, con el objetivo de proporcionar un método para la detección temprana de la corrosión del hormigón armado.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de los ultrasonidos, y más concretamente el análisis de la variación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (UPV), ha sido ampliamente empleada para la evaluación de la calidad del hormigón así como para la detección de macrofisuras [1,2]. En ocasiones puede resultar de interés conocer la existencia de microfisuras antes de que éstas sean perceptibles visualmente adelantándonos así a la manifestación del daño cuando éste ya es considerable.

La aparición de pequeñas fisuras en el medio de propagación origina no linealidades que serán perceptibles cuando la perturbación tenga una amplitud suficientemente grande. Estas no linealidades se hacen patentes por la presencia de armónicos de orden superior. Estudios anteriores [5, 6] demuestran que la relación entre las amplitudes de los armónicos viene dada por las siguientes expresiones:

$$\frac{A_2}{A_1^2} = \frac{B_2}{4} k^2 x \quad (1)$$

$$\frac{A_3}{A_1^3} = \frac{B_2^2}{8} k^4 x^2 \quad (2)$$

donde  $A_i$  corresponde a la amplitud del armónico  $i$ -ésimo,  $k$  al número de onda,  $x$  a la distancia recorrida por la perturbación y  $B$  a un parámetro de no linealidad.

Este trabajo tiene por objeto la comprobación experimental del método como paso previo a establecer una metodología aplicable a medidas in situ.

## 2. MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS

### 2.1 Materiales

Para la realización de este trabajo se empleó una probeta de hormigón en masa para el ensayo de resistencia a compresión, de dimensiones  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ , y una probeta de mortero de cemento de dimensiones  $8 \times 8 \times 35 \text{ cm}^3$  para el ensayo de corrosión. Las dosificaciones de ambos materiales pueden apreciarse en la Tabla 1.

Tabla 1: Dosificación del hormigón y el mortero empleados.

| Dosificación Hormigón<br>(para 10kg de material) |           | Dosificación Mortero   |          |
|--|-----------|------------------------|----------|
| Material   | Masa (kg) | Material               | Masa (g) |
| CEM I 32.5 N                                     | 12        | CEM I 42.5 R           | 450      |
| Árido [6/12]                                     | 4.9       | Arena                  | 1350     |
| Arena  | 3.3       | Agua                   | 225      |
| Agua   | 6         | Relación a/c           | 0.5      |
| Relación a/c                                     | 0.5       | Relación arena/cemento | 3:1      |

Dado que el ensayo de corrosión requería una probeta con armadura en su interior, se empleó un acero corrugado comúnmente empleado en construcción, B-500 SD, de 12 mm de diámetro. El recubrimiento establecido para la barra de acero fue de 2.5 cm, tal y como se muestra en la Figura 1. El hormigón ensayado a compresión tenía una edad de 3 meses. En el caso de la probeta de mortero, esta se ensayó tras un curado de 14 días.

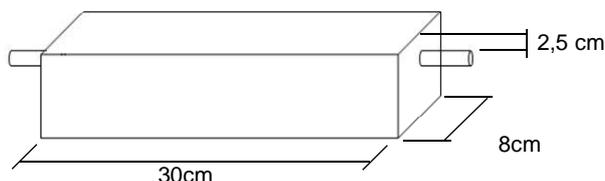


Figura 1: esquema de la probeta de mortero con el acero embebido en ella.

## 2.2 Equipos

El ensayo de rotura a compresión se llevó a cabo en una prensa manual de la casa Suzpecar modelo CMP con capacidad máxima 150 toneladas y una precisión en nuestro caso, de 100kp. En el caso del ensayo de corrosión, se empleó un multímetro Fluke 45 y un electrodo de referencia de Ag/AgCl para la realización de las medidas de potencial de corrosión. Asimismo, se empleó una fuente de tensión para administrar la diferencia de potencial requerida. En ambos ensayos, la adquisición y generación de señales se realizó mediante la tarjeta PCI-6120 de National Instruments, formada por 4 entradas analógicas con frecuencia de muestreo 1 MS/s y dos salidas de 16 bits y 2,5 MS/s. Este dispositivo, conectado a un PC, permitió almacenar y procesar la información capturada en el ensayo a través del software Labview. Como elementos de emisión y recepción de ultrasonidos se emplearon dos transductores PANAMETRICS X1021. En la Figura 2 se muestra la respuesta como receptor de uno de los dos transductores utilizados al ser excitado por su gemelo. La señal de excitación empleada corresponde a un tono de corta duración, frecuencia 40 kHz y amplitudes comprendidas entre 60 y 200 V<sub>pico</sub>.

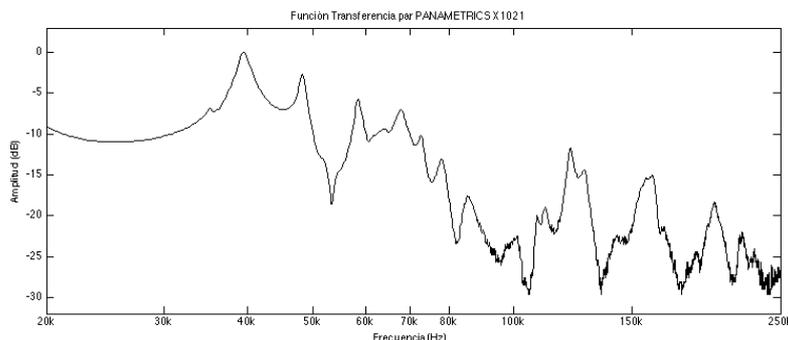


Figura 2. Función de transferencia de los transductores empleados.

## 3. PROCESO EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo es el empleo de ultrasonidos de baja frecuencia para la detección de microfisuras en morteros y hormigones. Para ello, se llevaron a cabo dos tipos de ensayos que derivan en la aparición de fisuras. En primer lugar, se realizó un ensayo de rotura a compresión de hormigón. Este material, diseñado para resistir altas compresiones, comienza a agrietarse e incluso llega a romper cuando se superan sus límites máximos de resistencia. En segundo lugar, se llevó a cabo un ensayo de corrosión sobre una probeta de mortero. Cuando una barra de acero se oxida, se forman los llamados productos de corrosión como consecuencia de las reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en la superficie del metal. Estos productos de corrosión, generan un incremento de volumen. Si la barra se encuentra embebida en el interior del conglomerante ya fraguado, dicho incremento de volumen genera tensiones dentro del material, que terminan traducándose en fisuras.

En ambos casos, la aparición de microfisuras provocadas por tensiones internas introduce no linealidades en el medio y por tanto, variaciones en el comportamiento de las ondas al atravesar el sólido [3]. La evolución temporal de la relación de amplitudes entre la frecuencia fundamental y los dos primeros armónicos de la señal recibida, según las expresiones detalladas en la introducción del presente documento, proporciona una medida cuantitativa del estado de la probeta y en su caso, de la corrosión existente en la armadura interior.

### 3.1 Ensayo de Rotura a Compresión

El ensayo de rotura consiste en la aplicación de una carga en dirección perpendicular a una de las superficies de la probeta, tal y como muestra la Figura 3. Dicha aplicación se lleva a cabo a partir de “escalones de carga”. Estos escalones de carga permiten la realización de las medidas de ultrasonidos para diferentes estados tensionales de la probeta.



Figura 3. Fotografía del dispositivo antes de la realización del ensayo de rotura.

Tabla 2: Escalones de carga aplicados.

| Escalón de Carga | Carga Aplicada (T) | Porcentaje de Carga Aplicada |
|------------------|--------------------|------------------------------|
| 1                | 4.6                | 10 %                         |
| 2                | 9.2                | 19 %                         |
| 3                | 13.7               | 29 %                         |
| 4                | 18.3               | 38 %                         |
| 5                | 23                 | 48 %                         |
| 6                | 27.5               | 57 %                         |
| 7                | 32                 | 67 %                         |
| 8                | 36.6               | 76 %                         |
| 9                | 41.2               | 86 %                         |
| Rotura           |                    | 100 %                        |

Conocidas las características del hormigón ensayado, fue posible estimar un valor aproximado de carga de rotura esperado (entre 45 y 50 toneladas). Estimada la carga de rotura, se establecieron 10 intervalos de aplicación de carga (Tabla 2).

Los transductores ultrasónicos se colocaron en caras opuestas de la probeta, obteniendo una medida de la transmisión longitudinal de las ondas. Cada escalón de carga aplicado fue ensayado con señales de amplitud 80, 100, 120, 140 y 160 V de pico. A partir del espectro en frecuencia obtenido para cada una de las medidas se representó la evolución temporal de la relación de amplitudes referidas al estado inicial.

### 3.2 Ensayo de Corrosión

Para la realización de este ensayo fue necesario fabricar un depósito, que unido a la cara superior de la probeta, albergase la disolución con el agente agresivo (cloruro) pero de manera que se permitiera el mayor contacto posible del líquido con el mortero. Para ello, se fabricó un recipiente rectangular de metacrilato abierto por las caras superior e inferior. Dicho molde, de 5 cm de altura, tenía unas dimensiones en planta de 28x6.5 cm<sup>2</sup>. Una vez fijado el depósito a la cara superior de la probeta, se procedió a llenar el mismo con una disolución de NaCl al 3%.

El proceso de difusión natural es un proceso lento que puede tardar meses. Por este motivo, para lograr acelerar el proceso de corrosión de la barra de acero, se empleó una técnica de migración forzada [4]. En este caso, no se siguió ningún ensayo normalizado puesto que el propósito del estudio no era analizar la penetración de los cloruros, o la resistencia del material a la misma, sino conseguir que la barra de acero se corroiera en un espacio corto de tiempo [5]. La Figura 4 muestra la probeta justo antes de comenzar el ensayo. La distancia entre la cara superior del espécimen y la barra de acero, es de 2.5 cm (recubrimiento).

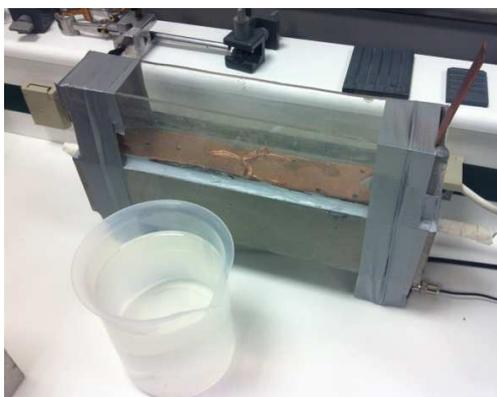


Figura 4. Probeta de mortero con el tanque vacío, placa de Cu y trasductores. Junto a la probeta, disolución de NaCl antes de ser vertida en el tanque.

Para conseguir despasivar el acero y desplazar los iones cloruro desde la disolución hacia el refuerzo, se aplicó una diferencia de potencial entre dos electrodos. En este caso, la propia barra de acero ejerce de ánodo (oxidándose). Como cátodo o electrodo negativo se empleó una placa de cobre. Dicha placa de cobre contenía una serie de orificios de manera que al sumergirse en la disolución de cloruro sódico, fuera posible la circulación de líquido a su través, evitando así gradientes de concentración. La diferencia de potencial aplicada hace que los iones cloruro, cargados negativamente, migren hacia el ánodo o polo positivo; en este caso, la barra de acero corrugado. Se aplicó una diferencia de potencial de 10 v, registrándose al inicio del ensayo, un valor de intensidad de 100 mA. Conocida la superficie lateral del metal expuesto a la oxidación, puede calcularse la densidad de corriente aplicada, que en este caso fue de  $0.88 \text{ mA/cm}^2$ . El dispositivo permaneció conectado a la fuente de corriente durante 22 horas diarias. El ensayo finalizó transcurridos 5 días.

Para llevar un control del estado del acero [6], se realizaron medidas del potencial del refuerzo con ayuda de un multímetro y de un electrodo de referencia de Ag/AgCl. Para realizar esta medida de potencial, es preciso conectar el multímetro a la barra de acero y al electrodo de referencia una vez este último se ha introducido en la disolución de NaCl. Para evitar la distorsión del valor de potencial de corrosión por posibles fenómenos de polarización de la barra, se dejaba la fuente apagada durante 30 minutos antes de proceder a la medida.

La monitorización del estado de la probeta por métodos ultrasónicos se realizó en este caso a partir ondas transversales, garantizando una mayor longitud de inspección. La configuración precisa por tanto la colocación de ambos transductores, emisor y receptor, en la misma cara de la probeta. Este montaje se adapta mejor a la exploración de superficies reales, donde el acceso a determinadas caras no es siempre posible. La distancia entre transductores viene marcada por la longitud de onda de la señal de excitación al propagarse en el medio. Para determinar este parámetro se calculó en primer lugar la velocidad de propagación de las ondas transversales. Se excitó la probeta con una señal TSP de corta duración. A partir de métodos convolutivos se determinó la diferencia temporal entre la señal emitida y la recibida. Conocida la distancia entre emisor y receptor, se estableció una velocidad de propagación de 2850 m/s y una longitud de onda de 71.2 mm a una frecuencia de 40 kHz. Se fijó una distancia entre transductores igual a 4 veces la longitud de onda.

## 4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Ensayo de Rotura a Compresión

La Tabla 3 muestra los valores de carga a los que fue sometida la probeta hasta su rotura.

Tabla 3. Valores de carga hasta rotura del ensayo de compresión.

| Escalón de Carga | Carga Aplicada (T) | Porcentaje de Carga Aplicada respecto a Rotura | Carga Aplicada (MPa) |
|------------------|--------------------|--|----------------------|
| 1                | 4.6                | 10 %   | 2.04                 |
| 2                | 9.2                | 19 %   | 4.09                 |
| 3                | 13.7               | 29 %   | 6.09                 |
| 4                | 18.3               | 38 %   | 8.13                 |
| 5                | 23                 | 48 %   | 10.22                |
| 6                | 27.5               | 57 %   | 12.22                |
| 7                | 32                 | 67 %   | 14.22                |
| 8                | 36.6               | 76 %   | 16.27                |
| 9                | 41.2               | 86 %   | 18.31                |
| Rotura           | 48                 | 100 %  | 21.33                |

Las señales obtenidas en el ensayo (Figura 5) presentan una evolución clara de la no linealidad del medio. Cargas superiores a 10 MPa originan un incremento exponencial en la relación de amplitudes entre el segundo y tercer armónico con la frecuencia fundamental. De las gráficas anteriores se desprende una mayor sensibilidad del método en las medidas realizadas con señales de tensión elevada. Además, se observa como la variación de los armónicos se ve influida por la aparición de fisuras en el material.

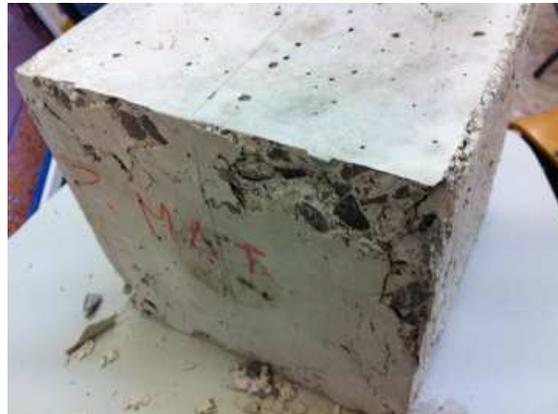
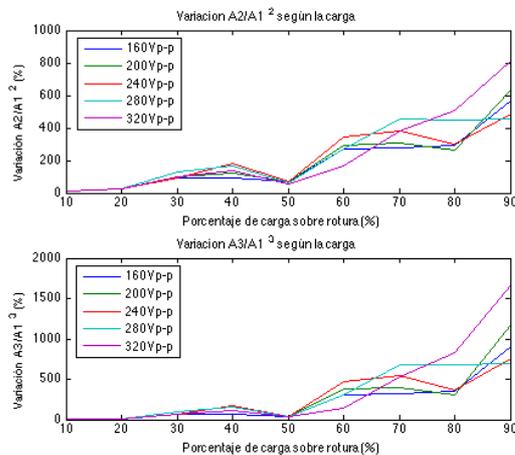


Figura 5. Izquierda: Variación de la relación de armónicos  $A_2/A_1^2$  y  $A_3/A_1^3$  frente a la carga aplicada. Derecha: fotografía de la probeta tras el ensayo.

### 4.2 Ensayo de Corrosión

Los resultados del ensayo de corrosión se muestran en la Tabla 4. El valor de medida cero se corresponde con el potencial que tenía la barra de acero justo antes de conectar el dispositivo a la corriente y dar así comienzo al ensayo.

Tabla 4. Potencial de Corrosión del acero.

| Medida | Ecorr (mV) |
|--------|------------|
| 1      | 0.62       |
| 5      | -500       |
| 8      | -519       |
| 11     | -447       |
| 15     | -376       |
| 18     | -360       |

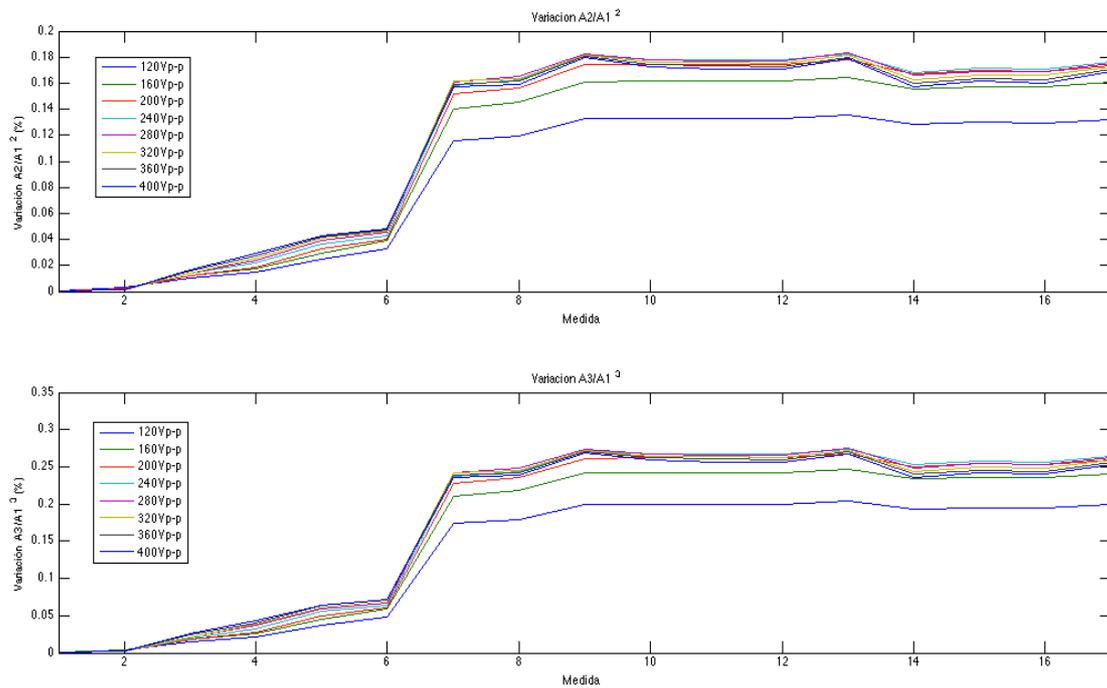


Figura 6. Variación de la relación de armónicos  $A_2/A_1^2$  y  $A_3/A_1^3$  para cada medida realizada.

Las gráficas de la Figura 6 muestran una evolución creciente de la relación del 2º y 3º armónico ( $A_2$  y  $A_3$ ) con el fundamental ( $A_1$ ) a medida que los fenómenos de corrosión en la armadura avanzan.



Figura 7: Imagen de la macrofisura longitudinal generada.



Figura 8: Imagen de la probeta rota una vez terminado el ensayo.

Se observa un primer incremento en la relación de armónicos a partir de la segunda medida y un segundo incremento de mayor a partir de la sexta medida. Se alcanza un estado estacionario a partir de la 8ª medida. Esta estabilización de la relación de armónicos podría deberse a una relajación de las tensiones internas originadas por la corrosión debido a la generación de una microfisura mayor (Figura 7). Este hecho ralentizaría la aparición de nuevas microfisuras. La rotura total de la muestra pone de manifiesto la formación de óxido a lo largo de toda la armadura, tal y como puede apreciarse en la Figura 8 .

## 5.CONCLUSIONES

1. El uso de ultrasonidos permite reflejar la aparición de microfisuras en el hormigón cuando este es sometido a esfuerzos de compresión. En concreto, la relación entre el segundo y el tercer armónico respecto al fundamental,  $A_2/A_1^2$  y  $A_3/A_1^3$ , aumenta considerablemente a partir de la aplicación del 50% de la carga de rotura.
2. Esta misma relación de parámetros nos permite detectar la existencia de microfisuras generadas como consecuencia de la oxidación del acero de una probeta de mortero, cuando estas aún no son perceptibles a simple vista.
3. La aparición de macrofisuras lleva a una posible relajación de las tensiones originadas por la aparición de los productos de corrosión, lo que ralentizaría la aparición de nuevas microfisuras. Este hecho se traduce en la estabilización de la relación de armónicos.

## 6.BIBLIOGRAFÍA

---

[1]Wang kai, Quan-shui, Chen Meng-cheng, Xie Li. Corrosion Fatigue of Reinforced Concrete in the Presence of Stray Current. Engineering Research Centre of Railway Environment Vibration and Noise of Ministry of Education.

[2]ASTM C597-09.Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.

[3] A. A. Shah, Y. Ribakov, "Non-linear ultrasonic evaluation of damage concrete based on higher order armonic generation", Materials and Design 30, 4095-4102 (2009).

[4] M. Castellote, C. Andrade, C. Castellote. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. Cement and Concrete Research 31 1411 –1420 (2001)

[5] G. Nossoni and R. Harichandran. Current Efficiency in Accelerated Corrosion Testing of Concrete, Corrosion Science Section, Vol 68, No.9 (2012)

[6] ASTM C876-91: Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete," 1999