

# USO DE GENERACIÓN DE INTERMODULACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS PARA LA DETECCIÓN DE FISURACIÓN DEBIDO A CORROSIÓN DE PROBETAS DE MORTERO REFORZADAS

Marina Miró<sup>1</sup>, Pedro Poveda<sup>2</sup>, Jesús Eiras<sup>3</sup>, Miguel Ángel Climent<sup>4</sup>, Jaime Ramis<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante, Spain.  
{e-mail: m.miro@ua.es}

<sup>2</sup> DFISTS, Universidad de Alicante, 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante, Spain.  
{e-mail: pedro.poveda@ua.es}

<sup>3</sup> Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marsella, Francia  
{e-mail: eiras@lma.cnrs-mrs.fr}

<sup>4</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante, Spain.  
{e-mail: ma.climent@ua.es}

<sup>5</sup> DFISTS, Universidad de Alicante, 03690 Sant Vicent del Raspeig, Alicante, Spain.  
{e-mail: jramis@ua.es}

## Resumen

El hormigón armado es de vital importancia en muchas aplicaciones estructurales en ingeniería civil e industrial. La fisuración, delaminación y desprendimiento de la interfaz acero-hormigón son fallos típicos debidos a la corrosión de las barras de acero. Este fenómeno puede reducir severamente la capacidad de carga de las estructuras. Sin embargo, el primer paso de este proceso de degradación es la microfisuración del material cementicio. En este trabajo se ha empleado la intermodulación de ondas ultrasónicas para detectar la aparición de micro fisuras debidas a la corrosión del acero en mortero reforzado y cuantificar el daño y la degradación causadas. Para ello, se diseñó un experimento utilizando probetas de mortero reforzado con adición de cloruro sódico y sometidas a un campo eléctrico para acelerar el proceso de corrosión durante diferentes periodos de tiempo para obtener varios niveles de degradación.

**Palabras clave:** ensayo de ultrasonidos no lineales, daño, fisuras, corrosión de acero, mortero de cemento.

## Abstract

Reinforced concrete is of vital importance in many civil and industrial structural applications. Cracking, delamination and debonding of the steel-concrete interface are typical failures due to corrosion of the steel rebar. These phenomena can severely reduce the load-bearing capacity of the structures. However, the first step in these degradation processes is the micro-cracking of the composite cementitious material. In this work intermodulation of ultrasonic waves have been used for detecting the appearance of micro cracks due to steel corrosion in reinforced mortar and quantify the damage and degradation caused. For this purpose, an experiment was designed using steel reinforced mortar specimens with addition of sodium chloride and subjected to an electric field to accelerate the corrosion process during different periods of time to obtain various levels of degradation.

**Keywords:** non-linear ultrasonic test, damage, cracks, steel corrosion, cement mortar.

PACS nº. 43.35.Zc

## 1 Introducción

Las técnicas ultrasónicas son una práctica cada vez más común en los ensayos no destructivos (END) de materiales de construcción debido a sus características no invasivas, su capacidad para la detección de fisuras y su aplicabilidad directa a casos in situ [1]. En este contexto, se han desarrollado técnicas de monitorización de la corrosión en hormigón basadas en la propagación de ondas ultrasónicas. No obstante, se ha demostrado que la sensibilidad y precisión de estas técnicas lineales son limitadas para la detección de micro fisuras propias de las primeras etapas en comparación con las técnicas ultrasónicas no lineales (UNL) [2, 3]. Esto es debido a que para la penetración total de la onda ultrasónica en elementos de hormigón armado en estas técnicas lineales, se debe utilizar una frecuencia de excitación más baja, la cual induce una longitud de onda más larga, de modo que puede producirse una pérdida de resolución [4]. En el estudio de la elasticidad no lineal se ha comprobado que, en un sólido expuesto a un fuerte campo ultrasónico, ocurren efectos no lineales [5] como el cambio de frecuencia de resonancia [6], la generación de subarmónicos y armónicos de orden superior [7], o la aparición de productos de intermodulación. La degradación de un material está directamente ligada a un comportamiento mecánico no lineal. Como resultado, cuando una onda ultrasónica se propaga a través del material e interactúa con estos cambios microestructurales, se generan términos no lineales [8]. Las relaciones con el primer y segundo armónico se han utilizado para detectar daño en edades tempranas causado por la corrosión del acero en el hormigón, ya que cuando se generan microfisuras, aumentan la amplitud de los armónicos (principalmente el tercer armónico) y se atenúa la fundamental [9]. Como en otras áreas, la aparición o aumento de la amplitud de armónicos o productos de intermodulación se considera un síntoma de deterioro y pérdida de calidad del dispositivo o material estudiado. Por ejemplo, una publicación anterior [10] aborda la relación entre las medidas de distorsión no lineal y las no linealidades, que son las causas físicas de la distorsión de la señal en altavoces, auriculares, micro altavoces y otros transductores [11]. La figura 1 muestra gráficamente el concepto de distorsión de intermodulación (IMD). La IMD ocurre en frecuencias que son la suma y / o la diferencia de múltiplos enteros de las frecuencias fundamentales. Si un sistema no lineal es excitado por dos señales de frecuencias  $f_1$  y  $f_0$ , la no linealidad da lugar a componentes de salida adicionales en  $(f_1 + f_0)$  y  $(f_1 - f_0)$  conocidos como productos de intermodulación de primer orden. Al mismo tiempo, los productos de segundo orden se mezclarán con las señales originales dando componentes de frecuencias  $(f_1 + 2f_0)$ ,  $(f_1 - 2f_0)$ , y así sucesivamente.

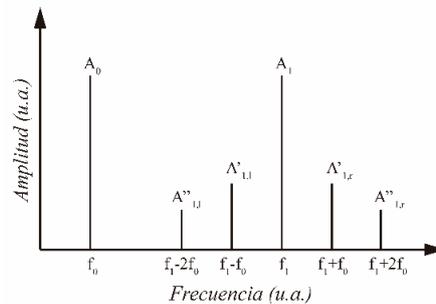


Figura 1 – Espectro en frecuencia: distorsión de intermodulación (IMD).

En cuanto a los parámetros específicos que se han utilizado para cuantificar el daño mediante la incorporación de productos de intermodulación encontramos la Relación de Modulación de Intensidad,  $R$ , el cual se utiliza como índice de daño en diversos estudios [6, 12-14] y se define como:

$$R = \frac{A'_{1,l} + A'_{1,r} + A''_{1,l} + A''_{1,r}}{A_1} \quad (1)$$

donde  $A'_{l,l}$ ,  $A'_{l,r}$ ,  $A''_{l,l}$  y  $A''_{l,r}$  son las amplitudes de las bandas laterales izquierda y derecha respectivamente, y  $A_l$  es la amplitud de la onda acústica de alta frecuencia.

En este estudio, se investiga la aplicación de un ensayo ultrasónico de doble excitación para detectar el daño por fisuración debida a la corrosión del acero en el hormigón armado. Para ello, se sometieron varias probetas de mortero de cemento armado a un ensayo de corrosión acelerada para favorecer la fisuración del recubrimiento. La evolución del daño se controló mediante mediciones de UNL ubicando los transductores únicamente en una de las caras de la probeta, lo que es deseable para muchas aplicaciones reales debido al acceso limitado a otras superficies.

## 2 Materiales y métodos

Se prepararon cinco probetas prismáticas de mortero de cemento reforzado de 100 x 100 x 350 mm<sup>3</sup> de idéntica composición. Se escogió fabricar las probetas de mortero en lugar de hormigón para asegurar una mejor unión en la interfaz acero-mortero y reducir las heterogeneidades del material y, de este modo, mejorar la distinción del comportamiento mecánico no lineal producido por la fisuración del inherente al medio de propagación [15]. El molde de fabricación posee dos orificios centrados a 25 mm de la superficie inferior, permitiendo la ubicación de una barra de acero de 12 mm de diámetro. Este diseño se realizó para provocar una fisura longitudinal en las muestras tras la corrosión de la barra de refuerzo. Una de las muestras se utilizó como referencia (Control) mientras que las otras cuatro se sometieron a un ensayo de corrosión acelerada (ver sección 2.2). Los diferentes tiempos de exposición al ensayo permitieron obtener estados crecientes de daño por fisuración (M1, M2, M3 y M4). El inicio del daño se controló mediante observaciones microscópicas (ver sección 2.3).

### 2.1 Materiales y preparación de las probetas

El mortero se compuso de 1350 g de arena silíceo normalizada [16] y de 450 g de cemento Portland resistente a sulfatos tipo CEM I 52.5 R-SR 3 [16]. La relación de agua-cemento ( $a/c$ ) se fijó en 0.5 (225 g) y se incorporó cloruro de sodio en el agua de amasado para proporcionar un contenido equivalente de 2% de Cl<sup>-</sup> en relación con el peso del cemento en el mortero endurecido (14.8 g de NaCl) [17]. Las barras de acero se limpiaron de productos de corrosión previos antes de su colocación en el molde [18]. Además, los extremos de las barras de refuerzo se cubrieron con cinta aislante de vinilo para evitar la interfaz acero-mortero-aire en los ensayos de corrosión acelerada. Los morteros se amasaron con una mezcladora [19], para posteriormente, ser vertidos en el molde, compactados mecánicamente y curados durante 28 días en cámara de humedad a 20 °C y 95% de humedad relativa, antes de comenzar el ensayo de corrosión acelerada.

### 2.2 Ensayo de corrosión acelerada y niveles de daño

El ensayo de corrosión acelerada se llevó a cabo utilizando un potenciostato-galvanostato (Modelo 362, EG&G Instruments, Princeton NJ, EE. UU.). Se aplicó una densidad de corriente anódica constante de 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  entre la barra de acero (ánodo) y una rejilla externa de acero galvanizado (cátodo) colocada en la parte inferior de las muestras. Para mantener una conductividad eléctrica adecuada en todo el mortero de cemento, las muestras se sumergieron parcialmente (5 mm de altura) en un recipiente con agua del grifo y se colocó una esponja de polipropileno entre la muestra y la rejilla (Figura 2).

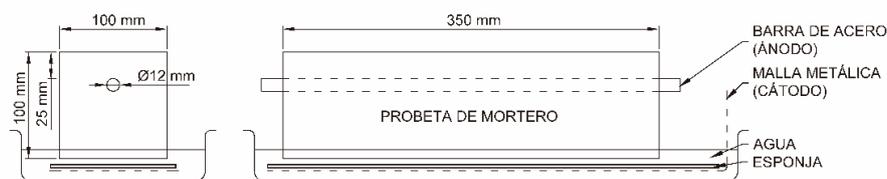


Figura 2 – Dimensiones de las probetas de mortero.

Dado que el potencióstato-galvanostato proporcionaba una densidad de corriente constante, fue posible corroer cuatro muestras simultáneamente conectándolas en serie. En las condiciones experimentales de estos ensayos, la penetración del proceso de corrosión del acero puede considerarse lineal con el tiempo, siendo la velocidad de corrosión igual a la densidad de corriente anódica que pasa por el circuito eléctrico (eficiencia del 100%) [20, 21]. La duración del tiempo de exposición de cada muestra al ensayo de corrosión acelerada se escogió para que cada una alcanzara un nivel diferente de degradación. Se buscó obtener una muestra con bajo nivel de daño (M1), una algo más dañada pero antes de la aparición de la primera fisura superficial (M2), una en la que acabase de aparecer la primera fisura (M3) y otra con un alto grado de daño (M4). Para establecer el tiempo de exposición al paso de corriente para cada muestra, previo al ensayo, se calculó el tiempo estimado en aparecer la primera fisura visible como:

$$t_0 = \frac{7.53 + 9.32 \frac{c}{\varnothing}}{0.0319 \cdot I_{corr}} \quad (2)$$

Donde  $t_0$  (días) es el tiempo estimado de aparición de la primera fisura visible,  $c$  (mm) es la profundidad del recubrimiento,  $\varnothing$  (mm) es el diámetro de la barra de refuerzo e  $I_{corr}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) es la densidad de corriente. En este caso, la ecuación arroja el resultado de 8.4 días. Por tanto, los tiempos establecidos fueron 0 días para la muestra control, 3 días para la muestra M1, 6 días para la muestra M2, el día de aparición de la primera fisura visible para la muestra M3 y 20 días para la muestra M4. Por tanto, el sexto día se esperaba desconectar únicamente la muestra 2, pero ese día apareció la primera fisura visible en la muestra M3, obligando a desconectar ambas muestras (M2 y M3) al mismo tiempo. El tiempo de aparición de la primera fisura visible fue algo menor al esperado ya que ese día apareció también la primera fisura visible en la muestra M4, la cual se mantuvo conectada hasta el día 20. Afortunadamente, la muestra M2 no fisuró, por lo que podríamos tener dos muestras en una etapa de daño claramente diferente. La figura 3 muestra un diagrama del ensayo de corrosión acelerada y los niveles de daño.

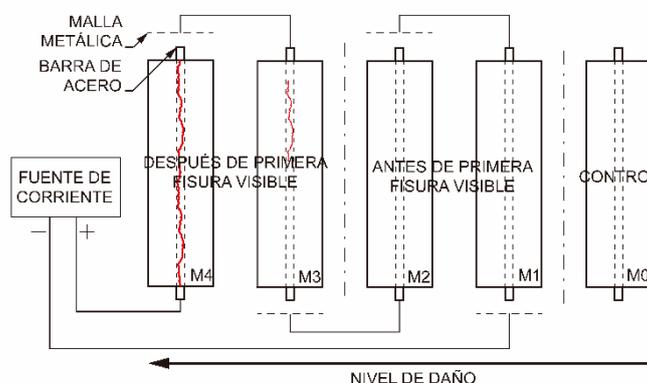


Figura 3 – Configuración experimental para el ensayo de corrosión acelerada.

### 2.3 Medidas con microscopio

El seguimiento del daño se ha realizado mediante la detección de la aparición de la primera micro fisura superficial y monitorizando el crecimiento del ancho de esta a lo largo del tiempo. Para ello, se llevó a cabo una inspección periódica de la superficie de las muestras de mortero durante todo el experimento, utilizando para ello un microscopio con escala de medida (aumento 40X, modelo 58-C0218, Controls, Milán, Italia) y tomando fotografías microscópicas de la superficie de inspección de las muestras. Se registró el ancho de las fisuras de estas imágenes tomando tres medidas de ancho de fisura por muestra.

### 2.4 Medidas del ensayo de ultrasonidos no lineales

El ensayo de UNL comenzó justo antes del inicio del ensayo de corrosión acelerada (día 0) y concluyó al mes y medio, cuando se evidenció que el comportamiento de las muestras era constante.

La configuración experimental utilizada para las medidas de UNL se muestra en la Figura 4. Se utilizaron dos transductores emisores para suministrar simultáneamente dos tonos puros ( $f_0 = 20$  kHz,  $f_1 = 200$  kHz). A diferencia de la mayoría de las investigaciones en este campo [22], la baja frecuencia utilizada en este trabajo no corresponde a una frecuencia de resonancia de las muestras, lo que es interesante para aplicaciones reales in-situ. La señal sinusoidal de 20 kHz, con una duración de 1000 ciclos y amplitud de 130V, se envió a un amplificador de voltaje FS WMA-100 y luego al transductor emisor (EL). La señal de 200 kHz, emitida por un transductor IDK (EZ), fue proporcionada por un generador de señales (SONY AFG310) a una amplitud de 5V. En cuanto al transductor receptor (RZ), se ha elegido uno similar a EZ para garantizar que el rango de frecuencias entre 160 kHz y 240 kHz, donde se espera la aparición de productos de intermodulación, se registrara sin distorsión. Para la emisión y adquisición de la señal, se implementó una aplicación a medida utilizando el software de desarrollo LabVIEW®. Los transductores se acoplaron a las probetas con parafina blanda blanca (Acofarma). Las mediciones se realizaron mediante un dispositivo de E/S multifunción NI-USB 6361 con una frecuencia de muestreo de 2 MS/s y una resolución de 16 bits.

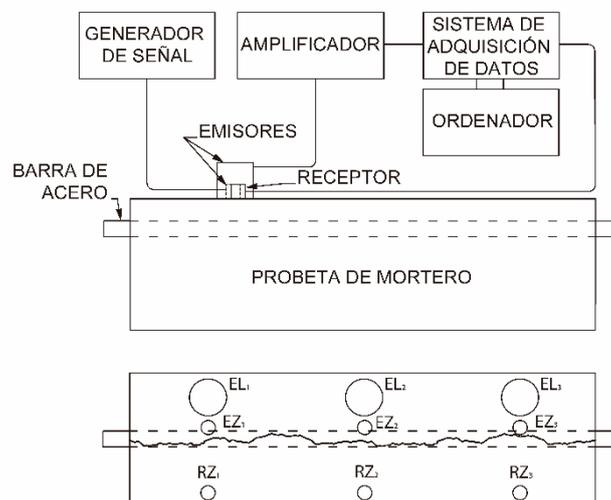


Figura 4 – Configuración experimental para las medidas de UNL y posiciones de los transductores.

Finalmente, el espectro de frecuencia de la señal eventanada se obtuvo utilizando la transformada de Fourier. Luego, se obtuvieron las amplitudes de la frecuencia fundamental (200 kHz) y de los primeros y segundos productos de intermodulación esperados (180 y 220 kHz - 1<sup>er</sup> orden - 160 y 240 kHz - 2<sup>o</sup> orden). Estos valores se utilizaron para evaluar el parámetro de intermodulación R (Ecuación 1).

## 2.5 Transductores ultrasónicos

La detección de microfisuras dependerá significativamente de la frecuencia y energía de la fuente de excitación y, por lo tanto, es necesario seleccionar o diseñar los transductores de manera óptima para que funcionen en su frecuencia de resonancia. Al mismo tiempo, el uso de un transductor receptor con un rango de frecuencia adecuado puede evitar la pérdida de información crítica.

Para una mayor flexibilidad en la selección de la alta frecuencia en el ensayo y un rango de frecuencia más alto para la adquisición de la señal, se utilizaron transductores de ultrasonidos de banda ancha IDK09 [23]. Los dispositivos estaban formados por una membrana de contacto aislado (cerámica pura  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y un elemento activo cerámico piezoeléctrico  $\text{PbZrTiO}_3$  (PZT) - cerámica modificada clase 200. El bajo factor de calidad mecánica ( $Q_m < 100$ ) de estos materiales PZT permite una respuesta de banda ancha cuya impedancia eléctrica se muestra en la figura 5. Aunque la frecuencia de resonancia está cerca de 180 kHz, la frecuencia de emisión ha sido de 200 kHz.

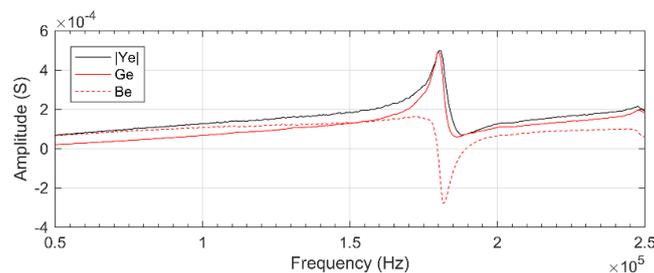


Figura 5 – Ejemplo de figura con leyenda.

En cuanto al transductor emisor encargado de emitir la señal de 20 kHz, se ha optado por uno tipo Langevin [24-26]. Estos dispositivos, basados en el fenómeno piezoeléctrico, presentan un ancho de banda muy estrecho, lo que los hace aptos para aplicaciones de alta potencia. Su estructura más común consta de dos piezas cilíndricas de metal, la masa trasera y la frontal a juego, entre las cuales se ubican un cierto número de pares de anillos de material piezoeléctrico. Para dotar de consistencia mecánica al conjunto y garantizar una óptima transmisión de ondas longitudinales, el transductor es pretensado mediante un tornillo. Para un correcto diseño, la pieza trasera debe garantizar una máxima reflexión de la onda acústica, mientras que el elemento frontal se encargará de transmitirlos al medio. Para dotar al sistema de una mayor potencia de radiación, se diseñó este elemento frontal del transductor disminuyendo gradualmente su diámetro. Esta sección cónica constituye un amplificador mecánico capaz de incrementar la amplitud de las oscilaciones [27]. Por otro lado, las oscilaciones se producirán gracias a la excitación de los cristales piezoeléctricos (generalmente cerámica de PZT) mediante una tensión alterna.

A pesar de la existencia de modelos más sofisticados para describir el comportamiento de un transductor tipo sandwich [25], las ecuaciones del modelo propuesto por Langevin son ampliamente utilizadas debido a su sencillez y flexibilidad. A partir de ellas es posible establecer, para una frecuencia de resonancia dada (en la cual la impedancia se vuelve cero), las dimensiones necesarias para cada uno de los componentes. El modelo asume la propagación de ondas planas a lo largo de la sección longitudinal de los elementos y que las fuerzas ejercidas por los extremos frontal y trasero en el aire se consideran insignificantes. En este trabajo se diseñó y fabricó el transductor principal con una frecuencia de resonancia de 20 kHz. Su curva de admitancia y desplazamiento se muestran en la Figura 6.

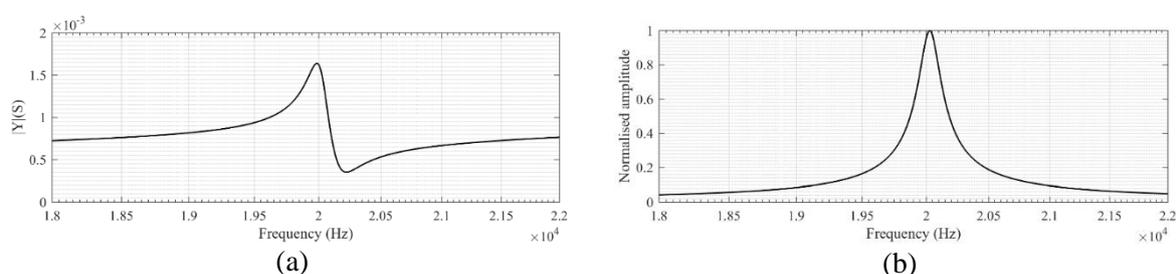


Figura 6 – (a) Admitancia eléctrica. (b) Desplazamiento al final del transductor.

### 3 Resultados y discusión

Como se menciona en la sección 2.3., se utilizó un microscopio para la detección y evaluación del crecimiento del ancho de fisura en función del tiempo. Las primeras microfisuras en las muestras 3 y 4 se detectaron después de 6 días desde el inicio del paso de corriente, momento en que la muestra 3 se desconectó de la fuente de alimentación. La muestra 4 se desconectó después de 20 días, cuando la fisura tenía un ancho de 240  $\mu\text{m}$ . La figura 7 muestra imágenes representativas a la evolución de la fisura aparecida encima de la muestra de mortero 4.

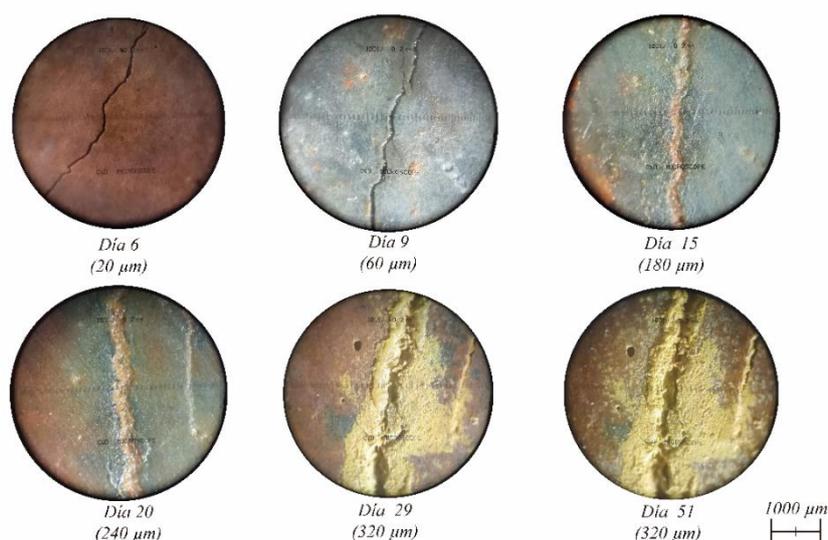


Figura 7 – Evolución del ancho de fisura de M4.

En este trabajo se han realizado mediciones diarias (excepto fines de semana y festivos) de UNL en las cinco probetas. Se han utilizado dos estrategias diferentes para poner en evidencia la aparición de características no lineales debidas a la microfisuración de las probetas de estudio a través del parámetro R, (Ecuación 1). En primer lugar, se optó por observar de la evolución del daño infligido en las muestras desde el inicio de las pruebas hasta 30 días después. En segundo lugar, para comparar el daño infligido en condiciones más controladas, se realizaron cinco medidas al final del experimento (día 45). En ese momento, las muestras se habían secado durante al menos 15 días y el proceso de corrosión (controlado por la inspección del ancho de fisura) se había estabilizado.

El análisis de los valores de R obtenidos inicialmente no mostró diferencias significativas entre las tres posiciones investigadas. Por lo tanto, estas mediciones de referencia (sin daños) de R se utilizaron para definir un límite de control superior, más allá del cual se pueden identificar los daños. En este

documento, se encontró que los valores de R para las muestras no dañadas estaban bien descritos por una distribución de valores extremos generalizados (GEV).

La Figura 8 muestra la evolución del parámetro no lineal R con el tiempo para cada muestra; la línea de puntos horizontal representa el límite de control superior (98%). También se muestran la evolución del ancho de fisura de las probetas de mortero M3 y M4 (3 puntos de medida para cada una) y, en líneas verticales, los tiempos de desconexión y de detección de la primera fisura visible.

Los resultados muestran que los valores de R correspondientes a la muestra “control” permanecen constantes y por debajo del límite de control superior. Por el contrario, las muestras sometidas a la corrosión acelerada manifestaron valores atípicos en todos los casos. Sin embargo, los momentos en los que se obtuvieron estas advertencias fueron diferentes. Las muestras M1 y M2 exhibieron un comportamiento similar. La duración de la exposición a la corriente pasante en ambas muestras fue de 3 y 6 días, y exhibieron valores atípicos a los 16 y 14 días, pudiendo deberse a que, a pesar de haber sido desconectadas antes de la fisuración, el proceso de corrosión de las armaduras iniciado no se detiene sino que se ralentiza. Posteriormente, el parámetro no lineal en ambas muestras disminuyó progresivamente para permanecer dentro del límite de control. Por el contrario, la corrosión acelerada provocó la fisuración al sexto día en las muestras M3 y M4. Debido al procedimiento experimental seguido, solo fue posible definir la evolución del ancho de fisura para la probeta 4. Sin embargo, para ambas probetas se pudo observar una corta primera etapa del proceso de corrosión en la cual no se aprecia fisura (etapa de generación). Posteriormente, la evolución del ancho de la fisura muestra un aumento aproximadamente lineal con el tiempo en la probeta 4 (etapa de propagación), en buen acuerdo con los resultados e interpretación de Andrade et al. [28-31]. Curiosamente, el parámetro R adquirió valores por encima del límite de control, un día antes de que se advirtiera la fisura. Una vez las probetas fisuraron, este parámetro no lineal aumentó, aunque los resultados también muestran una mayor variabilidad. Esto es especialmente cierto para la muestra M4, para la que el paso de corriente se mantuvo hasta el día 20 para promover aún más la corrosión de las barras de refuerzo y acumular daños en el recubrimiento del mortero. De hecho, en ese momento, la fisura había alcanzado un ancho de aproximadamente 240  $\mu\text{m}$ , pero se puede observar que dicho ancho continuó creciendo durante cuatro días hasta alcanzar alrededor de 300  $\mu\text{m}$  antes de estabilizarse. Sin embargo, el parámetro no lineal no se correlacionó con las observaciones del ancho de fisura, debido a factores no controlados que pueden conducir a una mayor variabilidad. En efecto, la corrosión acelerada implica fenómenos complejos en los que se produce la fisuración en un medio dinámico con condiciones variables, es decir, cuando se preparan probetas de mortero de cemento se producen reacciones complejas que desarrollan su resistencia con el tiempo y cambian su microestructura, además de la generación y transporte de óxido y otros productos de corrosión a través de poros y fisuras. En la Figura 7 se aprecia de forma evidente la aparición de productos de corrosión dentro de la fisura. Por lo tanto, las características mecánicas de la fisura pueden verse afectadas por tales productos, promoviendo o dificultando de manera distintiva el comportamiento mecánico no lineal. En cualquier caso, el daño por fisuración generó una desviación considerable de los valores de referencia obtenidos en la muestra de Control. Por otro lado, el hecho de que dos probetas (M2 y M3) estuvieran en etapas diferentes de daño (solo fisuró M3 el sexto día) podría deberse a un fenómeno de lixiviación de diferente intensidad en ambas probetas, apareciendo con una intensidad mucho mayor para la muestra M2 que para la muestra M3. La explicación más probable es una posible diferencia en la compactación de las muestras de mortero de cemento reforzado, al realizarse de forma manual. Es posible que si la interfaz acero-mortero fuera menos compacta y más imperfecta en algún caso (M2), el transporte de las especies de corrosión formadas en la superficie del acero pudiera haber sido más eficiente, lo que condujo a una lixiviación más intensa de los productos de corrosión, reduciendo su capacidad de generar tensiones y fisuración [32].

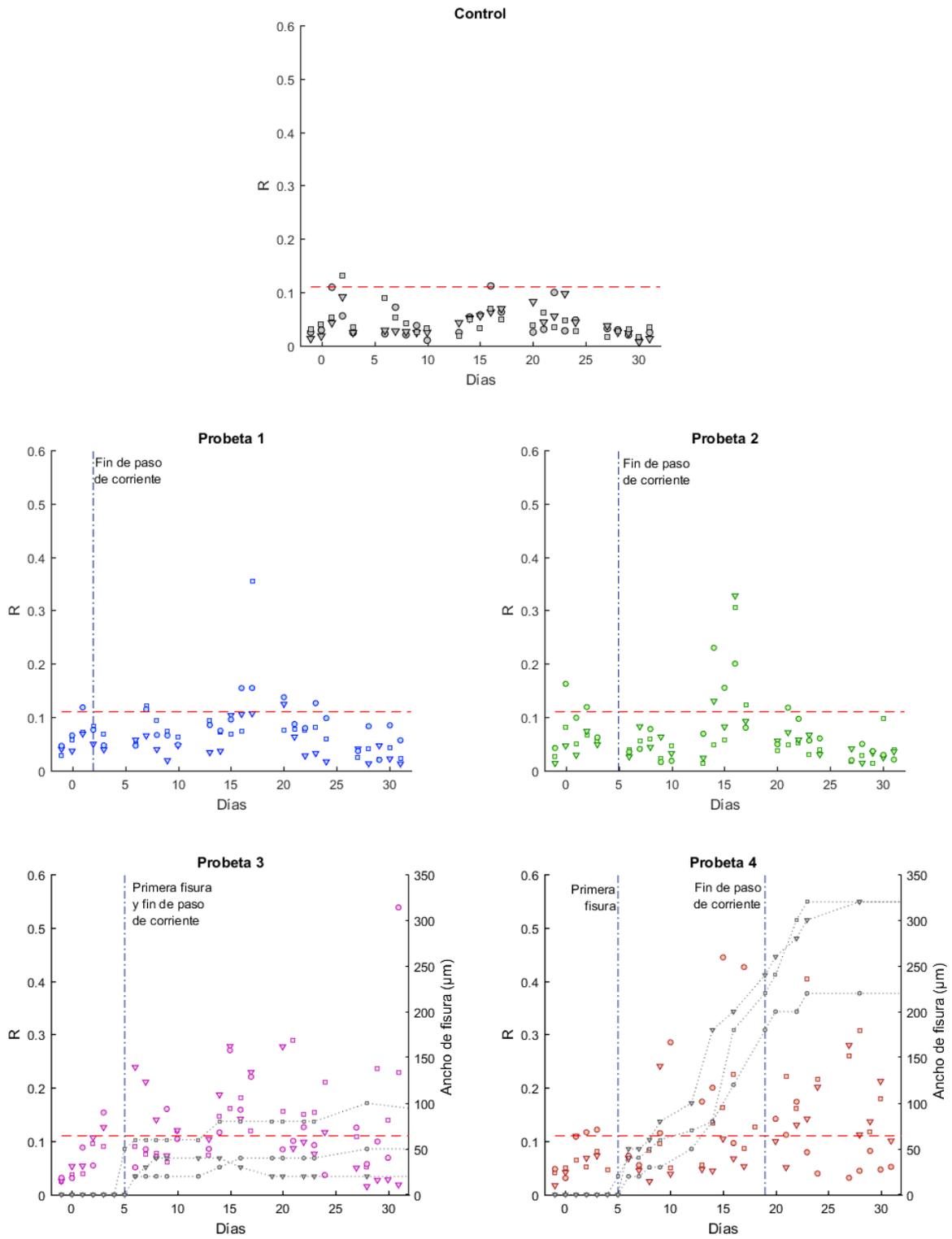


Figura 8 – Evolución del parámetro no lineal R en e tiempo para cada probeta.

Finalmente, es necesario resaltar que los ensayos de corrosión involucran condiciones de saturación de la muestra que suelen ser variables con el tiempo. Por este motivo, fue necesario utilizar probetas con diferente nivel de daño. Esas muestras pudieron ensayarse una vez finalizado el ensayo de corrosión, posteriormente a su secado y cuando todas las propiedades se hubieron estabilizado.

Se llevó a cabo un conjunto de cinco mediciones de modulación no lineal al final del experimento (día 45) para comparar el parámetro no lineal entre las muestras. La Figura 9 muestra los valores del parámetro R en diagramas de caja: la mediana, el primer y tercer cuartiles se muestran en los cuadros, mientras que los límites superior e inferior representan 1,5 veces el rango intercuartílico y las cruces rojas identifican los valores atípicos [33]. Como referencia, también se muestra el límite de control superior. Los resultados confirman que las muestras más dañadas son la M3 y la M4, mientras que la M1 y M2 son las menos dañadas. Curiosamente, la muestra de control también exhibió parte de los datos, por encima del límite de control superior. Dado que las muestras se secaron naturalmente al final de la prueba, la pérdida de humedad puede favorecer el comportamiento mecánico no lineal [34, 35]. Además, las muestras fisuradas exhibieron una mayor variabilidad que las demás. Estos resultados reforzaron la conclusión de que la no linealidad de la fisura conduce a una variabilidad creciente y una baja reproducibilidad.

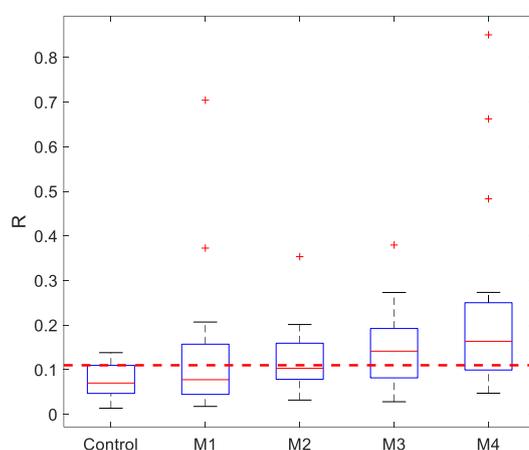


Figura 9 – Representación en cajas del parámetro R para las medidas finales.

## 4 Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que la distorsión por intermodulación, cuantificada mediante el parámetro R, puede ser un buen indicador de la degradación de estructuras. El análisis estadístico realizado así lo señala. En los ensayos de corrosión acelerada llevados a cabo con probetas de mortero reforzado se observa un aumento estadísticamente significativo del parámetro R. Además, la evolución de los valores del parámetro R encontrados en este trabajo, parece indicar que las características no lineales pueden estar apareciendo algún tiempo antes de la observación de una fisura. Los resultados de las medidas realizadas correlan temporalmente con las observaciones y registros fotográficos microscópicos superficiales. Por tanto, se puede concluir que el análisis realizado facilita la visualización de síntomas de no linealidad asociados a la aparición de fisuras, abriendo el camino a la propuesta de umbrales relacionados con nivel de daño en una estructura.

Si bien los resultados indican que las medidas de intermodulación pueden ser de gran utilidad para la detección de daños en estructuras corroídas, se necesita más investigación para confirmar estos resultados y avanzar en la propuesta de procedimientos prácticos, tanto para fines de investigación como en aplicaciones para monitorización de estructuras reales dañadas.

## Agradecimientos

Se agradecen los fondos recibidos para esta investigación de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto BIA2016-80982-R. Además, este trabajo ha podido ser realizado gracias al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, a través de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU16/04078). Finalmente, se agradece a Lafarge-Holcim España por proporcionar las muestras de cemento para preparar las probetas de mortero.

## Referencias

- [1] J. Blitz, G. Simpson, *Ultrasonic methods of non-destructive testing*, Springer Science & Business Media, 1995.
- [2] P. Antonaci, P. Bocca, D. Masera, Fatigue crack propagation monitoring by Acoustic Emission signal analysis, *Materials Structure & Micromechanics of Fracture* 465 (2011) 370-373.
- [3] J.D. Stauffer, C.B. Woodward, K.R. White, Nonlinear ultrasonic testing with resonant and pulse velocity parameters for early damage in concrete, *Aci Materials Journal* 102(2) (2005) 118-121.
- [4] W. Yeih, R. Huang, Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing, *Cement and Concrete Research* 28(7) (1998) 1071-1083.
- [5] K.Y. Jhang, Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non-destructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10(1) (2009) 123-135.
- [6] K.E.A. Van den Abeele, J. Carmeliet, J.A. Ten Cate, P.A. Johnson, Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy, *Research in Nondestructive Evaluation* 12(1) (2000) 31-42.
- [7] A.A. Shah, Y. Ribakov, Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation, *Materials & Design* 30(10) (2009) 4095-4102.
- [8] K.Y. Jhang, Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation, *Ieee Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* 47(3) (2000) 540-548.
- [9] C. Woodward, M.N. Amin, Evaluating rebar corrosion using nonlinear ultrasound, *34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Amer Inst Physics, Golden, CO, 2007, pp. 1314-1319.
- [10] W. Klippel, Tutorial: Loudspeaker nonlinearities - Causes, parameters, symptoms, *Journal of the Audio Engineering Society* 54(10) (2006) 907-939.
- [11] J. Price, T. Goble, *Signals and noise*, Telecommunications Engineer's Reference Book, Elsevier 1993, pp. 10-1-10-15.
- [12] F. Aymerich, W.J. Staszewski, Experimental Study of Impact-Damage Detection in Composite Laminates using a Cross-Modulation Vibro-Acoustic Technique, *Structural Health Monitoring-an International Journal* 9(6) (2010) 541-553.
- [13] M.I. Friswell, J.E.T. Penny, Crack Modeling for Structural Health Monitoring, *Structural Health Monitoring-an International Journal* 1(2) (2002) 139-148.
- [14] M. Muller, A. Sutin, R. Guyer, M. Talmant, P. Laugier, P.A. Johnson, Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone, *Journal of the Acoustical Society of America* 118(6) (2005) 3946-3952.
- [15] C. Payan, T.J. Ulrich, P.Y. Le Bas, T. Saleh, M. Guimaraes, Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage, *Journal of the Acoustical Society of America* 136(2) (2014) 537-546.
- [16] UNE-EN:197-1, AENOR, Madrid, España, 2011.

- [17] M.A. Climent, G. de Vera, E. Viqueira, M.M. Lopez-Atalaya, Generalization of the possibility of eliminating the filtration step in the determination of acid-soluble chloride content in cement and concrete by potentiometric titration, *Cement and Concrete Research* 34(12) (2004) 2291-2295.
- [18] ASTM:G1-03, Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, 2004.
- [19] UNE-EN 196-1: Métodos de ensayo de cementos., Parte 1: Determinación de resistencias., AENOR, Madrid, España, 2018.
- [20] M. Angel Climent, M. Miro, J. Carbajo, P. Poveda, G. de Vera, J. Ramis, Use of Non-Linear Ultrasonic Techniques to Detect Cracks Due to Steel Corrosion in Reinforced Concrete Structures, *Materials* 12(5) (2019).
- [21] G. Nossoni, R. Harichandran, Current Efficiency in Accelerated Corrosion Testing of Concrete, *Corrosion* 68(9) (2012) 801-809.
- [22] L. Pieczonka, A. Klepka, A. Martowicz, W.J. Staszewski, Nonlinear vibroacoustic wave modulations for structural damage detection: an overview, *Optical Engineering* 55(1) (2016).
- [23] Dakel., IDK09. <http://www.dakel.cz>. (Last consulted: July 2020).
- [24] S.Y. Lin, F.C. Zhang, Study of Vibrational Characteristics for Piezoelectric Sandwich Ultrasonic Transducers, *Ultrasonics* 32(1) (1994) 39-42.
- [25] H. Minchenko, High-power piezoelectric transducer design, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* 16(3) (1969) 126-131.
- [26] E. Neppiras, The pre-stressed piezoelectric sandwich transducer, *Ultrasonics international* 1973 (1973) 295-302.
- [27] ZVEI, Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products: Recommendations on methods, construction and applications, German Electrical Manufacturers Association, 2006.
- [28] F. Pedrosa, C. Andrade, Corrosion induced cracking: Effect of different corrosion rates on crack width evolution, *Construction and Building Materials* 133 (2017) 525-533.
- [29] C. Alonso, C. Andrade, J. Rodriguez, J.M. Diez, Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion, *Materials and Structures* 31(211) (1998) 435-441.
- [30] C. Andrade, C. Alonso, F.J. Molina, Cover Cracking as a Function of Bar Corrosion. 1. Experimental Test, *Materials and Structures* 26(162) (1993) 453-464.
- [31] F.J. Molina, C. Alonso, C. Andrade, Cover Cracking as a Function of Rebar Corrosion. 2. Numerical-Model, *Materials and Structures* 26(163) (1993) 532-548.
- [32] M.A. Climent-Llorca, M. Miró-Oca, P. Poveda-Martínez, J. Ramis-Soriano, Use of Higher-Harmonic and Intermodulation Generation of Ultrasonic Waves to Detecting Cracks due to Steel Corrosion in Reinforced Cement Mortar, *International Journal of Concrete Structures and Materials* (2020).
- [33] J.W. Tukey, *Exploratory data analysis*, Reading, MA1977.
- [34] J.N. Eiras, J.S. Popovics, M.V. Borrachero, J. Monzo, J. Paya, The effects of moisture and micro-structural modifications in drying mortars on vibration-based NDT methods, *Construction and Building Materials* 94 (2015) 565-571.
- [35] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, Effect of water saturation and porosity on the nonlinear elastic response of concrete, *Cement and Concrete Research* 40(3) (2010) 473-476.