DETECCIÓN DE FISURAS DEBIDAS A CORROSIÓN DE ARMADURAS EN HORMIGÓN MEDIANTE TÉCNICAS ULTRASÓNICAS NO LINEALES. RESULTADOS PRELIMINARES

M. A. CLIMENT¹, M. MIRÓ¹, J. CARBAJO², P. POVEDA²,
G. DE VERA¹, E. G. SEGOVIA¹, J. RAMIS²

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, España.

² DFISTS, Universidad de Alicante, Alicante, España.

RESUMEN

En este trabajo, se han empleado ondas ultrasónicas no lineales para detectar el inicio de la microfisuración debida a la corrosión del acero en elementos de hormigón armado. Las probetas tenían forma prismática con una barra de acero. Se forzó la corrosión añadiendo cloruro sódico en el momento de la mezcla del mortero, y aplicando corriente eléctrica con una fuente a densidad de corriente constante, haciendo que la armadura trabajara como ánodo y un contraelectrodo externo como cátodo. Los resultados preliminares indican que el inicio de la fisuración parece estar acompañado de la aparición de armónicos de orden superior en la señal de salida (distorsión armónica), cuando el sistema se excita por medio de una onda ultrasónica con frecuencia central.

Palabras clave: corrosión del acero; hormigón armado; fisuración; ondas ultrasónicas; detección no destructiva.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero es uno de los mecanismos principales que limitan la vida útil de las estructuras de hormigón armado y pretensado, en edificación e infraestructuras de ingeniería civil (ACI, 1996). El carácter expansivo de los productos de corrosión del acero es la causa del daño sufrido por el hormigón (Suda et al., 1993), del cual los primeros síntomas son las micro y macro fisuras (Alonso et al., 1998; Liu and Weyers, 1998), seguido del desprendimiento o delaminación del recubrimiento de hormigón. Otras consecuencias de la corrosión del acero embebido en hormigón son las siguientes: pérdida de adherencia entre acero y hormigón, pérdida de ductilidad del acero, y pérdida de sección transversal del acero (Bertolini et al., 2004). Estos fenómenos contribuyen a la reducción de la vida útil y la capacidad portante de las estructuras. Normalmente, la aparición de fisuras se considera el estado límite en relación con la durabilidad de las estructuras de hormigón afectadas por corrosión de las armaduras de acero (Ministerio de Fomento, 2010; Uomoto and Misra, 1988).

Existe mucho interés en desarrollar técnicas de evaluación no destructivas que sean capaces de proporcionar alertas tempranas de la iniciación de la corrosión. Estas técnicas serían muy útiles para la vigilancia e inspección de las estructuras en el mantenimiento y reparación de construcciones que se han visto afectadas por corrosión de armaduras. Las llamadas técnicas electroquímicas han sido ampliamente utilizadas para la evaluación del estado y riesgo de la corrosión en hormigón (Andrade and González, 1978; Andrade, et al., 2001; Elsener, et al., 2003; ASTM, 2004b). La medida del potencial de corrosión (E_{corr}) aporta información cualitativa del estado de la corrosión del acero, lo que es de gran ayuda para el mapeo del riesgo de corrosión en un elemento de hormigón. La velocidad de corrosión indica la actividad de la corrosión del acero, expresándose normalmente en unidades electroquímicas ($\mu A/cm^2$). Este último parámetro puede incluso ser usado en modelos matemáticos para la predicción de la vida útil restante de una estructura afectada por corrosión del refuerzo de acero (Ministerio de Fomento, 2010). Sin embargo, las técnicas electroquímicas no aportan información acerca de las microfisuras que aparecen en el hormigón por la generación de productos de corrosión del acero.

Diversas técnicas basadas en el uso de ondas elásticas se han utilizado para evaluar propiedades mecánicas y para la detección del daño en materiales y estructuras. Las ondas que se propagan a través de un material son reactivas a defectos, poros y discontinuidades como las fisuras (Zaki, et al., 2015). El método de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) ha sido ampliamente utilizado para la inspección de estructuras de hormigón. La técnica VPU, basada en la medida de la velocidad del sonido, se considera sensible al estado de la interfaz entre hormigón y acero y también a la fisuración (Sharma and Mukherjee, 2010). Sin embargo, las medidas de VPU a través del hormigón son menos sensibles a las fisuras distribuidas que aparecen en las primeras etapas de la corrosión del acero en hormigón (Shah and Ribakov, 2009a). La técnica de impacto-eco (IE), que se basa en aplicar un impacto mecánico, y monitorizar la señal que se recibe con sensores localizados en la superficie del hormigón, no se ha utilizado apenas para detectar el daño producido por la corrosión del acero (Liang and Su, 2001). Algunos autores han señalado que la fiabilidad del método de IE descende con el aumento del espesor de las muestras de hormigón (Zaki, et al., 2015). La técnica de emisión acústica (EA) se ha empleado comúnmente para detectar procesos de deformación activos: crecimiento de fisuras, cierres de huecos, deformaciones plásticas, etc. (Calabrese et al., 2013; Zaki, et al., 2015). Existen recomendaciones específicas para la aplicación del método de la EA para la evaluación del daño en hormigón (Ohtsu, 2010). Sin embargo, una limitación importante de la técnica de EA es que no es capaz de detectar defectos pasivos (Zaki, et al., 2015), lo que impide la aplicación de la EA en inspecciones ocasionales de estructuras de hormigón armado.

Se ha demostrado que las técnicas ultrasónicas no lineales (UNL) son útiles para la evaluación de la degradación de un material (Jhang, 2009). Concretamente, sirven para detectar las primeras etapas de

la fisuración (Shah et al., 2009). La técnica UNL se basa en el hecho de que la interacción de los ultrasonidos con los materiales fisurados genera armónicos de orden superior (Korenska et al., 2009; Shah and Ribakov, 2009a; Shah and Ribakov, 2009b; Shah et al., 2009; Shah et al., 2013; Xiang et al., 2008).

Existen numerosas técnicas para detectar la microfisuración del hormigón (Golewski, 2018; Maji, 1995). Debiendo mencionar especialmente los métodos basados en el análisis de imagen digital, que se han empleado para investigar daño, fisuras y parámetros mecánicos de fractura en hormigón y otros materiales de construcción (Golewski and Sadowski, 2016; Ringot and Bascoul, 2001). Sin embargo, el objetivo del presente trabajo es el estudio de la posibilidad de usar la técnica de UNL para la evaluación no destructiva del daño en elementos de hormigón, debido a la corrosión del acero. Para ello, se han llevado a cabo medidas de UNL en probetas de hormigón armado sometidas a corrosión forzada del acero, a través de la aplicación de campo eléctrico. Los resultados preliminares sugieren que es posible detectar las microfisuras que se generan por la expansión de los productos de corrosión usando la técnica de UNL. La técnica puede considerarse como una metodología no destructiva que es complementaria a las técnicas electroquímicas clásicas, ya que estas últimas no son sensibles a la aparición de las anteriormente mencionadas microfisuras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se llevan a cabo en elementos de mortero de cemento armado. Las probetas tenían forma prismática, con una única barra de acero como refuerzo. La elección de usar mortero de cemento en lugar de hormigón se debe al interés de utilizar un material más homogéneo y simple, evitando la presencia del árido grueso, que podría crear heterogeneidades en la interfaz hormigón-acero. La corrosión del acero fue forzada mediante la aplicación de un campo eléctrico, entre la barra de acero (ánodo) y un cátodo externo. Las medidas de UNL se llevaron a cabo durante el ensayo de corrosión. La aparición de fisuras en la superficie de hormigón se detectó usando un microscopio, que también permitió las medidas de ancho de fisura. Todos los detalles experimentales de detallan a continuación.

Tabla 1. Composición del mortero de cemento.

Material	Cantidad (g)
Cemento (CEM I 52,5 R SR(3))	450
Arena silícea normalizada	1350
Agua desionizada	225 (a/c = 0.5)
NaCl	14.8 (2% Cl^- relativo al peso de cemento)

2.1 Preparación de las Probetas de Mortero de Cemento Reforzado

El mortero de cemento se preparó con un cemento Portland ordinario resistente a sulfatos, CEM I 52,5 R SR(3), siguiendo la norma Europea (UNE-EN, 2011). El agregado utilizado fue arena silícea normalizada. La relación agua-cemento (a/c) del mortero fue 0.5, y finalmente se disolvió cloruro sódico en el agua de amasado para obtener un contenido del 2% Cl^- relativo al peso de cemento en el mortero endurecido (Climent et al., 2004). Los detalles de la composición se dan en la Tabla 1. La Figura 1 muestra una foto con el molde de madera, la amasadora de mortero y los materiales utilizados en la mezcla.

Las probetas de mortero tenían forma prismática, con dimensiones de $8 \times 8 \times 35 \text{ cm}^3$. Se fabricaron en moldes de madera que contenían una armadura de acero corrugada (diámetro $\varnothing 12 \text{ mm}$), localizada en uno de los principales planos de simetría de la probeta, dejando un espesor de recubrimiento de hormigón de 10 mm (ver Figuras 1 y 2). Antes de colocar la barra en el molde vacío, la superficie de

acero se limpió de productos de corrosión existentes, siguiendo un procedimiento recomendado (ASTM, 2004a), y se pesó la armadura. Los extremos de la barra de acero se protegieron con cinta aislante de vinilo, para evitar el triple contacto acero-mortero-aire, dejando una superficie expuesta de acero de 120 cm^2 (la superficie de contacto entre mortero y acero). Las probetas de mortero se compactaron mecánicamente y se dejaron en los moldes 24 h. Después de la extracción de los moldes, las probetas se curaron durante siete días en cámara húmeda (20°C y 95% de humedad relativa). Durante su estancia en la cámara húmeda, y antes de empezar el ensayo de corrosión forzada, se midió la velocidad de corrosión natural de las barras de acero con la técnica de polarización lineal, usando el medidor portátil de velocidad de corrosión Gecor8 (Geocisa, Madrid, España).

Figura 1. Foto del molde de madera con la barra de acero, la amasadora de mortero y los materiales utilizados: cemento (encima de la balanza), arena silíceas y agua con adición de la cantidad apropiada disuelta de NaCl.

Figura 2. Esquema de las probetas de mortero con armadura. Todas las dimensiones en mm.

2.2 Ensayos de Corrosión

Los ensayos de corrosión forzada se llevaron a cabo aplicando corriente entre la barra de acero (ánodo) y un cátodo externo, consistente en una malla de acero galvanizado. Los ensayos, de 23 días de duración, se llevaron a cabo en condiciones galvanostáticas (densidad de corriente anódica constante de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), usando una fuente de corriente electroforética. Durante los ensayos, la parte inferior de las probetas de mortero estaba en contacto permanente con agua del grifo (la máxima altura de contacto entre el agua y el mortero fue de 5 mm), para mantener un nivel adecuado de conductividad eléctrica del material. Las probetas de mortero se colocaron sobre el cátodo, con una esponja de polipropileno entre ambos (ver Figura 3).

Figura 3. Representación esquemática del montaje experimental de los ensayos de corrosión, mostrando asimismo el sistema utilizado para las medidas de ultrasonidos no lineales.

Al final de los ensayos de corrosión, se rompieron las probetas de mortero y se extrajeron las barras de acero corroídas. Las barras se limpiaron para eliminar los productos de corrosión (ASTM, 2004a), y se volvieron a pesar, para determinar la pérdida de masa al final de los ensayos de corrosión. La pérdida de masa gravimétrica determinada se designa como Δm_G . Este valor de pérdida de masa se comparó con la pérdida de masa calculada teóricamente, obtenida a través de la aplicación de la ley de Faraday con los valores de los parámetros relevantes del ensayo (Alonso et al., 1998). La pérdida de masa teórica (o electroquímica) se designa como Δm_T .

Debido al montaje experimental seleccionado y las condiciones geométricas de los experimentos, las fisuras debidas a la corrosión de la armadura aparecieron en la cara superior de las probetas de mortero, lo que facilitó una inspección periódica de la superficie con un microscopio de ancho de fisura (aumentos 40x, modelo 58-C0218, Controls, Milán, Italia). De esta forma es posible detectar la aparición de la primera fisura superficial, y posteriormente controlar el crecimiento del ancho de la fisura con el tiempo.

El número de probetas de mortero reforzado ensayadas en este trabajo fueron tres, las cuales se designaron como M1, M2 y M3.

2.3 Medidas de Ultrasonidos No Lineales

En la Figura 3 se muestra una representación esquemática de la configuración utilizada para los experimentos de UNL. Consiste en dos transductores ultrasónicos piezoeléctricos cerámicos, un acondicionador de señal tipo B&K 2693-A-0F4, un amplificador de audio interM M-500 y una tarjeta de adquisición de datos NI USB 6361 conectada a un ordenador. Es necesario enfatizar que las medidas de UNL se han obtenido mediante una técnica de contacto. Ambos transductores se pegaron a cada extremo de la cara superior de la probeta de mortero, uno actuando como emisor y otro como receptor. La técnica de UNL consiste en la generación de una señal sinusoidal fundamental A_1 , la cual se amplifica y se envía al transductor. En este estudio, la frecuencia fundamental de la señal f_1 se seleccionó con un valor de 30 kHz. Después de la propagación a través de la probeta, la onda de ultrasonidos alcanza el otro transductor, la señal recibida se acondiciona y se procesa para obtener el espectro de frecuencias (ver Figura 4). Este espectro nos permite obtener la variación de amplitudes de los armónicos de orden superior (en nuestro caso, el segundo, A_2 , en una frecuencia $f_2 = 60$ kHz, y el

tercero, A_3 , en una frecuencia $f_3 = 90$ kHz), con respecto a la frecuencia emitida (la fundamental, A_1), y obtener los parámetros de no linealidad (Jhang, 2009; Shah and Ribakov, 2009b; Shah et al., 2009), que se definen como:

$$\beta = A_2/A_1^2 \quad (1)$$

$$\beta' = A_3/A_1^3 \quad (2)$$

Dado que los parámetros de no linealidad son sensibles a la variación a microescala del medio de propagación, no solo sirven como un indicador del fenómeno de microfisuración causado por la corrosión forzada, sino también para la evaluación del daño a edades tempranas en hormigón armado. Para evaluar la variación, el procedimiento descrito se repitió de forma continuada por medio de una rutina automatizada cada 10 minutos, a lo largo de todo el experimento de UNL (alrededor de 4000 veces por ensayo). Una vez el cociente de variación relativa de β o β' respecto al valor inicial estaba por encima de 10, el tiempo transcurrido se grababa y se tomaba como el tiempo necesario para la generación de la microfisuración, debida al proceso de corrosión. Debe tenerse en cuenta que el valor de la relación que se utilizó en estos cálculos fue elegido basándose en la tendencia de los parámetros de no linealidad para los ensayos llevados a cabo.

Figura 4. Espectro de frecuencia mostrando la frecuencia emitida (f_1), y dos de los armónicos generados (f_2 y f_3).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fisuración de la superficie del hormigón armado debida a la corrosión de las armaduras internas en presencia de iones cloruro, ha sido estudiada previamente por otros autores (Alonso et al., 1998; Andrade et al., 1993; Liu and Weyers, 1998; Molina et al., 1993; Pedrosa and Andrade, 2017). El proceso de fisuración normalmente se considera consistente en dos etapas. La primera parte, llamada la etapa de generación, es el tiempo que pasa entre el comienzo del proceso de corrosión (la despasivación del acero), y la aparición de la primera fisura visible en la superficie del hormigón. La segunda parte, llamada etapa de propagación, es el periodo durante el cual el ancho de fisura continúa creciendo (Alonso et al., 1998).

Es sabido que, para una configuración experimental similar a la utilizada en este trabajo, una pequeña cantidad de pérdida de radio efectiva de la barra de entre aproximadamente $15 \mu\text{m}$ a $35 \mu\text{m}$ es suficiente para producir la primera fisura visible en la superficie del hormigón (un ancho de fisura igual o menor a 0.05 mm) (Alonso et al., 1998). En lo relativo a la etapa de propagación, se considera que el ancho de

fisura crece linealmente con la propagación de la corrosión, es decir, crece linealmente con la pérdida efectiva de radio de la barra (Alonso et al., 1998). Se asume que los productos de corrosión se forman de manera uniforme alrededor de la superficie para simplificar el análisis, aunque la corrosión se produce en el hormigón contaminado con cloruros en forma de corrosión por picadura; por lo que no es uniforme. Sin embargo, cuando la corrosión por picadura progresa, aparece como corrosión uniforme, y puede considerarse razonable el asumir corrosión uniforme (Liu and Weyers, 1998). Siguiendo este tipo de análisis, en este trabajo, se ha calculado el progreso del proceso de corrosión, es decir, la pérdida teórica de radio efectiva de la barra, aplicando la ley de Faraday con los parámetros relevantes de nuestros ensayos, considerando el progreso de la corrosión generalizado y el proceso homogéneamente distribuido (Andrade et al., 1993; Molina et al., 1993; Pedrosa and Andrade, 2017). Para una densidad de corriente anódica constante (I_{corr}), la pérdida de radio efectiva de la barra de acero (x) puede ser calculada como (Molina et al., 1993):

$$x = 0.0319 \times I_{\text{corr}} \times t \quad (3)$$

donde x se expresa en μm , I_{corr} se expresa en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, y t es el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo de corrosión forzada, en días. El valor 0.0319 contiene todas las constantes físicas relevantes y factores de cambio de unidades necesarios para el cálculo. En otros trabajos, x se denomina penetración de la corrosión, y se designa con el símbolo P_x (Pedrosa and Andrade, 2017).

La Figura 5 muestra una fotografía de la probeta de mortero reforzado M3 próxima al final del ensayo de corrosión. Se aprecia la aparición de un patrón de fisuración en la superficie superior de la probeta. Esta fisuración era longitudinal a la barra de acero, y salían productos líquidos de corrosión del acero a través de las fisuras abiertas de la probeta de mortero. Se midió el pH de este líquido, obteniendo un valor de 3, coincidiendo con resultados previos de otros autores (Andrade et al., 1993).

Figura 5. Foto de la probeta de mortero reforzado M3 cercana al final del ensayo de corrosión.

Al final del ensayo de corrosión forzada, las probetas de mortero se rompieron, y la barra de acero se extrajo. La Figura 6 muestra una foto tomada justo después de romper la probeta M1. Se aprecia que el proceso de corrosión había afectado a la barra de acero entera. Sin embargo, también se observan algunas manchas de corrosión más intensa (picaduras). Estas picaduras eran más claramente apreciables después de limpiar la barra corroída para retirar los productos de corrosión. La apariencia de las barras de acero después de los ensayos de corrosión de las otras probetas era muy similar a la mostrada en la Figura 6.

Figura 6. Foto tomada después de romper la probeta de mortero reforzada M1 al final del ensayo de corrosión.

Puesto que la mezcla que se utilizó para las probetas de mortero reforzado contenía un 2% de Cl^- relativo al peso de cemento, era importante cuantificar la corrosión espontánea que sufría el acero antes del ensayo de corrosión, es decir, durante el periodo de curado, y el tiempo transcurrido antes de comenzar el ensayo de corrosión forzada. Esto se realizó midiendo la velocidad de corrosión espontánea con un medidor de velocidad de corrosión, véase Procedimiento Experimental, con una frecuencia de medida de cada dos días. Los valores de velocidad de corrosión estaban siempre en el rango de $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Como la densidad de corriente impresa anódica durante el ensayo de corrosión forzada era de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, la corrosión espontánea previa al ensayo de corrosión se consideró despreciable, lo que permitió el uso de la Ecuación (3) para la estimación del progreso del proceso de corrosión. Sin embargo, posteriormente se comprobó esta suposición midiendo la pérdida de masa experimental de la barra de acero al final del ensayo de corrosión (Δm_G), comparándola con la pérdida de masa teórica, o pérdida de masa electroquímica (Δm_T), calculada aplicando la ley de Faraday con los parámetros relevantes de los ensayos, véase Procedimiento Experimental. Para una densidad de corriente anódica de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, una superficie expuesta de acero de 120 cm^2 , y una duración de los ensayos de corrosión de 23 días, la pérdida de masa teórica era de 6.90 g.

La Tabla 2 muestra la comparación entre la pérdida de masa determinada experimentalmente y la pérdida de masa teórica de las barras en estos ensayos. Los resultados indican una buena concordancia entre los valores teóricos y experimentales, lo que confirma la validez de asumir que la corrosión del acero previa a la corrosión forzada es despreciable.

Otra consideración que puede derivarse de los datos de la Tabla 2 es que el proceso de corrosión acelerada (forzada) se ha desarrollado con una eficiencia de corriente cercana al 100%, lo que es normal en casos de ensayos de corrosión forzada llevados a cabo en probetas de hormigón armado contaminados con cloruros y sin limitación de agua en el sistema (Nossoni and Harichandran, 2012).

Tabla 2. Comparación de las pérdidas de masa experimental (gravimétrica) y teórica de las barras de acero ensayadas.

Probeta	Δm_G (g)	$\Delta m_G/\Delta m_T$
M1	6.07	0.880
M2	8.64	1.252
M3	6.92	1.003

Se utilizó un microscopio para la detección de la aparición de fisuras en la superficie de mortero. Esto también permitió la monitorización de la evolución del ancho de las fisuras con el tiempo. La Figura 7 muestra tres fotos que corresponden a la evolución de una fisura visible en la superficie de una probeta ensayada.

Figura 7. Observación microscópica de la evolución de una fisura correspondiente a una de las probetas ensayadas. (a): Tres días de paso de corriente; (b): 11 días; (c): 23 días.

La Figura 8 representa la evolución del ancho de fisura de las probetas M1, M2, y M3, en función de la progresión del proceso de corrosión, es decir, en función de la pérdida de radio efectiva de la barra de acero, calculada mediante la Ecuación (3). Puede apreciarse que la evolución observada es muy similar en las tres probetas ensayadas. Parece existir una primera etapa del proceso de corrosión, hasta aproximadamente 10 μm de pérdida de radio (para estos casos de estudio), durante la cual no aparecen fisuras visibles. Esta sería la etapa de generación. Seguidamente, el ancho de fisura muestra un incremento aproximadamente lineal con la pérdida de radio. Esta sería la etapa de generación (Alonso et al., 1998; Andrade et al., 1993; Molina et al., 1993; Pedrosa and Andrade, 2017). La Tabla 3 muestra los parámetros del ajuste lineal por mínimos cuadrados del ancho de fisura (w) respecto a x , correspondientes a los datos de la Figura 8. El ajuste se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$w = a + b \cdot x \quad (4)$$

donde w es el ancho de fisura (μm) y x es la pérdida de radio de la barra de acero debida a la corrosión (μm). Los resultados que se muestran en la Tabla 3 confirman el incremento casi lineal de w respecto a x durante la etapa de generación, coincidiendo con los resultados previos de otros autores (Alonso et al., 1998).

Figura 8. Evolución de los anchos de fisura de las probetas de mortero en función de las pérdidas de radio efectivas de las barras de acero, calculadas según la Ecuación (3).

Tabla 3. Parámetros de ajuste de la Ecuación (4) para los conjuntos de datos de la Figura 8.

Probeta	a	b	r^2 (Coeficiente de Correlación)	Intersección con el Eje de Abscisas(μm)
M1	-32.811	4.029	0.9276	8.1
M2	-19.990	2.447	0.9473	8.2
M3	-34.587	3.705	0.8992	9.3

Uno de los puntos clave de esta investigación fue la detección de la fisuración de las probetas de mortero debida a la corrosión de la barra de acero. Esto se ha conseguido en este trabajo mediante observación macroscópica directa de la superficie superior de las probetas, Figura 7. Por otro lado se tomaron periódicamente medidas de UNL durante los ensayos de corrosión forzada para comprobar la capacidad de la técnica de UNL para la monitorización temprana de la fisuración debida a la corrosión del acero embebido. El evento principal de las medidas de UNL, que indica la aparición de microfisuras, es la generación de armónicos acústicos de orden superior (Korenska et al., 2009; Shah and Ribakov, 2009^a; Shah and Ribakov, 2009b; Shah et al., 2009; Shah et al., 2013; Xiang et al., 2008). El criterio cuantitativo que se adoptó en este trabajo es la variación de la relación de los parámetros de no linealidad (β o β'), relativos al valor inicial, superando el valor de 10 (véase Procedimiento Experimental).

La Figura 9 muestra la variación con el tiempo de los parámetros de no linealidad que se derivan de las medidas de UNL durante los ensayos de corrosión forzada de la probeta M3. El eje de abscisas de la Figura 9 representa el tiempo transcurrido desde el inicio del paso de corriente. Se puede apreciar en la Figura 9 que ambos parámetros, β y β' , exceden el umbral establecido de 10 veces el valor inicial, aproximadamente dos días y medio después del inicio del ensayo de corrosión forzada. En este caso, la primera observación de una fisura microscópica en la superficie superior de la probeta M3 fue al cuarto día después del inicio del ensayo. Por lo tanto, estos resultados preliminares parecen indicar que la observación microscópica de la fisuración del mortero reforzado debido a la corrosión forzada va acompañada de un claro incremento de los parámetros de no linealidad. Este resultado concuerda con observaciones previas de otros autores (Korenska et al., 2009; Maji, 1995). Para el resto de las probetas de mortero ensayadas, el comportamiento observado fue similar al que se muestra en la Figura 9, aunque las gráficas correspondientes no se muestran por la brevedad del manuscrito.

Figura 9. Evolución de los parámetros de no linealidad (derivados de las medidas de ultrasonidos no lineales (UNL)) durante el ensayo de corrosión forzada de la probeta M3. β : $\circ$; β' : Δ .

La Tabla 4 muestra los parámetros relevantes relacionados con la detección de la fisuración de las probetas de mortero reforzado, debida a la corrosión de la armadura de acero. Para la observación microscópica directa y para la detección indirecta, basada en la variación de los parámetros de no linealidad de las medidas de UNL, la Tabla 4 muestra el tiempo transcurrido al detectarse la fisuración, y las correspondientes pérdidas de radio efectivas de las armaduras, calculadas mediante la Ecuación (3). Se aprecia de la Tabla 4 que los tiempos de detección son muy similares, aunque todavía no es posible establecer si las medidas de UNL pueden detectar la fisuración de forma más temprana que las observaciones microscópicas directas. Sin embargo, se debe considerar que la utilización de un sistema automatizado para las medidas de UNL representaría un esfuerzo experimental mucho menor para la detección del inicio de la fisuración, en comparación con la observación microscópica directa. Teniendo en cuenta la cantidad de corrosión de acero que se necesita para la fisuración del mortero o el hormigón, la comparación de los valores de x_1 (observación con microscopio) y x_2 (medidas de UNL) en la Tabla 4 indica que ambos sistemas de detección aportan valores similares de penetración de corrosión necesaria para la fisuración del mortero. Estos valores se encuentran en un rango entre $6\ \mu\text{m}$ y $13\ \mu\text{m}$ (pérdida de radio de acero) para los ensayos de este trabajo. Además, estos valores concuerdan con resultados previos de otros autores, que establecen que una pequeña penetración de corrosión es suficiente para generar la primera fisura visible, debida a la corrosión en hormigón armado (Alonso et al., 1998; Liu and Weyers, 1998). Se propuso una relación empírica para describir la relación entre la mínima cantidad de corrosión necesaria para producir fisuración (x_0), y el cociente $c/\varnothing$ (Alonso et al., 1998):

$$X_0 = 7.53 + 9.32\ c/\varnothing \quad (5)$$

donde x_0 se expresa en μm , c es el espesor de recubrimiento de hormigón sobre la barra de acero (mm), y $\varnothing$ es el diámetro de la barra de acero (mm). Aplicando la Ecuación (5) con los parámetros geométricos relevantes de las probetas de mortero reforzado ensayadas en este trabajo, se extrae un valor de x_0 de $15.3\ \mu\text{m}$, que está en buena concordancia con los valores de x que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros relevantes de la detección de la fisuración en las probetas ensayadas.

Probeta	Microscopio		Medidas de UNL	
	t_1 (días)	x_1 (μm)	t_2 (días)	x_2 (μm)
M1	2	6.4	3*	9.6
M2	4	12.8	4.01	12.8
M3	4	12.8	2.47	7.9

* Las medidas de UNL para M1 se llevaron a cabo sin utilizar el sistema automatizado, véase Procedimiento Experimental.

Los resultados de este trabajo parecen indicar que es posible usar la técnica de UNL para la detección de la fisuración en hormigón armado, debida a la corrosión de las armaduras de acero embebidas. Sin embargo, estos resultados deben considerarse como preliminares. Son necesarias más investigaciones para determinar si la técnica de UNL puede utilizarse para propósitos de investigación y para inspecciones prácticas ingenieriles en estructuras de hormigón armado. En este último caso sería esperable encontrar diferencias en lo relativo a, por ejemplo, la velocidad de corrosión, que es normalmente mucho menor en casos de la vida real de las estructuras, en comparación con los valores utilizados en este trabajo. Otra dificultad que puede encontrarse está relacionada con la accesibilidad de las superficies exteriores para colocar los transductores ultrasónicos, que necesitan estar cercanos a las barras de acero corroídas. Particularmente, la técnica debería ser probada en probetas de hormigón armado más grandes y complejas, y en elementos constructivos como vigas de hormigón, pilares,

cimentaciones, etc. Se espera que estos estudios futuros proporcionen un protocolo optimizado indicando dónde, cuándo aplicar la técnica y cuántas medidas son necesarias para una detección adecuada de la fisuración de las estructuras de hormigón armado corroídas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados provisionales que se obtienen en este trabajo indican que es posible usar las técnicas ultrasónicas no lineales para la detección de la fisuración de probetas modelo de mortero de cemento reforzadas, debida a la corrosión de la barra de acero embebida. Es evidente que la aparición de la microfisuración va acompañada de la generación de armónicos de orden superior en la señal de salida, cuando el sistema se excita por medio de ultrasonidos con un pulso de frecuencia central. Parece que el evento de la microfisuración puede asociarse con un incremento de los parámetros de no linealidad de al menos 10 veces superior que los valores iniciales. El uso de medidas de ultrasonidos no lineales produce valores similares de tiempos para la fisuración (o la cantidad de corrosión necesaria para la fisuración), comparados a las observaciones visuales o microscópicas directas de la superficie de mortero. La utilización de estas técnicas ultrasónicas reduciría el esfuerzo experimental necesario en investigaciones que tengan como objetivo la detección del inicio de la fisuración, especialmente si se usan medidas de UNL automatizadas. Sin embargo, la limitación necesaria de extensión de este trabajo preliminar no permite generalizar esta conclusión. Son necesarias más investigaciones para comprobar si las medidas de UNL pueden usarse extensivamente, con propósitos de investigación y para inspecciones piloto en ingeniería de estructuras de hormigón armado o pretensado corroídas.

Fondos: Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación Española (código de subvención BIA2016-80982-R) y por la Agencia de Desarrollo Regional Europea (código de subvención BIA2016-80982-R). M. M. agradece una beca predoctoral del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte español (FPU16/04078).

Agradecimientos: Se agradece a la Profesora Carmen Andrade por su consejo en los detalles de los ensayos de corrosión. También se agradece a Lafarge-Holcim España por suministrar el cemento para la preparación de las probetas de mortero armado.

5. REFERENCIAS

- Alonso, C., C. Andrade, J. Rodríguez and J. M. Díez. (1998), '*Factors Controlling Cracking of Concrete Affected by Reinforcement Corrosion*', Materials and Structures. Vol. 31, No. 211, pp. 435-441.
- ACI. (1996), *Corrosion of Metals in Concrete*, American Concrete Institute (ACI Committee 222R-96), 38800 Country Club Dr., Farmington Hills, MI48333-9094, USA.
- ASTM. (2004a), *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, American Society for Testing and Materials (ASTM G 1-90), 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.
- ASTM. (2004b), *Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforced Steel in Concrete*, American Society for Testing and Materials (ASTM C 876-91), 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428-2959, USA.
- Andrade, C., C. Alonso and F. J. Molina. (1993), '*Cover Cracking as a Function of Bar Corrosion .1. Experimental Test*', Materials and Structures. Vol. 26, No. 162, pp. 453-464.
- Andrade, C. and J. A. González. (1978), '*Quantitative Measurement of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements*', Werkstoffe Und Korrosion-Materials and Corrosion. Vol. 29, No. 8, pp. 515-519.

- Andrade, C., I. Martínez, C. Alonso and J. Fullea. (2001), '*New Advanced Electrochemical Techniques for on Site Measurements of Reinforcement Corrosion*', *Materiales de Construcción*. Vol. 51, No. 263-64, pp. 97-107.
- Bertolini, L., B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli and R. B. Polder. (2004), *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, John Wiley & Sons.
- Calabrese, L., G. Campanella and E. Proverbio. (2013), '*Identification of Corrosion Mechanisms by Univariate and Multivariate Statistical Analysis During Long Term Acoustic Emission Monitoring on a Pre-Stressed Concrete Beam*', *Corrosion Science*. Vol. 73, pp. 161-171.
- Climent, M.A., G. de Vera, E. Viqueira, M.M. López-Atalaya. (2004), '*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*. Vol. 34, pp. 2291-2295.
- Elsener, B., C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder and M. Raupach. (2003), '*Half-Cell Potential Measurements - Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures*', *Materials and Structures*. Vol. 36, No. 261, pp. 461-471.
- Golewski, G. L. (2018), '*Evaluation of Morphology and Size of Cracks of the Interfacial Transition Zone (ITZ) in Concrete Containing Fly Ash (FA)*', *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 357, pp. 298-304.
- Golewski, G. L. and T. Sadowski. (2016), '*Macroscopic Evaluation of Fracture Processes in Fly Ash Concrete*', *Solid State Phenomena*, Vol. 254, pp. 188-193.
- Jhang, K. Y. (2009), '*Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non-Destructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review*', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* Vol. 10, No. 1, pp. 123-135.
- Korenska, M., M. Matysik, P. Vyroubal and K. Pospisil. (2009), '*Assessment of Reinforcement Corrosion Using Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy*', in *Proceedings of the 5th NDT Progress—International Workshop of NDT Experts*, Prague, Czech Republic, 12–14 October 2009.
- Liang, M.T. and P.J. Su. (2001), '*Detection of the Corrosion Damage of Rebar in Concrete Using Impact-Echo Method*', *Cement and Concrete Research*. Vol. 31, pp. 1427–1436.
- Liu, Y. P. and R. E. Weyers. (1998), '*Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures*', *ACI Materials Journal*. Vol. 95, No. 6, pp. 675-681.
- Maji, A. K. (1995), '*Review of Noninvasive Techniques for Detecting Microfracture*', *Advanced Cement Based Materials*. Vol. 2, No. 5, pp. 201-209.
- Ministerio de Fomento. (2010), *EHE-08 : Instrucción De Hormigón Estructural*, Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- Molina, F. J., C. Alonso and C. Andrade. (1993), '*Cover Cracking as a Function of Rebar Corrosion .2. Numerical Model*', *Materials and Structures*. Vol. 26, No. 163, pp. 532-548.
- Nossoni, G. and R. Harichandran. (2012), '*Current Efficiency in Accelerated Corrosion Testing of Concrete*', *Corrosion (NACE)*. Vol. 68, No. 9, pp. 801-809.
- Ohtsu, M. (2010), '*Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic Emission and Related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete*', *Materials and Structures*. Vol. 43, pp. 1177-1189.
- Pedrosa, F. and C. Andrade. (2017), '*Corrosion Induced Cracking: Effect of Different Corrosion Rates on Crack Width Evolution*', *Construction and Building Materials*. Vol. 133, pp. 525-533.
- Ringot, E. and A. Bascoul. (2001), '*About the Analysis of Microcracking in Concrete*', *Cement and Concrete Composites*. Vol. 23, No. 2-3, pp. 261-266.
- Shah, A. A. and Y. Ribakov. (2009a), '*Non-Destructive Evaluation of Concrete in Damaged and Undamaged States*', *Materials & Design*. Vol. 30, No. 9, pp. 3504-3511.
- Shah, A. A. and Y. Ribakov. (2009b), '*Non-Linear Ultrasonic Evaluation of Damaged Concrete Based on Higher Order Harmonic Generation*', *Materials & Design*. Vol. 30, No. 10, pp. 4095-4102.

- Shah, A. A., Y. Ribakov and S. Hirose. (2009), '*Nondestructive Evaluation of Damaged Concrete Using Nonlinear Ultrasonics*', Materials & Design. Vol. 30, No. 3, pp. 775-782.
- Shah, A. A., Y. Ribakov and C. Zhang. (2013), '*Efficiency and Sensitivity of Linear and Non-Linear Ultrasonics to Identifying Micro and Macro-Scale Defects in Concrete*', Materials & Design. Vol. 50, pp. 905-916.
- Sharma, S. and A. Mukherjee. (2010), '*Longitudinal Guided Waves for Monitoring Chloride Corrosion in Reinforcing Bars in Concrete*', Structural Health Monitoring - An International Journal. Vol. 9, No. 6, pp. 555-567.
- Suda, K., S. Misra and K. Motohashi. (1993), '*Corrosion Products of Reinforcing Bars Embedded in Concrete*', Corrosion Science. Vol. 35, No. 5-8, pp. 1543-1549.
- UNE-EN. (2011), *Cemento. Parte 1: Composición, Especificaciones y Criterios de Conformidad de los Cementos Comunes*, Asociación Española de Normalización y Certificación (UNE-EN 197-1), Madrid, España.
- Uomoto, T. and S. Misra. (1988), '*Behavior of Concrete Beams and Columns in Marine-Environment When Corrosion of Reinforcing Bars Takes Place*', in Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete in Marine Environment, ACI, 38800 Country Club Dr., Farmington Hills, MI48333-9094, USA, pp. 127-146.
- Xiang, H., C. M. Newton and C. Woodward. (2008), '*Optimization of Nonlinear Ultrasound Results to Determine Dynamic Properties of Concrete*', Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). Vol. 20, No. 11, pp. 700-706.
- Zaki, A., H. K. Chai, D. G. Aggelis and N. Alver. (2015), '*Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique*', Sensors. Vol. 15, No. 8, pp. 19069-19101.