



Corrosión en armaduras de elementos de hormigón reforzado con fibras en estado fisurado

RESUMEN

En los elementos de hormigón armado flexionados se desarrollan fisuras transversales a la armadura longitudinal. El uso de fibras controla la fisuración y mejora de la adherencia acero-hormigón. Las fisuras y el daño en la interfaz actúan como canales de ingreso y distribución de agentes agresivos y humedad, favoreciendo el inicio y propagación de la corrosión en la intersección entre fisuras y armaduras. Se fabricaron tensores y vigas de hormigón simple y reforzado con fibras que fueron fisurados mecánicamente a distintos niveles de carga y expuestos a un ambiente rico en cloruros para evaluar la influencia de las fisuras y fibras en el inicio y el desarrollo de la corrosión. Se observó que las fisuras son determinantes en el inicio de la corrosión y que la presencia de fibras no impide la corrosión en edad temprana. Se plantean las bases para un monitoreo más preciso.

INTRODUCCIÓN

Debido a la alcalinidad del cemento hidratado ($\text{pH} > 12,5$) las armaduras embebidas en el hormigón desarrollan una capa de óxido, denominada capa pasiva, que protege al acero de la degradación por corrosión [1,2]. El ingreso de agentes agresivos, como iones cloruros (Cl^-) o dióxido de carbono (CO_2), hasta la posición de las armaduras puede generar la destrucción parcial (corrosión localizada) o total (corrosión generalizada) de la capa pasiva provocando el inicio de la corrosión [1,2]. Para caracterizar la vida útil de una estructura de hormigón armado sin fisuras, Tutti [3] planteó el primer modelo de deterioro por corrosión compuesto por dos etapas *iniciación* y *propagación*. Basado en este primer modelo, François & Arliguie [4] propusieron un modelo de vida útil adaptado para estructuras de hormigón fisurado que contempla 4 etapas (**Figura 1**): 01 *incubación*, el lapso en el cual los agentes

agresivos ingresan por las fisuras hasta las armaduras destruyendo la capa pasiva e iniciando la corrosión en la zona de influencia de la fisura; 02 *iniciación*, que contempla el desarrollo inicial de la corrosión activa en la zona de influencia de la fisura; 03 *inducción*, donde el desarrollo de la corrosión activa en la zona de influencia de la fisura se atenúa por acumulación de productos de corrosión que sellan las fisuras y los defectos de la interface acero-hormigón (IAH); y 04 *propagación*, que representa el periodo de tiempo en el que la corrosión se desarrolla en toda la extensión de las armaduras debido a que los agentes agresivos logran alcanzar el acero en toda la extensión del refuerzo. En la etapa de propagación de ambos modelos, la degradación puede acelerarse por formación de fisuras inducida por productos de corrosión acumulados, o por el desprendimiento del recubrimiento en un estado de deterioro muy avanzado.

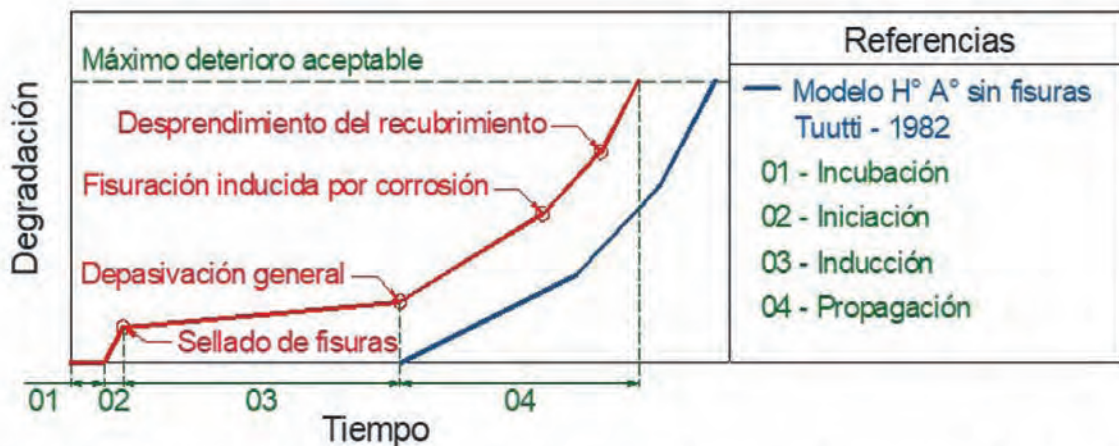
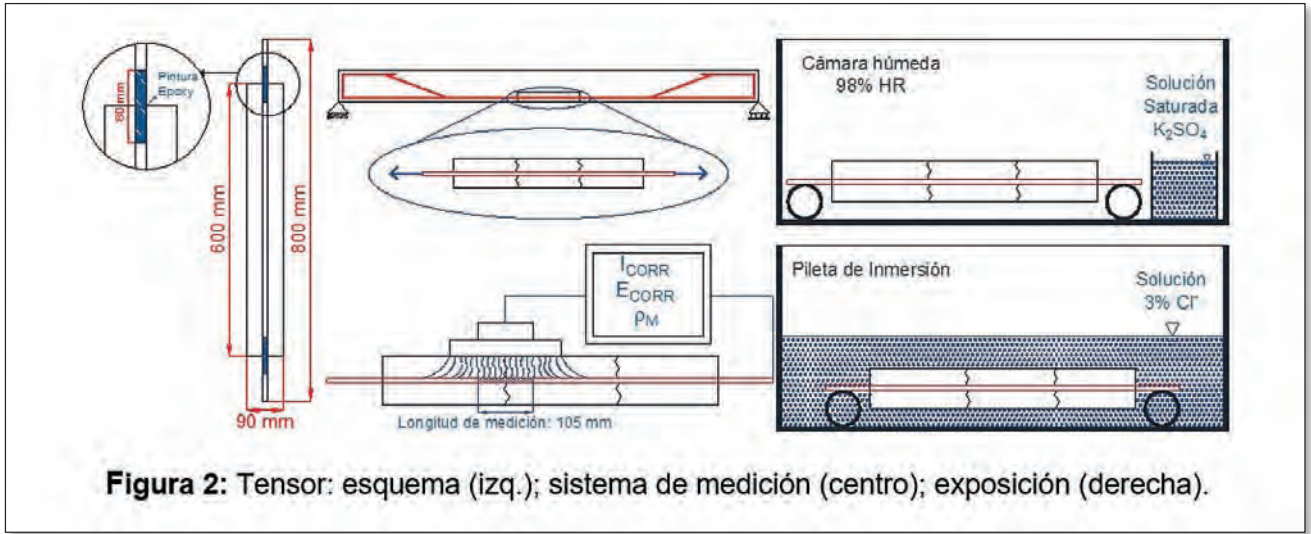


Figura 1: Modelos de vida útil para hormigón armado en estado fisurado.



En el caso de hormigones fisurados, la acumulación de productos de corrosión puede generar mayor apertura de fisuras existentes o formación de nuevas fisuras.

La corrosión por cloruros en elementos fisurados es heterogénea ya que genera picaduras y se desarrolla en la zona de influencia de las fisuras. La heterogeneidad del ataque combinada con otras variables, como las condiciones ambientales o de carga, pueden generar múltiples escenarios de deterioro aun en una misma estructura. Durante décadas, investigadores de todo el mundo caracterizaron la corrosión por cloruros en elementos fisurados. Uno de los as-

pectos más estudiados y controversiales es el efecto del ancho de fisura [5-7]. También se estudiaron la dirección, frecuencia y profundidad de fisuras [8,9]. Se estableció que si bien el ancho de fisuras influye, tiene poco impacto respecto al de otros parámetros. La morfología y el daño por fisuración de la IAH [10,11], en conjunto con las condiciones ambientales de exposición, tienen un impacto más significativo que el ancho de fisuras. Sin embargo, limitar el ancho de fisuras puede tener impacto positivo a largo plazo, ya que puede mejorar las condiciones en las que se desarrollan cada una de las etapas del proceso de corrosión.

El uso de fibras controla la fisuración del hormigón. Aunque limita el ancho de fisuras, lo cual puede ser positivo, también aumenta su frecuencia, lo que resulta en mayor cantidad de fisuras [12, 13]. La presencia de fibras también mejora la adherencia acero-hormigón, lo cual puede significar una mejora en las condiciones de la IAH. En términos de corrosión, existen resultados que insinúan mejoras en el desempeño bajo ciertas condiciones ambientales [14] o con el uso de determinada combinación de fibras [15]. Sin embargo, aún no se conoce con claridad el impacto del uso de fibras en la corrosión de elementos fisurados ni existe una metodología para

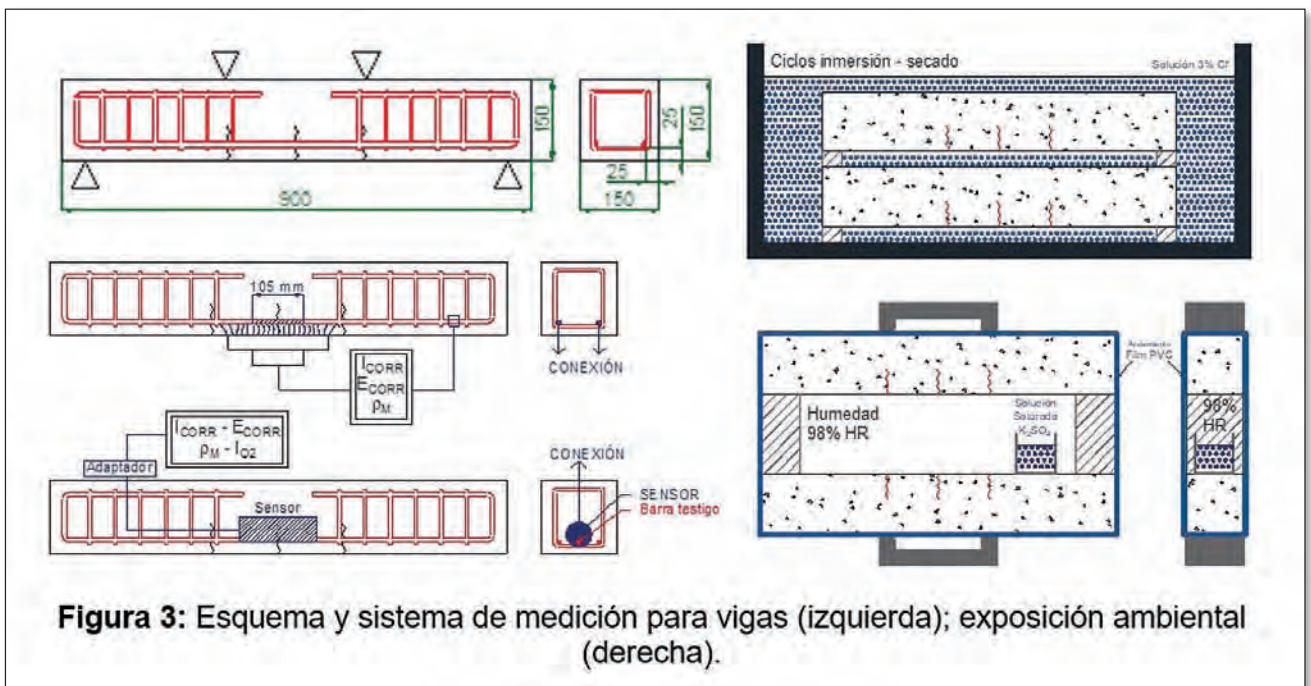




Figura 4: Deterioro en zona de fisuras en HC (izquierda) y en HRF (derecha).

evaluar el desarrollo de la corrosión en los mismos. Para avanzar en una metodología general deben definirse técnicas claras y reproducibles de evaluación para lo cual hay que considerar tres problemas iniciales: En primer lugar, las técnicas y el instrumental que permiten cuantificar el avance de la corrosión no están validadas en Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) fisurado. Las fibras de acero interfieren en las mediciones electroquímicas. Por otro lado, no hay metodologías de evaluación que incluyan la influencia de las características de la IAH en el monitoreo de la corrosión. Finalmente, no hay definiciones claras sobre el *deterioro admisible* en un conjunto de

armaduras o en armaduras individuales. Deben establecerse deterioros límites para evaluar el desempeño de un material cementíceo en cada etapa. Este trabajo presenta avances en la búsqueda de una metodología de evaluación de la corrosión del HRF en elementos fisurados. Se enfoca en la evaluación de las técnicas y el instrumental existente analizando la interferencia de las fibras metálicas en los ensayos electroquímicos. Además, avanza sobre la correlación entre las mediciones obtenidas y la morfología del ataque con el objetivo de definir una metodología de medición y análisis más precisa ante el escenario de deterioro heterogéneo.

METODOLOGÍA

Se fabricaron tensores y vigas de hormigón convencional (HC) y HRF conteniendo barras de armadura tradicionales con el objetivo de evaluar técnicas e instrumentos de medición. Dichos elementos estructurales fueron prefisurados y expuestos a ambientes con alto contenido de cloruros para provocar el inicio de la corrosión en las armaduras. El programa contó con dos etapas: en la primera etapa, utilizando los tensores, se probaron las técnicas e instrumentos usualmente utilizados en HC sin fisuras para evaluar la validez de las mediciones en HRF fisurados. Con los datos de esta primera

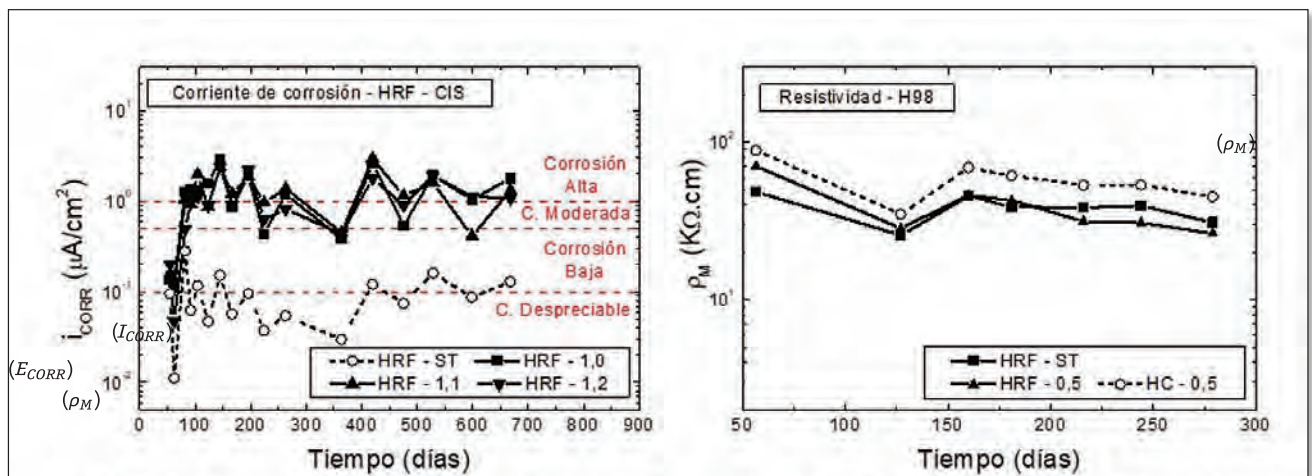


Figura 5: Monitoreo de i_{CORR} en tensores sometidos a ciclos de inmersión y secado (izquierda) y monitoreo de ρ_M en tensores sometidos a humedad de 98% (derecha).

etapa, se avanzó en la adaptación de instrumental y estrategias de monitoreo sobre las vigas prototipo. En la segunda etapa, aún en desarrollo, se monitorea el avance de la corrosión en las vigas prototipo, considerando todas las variables de un escenario real, utilizando el equipo validado en la primera etapa y un sensor interno que registra con mayor precisión las condiciones ambientales dentro de la matriz cementícea.

Las características de las mezclas utilizadas se detallan en la **Tabla 1**. En todas ellas se emplearon cemento CP40, arena silíceo natural y piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo. La relación a/c fue próxima a 0,45 y se incorporó aditivo superfluidificante para lograr la trabajabilidad adecuada para compactar las probetas. Los HRF se elaboraron con fibras de acero de 50 mm de largo y 1 mm de diámetro con ganchos en extremos, o con macrofibras sintéticas de 48 mm de largo.

Primera etapa: Tensores de HC y HRF

Se fabricaron diez tensores prismáticos (5 con HRF de acero y 5 con HC) de 600

mm de longitud y sección cuadrada de 90 mm de lado, cada uno conteniendo una barra de 12 mm de diámetro en el centro de la sección con un recubrimiento de 40 mm (**Figura 2**). Luego del desmolde fueron curados en cámara húmeda durante 28 días.

Ocho tensores fueron prefisurados en tracción, simulando la sollicitación de un segmento dentro de una viga (**ver Figura 2**), a 4 niveles de carga diferentes en relación a la tensión de fluencia del acero: 0,5 σ_Y (carga de servicio), σ_Y , 1,1 σ_Y y 1,2 σ_Y (cargas últimas). Los tensores fisurados bajo cargas últimas, fueron sometidos durante dos años a ciclos de inmersión y secado (CIS) en solución con 3 % de iones cloruros y luego fueron abiertos para evaluar la extensión, morfología y penetración del ataque en las barras. Los tensores fisurados bajo carga de servicio, fueron contaminados durante 40 días por inmersión en solución con alto contenido de cloruros (> 10 %) para inducir el inicio de la corrosión y luego expuestos a un ambiente con 98 % de humedad relativa (H98)

hasta la actualidad (9 meses). Durante el tiempo de exposición se monitorearon los principales parámetros electroquímicos que permiten caracterizar el avance del proceso de corrosión: corriente de corrosión (I_{CORR}), potencial de corrosión (E_{CORR}) y resistividad de la matriz cementícea (ρ_M). Para el monitoreo, se utilizó un equipo comercial de medición superficial con tecnología de anillo de guarda (Gecor 6™) que permite confinar la medición a un área definida S_{Med} de la armadura (**Figura 2 centro**). Posterior al monitoreo, los tensores fueron abiertos y se midieron las extensiones superficiales de los ataques y las penetraciones máximas de picado (P_{PIT}) en cada caso. Se calcularon valores de coeficientes de área (α_s), respecto a S_{Med} . Se determinaron la densidad de corriente (i_{CORR}) para cada medición y, considerando el tiempo (t) de monitoreo, se estableció la penetración promedio (P_x) según la ecuación 1. Finalmente, se calcularon coeficientes de picado (α_p), según la ecuación 2 [16]. Los valores de penetración calculados fueron comparados con las penetraciones medidas en las armaduras para evaluar la precisión del criterio.

SISTEMA DE SUPERVISIÓN DE TRÁNSITO

FlanCité

SU VELOCIDAD
Km/h
ATENCIÓN

Radar Pedagógico
Venta / Leasing

ADEC
Detector de Tráfico
Radar Doppler

SEMÁFOROS PEATONALES Y VEHICULARES

SEMÁFOROS PARA NO VIDENTES

ITERIS VersoCam
VIDEO CONTEO

REGER SITRA

ESPECIALISTAS EN DESARROLLO DE SISTEMAS ITS PARA CADA NECESIDAD

Integramos su equipo o sistema a Protocolos Públicos Abiertos.

UNE - 135401-4
NTCIP - NEMA
UTMC - Urban Traffic Management Control
DALI - Digital Addressable Lighting Interface

EQUIPOS CONTROLADORES DE TRÁNSITO
COMPLETA CONECTIVIDAD CUALQUIER MEDIO FÍSICO
COORDINACIÓN PERMANENTE CON RESPALDO DE GPS

www.reger.com.ar

FLEUBA S.R.L. | Tel.: (+5411) 4372-0429
e-mail: contacto@reger.com.ar

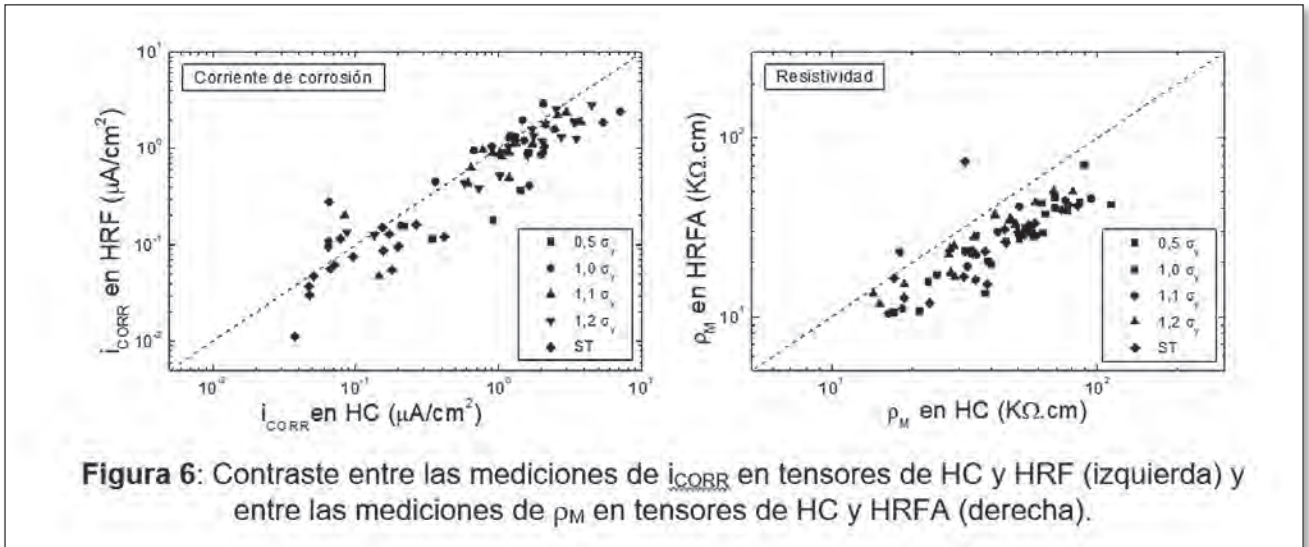


Figura 6: Contraste entre las mediciones de i_{CORR} en sensores de HC y HRF (izquierda) y entre las mediciones de ρ_M en sensores de HC y HRFA (derecha).

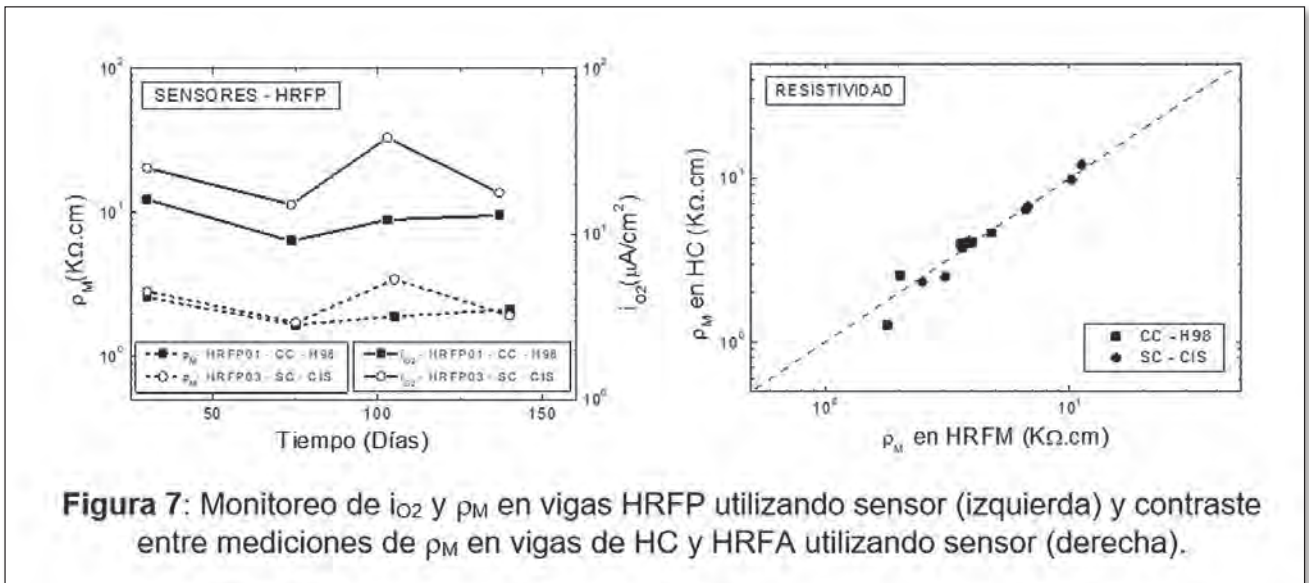


Figura 7: Monitoreo de i_{O_2} y ρ_M en vigas HRFP utilizando sensor (izquierda) y contraste entre mediciones de ρ_M en vigas de HC y HRFA utilizando sensor (derecha).

Segunda Etapa: Vigas de HRF

Se fabricaron 12 vigas de 900 mm de longitud y una sección de cuadrada de 150 mm de lado, 4 sin fibras (HC), 4 con fibras de acero (HRFA) y cuatro con fibras poliméricas (HRFP). Cada viga está armada longitudinalmente con dos barras de 8 mm de diámetro y contiene estribos de 6 mm de diámetro cada 100 mm. Se garantizó un recubrimiento de 25 mm sobre las armaduras longitudinales (Figura 3).

Las vigas se curaron en cámara húmeda durante 28 días. Entonces fueron prefisuradas a flexión bajo carga de servicio y luego inmersas durante 40 días en una solución con alto contenido de iones cloruro (>10 %) para inducir la contaminación y el inicio de la corrosión. Actualmente, seis vigas (2HC, 2HRFA, 2HRFP) se someten a CIS en solución con 3 % sin carga (SC), mientras que las seis restantes (2HC, 2HRFA, 2HRFP) permanecen en pórticos bajo una carga de servicio (CC) expuestas a H98. Las vigas fueron instrumentadas con conexiones directas a las armaduras longitudina-

les y se colocaron sensores al centro de las vigas (Figura 3) para monitorear las condiciones ambientales en la zona fisurada. A través de las conexiones a armaduras, se monitorearon, (i_{CORR}), (E_{CORR}) y (ρ_M) en las zonas de influencia de las fisuras utilizando el equipo Gecor 6™. Al mismo tiempo, utilizando un potencióstato – galvanostato portátil (IVIUM™), conectado al sensor, se monitorearon, (ρ_M) y la corriente límite de oxígeno (i_{O_2}); que es un parámetro indicador de humedad y oxígeno disponible para la reacción catódica del proceso de corrosión [17]. El sensor también cuenta con

$$P_X = 0,0116 * \frac{i_{CORR}}{\alpha_S * S_{Med}} * t \quad (1)$$

$$P_{PIT} = P_X * \alpha_p \quad (2)$$

una barra de acero testigo de 8 mm de diámetro (igual a la armadura) sobre la cual se monitorea el avance de la corrosión como dato complementario. Los datos fueron tratados con la misma metodología empleada en los sensores, utilizando un factor de área obtenidos de la primera etapa. En ambas etapas experimentales se utilizaron cámaras herméticas para generar los ambientes de contaminación y exposiciones. En el caso de las vigas bajo carga, el aislamiento de la humedad se logró utilizando film de PVC como recubrimiento. Las soluciones con cloruros se elaboraron utilizando cloruro de sodio (NaCl) y los porcentajes de cloruros expresados son masa en masa (m/m). Dentro de las cámaras húmedas, la humedad de 98% se mantuvo utilizando solución saturada de sulfato de potasio (K_2SO_4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al abrir los sensores, se observó un patrón común de ataque localizado en la cara inferior de la armadura (respecto a la dirección de colado) que se extiende entre 25 y 45 mm a cada lado de la fisura (**Figura 4**). En todos los casos las picaduras fueron muy variables, aunque su posición y tamaño en general coincidían con defectos en la IAH (burbujas). Se midieron la extensión superficial del ataque y la profundidad máxima de picado en la zona de influencia de cada fisura. Se calcularon los valores de (α_S), respecto al área de medición, y (α_P) utilizando el criterio de presentado. La **Tabla 2** muestra la caracterización del ataque en las zonas de influencia de las fisuras en cada tensor. La **Figura 5** muestra monitoreos de (I_{CORR}) y (ρ_M) realizados en sensores previos a la abertura. Los valores de fueron calculados utilizando un coeficiente de área de 0,3, obtenido como criterio general a partir del análisis de la morfología del ataque. Se nota el impacto de las fisuras en el desarrollo de la corrosión. El proceso se inicia en poco tiempo (menos de 100 días) y oscila entre velocidades de degra-

dación *alta y moderada*. Durante el monitoreo no se observó atenuación de la degradación por el sellado de fisuras. Esto último tal vez se deba a que los niveles de deterioro alcanzados no son suficientes para generar productos de corrosión que sellen las fisuras. También se observa el impacto de las fibras metálicas en las medidas de (ρ_M). Las matrices sin fibras evidencian resistividades mayores.

Las **Figura 6** compara las mediciones realizadas en sensores de HC y HRF. Los registros de (I_{CORR}) y (E_{CORR}) se ven poco influenciados por la presencia de las fibras de acero, mientras que en (ρ_M) se evidenció con mayor claridad el impacto de las fibras. La interferencia de fibras metálicas en las mediciones fue analizada por varios investigadores [14, 18, 19] y se indica la posibilidad de medir en forma más precisa utilizando técnicas de corriente alterna. Según Berrocal et al. [20] se pueden obtener valores precisos al emplear frecuencias tres órdenes de magnitud menores (~ 1 Hz) a las usuales en HC (~1000 Hz).

La **Figura 7** muestra el monitoreo de (i_{O_2}) y (ρ_M) en vigas con fibras poliméricas utilizando los sensores y el contraste de las mediciones de (ρ_M) realizadas en HC y HRF. La precisión de la medición de resistividad mejora gracias a la posibilidad de poder configurar frecuencias que brinda el uso del sensor. También se nota que las medidas de (i_{O_2}) reflejan de buen modo la disponibilidad de humedad en la zona de la fisura.

Un aspecto a remarcar es el impacto de las fibras en la formación de fisuras. Bajo cargas últimas, son claras las reducciones en el espesor de fisuras y en su separación. Bajo carga de servicio, contrario a la hipótesis inicial, la frecuencia de fisuras disminuye (menos fisuras en HRF) y la reducción del ancho de fisuras no es apreciable a simple vista. Aun cuando disminuye el ancho de fisuras, el inicio del proceso de corrosión es casi instantáneo.

Un menor ancho de fisuras puede ser beneficioso en la etapa de propagación haciendo que el sellado sea más viable. En términos de monitoreo, se remarca la necesidad de conocer la extensión del ataque para una evaluación precisa de la degradación. En armaduras horizontales, el deterioro en la zona de influencia de las fisuras mostró cierto patrón repetitivo que hace viable el uso de (α_S) para corregir mediciones (i_{CORR}). Para fisuras generadas bajo cargas últimas, se pueden utilizar valores (α_S) de entre 0,3 y 0,5 en edades tempranas de deterioro. Se observó coincidencia entre la posición de picaduras y de defectos en la IAH, sin embargo, los valores de (α_P) obtenidos no permiten hacer recomendaciones generales. Para recomendar valores de (α_P) se requiere un estudio más amplio en donde se tengan en cuenta diferentes condiciones ambientales y los defectos de IAH. Valores de (α_P) cercanos a 10 siempre serán más conservadores. Por último, se destaca que fue posible realizar mediciones precisas de resistividad corrigiendo la frecuencia en la técnica de corriente alterna.

CONCLUSIONES

- La presencia de las fisuras tiene un alto impacto en el inicio y desarrollo de la corrosión. Aun con ancho de fisuras menor a 0,2 mm, el inicio es casi instantáneo.
- La reducción del ancho de fisuras debido al uso de fibras no tuvo impacto significativo en el avance de corrosión durante el monitoreo. En etapas de deterioro más avanzado, podría ser viable el sellado en fisuras menos abiertas.
- Valores de (α_S) entre 0,3 y 0,5 son viables para evaluar el deterioro, en edades tempranas, de armaduras horizontales intersectadas por fisuras generadas por cargas últimas.
- La presencia de fibras de acero afecta a la medición de (ρ_M). Es necesario el uso de técnicas de corriente alterna a frecuencias del orden de 1 Hz.



- La adaptación de un sensor de medición interna permitió mejorar el registro de (ρ_M) y monitorear la disponibilidad de oxígeno y humedad para la reacción catódica.

REFERENCIAS

- [1] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redealli, R. Polder, "Corrosion of Steel in concrete", 2° Edición, Wiley-VCH, (2013), 71-77.
- [2] G. Duffo, S. Farina, "La corrosión de estructuras de hormigón armado", 1° Ed, Ed. Académica Española, (2016), 83-110.
- [3] K Tutti, "Corrosion of steel in concrete", 1° Ed, Swedish cement and concrete research institute, (1982), 17-101.
- [4] R. Francois, G. Arliguie, "Effect of microcracking and cracking of the development of corrosion in reinforced concrete members", Magazine of concrete research 51, 2, (1999), 143-150.
- [5] T. U. Mohammed, N. Otsuki, M. Hisada, T. Shibata, "Effect of crack width and bar types on corrosion of steel in concrete", Journal of materials in civil engineering 13, 3, (2001), 194-201.
- [6] M. B. Otieno, M. G. Alexander, H. D. Beushausen, "Corrosion in cracked and uncracked concrete - Influence of crack width, concrete quality and crack reopening", Magazine of concrete research 62, 6, (2010), 393-404.
- [7] J. Wang, P.A.M. Bashieer, S. V. Nanukuttan, Y. Bai, "Influence of cracking caused by structural loading on chloride induced corrosion process in reinforced concrete elements: a review" en "Durability of reinforced concrete from composition to protection", 1° Ed, Springer International, (2015), 99-113.
- [8] C. Arya, F. K. Ofori-Darko, "Influence of cracking frequency on reinforcement corrosion in concrete", Cement and concrete research 26, 3, (1996), 345-353.
- [9] P. Schiebl, M. Raupach, "Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete", ACI Material Journal 94, (1997), 56-61.
- [10] A. Castel, T. Vidal, R. Francois, G. Arliguie, "Influence of steel-concrete interface on reinforcement corrosion by chlorides", Magazine of concrete research 55, 2, (2003), 151-159.
- [11] W. Zhang, R. Francois, L. Yu, "Influence of load-induced cracks coupled or not with to-casting-induced defects on the corrosion of the longitudinal tensile reinforcement of naturally corroded beams exposed to chloride environment under sustained loading", Cement and concrete research 129, (2020), 105972.
- [12] Vandewalle L, "Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers", Materials and Structures 33, 3, (2000), 164-170.
- [13] P. H. Bischoff, "Tension stiffening and cracking of steel fibre reinforced concrete", Journal of Materials in Civil Engineering 15, 2, (2003), 174-182.
- [14] C. G. Berrocal, K. Lundgren, I. lofgren, "corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of art", Cement and concrete research 80 (2016), 69-85.
- [15] C. G. Berrocal, "Corrosion of Steel bars in fibre reinforced concrete: corrosion mechanisms and structural performance", Tesis doctoral, Universidad de tecnología Chalmers, Göteborg, (2017), 38-57.
- [16] G. Duffo, S. Farina, "Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures", Construction and building materials 23, (2009), 2743-2751.
- [17] C. Andrade, C. Alonso, "Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of polarization resistance method", Materials and structures 37, (2004), 623-643.
- [18] T.O. Mason, M. A. Campo, A. D. Hixon, L. Y. Woo, "Impedance spectroscopy of fiber-reinforced cement composites", Cement and concrete composites 24, (2002), 457-565.
- [19] A. O. S. Solgaard, M. Carsana, M. R. Geiker, A. Kuter, L. Bertolini, "Experimental observations of stray current effect of steel fibres embedded in mortar", Corrosion Science 74, (2014), 1-12.
- [20] C. G. Berrocal, K. Hornbostel, M. R. Geiker, I. lofgren, K. Lundgren, D. G. Bekas, "Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious materials", Cement and concrete composites, 89, (2018), 216-229. 📌