

## CONTRIBUCIÓN DEL USO DE FIBRAS EN EL DESEMPEÑO DEL RECUBRIMIENTO DE HORMIGÓN ASOCIADO A LA CORROSIÓN DE ARMADURAS

Zerbino, Raúl<sup>1</sup>, Torrijos, María Celeste<sup>1</sup>, Giaccio, Graciela<sup>2</sup>,  
Gómez, Enzo<sup>3</sup>, Duffo, Gustavo S<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CONICET, LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, <sup>2</sup> Investigador CIC, LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, <sup>3</sup>CNEA, <sup>4</sup>CONICET – CNEA – UNSAM, LEMIT-CIC, 52 e/ 121 y 122. La Plata, 0221-4831142, [zerbino@ing.unlp.edu.ar](mailto:zerbino@ing.unlp.edu.ar), CNEA Centro Atómico Constituyentes, Av. Gral. Paz 1499, 011 6772-7000, [duffo@cnea.gov.ar](mailto:duffo@cnea.gov.ar).

### RESUMEN

---

Este trabajo presenta los primeros resultados de una cooperación entre LEMIT-CIC y CNEA que tiene por objetivo analizar la influencia de la incorporación de diferentes tipos y contenidos de fibras sobre el proceso de corrosión de armaduras. Empleando un hormigón convencional y la misma matriz reforzada con fibras de acero se moldearon prismas de 90 mm de lado con una barra de 12 mm de diámetro embebida en el centro. Varios prismas fueron fisurados traccionando la barra de acero y otros permanecieron sin fisurar como referencia. Para inducir la corrosión se realizaron ciclos de inmersión y secado en una solución con una concentración de cloruros al 3% (m/m). Se evaluaron el potencial de corrosión, la densidad de corriente y la resistividad del hormigón. Se aprecia que la corrosión se activa rápidamente en presencia de fisuras y que las fibras no generan mayores efectos sobre el inicio de la degradación.

**Palabras claves:** Corrosión de armaduras; fibras de acero; control de fisuras.

### INTRODUCCIÓN

La corrosión de armaduras es el principal mecanismo de degradación que afecta a las estructuras de hormigón armado. En el interior del hormigón el pH es alto ( $\approx 13$ ) lo cual genera y mantiene sobre la superficie del acero una capa de óxido estable denominada capa pasiva (CP). Mientras la CP no se destruya, el acero no se degrada. Sin embargo, pueden ingresar agentes agresivos desde el exterior atravesando el recubrimiento hasta alcanzar las armaduras y provocar la destrucción de la CP de manera generalizada o localizada iniciando la corrosión [1]. El modelo de Tuutti [2] divide al proceso de corrosión en una etapa de iniciación, durante la cual el acero no sufre degradación, que representa el período durante el cual los agentes agresivos ingresan hasta alcanzar la superficie de las armaduras provocando la destrucción de la CP y una etapa de propagación, durante la cual la armadura se degrada, perdiendo capacidad portante y adherencia.

Durante la etapa de iniciación el hormigón de recubrimiento es una barrera química (mantiene la CP) y física (evita el ingreso de agentes) para que el acero no se corroa [3].

En hormigones sin fisuras los agentes agresivos, como los iones cloruros o el dióxido de carbono, pueden tardar decenas de años en alcanzar las armaduras dependiendo del espesor y calidad del recubrimiento y de la concentración de agentes en el exterior. Las fisuras en el recubrimiento generan canales de rápido ingreso para que dichos agentes alcancen a las armaduras [3]. Es por esto que el control de fisuración hace a la durabilidad de estructuras expuestas en ambientes agresivos. Beeby [4] fue uno de los primeros en remarcar que las fisuras aceleran el inicio de la corrosión. Arya y Wood [5] observaron que las fisuras longitudinales (respecto a la armadura) aceleran el inicio del proceso y mantienen altas velocidades de degradación de la armadura, mientras que las fisuras transversales solo afectan la zona de intersección con las barras. Schiebl y Raupach [6] propusieron un mecanismo de macrocelda cuando existen fisuras transversales, notando que el espesor y la calidad del recubrimiento afectan directamente a la reacción catódica al dificultar el ingreso de oxígeno y humedad. Scott y Alexander [7] encontraron que además de dificultar el ingreso de humedad y oxígeno, un buen hormigón también limita la corrosión gracias a su resistividad. Estos y otros estudios coinciden en que para garantizar la durabilidad de estructuras expuestas a ambientes agresivos es de suma importancia que se limiten y controlen las fisuras del recubrimiento.

La incorporación de fibras al hormigón tiene como principal efecto el control de los procesos de fisuración. Las fibras incrementan la tenacidad y la resistencia residual (post fisuración) lo que hace al material particularmente eficiente para estructuras expuestas a acciones dinámicas. Las fibras también contribuyen a la resistencia al corte permitiendo reducir el refuerzo convencional y pueden mejorar la adherencia acero-hormigón por lo que se puede disminuir la longitud de adherencia. Pero un aspecto importante es que las fibras permiten controlar el ancho de las fisuras lo que tiene un efecto directo sobre eventuales procesos de corrosión; muchas aplicaciones del Hormigón Reforzado con Fibra (HRF) en ambientes agresivos fueron motivadas por esta razón. Cabe destacar que en el *fib* Model Code 2010 [8] se han incluido apartados específicos para el diseño estructural de HRF incluyendo el uso combinado con armadura convencional. Trabajos sobre elementos estructurales con armadura convencional y fibras datan de fines de los años '90 [9] [10] [11] mostraron que la incorporación de fibras de acero reduce el espaciamiento y el ancho de fisuras. Tiberti *et al.* [12] estudiaron tensores de hormigón analizando la etapa de formación de las fisuras y su posterior estabilización y, aunque no encontraron una relación entre las deformaciones medidas y la tenacidad del HRF, observaron un aumento global de la tenacidad y una reducción del espaciamiento medio de fisuras. Estudios sobre vigas a escala real [13] indicaron que la incorporación de fibras no incrementa significativamente la resistencia a flexión y la ductilidad en estado límite último (ULS). Sin embargo, al introducir fibras mejora la respuesta en estado límite de servicio (SLS) porque se limitan las fisuras y las flechas ya que las fibras favorecen la transferencia de esfuerzos desde las armaduras hacia el hormigón circundante. Este mecanismo, combinado con la resistencia residual en tracción que imparten las fibras, conduce a la reducción en el ancho y espaciamiento de fisuras.

En hormigón convencional (HC), una vez fisurado e iniciado el proceso de corrosión, las cargas y/o la acumulación de residuos de corrosión pueden generar nuevas fisuras y el crecimiento de las existentes, acelerando el deterioro. La presencia de fibras condiciona la aparición y el crecimiento de las fisuras, dificultando el avance del mismo e inclusive pudiéndolo interrumpir. En la etapa de iniciación de la corrosión las fibras pueden influir negativamente al promover mayor cantidad de fisuras con menor espaciamiento y ancho, aumentando la cantidad de vías de ingreso de agentes agresivos [5]. Sin embargo, las fibras pueden desempeñar un rol positivo durante la etapa de propagación al restringir la aparición de nuevas fisuras y el crecimiento de las existentes [13]. Este último efecto es importante, ya que cuando las fisuras tienen anchos menores a 0,2 mm el proceso puede verse atenuado o interrumpido por "autosellado" o deposición de productos de corrosión en las fisuras [6,7] dificultando el ingreso de agentes agresivos, humedad y oxígeno.



Este trabajo presenta los primeros resultados de una cooperación entre el LEMIT-CIC y la CNEA que tiene por objetivo analizar la incidencia de diferentes tipos (acero, macrofibras poliméricas y macrofibras de vidrio) y contenidos de fibras en el control de los procesos de fisuración en el hormigón armado. Se diseñó un elemento representativo de la zona traccionada de una viga a fin de comparar la respuesta frente a un ambiente corrosivo de muestras de HC y de HRF, fisurados y sin fisurar.

## METODOLGÍA

Este trabajo describe una primera versión de la metodología adoptada para analizar la influencia de la incorporación de fibras en el proceso de corrosión de armaduras teniendo en cuenta la presencia de fisuras. Se eligieron elementos de hormigón armado tipo tensores, que luego de fisurados fueron sometidos a ciclos de inmersión y secado en una solución de cloruro de sodio (NaCl) con el objetivo de inducir el proceso de corrosión. Se buscó definir las características de los ciclos de inmersión y secado más eficientes, que permitan observar resultados en un tiempo razonable. El control del inicio del proceso de corrosión en las armaduras y de las características del hormigón, se realizó a través de la medición de la velocidad de corrosión ( $i_{CORR}$ ), del potencial de corrosión ( $E_{CORR}$ ) y de la resistividad del hormigón ( $\rho_M$ ), utilizando un equipo comercial G-Cor 6™.

Se fabricaron probetas prismáticas tipo tensores de 90 x 90 x 600 mm (ver Figura 1), las cuales contienen una barra de acero tipo ADN 420 de 12 mm de diámetro embebida en el centro de la sección. Se utilizó un hormigón de relación a/c 0,44 elaborado con cemento tipo CPF40, un aditivo superfluidificante de base naftalénica, arena silícea natural y piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo. Se fabricaron dos conjuntos de probetas: 4 prismas utilizando HC (sin fibras) y otros 4 prismas de HRF, para lo cual se incorporaron 50 kg/m<sup>3</sup> (0,65 % en volumen) de fibras de acero conformadas de 50 mm de largo y 1 mm de diámetro. El asentamiento del HC fue 120 mm y en el HRF 65 mm.

Para caracterizar las barras de acero se realizaron ensayos de tracción obteniendo valores promedio de tensión de fluencia y tensión de rotura iguales a 455 y 625 MPa respectivamente. La resistencia a compresión del hormigón determinada sobre cilindros de 100x200 mm fue de 52,1 y 52,8 MPa para el HC y el HRF respectivamente. Con el fin de realizar la caracterización del HRF se realizaron ensayos de flexión sobre probetas entalladas siguiendo la norma EN 14654 [14], resultando una tensión de primera fisura igual a 5,1 MPa y tensiones residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  iguales a 5,2 y 5,3 MPa respectivamente.

Con el objetivo de provocar la fisuración del recubrimiento se aplicaron esfuerzos de tracción sobre 6 prismas (3 de HC y 3 de HRF) hasta diferentes cargas asociadas a la tensión de fluencia ( $\sigma_Y$ ) del acero:  $\sigma_Y$ ,  $1,1 \sigma_Y$  o  $1,2 \sigma_Y$ . La Tabla 1 detalla la identificación de las probetas y la tensión aplicada. Un prisma de cada grupo fue dejado sin fisurar.

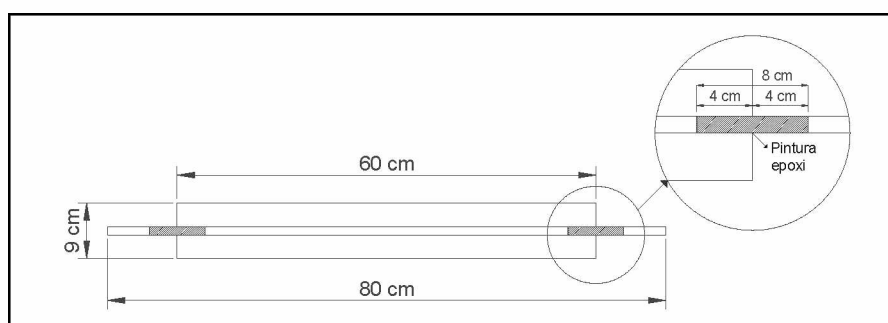


Figura 1: Esquema de probeta utilizada.

Tabla 1: Identificación de probetas.

Identificación	Tensión aplicada	Identificación	Tensión aplicada
HC – 0,0	Sin fisurar	HRF – 0,0	Sin fisurar
HC – 1,0	1,0 $\sigma_Y$	HRF – 1,0	1,0 $\sigma_Y$
HC – 1,1	1,1 $\sigma_Y$	HRF – 1,1	1,1 $\sigma_Y$
HC – 1,2	1,2 $\sigma_Y$	HRF – 1,2	1,2 $\sigma_Y$

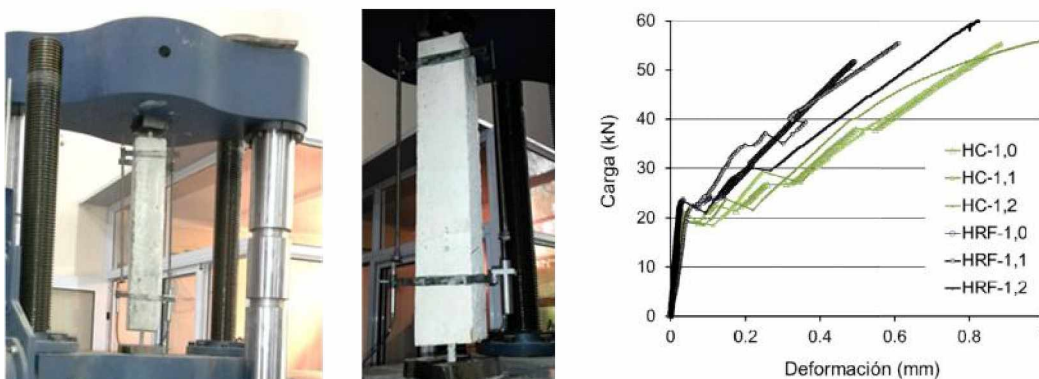


Figura 2: Fisuración previa.

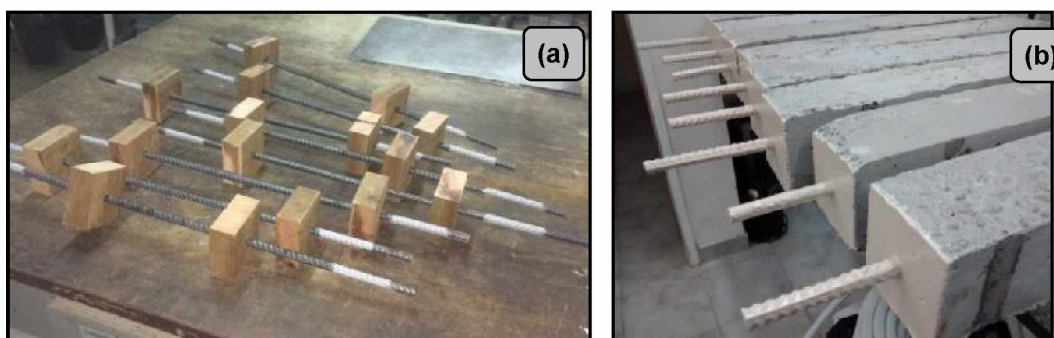


Figura 3: Acondicionamiento de probetas.

La Figura 2 muestra imágenes del procedimiento y dispositivos empleados para la fisuración previa de los tensores y las curvas carga-deformación correspondientes al promedio de las medidas de los dos transductores ubicados sobre los prismas. Se puede apreciar que las deformaciones axiales son menores en el caso de los HRF; también se observan saltos que indican la aparición de fisuras. Luego de la descarga se produce el cierre parcial de las fisuras por recuperación elástica.

Dado que los tensores se iban a sumergir en una solución de NaCl se debió acondicionar tanto la armadura como el hormigón. Pevio a la colada, una zona de la barra fue aislada con pintura epoxi (Figura 3.a) para evitar corrosión por rendijas en la región donde la armadura emerge de la probeta de hormigón. Por otro lado, luego de fisurados y previo a la inmersión, tanto los extremos del prisma, como la armadura que sobresalen de ellos, fueron protegidos con pintura epoxi (Figura 3.b) para evitar el deterioro del acero expuesto y asegurar que el ingreso de cloruros sea únicamente por las caras laterales.

Los tensores fisurados y acondicionados fueron sometidos a ciclos de inmersión y secado con el objetivo de inducir el inicio del proceso de corrosión. Se empleó una solución de NaCl con concentración de cloruros similar a la presente en agua de mar: 3,5% de iones cloruros (m/m). Para contemplar el avance del frente de carbonatación, el secado se realizó exponiendo los tensores al ambiente exterior de una zona industrial en vecindad con una zona de alto tránsito de vehículo, lo cual implica altas concentraciones de CO<sub>2</sub>.



La duración de los ciclos fue adecuada entre 10 y 20 días, en base a los resultados obtenidos en los ciclos anteriores.

Para contemplar el estado de las armaduras se midieron el  $E_{CORR}$ , que indica la susceptibilidad a la corrosión de la armadura dentro del hormigón y la  $i_{CORR}$ , que permite confirmar si la barra se está deteriorando ( $i_{CORR} > 0,2 \mu A/cm^2$  [15,16]) y a qué velocidad lo hace. Al mismo tiempo, se midió la resistividad del hormigón, que es indicativa de la humedad del hormigón. Como criterio de evaluación se tuvieron en cuenta los límites establecidos para los valores de  $i_{CORR}$  [15,16],  $E_{CORR}$  [17] y  $\rho_M$  [15,16] (ver Tablas 2 a 4).

Las mediciones de  $E_{CORR}$ ,  $i_{CORR}$  y  $\rho_M$  se realizaron utilizando un equipo comercial de medición superficial (G-Cor 6™), que utiliza electrodos de referencia de Cobre – Sulfato de Cobre Saturado (ESC) y un sistema de discos de guarda para confinar la región de la armadura que es ensayada (Figura 4). Las mediciones periódicas de estos parámetros se hicieron por duplicado sobre las mitades de los tensores, observando la diferencia de resistividad en los tensores y el efecto sobre los parámetros de la armadura posterior a cada ciclo previo a la inmersión y secado.

## RESULTADOS

La Figura 5 muestra los valores promedio de los parámetros electroquímicos medidos sobre las probetas que no fueron fisuradas. Se puede observar que, tanto en la probeta de HC como de HRF, los valores de  $i_{CORR}$  indican que el proceso aún no se inició de manera activa ( $i_{CORR} < 0,2 \mu A/cm^2$ ).

**Tabla 2:** Clasificación basada en la velocidad de corrosión [15,16].

$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Corrosión	$V_{corr}$ ( $\mu m/año$ )
< 0,1	Despreciable	< 1,2
0,1 a 0,5	Baja	1,2 a 5,8
0,5 a 1	Moderada	5,8 a 11,6
> 1	Alta	> 11,6

**Tabla 3:** Susceptibilidad basada en el potencial de corrosión [17].

Probabilidad de corrosión	$E_{corr}$ ( $V_{ESC}$ )
> 95 %	< -0,350
aprox. 50%	-0,200 a -0,350
< 5 %	> -0,200

**Tabla 4:** Susceptibilidad basada en la resistividad del hormigón [15,16].

Resistividad ( $k\Omega.cm$ )	Fenómeno probable
> 100	Hormigón muy seco. Las velocidades de corrosión serán muy bajas.
50 a 100	Bajas velocidades de corrosión.
10 a 50	Moderada a alta velocidad de corrosión si el acero está activo en hormigones carbonatados y/o contaminados con cloruro.
< 10	La resistividad no es un parámetro que controle la velocidad de corrosión



**Figura 4:** Medición de parámetros electroquímicos.

Sin embargo, los valores del potencial de corrosión y resistividad corresponden a “probabilidad incierta” y “riesgo moderado” respectivamente, lo cual es un indicativo de que las condiciones ambientales están dadas para que el proceso se lleve a cabo en cuanto algún agente agresivo destruya la CP.

Las Figuras 6 a 8 muestran los valores promedio de los parámetros electroquímicos medidos sobre probetas fisuradas. Se observa que tanto en HC como en HRF los valores de  $i_{CORR}$  indican que el proceso de corrosión se inició ( $i_{CORR} > 0,2 \mu A/cm^2$ ) ante la presencia de fisuras que permiten el ingreso de cloruros. En concordancia, los valores de  $E_{CORR}$  indican alta probabilidad de ocurrencia del proceso; sin embargo los valores de  $\rho_M$  son similares a los obtenidos en probetas sin fisuras indicando riesgo moderado.

Al analizar los resultados no se distinguen marcadas diferencias en los valores de  $i_{CORR}$  y  $E_{CORR}$  entre probetas con o sin fibras. Sin embargo, en el caso de la resistividad parece ser claro que la presencia de fibras implica menores resistividades.

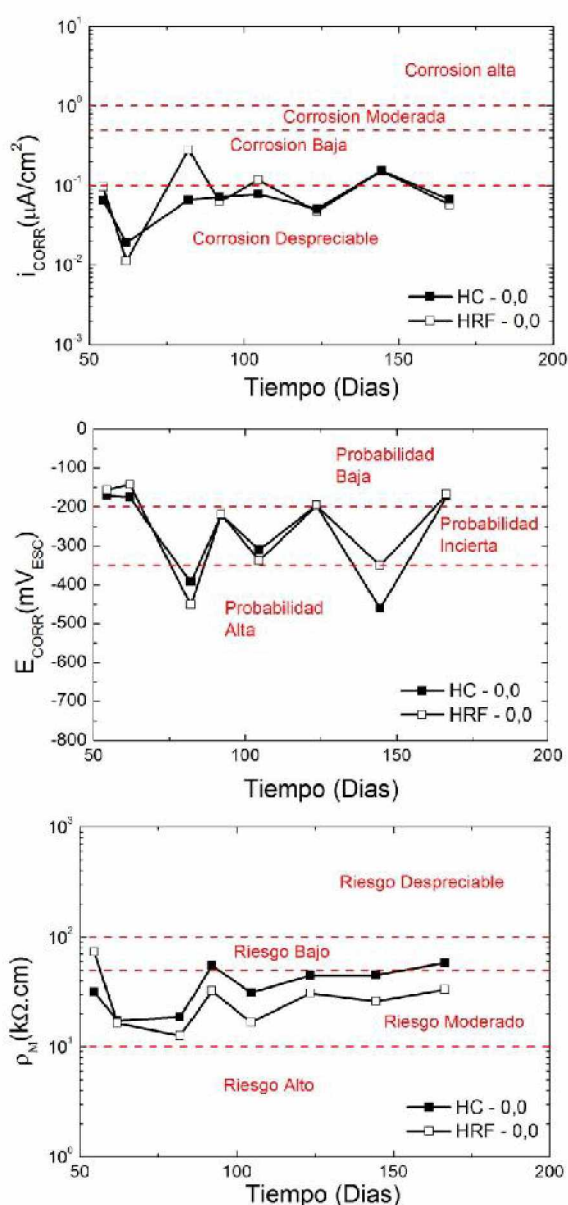


Figura 5: Probetas sin fisurar.

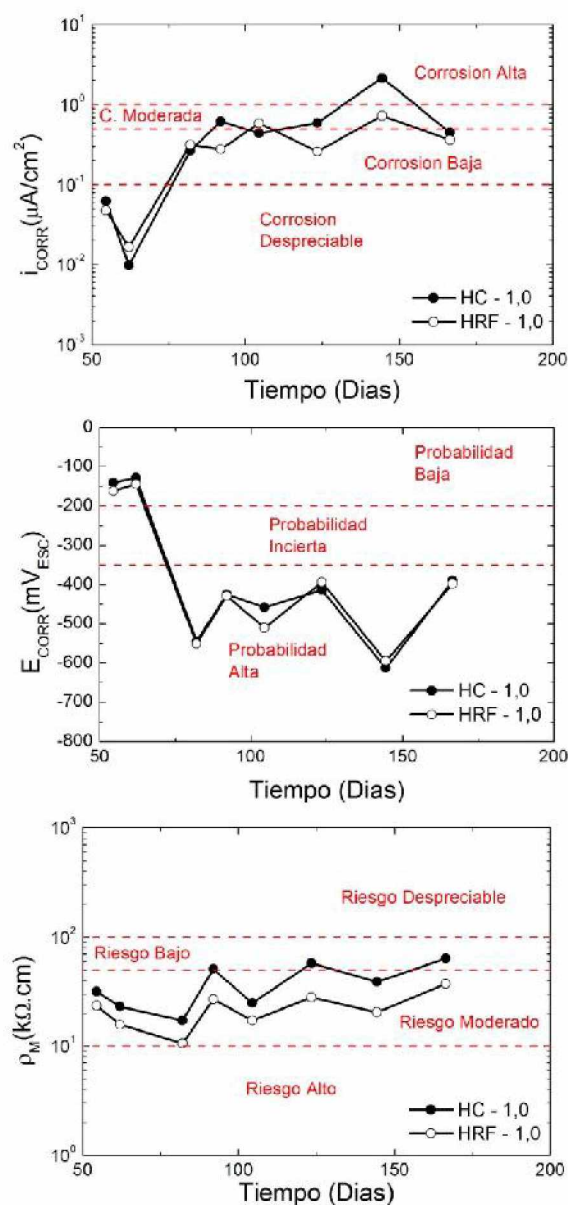
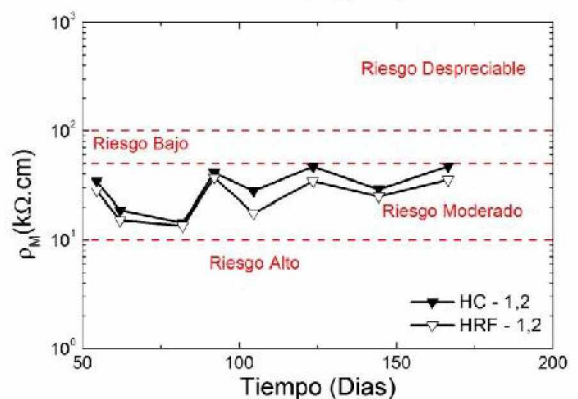
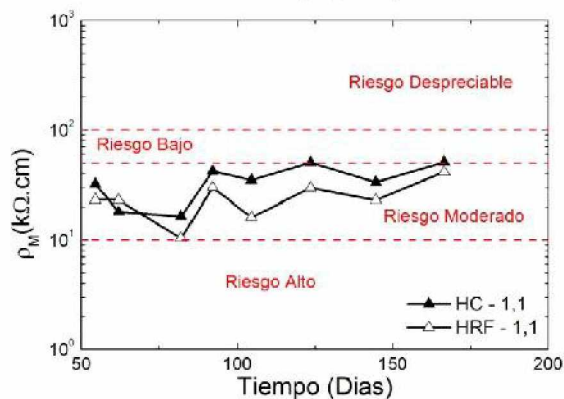
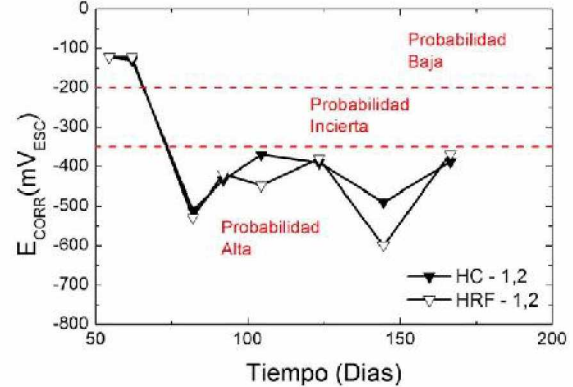
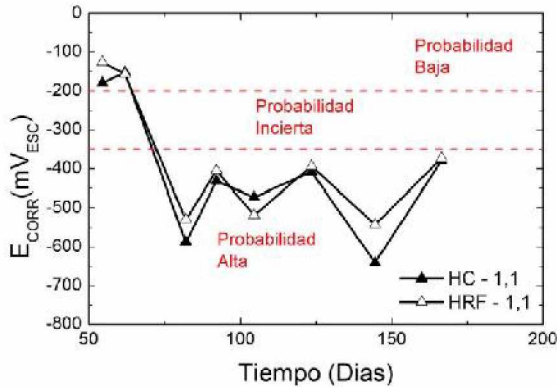
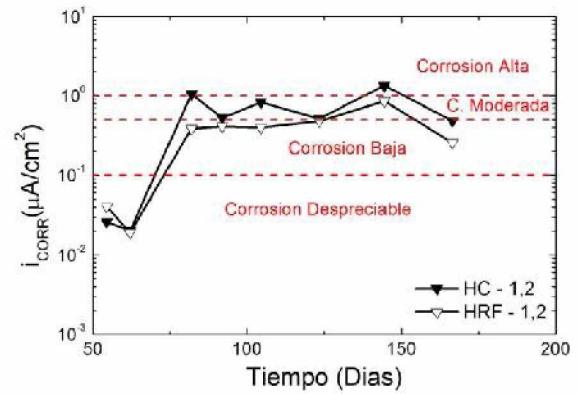
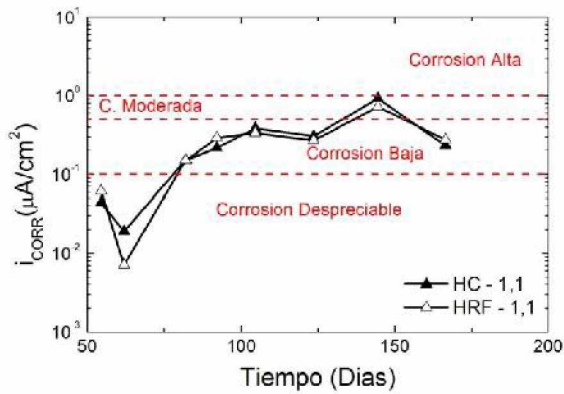


Figura 6: Probetas fisuradas a  $1,0 \sigma_y$ .

Figura 7: Probetas fisuradas a 1,1  $\sigma_Y$ .Figura 8: Probetas fisuradas a 1,2  $\sigma_Y$ .

La conductividad de los metales es mucho mayor a la del hormigón, por lo tanto era de esperar que si se incorporan fibras de acero al hormigón, la conductividad del material resultante (HRF) fuera mayor a la del hormigón sin fibras (HC). En este caso, la diferencia de resistividad entre HRF y HC es apreciable.

## CONCLUSIONES

Se propuso una metodología destinada a evaluar los efectos de la incorporación fibras sobre la corrosión en estructuras de hormigón armado. Las primeras experiencias indican que:

- El proceso de corrosión se inicia inmediatamente en presencia de fisuras. Las condiciones de exposición propuestas provocaron el inicio de la corrosión en pocos meses, siendo adecuadas para comparar tipos y contenidos de fibras en diferentes mezclas.



- El uso de fibras de acero no condicionó el inicio de la corrosión en probetas previamente fisuradas.
- Si bien el uso de fibras metálicas no genera diferencias en los valores de  $i_{CORR}$  y  $E_{CORR}$ , provoca menor resistividad en el hormigón.

## REFERENCIAS

- [1] Pedferri P, Polder B, Bertolini L, Elsener B, "Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair", segunda edición, Editorial Wiley-VCH, (2004), 71-73.
- [2] Tutti K, "Corrosion of steel in concrete", Editorial SCCRI, (1982), 17-24.
- [3] Bentur A, Diamond S, Berke NS, "Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice", Editorial E & FN Spon, (1997), 24-33.
- [4] Beeby AW, "Cracking, cover and corrosion of reinforcement", ACI Concrete International 5, 2, (1983), 35 – 40.
- [5] Arya C, Wood LA, "The relevance of cracking in concrete to corrosion of reinforcement", Technical report 44, Concrete society, (1995).
- [6] Schiebl P, Raupach M, "Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete", ACI Material J 94, 1, (1997), 56 – 61.
- [7] Scott A, Alexander MG, "The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete", Magazine of Concrete Research 59, 7, (2007), 495 – 505.
- [8] Fédération Internationale du Béton, (2013) "fib Model Code for Concrete Structures 2010". Ernst & Sohn, Berlin, Germany
- [9] Mitchell D, Abrishami HH, "Influence of steel fibres on tension stiffening", ACI Structural J 94, 6, (1997), 769 – 773.
- [10] Bischoff PH, "Tension stiffening and cracking of steel fibre reinforced concrete", J of Materials in Civil Engineering ASCE 15, 2, (2003), 174 – 182.
- [11] 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.
- [12] Tiberti, F, Minelli G, Plizzari G, "Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study", Cement and Concrete Research 68, (2015), 24 – 34.
- [13] Meda A, Minelli F, Plizzari G, "Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete", Composites Part B: Engineering 43, 8, (2012), 2930 – 2937.
- [14] EN 14651, "Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength", European Standards, (2005).
- [15] Andrade C, Alonso C, "On-site measurements of corrosion rate of reinforcements", Construction and Building Materials, 15, 3, (2001), 141 – 145.
- [16] Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland O, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B, "RILEM TC 154-EMC: Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method", Materials and Structures 37, 9, (2005) 623 – 643.
- [17] ASTM C876, "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete", ASTM Standards, (2009).