

## Detección de fibras de acero en hormigones mediante técnica eléctrica no destructiva

E. D. Gomez<sup>a,b\*</sup>, D. H. Monetti<sup>c</sup>, D. R. Vazquez<sup>a,d</sup>, R. Zerbino<sup>e,f</sup>, G. S. Duffó<sup>a,d,f</sup>

<sup>a</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Materiales (CNEA-GMAT), CP 1650, San Martín, Argentina, [enzodavidgomez@cnea.gob.ar](mailto:enzodavidgomez@cnea.gob.ar), [damianvazquez@cnea.gob.ar](mailto:damianvazquez@cnea.gob.ar), [gustavoduffo@cnea.gob.ar](mailto:gustavoduffo@cnea.gob.ar)

<sup>b</sup>Pontíficia Univ. Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias (UCA-FICA), CP 1400, CABA, Argentina.

<sup>c</sup>Univ. Nacional de La Plata, Facultad de Ingeniería (UNLP-Fl), CP 1900, La Plata, Argentina, [dmonetti@ing.unlp.edu.ar](mailto:dmonetti@ing.unlp.edu.ar)

<sup>d</sup>Univ. Nacional de San Martín, Instituto de Tecnología Jorge Sábat (UNSAM-ITJS), CP 1650, San Martín, Argentina.

<sup>e</sup>Lab. de Entrenamiento Multidiscip. para la Inv. Tec. (LEMIT), CP 1900, La Plata, Argentina, [zerbino@ing.unlp.edu.ar](mailto:zerbino@ing.unlp.edu.ar)

<sup>f</sup>Consejo Nacional de Inv. Científicas y Técnicas (CONICET), CP 1425, CABA, Argentina.

Recibido: 23 de diciembre de 2024

Aceptado: 25 de febrero de 2025

### RESUMEN

La utilización de fibras en el hormigón se extiende en la industria de la construcción debido a sus múltiples beneficios y el avance en las metodologías de utilización. El desarrollo de pruebas no destructivas que permitan detectar la distribución de fibras de acero en un elemento estructural terminado es de interés para el planteo de programas de control de calidad durante la producción. En este sentido, se presentan avances en el uso de la técnica eléctrica denominada “Espectroscopía de Impedancia Electroquímica” (EIS) como una posible herramienta para la detección de anomalías en la distribución de fibras. Entre las principales variables analizadas en este trabajo se encuentran el impacto del distanciamiento entre electrodos, de su geometría, la configuración de conexión y la humedad en la sensibilidad de detección. Los resultados muestran que la técnica tiene la sensibilidad necesaria para detectar diferentes dosajes de fibras y hace posible la obtención de coeficientes que operen como indicadores de la variación del contenido de fibras de acero con buena repetibilidad de registros.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón reforzado con fibras, ensayos no destructivos, espectroscopía de impedancia electroquímica, detección de fibras de acero

### ABSTRACT

The use of fiber reinforced concrete is spreading in the construction industry due to its multiple benefits and advances in methodologies for its use. Developments on non-destructive tests, for distribution of steel fibers detection in a finished structural element, are of interest for the design of quality control programs during production. In this sense, advances in the use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), as a possible a tool for the detection of anomalies in the distribution of fibers, are presented. The impact of multiple variables, as electrodes distance and geometry, connection configuration and humidity, on the detection sensibilities were analyzed in this work. The results show that EIS has the necessary sensitivity to detect fibers dosages and obtain indicators coefficients of steel fibers content variations with good repeatability.

**KEYWORDS:** Fiber reinforced concrete, non-destructive tests, electrochemical impedance spectroscopy, steel fibers detection

\*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Gomez, E. D., Monetti, D. H., Vazquez, D. R., Zerbino, R., y Duffó, G. S. (2025). Detección de fibras de acero en hormigones mediante técnica eléctrica no destructiva. *Revista Hormigón*, 67, 35–49. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/8xsqd0ld2>

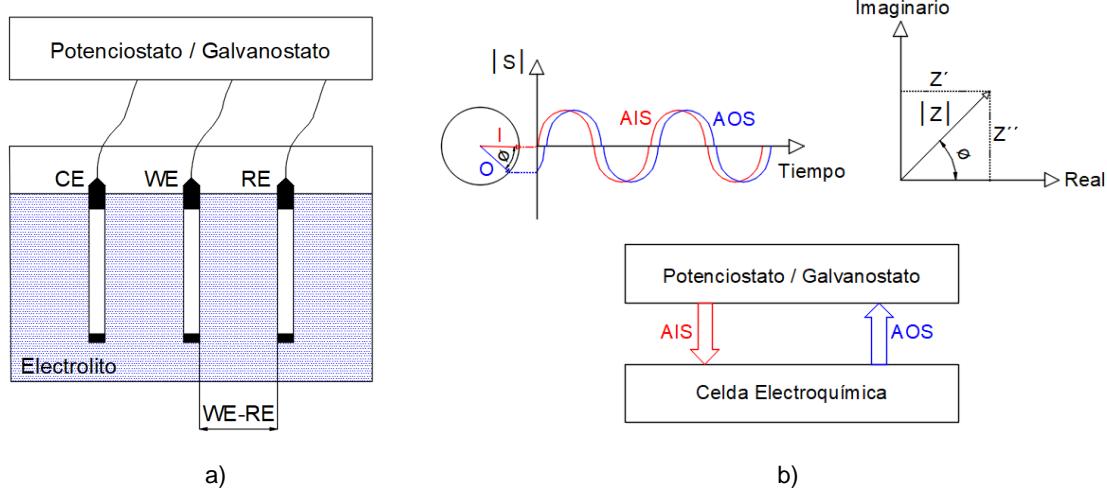
## 1. Introducción

La incorporación de fibras al hormigón tiene múltiples beneficios: controla los procesos de fisuración, incrementa la tenacidad y la resistencia residual (post fisuración), contribuye a la resistencia al corte y puede mejorar la adherencia acero-hormigón [1,2]. El empleo del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) va en crecimiento debido a la aparición de normativas y lineamientos técnicos específicos para este material compuesto [3,4]. Diversas técnicas y metodologías de ensayo, originalmente planteadas para hormigones convencionales (HC), tuvieron que ser revisadas, adaptadas o incluso reemplazadas [5] para la evaluación de HRF. En esta línea, resulta de interés desarrollar metodologías no destructivas que permitan evaluar la distribución de fibras de acero en una matriz de hormigón como parte de un proceso de control de calidad.

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es una técnica que permite medir la resistencia a la circulación de una corriente alterna (impedancia) en una celda electroquímica mediante la imposición de una variación sinusoidal de potencial (PEIS) o corriente (GEIS). Una celda electroquímica convencional está compuesta por un electrodo de trabajo (WE), un electrodo

de referencia (RE) y un contraelectrodo (CE) inmersos en un electrolito. Al aplicar una EIS, se impone una señal alterna de ingreso (AIS) a la celda electroquímica, a través del WE, y se registra una señal alterna de salida resultante (AOS). El contraste entre la señal de ingreso y de salida permite medir la impedancia ( $Z$ ) y el desfasaje ( $\phi$ ) que la señal evidencia debido a su pasaje por la celda. Al tratarse de una espectroscopía, la técnica varía la frecuencia de la señal de ingreso y registra para cada frecuencia utilizada un valor de  $Z$  y  $\phi$  generado por la celda electroquímica. Cada  $Z$  registrada durante una EIS, asociada a cada frecuencia ( $f$ ) relevada, puede expresarse como un vector del plano Real-Imaginario (Diagrama de Nyquist) definido por su módulo ( $|Z|$ ) y su ángulo de fase ( $\phi$ ). El vector  $Z$ , puede expresarse en términos de números imaginarios que contienen una componente real ( $Z'$ : Resistiva) y una componente imaginaria ( $Z''$ : Reactiva) [6]. De acuerdo con esto, la EIS permite caracterizar el comportamiento eléctrico de la celda electroquímica (WE-electrolito-RE) registrando la variación de las componentes de la impedancia ( $Z'$ ,  $Z''$ ), al barrer un rango de frecuencias previamente establecido [7,8].

La Figura 1 esquematiza el funcionamiento de la técnica.

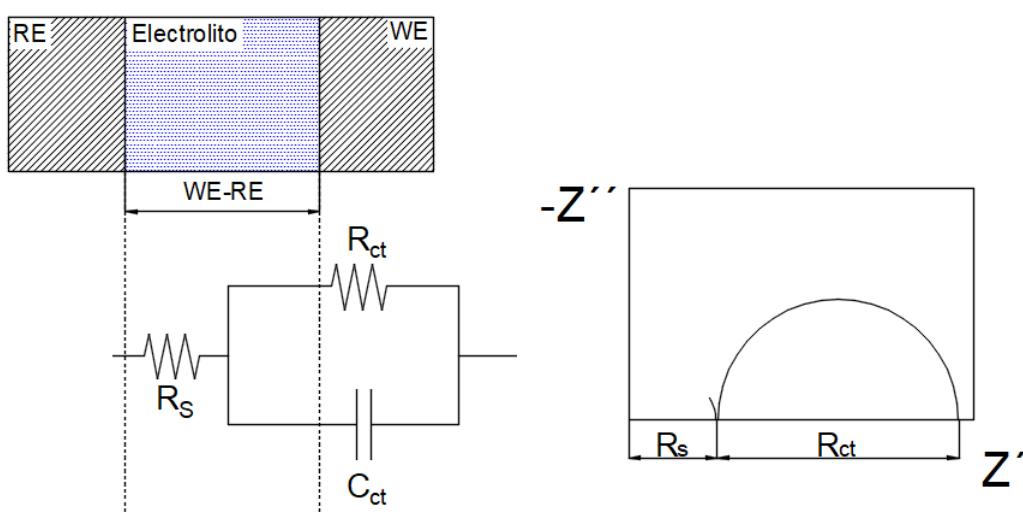


**Figura 1.** Esquematización del funcionamiento de la espectroscopía de impedancia electroquímica.  
a) Celda electroquímica. b) Registros de impedancia.

Al tratarse del contraste entre una señal de ingreso y una de salida, la celda electroquímica se comporta como una caja negra en donde el origen de la alteración que la señal sufre no está definido. Usualmente, para poder interpretar los registros de una EIS, se plantean circuitos equivalentes, conformados por una serie de componentes eléctricos (resistencias, capacitores, inductores, etc.), con respuesta eléctrica similar a las registradas en una celda electroquímica utilizada. A través del ajuste entre los registros de EIS y la respuesta del circuito equivalente planteado, se puede cuantificar el valor de los componentes del circuito. Si la conformación del circuito equivalente es asociable a los componentes de la celda electroquímica, los registros de EIS permiten interpretar el impacto de cada componente de la celda sobre la impedancia registrada. Es importante aclarar que no existe un único circuito asociable a una respuesta y que el diseño del circuito utilizado dependerá de la interpretación del funcionamiento de la celda emulada. Los componentes usualmente utilizados para la construcción de circuitos equivalentes son las resistencias (R), los capacitores (C), los inductores (L) y los elementos de fase constante (CPE). La Figura 2 muestra un ejemplo de cómo elementos de un circuito

equivalente se asocian a elementos de una celda electroquímica ("Rs" al electrolito y "R<sub>ct</sub> + C<sub>ct</sub>" al WE), siendo posible identificar las resistencias en el diagrama de Nyquist obtenido al ejecutar una EIS en la celda.

Una matriz cementicia puede actuar como el electrolito de una celda electroquímica si se utilizan electrodos metálicos en contacto con la matriz [9]. La estructura de poros, el contenido y conductividad de la solución de poros y la presencia de cualquier componente conductor, como las fibras de acero, influyen en la circulación de corrientes a través del compuesto. Por ejemplo, para evaluar la corrosión de armaduras (WE) en el hormigón (Electrolito), el principal circuito equivalente utilizado es el tipo "Randles" [10] (Figura 2), en donde "Rs" representa la resistencia eléctrica del hormigón y "R<sub>ct</sub>" es la resistencia a la polarización de la armadura que permite calcular la velocidad a la que se corroe. Es posible entonces proponer un circuito equivalente que contemple componentes asociadas a la presencia de fibras y evaluar los valores de sus componentes en búsqueda de indicadores sensibles al dosaje de fibras. Existen antecedentes de investigaciones que estudiaron las alteraciones que la presencia de fibras metálicas genera en registros de EIS y consideran viable la técnica para evaluar



**Figura 2.** Relación entre componentes del circuito equivalente "Randles" y elementos de una celda electroquímica.

sectores con deficiencia de fibras o segregación de las mismas en elementos elaborados con HRF de acero (HRFA) [11-15].

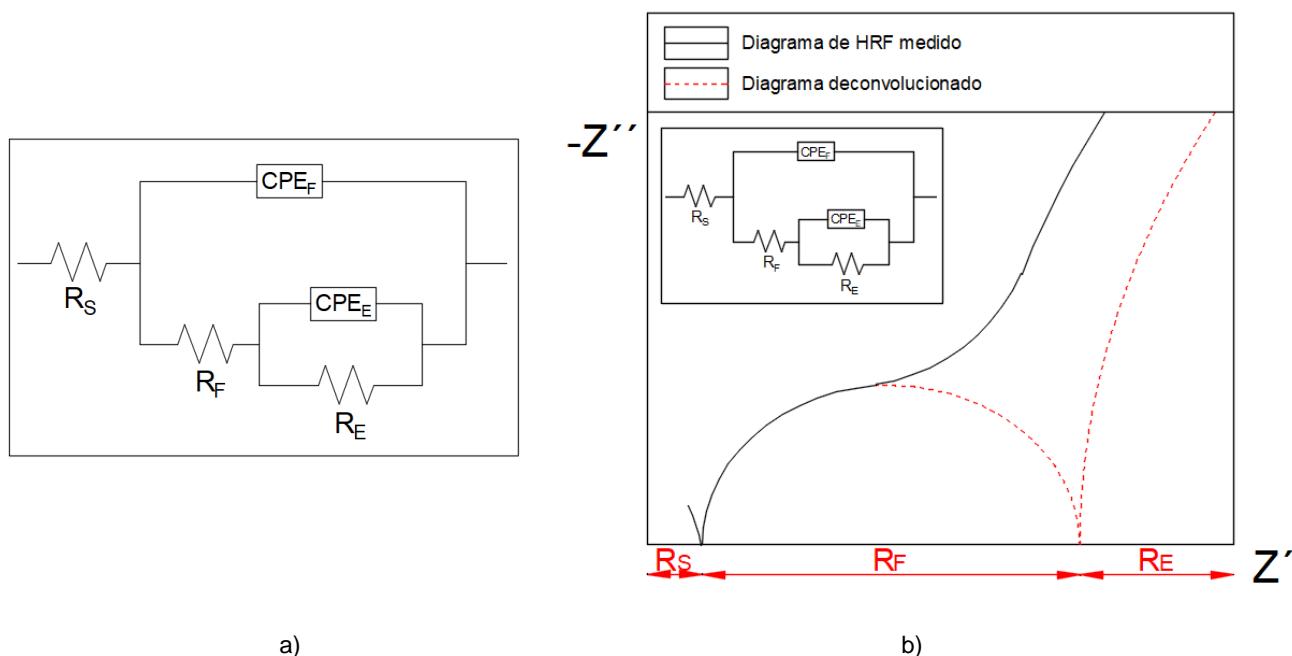
El presente trabajo que muestra avances en la búsqueda de un indicador del contenido de fibras que pueda ser obtenido a partir de mediciones de EIS; es el resultado de la colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI-UNLP), la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).

## 2. Metodología

Con el objetivo de identificar parámetros sensibles al contenido de fibras en el hormigón, se planteó un circuito equivalente que reproduce el comportamiento eléctrico que los HRF evidencian en registros de EIS. El circuito equivalente planteado contempló para su conformación los elementos que componen la celda electroquímica de medición utilizada en el programa experimental abajo descripto: electrodos,

solución electrolítica y fibras. Mediante un modelo numérico computacional se ajustaron las mediciones obtenidas al comportamiento del circuito y se cuantificaron cada uno de sus componentes. La Figura 3 muestra el circuito equivalente planteado (A) y un esquema de la descomposición del diagrama de la celda electroquímica (deconvolución) en sub-diagramas asociados a sus componentes (B), en donde se pone en evidencia el valor de las resistencias de interés del circuito.

Para la obtención de registros de EIS, se planteó un programa experimental con elementos de HRFA instrumentados sobre los que se ejecutaron múltiples ensayos de EIS para analizar la influencia de diferentes variables en los registros de impedancias. Se consideraron cuatro variables: la dosis de fibras, la humedad en el hormigón, la geometría de los electrodos y la configuración de conexión. Utilizando un hormigón de base tipo H30, con relación agua-cemento (a/c) 0,46 y tamaño máximo de agregado grueso de 26,5 mm, se fabricaron 4 prismas de 150 mm x 130 mm x 600 mm incorporando diferentes dosis de fibras de acero: 0 kg/m<sup>3</sup> (HC), 20 kg/m<sup>3</sup> (HRF20), 40 kg/m<sup>3</sup> (HRF40) y



**Figura 3.** Esquema del diagrama de Nyquist deconvolucionado de acuerdo con el circuito equivalente modelado.

60 kg/m<sup>3</sup> (HRF60). Se utilizaron fibras de acero al carbono con punta en gancho de 50 mm de longitud y 1 mm de diámetro (Esbeltex:  $\lambda = 50$ ).

Todas las probetas fueron instrumentadas con electrodos embebidos de acero inoxidable austenítico del tipo AISI 304L, en formato de barras (EIB) y de placas (EIP), y con electrodos de referencia embebidos (RE) de tipo metal/óxido metálico. Los electrodos fueron recubiertos con pintura epoxi para delimitar el área de contacto eléctrico con la matriz cementicia en el interior de la probeta y aislar la superficie del metal en la zona donde el electrodo emerge del hormigón. La geometría de probetas y las características de electrodos se muestran en la Figura 4.

Para la ejecución de los ensayos se contemplaron ocho (8) configuraciones de medición, detalladas en la Tabla 1, resultantes de la combinación de dos (2) configuraciones de conexión, sistema de dos (C2) y tres electrodos (C3), y distintas características geométricas de los electrodos (distancia y forma). Sobre estas ocho opciones se aplicaron PEIS de 5 mV de amplitud, barriendo frecuencias desde 0,05 a 100000 Hz utilizando potencióstatos/galvanostatos GAMRY INTERFACE 1010.

Para contemplar la influencia de la humedad sobre las mediciones, las probetas fueron sometidas a procesos de inmersión y secado para la toma de registros. Inicialmente, posterior a su colado, las probetas fueron curadas 30 días bajo inmersión. Posterior al curado, se dejaron secar a humedad de laboratorio (HR<sub>media</sub>: 70 %) durante 15 días (edad: 45 días), previo a un ciclo de inmersión de 15 días (edad: 60 días) y secado final a humedad ambiente de 30 días (edad: 90 días). Se tomaron registros de EIS en estado húmedo (EW), post inmersión, y en estado seco (ED) finalizado el ciclo.

Todas mediciones de EIS, en términos de Z' y Z'', fueron cargadas al modelo numérico computacional para ajustar la respuesta del circuito equivalente planteado a los registros de PEIS, mediante cuadrados mínimos no lineales, y se obtuvieron como resultados:

- Valores de los componentes del circuito equivalente:
  - R<sub>S</sub>: resistencia asociada a la solución electrolítica (estructura de poros del compuesto cementicio).
  - R<sub>F</sub>: resistencia asociada a la presencia de fibras.
  - CPE<sub>F</sub>: elemento fase constante asociado a las fibras, caracterizado por:
    - Y<sub>0F</sub>: constante de capacitancia asociado a las fibras.
    - α<sub>F</sub>: rango de capacitancia asociado a las fibras.
  - R<sub>E</sub>: resistencia asociada a los electrodos.
  - CPE<sub>E</sub>: elemento fase constante asociado a electrodos, caracterizado por:
    - Y<sub>0E</sub>: constante de capacitancia asociado a electrodos.
    - α<sub>E</sub>: rango de capacitancia asociado a electrodos.
- Valores de Z' y Z'' calculados con el modelo.
- Error relativo promedio y máximo entre valores modelados y medidos.

Los valores calculados, de los componentes del circuito equivalente asociados a la presencia de las fibras (RF, Y<sub>0F</sub> y α<sub>F</sub>), se analizaron en contraste con las variables tratadas: geometría de medición, humedad en la matriz y dosaje de fibras. La Figura 5 esquematiza la metodología general ejecutada.

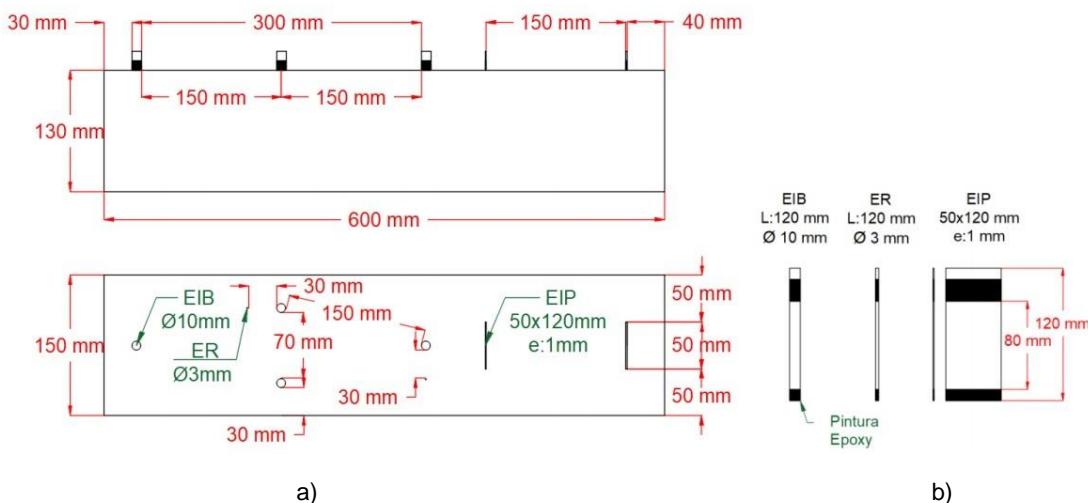


Figura 4. a) Geometría de la probeta. b) Geometría de electrodos embebidos.

Tabla 1. Descripción de configuraciones geométricas y de conexión.

Configuraciones de conexión		
C2	Sistema de dos electrodos. CE y RE conectados a un mismo electrodo.	
C3	Sistema de tres electrodos. CE y RE conectados a electrodos independientes.	
Configuraciones geométricas		
	C3EB	C2EB
Distancia WE-RE	30 mm	-
	81 mm	70 mm
	106 mm	150 mm
	306 mm	300 mm
	C2EP	
		-
		-
		150 mm
		-

### 3. Resultados

El efecto de la incorporación de fibras de acero al hormigón sobre el comportamiento eléctrico fue analizado en un trabajo previo [15] donde se remarcó que los diagramas de Nyquist muestran tres características en su morfología (ver Figura 6) que pueden ser utilizadas para evaluar la presencia de fibras:

- La reducción de la impedancia inicial asociada al electrolito (rebote de la curva a frecuencias de entre 1 KHz y 10 KHz).
- El desarrollo de un semicírculo capacitivo de frecuencias intermedias (SCFI),

asociado a la presencia de fibras (entre 1 KHz y 0,1 Hz).

- El desarrollo de la impedancia del electrodo a bajas frecuencias (< 0,1 Hz), sin impacto aparente por la presencia de fibras.

A modo de ejemplo, la Figura 7 muestra el efecto del dosaje de fibras (A) y de la distancia entre electrodos (B) sobre los diagramas de Nyquist obtenidos a partir de las mediciones tomadas en el programa experimental utilizando la configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB).

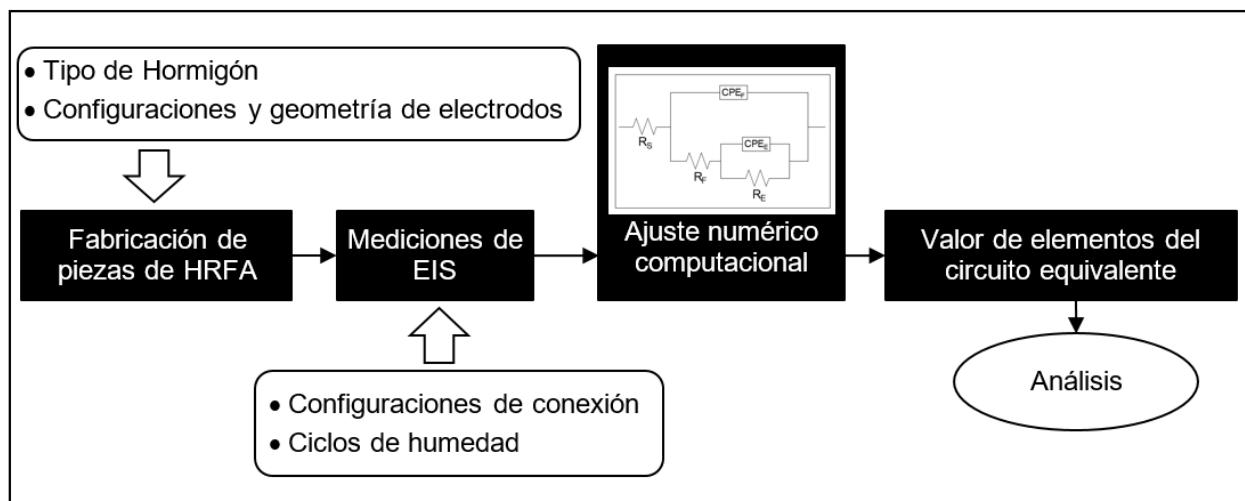


Figura 5. Esquema general de metodología empleada.

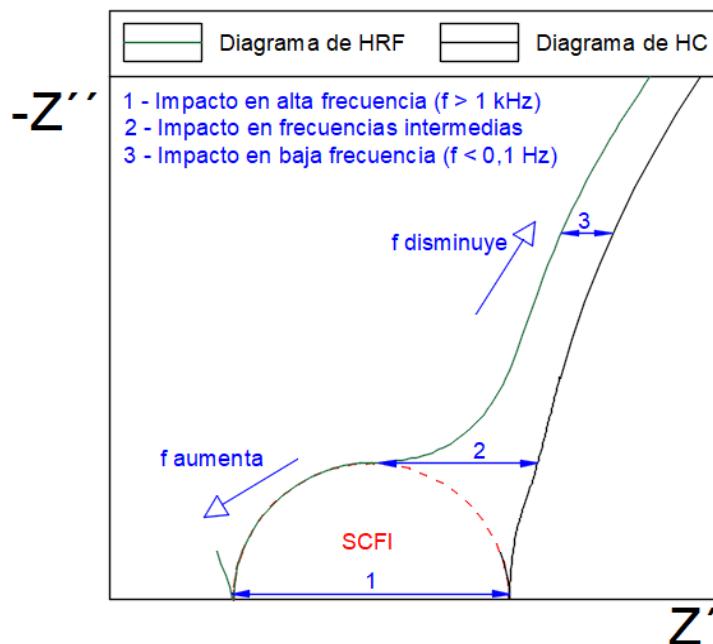
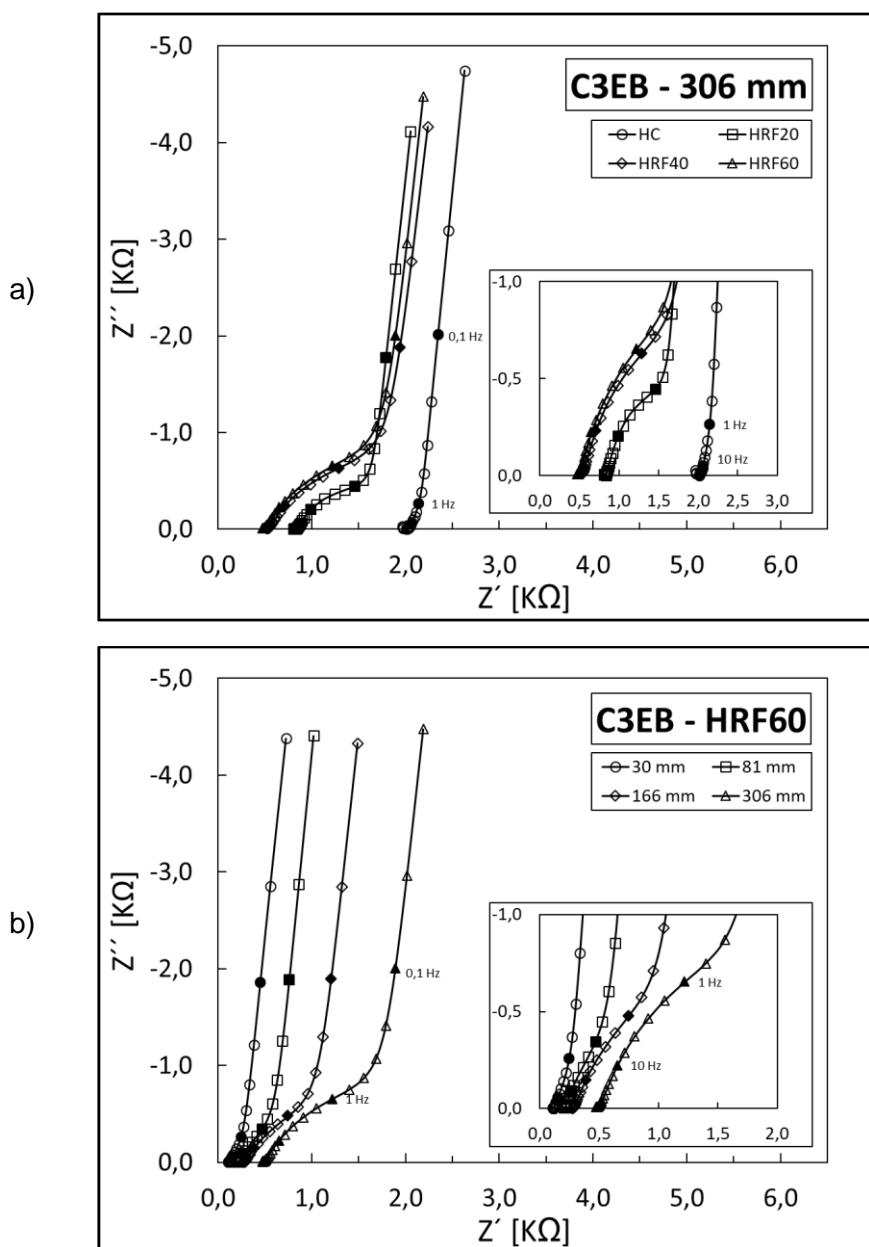


Figura 6. Efecto de la presencia de fibras de acero sobre diagramas de Nyquist medidos en celdas electroquímicas que utilizan compuestos cementicios como electrolito.

Es notable como el aumento del dosaje de fibras y del distanciamiento entre WE y RE generan mayor reducción de la impedancia inicial y la formación de un semicírculo capacitivo de frecuencias intermedias más grande. El impacto de la presencia de fibras en el hormigón queda en evidencia claramente al contrastar diagramas de Nyquist de HRF contra HC ante una similar configuración de medición; aunque en bajos distanciamientos entre electrodos, del orden

de la longitud de la fibra, este efecto puede verse alterado ante posibles contactos entre fibras y electrodos.

El modelo numérico computacional utilizado ajustó los 64 diagramas de Nyquist obtenidos (8 configuraciones de medición x 2 contenidos de humedad x 4 mezclas utilizadas) durante el programa experimental al comportamiento eléctrico del circuito equivalente planteado para cuantificar el valor de sus componentes

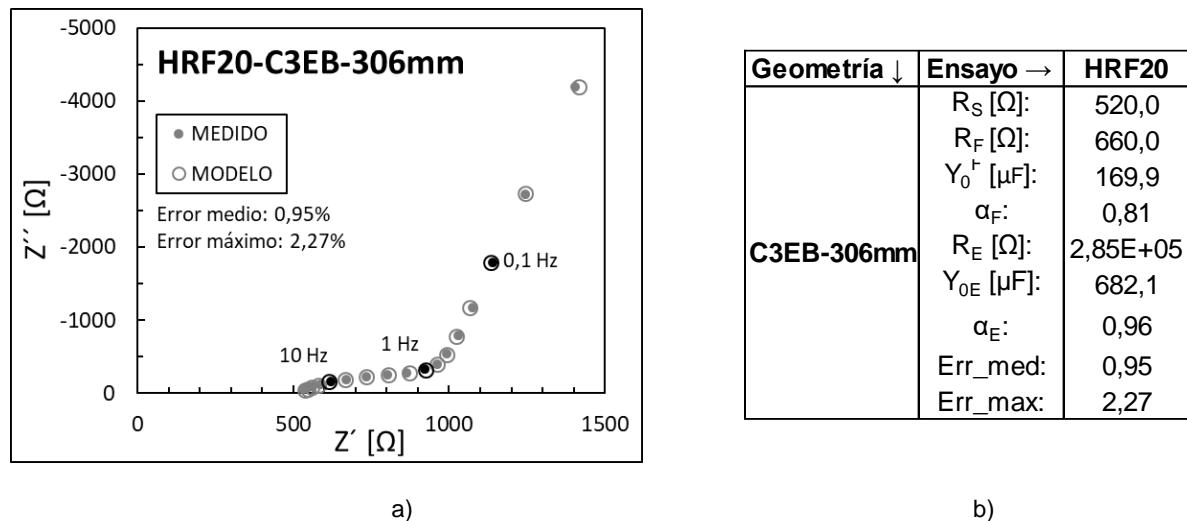


**Figura 7.** Contraste de diagramas de Nyquist registrados con una configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB). a) Impacto de la dosis de fibras para una distancia de 306 mm entre electrodos. b) Impacto de la distancia entre electrodos para un hormigón reforzado con 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras (HRF60).

con errores de ajuste máximos calculados menores al 10 % (en distancias entre electrodos menores a 50 mm). A modo de ejemplo, la Figura 8 muestra el contraste entre el diagrama de Nyquist obtenido en el programa experimental (medido) y diagrama de Nyquist ajustado (Modelo) (A), en conjunto con los valores de los componentes del circuito equivalente calculados (B), para una medición tomada en una mezcla con 20 kg/m<sup>3</sup>

de dosis de fibra (HRF20), utilizando una configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB) y con una separación WE-RE de 306 mm.

Los valores calculados de los componentes asociados al desarrollo de la impedancia del electrodo a baja frecuencia ( $R_E$ ,  $Y_0^E$ ,  $\alpha_E$ ) no reflejan el impacto de la presencia de las fibras y por lo tanto no fueron de interés para



**Figura 8.** Ejemplo de datos obtenidos por el modelo matemático computacional utilizando los registros obtenidos sobre la configuración C3EB-306 mm de la probeta HRF20.

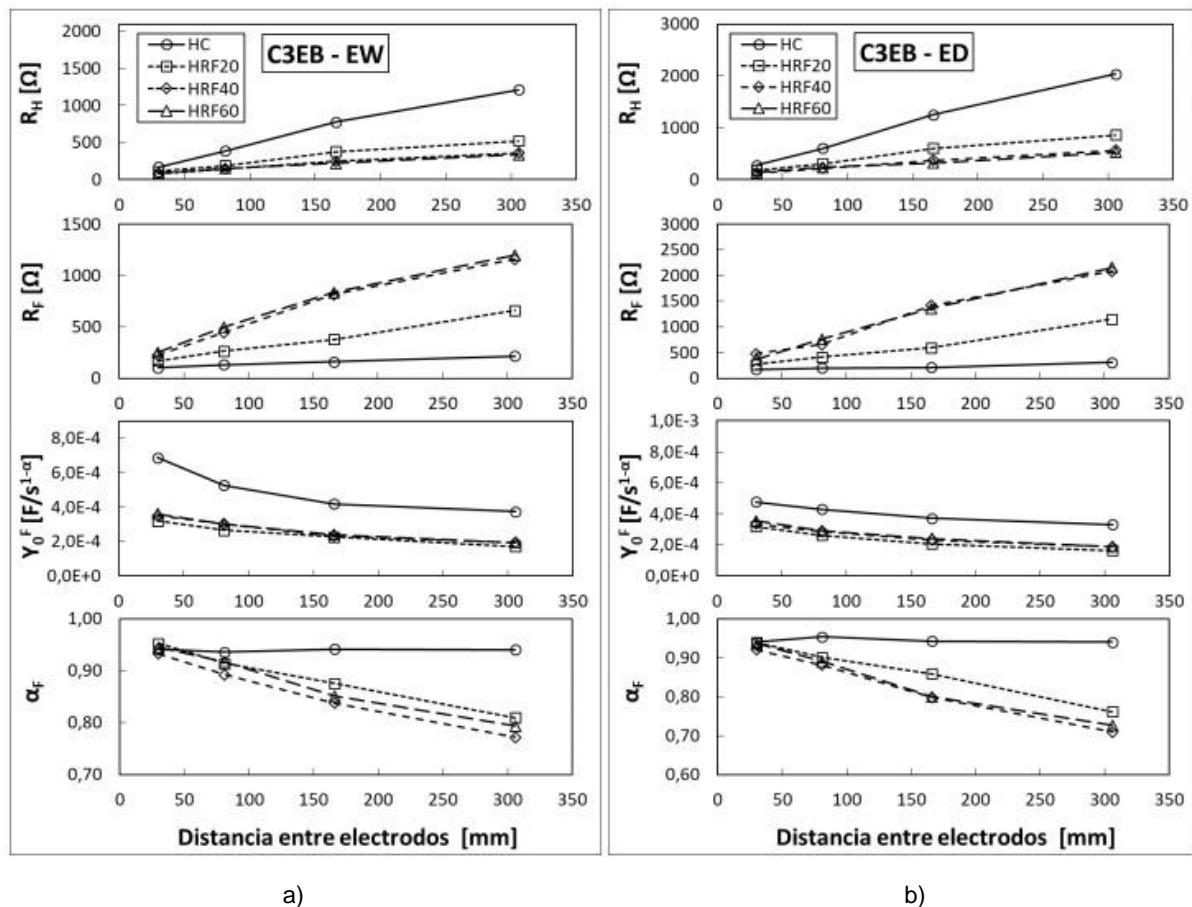
el desarrollo de este trabajo. En contrapartida, el análisis se centró en los componentes del circuito equivalente asociados a la formación del SCFI ( $R_S$ ,  $R_F$ ,  $Y_0^F$ ,  $\alpha_F$ ) y sus valores se presentaron en función del distanciamiento WE-RE y del dosaje de fibra, contrastando el estado húmedo (EW) con el seco (ED) para todas las configuraciones de medición utilizadas. En adelante, los términos  $Y_0$  y  $\alpha$  hacen referencia a  $Y_0^F$  y  $\alpha_F$  respectivamente.

A modo de ejemplo, se muestran los comportamientos de los componentes del circuito equivalente calculados a partir de registros tomados bajo la configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB), en función del distanciamiento WE-RE (Figura 9) y en función del dosaje de fibras (Figura 10), contrastando los estados de humedad.

De manera complementaria, la Figura 11 muestra el comportamiento de los componentes del circuito equivalente calculados a partir de registros tomados bajo una configuración de dos electrodos, en función del dosaje de fibras, contrastando distanciamientos WE-RE (A) tipo barra (C2EB) y dos morfologías del electrodo (B), Barra (C2EB) y placa (C2EP), bajo un similar distanciamiento WE-RE.

Al observar el comportamiento de los parámetros del semicírculo capacitivo de frecuencia intermedia ( $R_F$ ,  $Y_0$  y  $\alpha$ ), se pudo notar que:

- El comportamiento general de los parámetros es similar bajo las configuraciones de medición evaluadas (C2E/C3E), siendo ambas utilizables para detectar el impacto de la presencia de fibras.
- Los valores de  $Y_0$  y  $\alpha$  disminuyen al aumentar la distancia entre electrodos sin que el dosaje de fibras o la configuración de conexión afecten significativamente. Este comportamiento es asociable a un fenómeno geométrico de distribución de líneas de corriente.
- El valor de  $R_F$  aumenta proporcionalmente con la distancia entre electrodos, el dosaje de fibras y la pérdida de humedad. Esto es asociable a que una mayor cantidad de fibras son alcanzadas por las líneas de corriente.  $R_F$  es utilizable para evaluar la presencia de fibras.



**Figura 9.** Valores de componentes del circuito equivalente asociados a la formación del SCFI, en función de la distancia entre electrodos y obtenidos a partir de mediciones ejecutadas bajo la configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB). a) Medición en estado húmedo. b) Medición en estado seco.

- Aunque de manera menos evidente, el semicírculo capacitivo de frecuencia intermedia también se forma en hormigones sin fibras, siendo calculables los parámetros  $Y_0$ ,  $R_F$  y  $\alpha$ .

Además, es interesante observar el comportamiento de  $R_S$  como indicador de la reducción de la resistencia inicial que la presencia de fibras genera. En este sentido se pudo notar que:

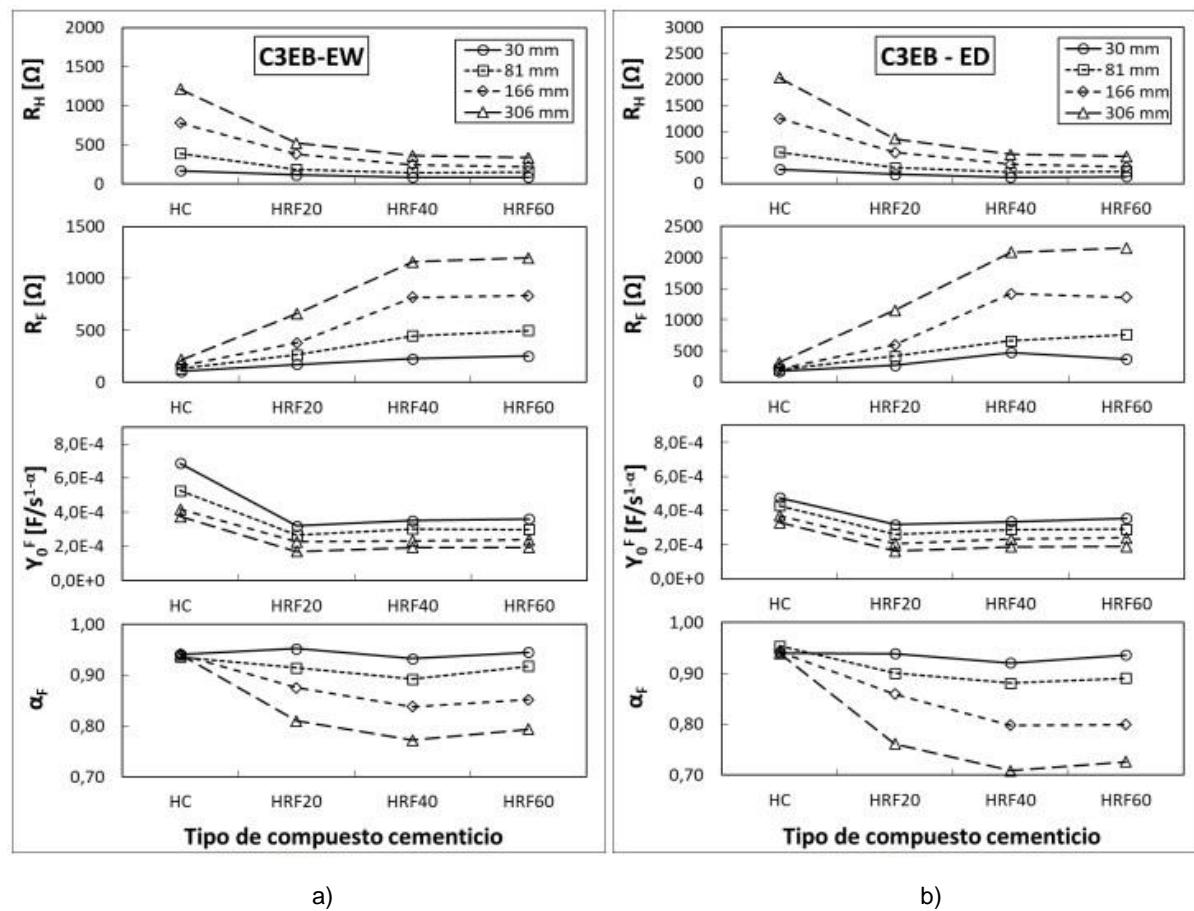
- Hay una proporcionalidad directa entre el valor de  $R_S$  y el distanciamiento WE-RE sin importar el dosaje de fibras.
- La caída del valor de  $R_S$  de HRF, respecto al de HC, aumenta con el dosaje de fibras. Este comportamiento muestra relación con el crecimiento del valor que experimenta

$R_F$  al aumentar el dosaje de fibras bajo una misma configuración de medición.

- El contenido de humedad también afecta al valor de  $R_S$ . Esto es esperable ya que el contenido y composición de la solución de poros impacta en la resistencia del compuesto.

#### 4. Discusión

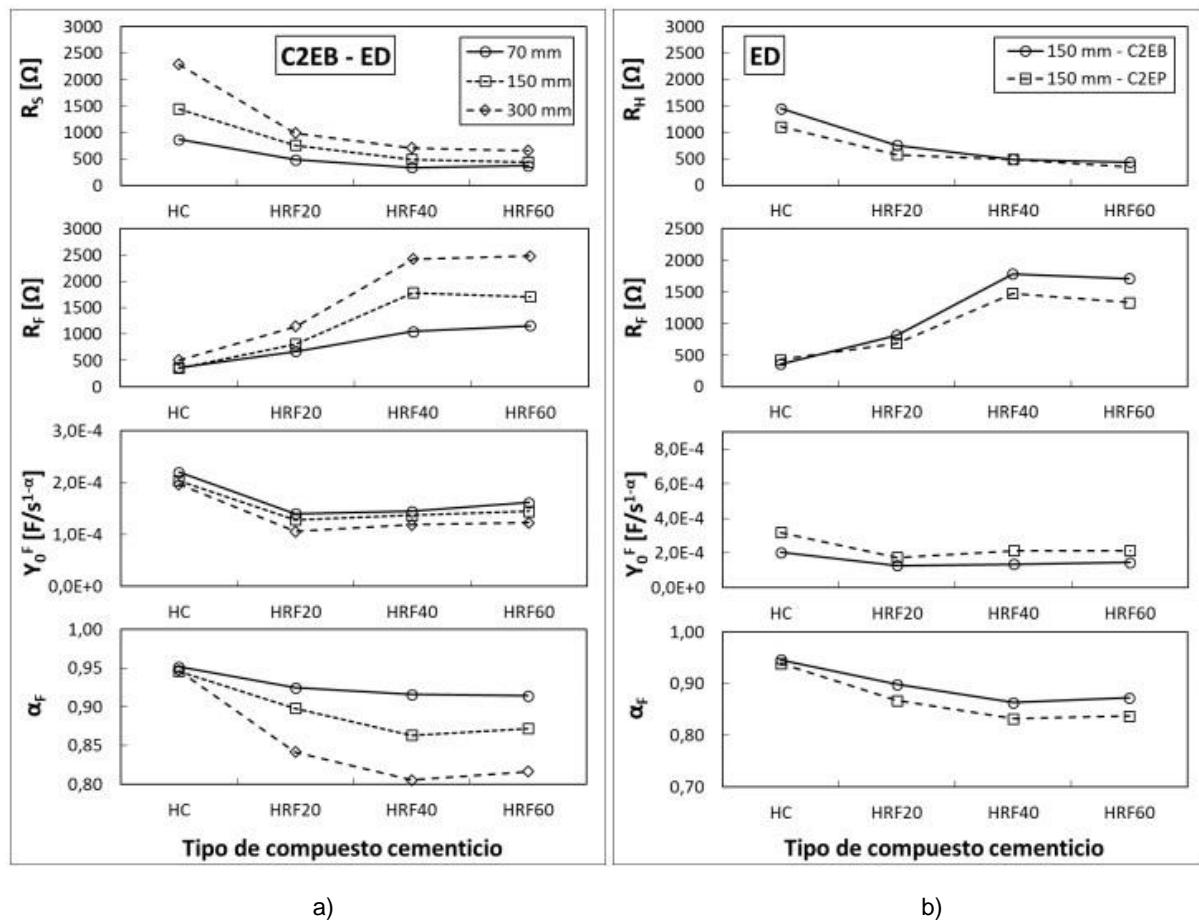
Las observaciones surgidas a partir del tratamiento de datos permitieron identificar a  $R_F$  como el parámetro candidato para evaluar la presencia de fibras. Sin embargo, el hecho de que  $R_F$  y  $\alpha_F$  puedan medirse también en hormigones sin fibras, y mantengan valores de igual orden sin que la distancia entre electrodos les afecte, es un indicador de que



**Figura 10.** Valores de componentes del circuito equivalente asociados a la formación del SCFI, en función del dosaje de fibras y obtenidos a partir de mediciones ejecutadas bajo la configuración de tres electrodos tipo barra (C3EB). a) Medición en estado húmedo. b) Medición en estado seco.

la formación del semicírculo capacitivo de frecuencia intermedia (SCFI) tiene su origen en un proceso que se desarrolla tanto en la superficie de las fibras como de los electrodos y que, además, está condicionado por el contenido de humedad presente. Por otro lado, la relación entre el valor de  $R_F$ , el dosaje de fibras y el distanciamiento entre electrodos (WE-RE) es atribuible a que mayores cantidades de fibras son interceptadas por las líneas de corriente que se forman durante el ensayo a medida que ambas variables aumentan. Finalmente, el valor de  $R_s$  mostró contener información tanto de las variables geométricas como del dosaje de fibras pudiéndose también utilizar como indicador de cantidad de fibras.

Si se analiza lo observado en un diagrama de Nyquist deconvolucionado, ver Figura 12, se podrá notar que la conductividad aportada por las fibras metálicas al compuesto cementicio es variable con la frecuencia debido a la formación y desarrollo del SCFI. En frecuencias altas (1-10 kHz), el proceso que da origen a la formación del SCFI aún no está activo y por lo tanto el rebote de la curva ( $R_s$ ) representa el valor de la resistencia eléctrica del compuesto cementicio con el mayor aporte de conductividad de las fibras. A medida que las frecuencias bajan (entre 1 kHz y 0,1 Hz), el SCFI se desarrolla, debido a un incremento en la resistencia eléctrica de las fibras, generando un aumento en la resistencia del compuesto cementicio.



**Figura 11.** Valores de componentes del circuito equivalente asociados a la formación del SCFI, en función del dosaje de fibras y obtenidos a partir de mediciones bajo la configuración de dos electrodos (C2). a) Con electrodos tipo barra a diferente distanciamiento. b) Con dos formatos de electrodos diferentes, ante igual distancia.

A frecuencias bajas ( $< 0,1$  Hz) la formación del SCFI se completó, en la condición  $R_s + R_f$  el aporte de conductividad de las fibras es el mínimo y cualquier aumento de resistencia se debe exclusivamente a procesos en la superficie de los electrodos.

Si la geometría del WE no varía, es posible utilizar el valor de  $R_s$  para independizar a  $R_f$  del impacto de la humedad y del distanciamiento WE-RE con la siguiente relación (1):

$$\xi = \frac{R_f}{(R_s + R_f)} \quad (1)$$

Se define a  $\xi$  como el *coeficiente de impacto eléctrico por fibras* y su valor cuantifica la

variación de conductividad en el compuesto cementicio, entre la condición de máximo y mínimo impacto, debido a la presencia de fibras. Bajo hipótesis de distribución aleatoria de fibras e inexistencia de cortocircuito entre electrodos por contactos con las fibras, el valor de  $\xi$  permite reconocer variaciones en el contenido de fibras en un elemento de HRF.

La Figura 13 muestra los valores promedio de  $\xi$  calculados para las diferentes mezclas utilizadas, bajo las configuraciones de conexión de dos y tres electrodos tipo barra (C2EB/C3EB) contemplando todos los distanciamientos WE-RE y condiciones de humedad evaluados. Se puede notar que los valores calculados varían con el contenido de fibras y mantienen una regularidad para

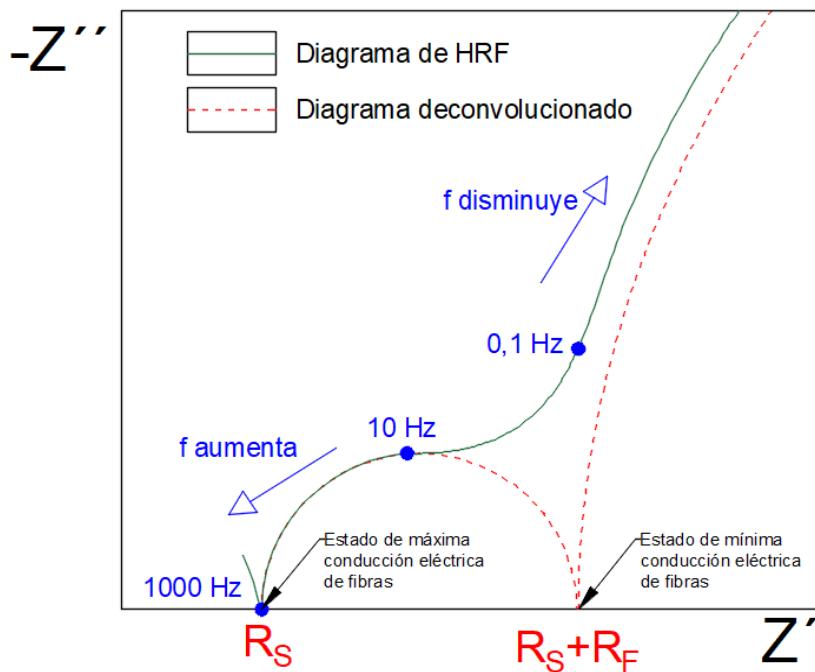


Figura 12. Parámetros del circuito equivalente indicados en diagrama de Nyquist deconvolucionado.

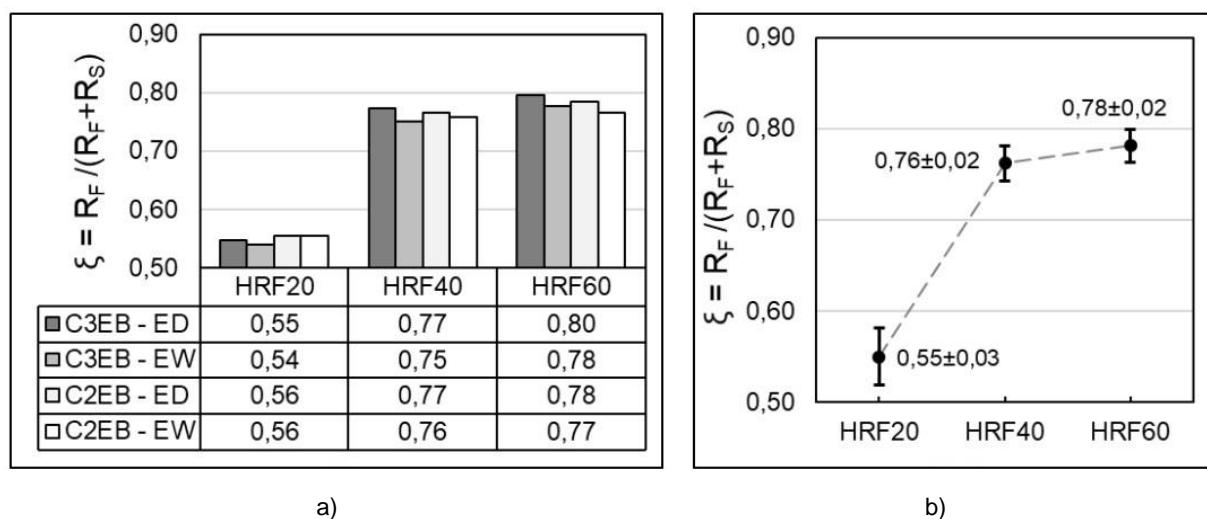


Figura 13. Valores promedio del *coeficiente de impacto eléctrico por fibras* calculados para todos los hormigones.

diferentes condiciones de humedad y distanciamientos WE-RE. Se observa que, para las condiciones de medición evaluadas,  $\xi$  aumenta con el contenido de fibras pero tiende a estabilizarse en valores cercanos a 0,8 (asintótico). La tendencia a estabilización del impacto de fibras puede deberse a la mayor cantidad de contactos entre fibras al

aumentar el dosaje, lo cual genera un estado de percolación eléctrica.

De acuerdo con estos resultados,  $\xi$  puede utilizarse para reconocer, por contraste, la homogeneidad del contenido de fibras en un elemento estructural bajo una configuración geométrica de medición estable.

Es importante aclarar que  $\xi$  no puede utilizarse de manera directa para estimar y/o cuantificar dosis de fibras sin antes independizar el valor del impacto de la geometría del sistema de medición y del desarrollo de resistencia en el WE. Esto último escapa del alcance de este trabajo y se plantea como línea de trabajo en el futuro.

## 5. Conclusiones

A partir del ajuste con los registros de EIS obtenidos en el programa experimental, se cuantificaron y analizaron los componentes del circuito equivalente propuesto en búsqueda de indicadores sensibles al contenido de fibras de acero. De la evaluación de los elementos componentes asociados a la presencia de fibras se concluye que:

- Es factible utilizar a la EIS como herramienta de caracterización del contenido de fibras de acero en elementos de hormigón.
- En el diagrama de Nyquist generado a partir de los registros de EIS, en un rango de frecuencias entre 1000 y 0,1 Hz, se evidencia un semicírculo capacitivo que contiene información del contenido de fibras.
- El comportamiento del circuito equivalente planteado ajusta bien con los registros experimentales, permitiendo calcular el valor de una resistencia asociada a la presencia de fibras ( $R_F$ ) sensible al contenido de fibras, el contenido de humedad y la configuración de conexión.
- Bajo una configuración geométrica de medición fija, el cálculo del coeficiente de impacto eléctrico por fibras ( $\xi$ ) planteado permite independizar el valor de la  $R_F$  del impacto de la humedad pudiéndose utilizar su valor como herramienta de caracterización del contenido de fibra de acero.
- El valor  $\xi$  tiene buena repetitividad aun cuando se calcula a partir de registros obtenidos con diferentes configuraciones geométricas.

## Fuentes de financiamiento

Este trabajo recibió el financiamiento del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), a través del PICT-2020-SERIEA-00149, y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET), a través de los proyectos PIP 11220200100081CO y PIP 11220200100139CO.

## Contribución de autoría

Enzo D. Gomez: Metodología, Recursos, Investigación, Análisis formal, Redacción y Visualización. Diego H. Monetti: Recursos, Investigación, Análisis formal y Redacción. Damián R. Vazquez: Metodología, Análisis formal y Software. Raúl Zerbino: Conceptualización, Supervisión y Adquisición de fondos. Gustavo Duffó: Conceptualización, Supervisión y Adquisición de fondos.

## Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## Referencias

- [1] Conforti, A., Zerbino, R., y Plizzari, G. (2015). Influence of steel, glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure. *Structural Concrete*, 20(1), 133–143. <https://doi.org/g6rk5g>
- [2] Zerbino, R. (2022). *Hormigón reforzado con fibras* (2da ed.). Ed. AATH, Serie Hormigones Especiales
- [3] American Concrete Institute (2016). *Report on design and construction of fiber reinforced precast concrete tunnel segments* (ACI 544.7R-16).
- [4] Fédération Internationale du Béton. (2012). *fib Model Code for Concrete Structures*.

- [5] Gomez, E., Leporace-Guimil, B., Conforti, A., Plizzari, G., Duffó, G., Zerbino, R. (2023). A practical approach for monitoring reinforcement corrosion in steel fiber reinforced concrete elements exposed to chloride rich environments. *Structural Concrete*, 24(1), 318–331. <https://doi.org/n8mf>
- [6] Barsoukov, E., Macdonald, J. R. (Eds.) (2005). *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications* (2da ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Orazem, M. E., y Tribollet, B. (2020). A tutorial on electrochemical impedance spectroscopy. *ChemTexts*, 6, 12. <https://doi.org/n8mh>
- [8] Lazanas, A. Ch., y Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy – a tutorial. *ACS Measurement Science*, 3(3), 162–193. <https://doi.org/gtkp5f>
- [9] Duffo, G., y Farina, S. (2016). *La corrosión de estructuras de hormigón armado*. Editorial Académica Española.
- [10] Vennesland, Ø., Raupach, M., y Andrade, C. (2007). Recommendation of RILEM TC154 – EMC: Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete – Measurements with embedded probes. *Materials and Structures*, 40, 745–758. <https://doi.org/ct7fm6>
- [11] Mason, T. O., Campo, M. A., Hixon, A. D., y Woo, L. Y. (2002). Impedance spectroscopy of fiber-reinforced cements composites. *Cement and Concrete Composites*, 24(5), 457–465. <https://doi.org/cvj5xm>
- [12] Ozyurt, N., Mason, T. O., Shah, S. P. (2006). Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1653–1660. <https://doi.org/fdvmq7>
- [13] Torrents, J. M., Blanco, A., Pujadas, P., Aguado, A., Juan-García, P., y Sánchez-Moragues, M. A. (2012). Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and Structures*, 45, 1577–1592. <https://doi.org/n8mz>
- [14] Gomez, E. D., Monetti, D. H., Carricando, J. I., Vázquez, D. R., Zerbino, R., y Duffó, G. S. (2024). Caracterización de hormigones reforzados con fibras de acero utilizando espectroscopía de impedancia electroquímica. En *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, (AJEA 25). Recuperado a partir de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1542>