

Caracterización de hormigones reforzados con fibras de acero utilizando espectroscopía de impedancia electroquímica.

Steel fiber reinforced concrete characterization using electrochemical impedance spectroscopy.

Presentación: 22/10/2023

Enzo David Gomez

Departamento de corrosión, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina.
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina (FICA-UCA), Argentina.
Instituto de Tecnología Jorge Sábato, Universidad Nacional de San Martín (ITJS-UNSAM),
Argentina. enzogomez@cnea.gov.ar

Diego Hernán Monetti

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (FI-UNLP), Argentina.
dmonetti@ing.unlp.edu.ar

Juan Ignacio Carricondo

Departamento de corrosión, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina.
Instituto de Tecnología Jorge Sábato, Universidad Nacional de San Martín (ITJS-UNSAM),
Argentina. carricondo@cnea.gov.ar

Damián René Vázquez

Departamento de corrosión, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina.
Instituto de Tecnología Jorge Sábato, Universidad Nacional de San Martín (ITJS-UNSAM),
Argentina. dvazquez@cnea.gov.ar

Raúl Zerbino

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (FI-UNLP), Argentina.
Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), Argentina.
Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
zerbino@ing.unlp.edu.ar

Gustavo Sergio Duffó

Departamento de corrosión, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina.
Instituto de Tecnología Jorge Sábato, Universidad Nacional de San Martín (ITJS-UNSAM), Argentina.
Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.
duffo@cnea.gov.ar

Resumen

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) ha demostrado tener múltiples beneficios al utilizarse como material estructural en la industria de la construcción. En muchos países, su utilización va en crecimiento debido a la aparición de normativas y lineamientos técnicos para la utilización de este material compuesto. Nuevas metodologías y técnicas no destructivas son de interés para el control de calidad tanto del material como de elementos estructurales terminados. Establecer la distribución final de fibras en el material compuesto endurecido es uno de los principales puntos de interés para el control de producción de elementos de HRF. En particular, en Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA), la presencia de fibras altera a las propiedades eléctricas del material cementicio pudiendo ser este efecto la base para desarrollar una metodología que permita identificar la disposición final de fibras en la matriz cementicia. La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica de corriente alterna (AC) que permite caracterizar el comportamiento eléctrico de un material. La EIS ya se ha utilizado en términos de corrosión

para evaluar el hormigón que protege a las armaduras y diferentes estudios sugieren que permite caracterizar contenido y distribución de fibras en compuestos cementicios. Este trabajo presenta avances en la evaluación de la EIS, como técnica capaz de reconocer la presencia de fibras, analizando el impacto de la configuración geométrica de electrodos y conexiones en la sensibilidad de detección que la técnica tiene. Los resultados mostraron que la técnica tiene la sensibilidad necesaria para detectar diferentes dosajes de fibras y puede ser eventualmente utilizada como ensayo no destructivo para el control de calidad.

Palabras clave: Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA) – Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) – Ensayos No Destructivos (END) – Control de Calidad (QC).

Abstract

Fiber Reinforced Concrete (FRC) has proven to have multiple benefits like structural material in construction industry. Due to new regulations and technical guidelines, FRC use is growing in many countries. Develop of non-destructive techniques and evaluation methodologies are both topics of interest for quality control (QC) of materials and finished structural elements. Final fibers distribution in hardened composite material is a main concern for FRC elements production control. Particularly, in Steel Fibers Reinforced Concrete (SFRC), cementitious material electrical properties are altered by fiber presence and this effect may be the base for developing methodologies that allows identifying final fibers distribution in cementitious matrices. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is an alternating current (AC) technique that allows to characterize materials electrical behavior. The EIS has already been used to evaluate concrete performance like reinforcement protection in corrosion terms, and it was suggested for characterizing fiber content and distribution in cementitious composites in different studies. This work presents advances in EIS evaluation as a technique capable of recognizing metallic fibers presence, analyzing the impact of different electrode geometry and electrochemical configuration on sensitivity. Results showed that EIS technique has the necessary sensitivity to detect different dosages of metallic fibers and can eventually be used like a non-destructive quality control test.

Keywords: Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) – Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) – Non-Destructive Tests (NDT) – Quality Control (QC).

Introducción

En las últimas décadas, los materiales que componen el hormigón han sufrido una gran evolución: los cementos contienen mayor cantidad de adiciones minerales, las nuevas generaciones de aditivos permiten obtener hormigones autocompactantes y se han desarrollado nuevos agregados como fibras o materiales reciclados inertes. Todo esto ha dado lugar a una gran cantidad de opciones de hormigones, cuyas características pueden diferir bastante del hormigón convencional. En particular, la incorporación de fibras al hormigón tiene múltiples beneficios: Afecta directamente a los procesos de fisuración reduciendo la abertura superficial y el espaciado entre fisuras, incrementan la tenacidad y la resistencia residual (post fisuración) lo que hace al material particularmente eficiente para estructuras expuestas a acciones dinámicas, 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 (Tiberti et al., 2005; Conforti et al., 2005; Minelli & Plizzari, 2003; Zerbino, 2022). En muchos países, la utilización de hormigón reforzado con fibras (HRF) va en crecimiento debido a la aparición de normativas y lineamientos técnicos para la utilización de este material compuesto: se establecieron metodologías normalizadas para caracterizar HRF utilizando elementos flexionados (ASTM C1399, 2015; ASTM C1550, 2012; ASTM C1609, 2012; EN 14651, 2005); se generaron diferentes reportes con lineamientos para diseñar elementos estructurales de HRF (ACI 544 6R, 2015; ACI Committee 544 R16, 2016; fib Bulletin 83, 2017); y algunas normas de diseño estructural (fib Model Code for Concrete Structures, 2012) ya incluyen apartados específicos para el diseño de elementos de HRF incluyendo el uso combinado con armadura convencional. Técnicas y metodologías de ensayos asociadas al control de calidad, desarrolladas originalmente para

hormigones convencionales (HC), tuvieron que ser revisadas, adaptadas e inclusive remplazadas (Gomez et al., 2023). En el caso de Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA), es de interés desarrollar metodologías no destructivas que permitan evaluar la distribución de fibras en la matriz de hormigón como un proceso de control de calidad. En este sentido, técnicas eléctricas que puedan detectar la influencia de la presencia de fibras metálicas sobre las propiedades eléctricas de un compuesto cementicio aparecen como candidatas para evaluar la presencia de fibras en un elemento estructural.

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica que permite medir la resistencia a la circulación de una corriente alterna (impedancia) generada por la imposición de una variación sinusoidal de potencial o corriente a un electrodo (electrodo de trabajo) de una celda electroquímica. La técnica registra la impedancia entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE) utilizado. Si se impone una variación alternada de potencial de amplitud constante al WE, la técnica se reconoce como EIS potenciostática (PEIS). Si se impone una variación alternada de corriente de amplitud constante al WE, la técnica se reconoce como EIS galvanostática (GEIS). Al tratarse de una espectroscopia, la técnica impone una variación de potencial/corriente alternada de amplitud constante utilizando diferentes frecuencias de variación y registra, para cada frecuencia utilizada, un valor impedancia. Las impedancias (Z) pueden expresarse en términos de números imaginarios que contienen una componente real (Z' : Resistiva) y una componente imaginaria (Z'' : Reactiva). Por lo tanto, 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 modulo ($|Z|$) y su ángulo de fase (θ) (Barsoukov & Macdonald, 2005; Orazem & Tribollet, 2008). 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, al barrer un rango de frecuencias previamente establecido (Orazem & Tribollet, 2020; Lazanas & Prodromidis, 2023).

Una matriz cementicia puede actuar como el electrolito de una celda electroquímica si se utilizan electrodos metálicos en contacto con la matriz. Ya sea incorporando electrodos embebidos o utilizando electrodos externos con un contacto superficial, al generar una celda electroquímica, la solución de poros de una matriz cementicia actúa como un electrolito en donde una corriente puede circular debido al flujo de iones (Vennesland et al., 2001; Duffo & Farina, 2016). La estructura de poros, el volumen de solución de poros y la presencia de iones o cualquier componente conductor, como fibras de acero, influyen en la circulación de corrientes a través de un compuesto cementicio. Bajo este concepto, al ejecutar una EIS utilizando electrodos en contacto con el hormigón, las variaciones de las componentes de la impedancia son el resultado de las características eléctricas de la matriz cementicia y de fenómenos electroquímicos en las interfaces de los electrodos (Sagoe-Crentsil et al., 1992; Ford et al., 1998). Bajo este concepto, estos tipos de sistemas electroquímicos se utilizan para mediciones de velocidad de corrosión de armaduras (actuando la armadura como WE) o para mediciones de resistencia eléctrica del hormigón que protege a las armaduras (actuando el hormigón como electrolito). Consecuentemente, es esperable que la EIS detecte la presencia de fibras de acero, que alteran las características eléctricas del hormigón, entre electrodos y por lo tanto sea una técnica candidata para ser utilizada como método de ensayo no destructivo en HRFA. Diferentes investigaciones estudiaron las alteraciones que la presencia de fibras metálicas genera en registros de EIS en compuestos cementicios reforzados con fibras metálicas (Mason et al., 2002; Woo et al., 2003). Los antecedentes indican que la EIS puede detectar la distribución y el contenido de fibras de acero en un volumen de hormigón y, en consecuencia, bajo un método adecuado, puede ser utilizada para determinar sectores de un elemento de SFRC con deficiencia o segregación de fibras a través de un relevamiento no destructivo (Ozyurt et al., 2006; Torrents et al., 2012).

El presente trabajo muestra los primeros avances en el análisis de la sensibilidad de la EIS como técnica capaz de detectar contenido de fibras metálicas en el hormigón y 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).

Metodología

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de la EIS para detectar la presencia de fibras, 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: dosis de fibras, geometría y posición de los electrodos, Tipos de EIS (PEIS o GEIS) y humedad en el hormigón.

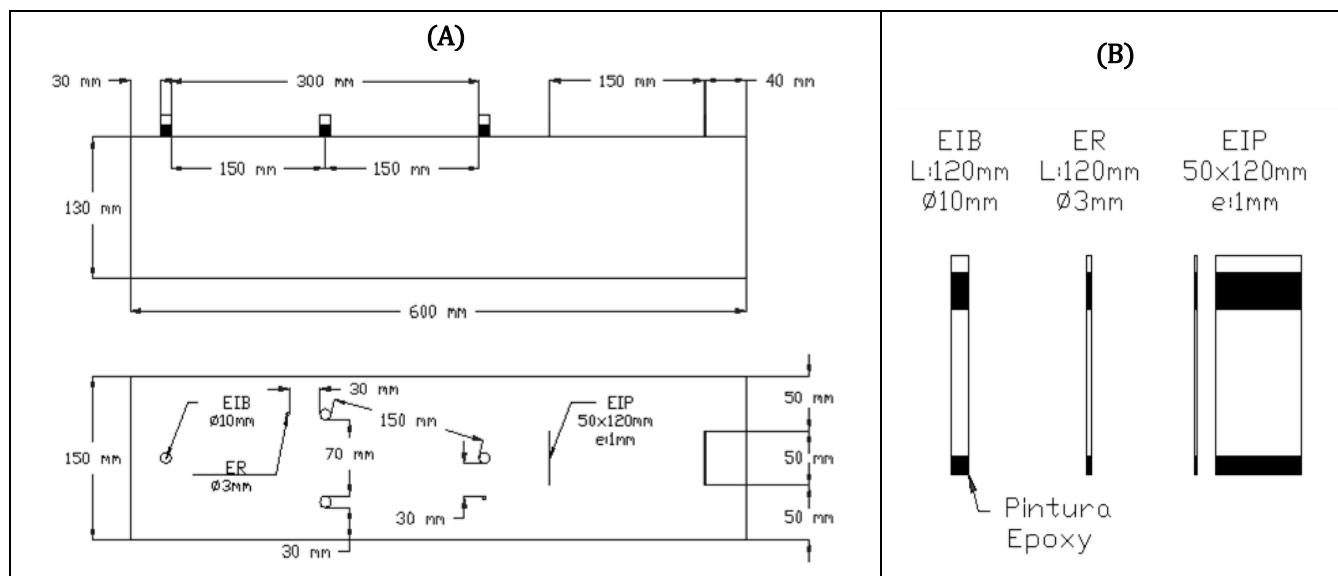


Figura 1: Diseño de probeta. (A): Geometría de la probeta. (B): Geometría de electrodos embebidos.

Se fabricaron 4 probetas prismáticas de 150x130x600 mm de hormigón con diferentes dosis de fibras de acero: 0 kg/m³ (HC), 20 kg/m³ (HRF20), 40 kg/m³ (HRF40) y 60 kg/m³ (HRF60). Se utilizó hormigón H30 con relación agua-cemento (a/c) de 0,46 y tamaño máximo de agregado grueso de 26,5 mm. 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/óxidos metálicos. Todos los electrodos fueron pintados con pintura epoxy para delimitar el área de contacto 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 embebidos se muestran en la Figura 1. Para la ejecución de los ensayos se contemplaron 12 configuraciones diferentes resultantes de la combinación de cuatro configuraciones geométricas de electrodos (EIB-C, EIB-M, EIB-L y EIP-U) y tres configuraciones de conexión (ORW, ORC y RCC) como se muestra en la Figura 2 y se detalla en la Tabla 1. Sobre estas 12 configuraciones se aplicaron tres tipos de EIS: PEIS de 5 mV y 30 mV de amplitud y GEIS de 5µA de amplitud. Todas las EIS se ejecutaron barriendo frecuencias desde 0,05 a 100000 Hz utilizando potenciostatos/galvanostatos GAMRY REFERENCE 600 y GAMRY INTERFACE 1010 (Figura 3).

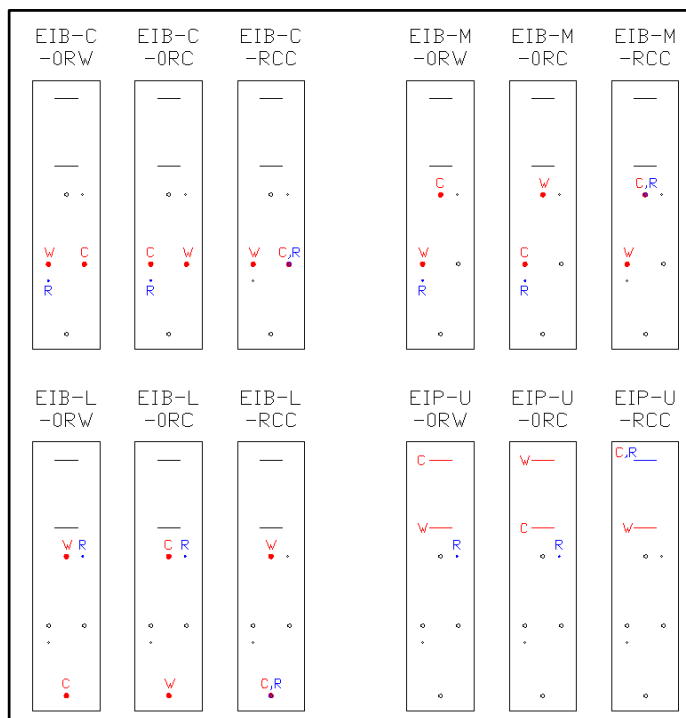


Figura 2 – Configuraciones de ensayos resultantes de la combinación de configuraciones geométricas y de conexión.

Configuraciones de conexión			
WE	Electrodo de trabajo.	ORW	Sistema de tres electrodos (RE independiente) donde el WE se conecta cerca del RE.
CE	Contra electrodo.	ORC	Sistema de tres electrodos (RE independiente) donde el CE se conecta cerca del RE.
RE	Electrodo de referencia.	RCC	Sistema de dos electrodos, con RE y CE conectados al mismo electrodo.
Configuraciones geométricas			
	EIB-C	EIB-M	EIB-L
Distancia entre WE-CE	70 mm	150 mm	300 mm
	En ORW		
Distancia entre WE-RE	30 mm	30 mm	30 mm
	En ORC		
Distancia entre WE-RE	75 mm	175 mm	305 mm
	En RCC		
Distancia entre WE-RE	70 mm	150 mm	300 mm
	EIP-U		
Distancia entre WE-RE	150mm		

Tabla 1 – Descripción de configuraciones geométricas y de conexión.



Figura 3 – Mediciones en probetas utilizando potenciostatos/galvanostatos GAMRY®.

Resultados y discusión

Para el análisis de los resultados se construyeron los diagramas de Nyquist (Z' vs $-Z''$), que presentan los valores de las impedancias registradas en términos de sus componentes reales e imaginarias; y diagramas de Bode ($|Z|$ vs f - θ vs f), que presentan la variación del módulo y el ángulo de fase de la impedancia al ir variando las frecuencias, para cada

situación evaluada. Los resultados se presentan analizando las variables planteadas con el siguiente orden de análisis: Influencia del dosaje de fibras – Influencia de la configuración de los electrodos (geometría y conexión) – Influencia de la humedad y del tipo de EIS.

La Figura 4 muestra los diagramas de Nyquist obtenidos en ensayos realizados sobre hormigón sin fibras (HC) teniendo en cuenta las doce configuraciones de conexión presentadas. Al no contener fibras se puede analizar la influencia neta del distanciamiento entre electrodos y conexiones.

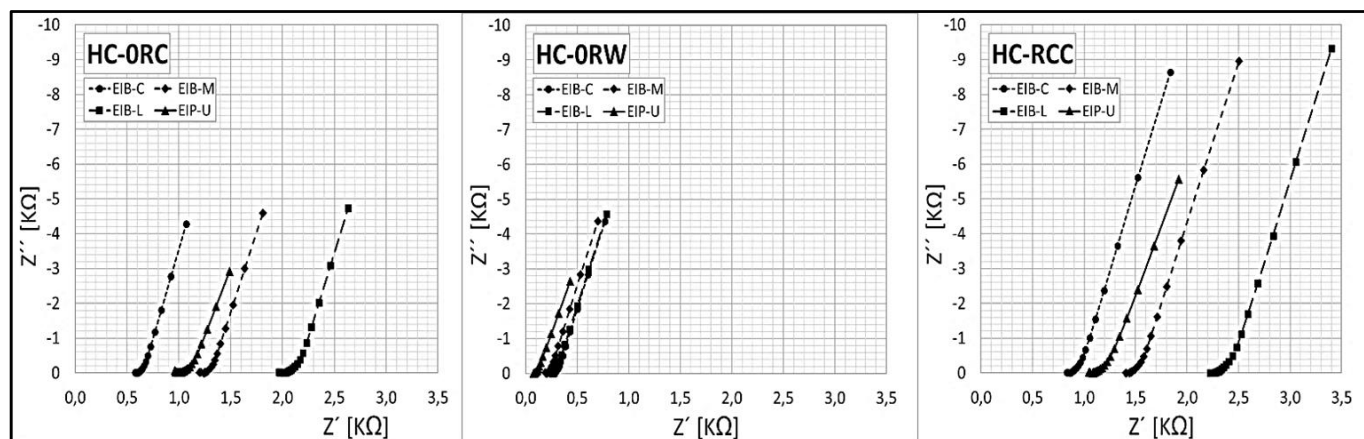


Figura 4 – Diagramas de Nyquist de mediciones realizadas en HC sobre las 12 configuraciones planteadas.

En términos generales se puede notar que:

- En todos los casos se pudo registrar la condición de componente imaginaria mínima ($Z'' \rightarrow 0$ entonces $|Z| \approx Z'$) la cual se visualiza como un “rebote” en la curva del diagrama de Nyquist y cuyo valor representa la resistencia eléctrica del electrolito (R_{RM}), es decir del hormigón. Diferentes autores (Mason et al., 2002; Woo et al., 2003; Ozyurt et al., 2006; Torrents et al., 2012) consideran que hacia la izquierda de R_{RM} (mayores frecuencias) el diagrama representa el comportamiento neto del electrolito, mientras que hacia la derecha de R_{RM} (menores frecuencias) la respuesta del diagrama representa una combinación del efecto de la resistencia del electrolito con efectos de procesos superficiales sobre los electrodos.
- Los registros de las impedancias se dan entre el WE y RE sin que la distancia entre el WE y CE tenga influencia. En la configuración ORW, cuando el distanciamiento entre WE y CE aumenta, los valores de R_{RM} (posición del “rebote” de la curva) no tienen una variación significativa ya que RE no modifica significativamente su posición respecto WE. En contrapartida en las configuraciones ORC y RCC la distancia entre el WE y RE varía y esto se refleja en los valores de R_{RM} registrados. En ORC, la distancia entre el RE independiente y el CE se mantiene constante mientras se varía la distancia entre el WE y RE. En RCC el ER y CE están conectados a un mismo electrodo y por lo tanto la distancia entre el RE y WE cambia en cada caso. De acuerdo con esto, configuraciones en donde el WE se ubica cerca del RE, como ORW, no resultan efectivas para detectar la presencia de fibras.
- Los registros de impedancia son mayores al utilizar la configuración RCC. Esto se debe a que la impedancia registrada con la configuración RCC, además de contemplar la resistencia del electrolito y el efecto de los procesos superficiales sobre el WE (caso de las configuraciones ORC y ORW), contempla también los efectos de los procesos superficiales sobre el CE. De igual manera, al utilizar electrodos tipo placa (EIP) los valores registrados de impedancia son menores que los registrados con electrodos tipo barra (EIB). Este efecto es netamente geométrico. Cuanto mayor es la superficie de los electrodos, mayor es la cantidad de corriente que puede circular. De acuerdo con la ley de Ohm, corrientes más grandes implican resistencias más bajas a potencial constante.

Descartando la configuración de conexión ORW, en las Figuras 5, 6 y 7 se muestra el efecto de la incorporación de fibras en hormigón. La Figura 5 se contrastan los diagramas de Nyquist de las configuraciones analizadas para cada

tipo de hormigón que contiene fibras. En la Figura 6 se contrastan los diagramas de Nyquist de los diferentes tipos de hormigón para cada una de las configuraciones analizadas. En la Figura 7 se contrastan los diagramas de Bode de los diferentes tipos de hormigón para cada una de las configuraciones analizadas.

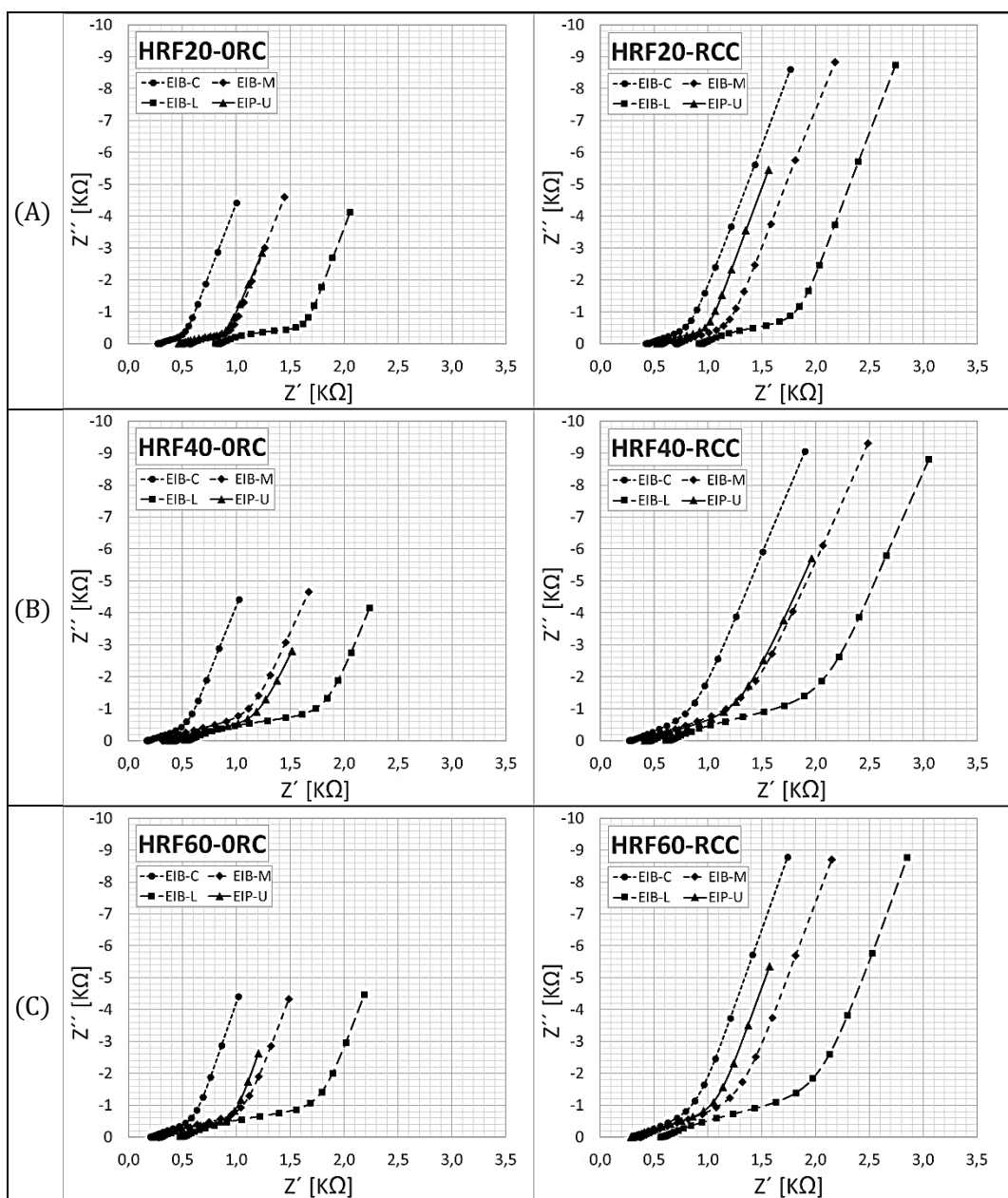


Figura 5 –Contraste de diagramas de Nyquist de configuraciones de interés en HRF evaluados.

(A) – Diagramas en HRF20. (B) – Diagramas en HRF40. (C) – Diagramas en HRF60.

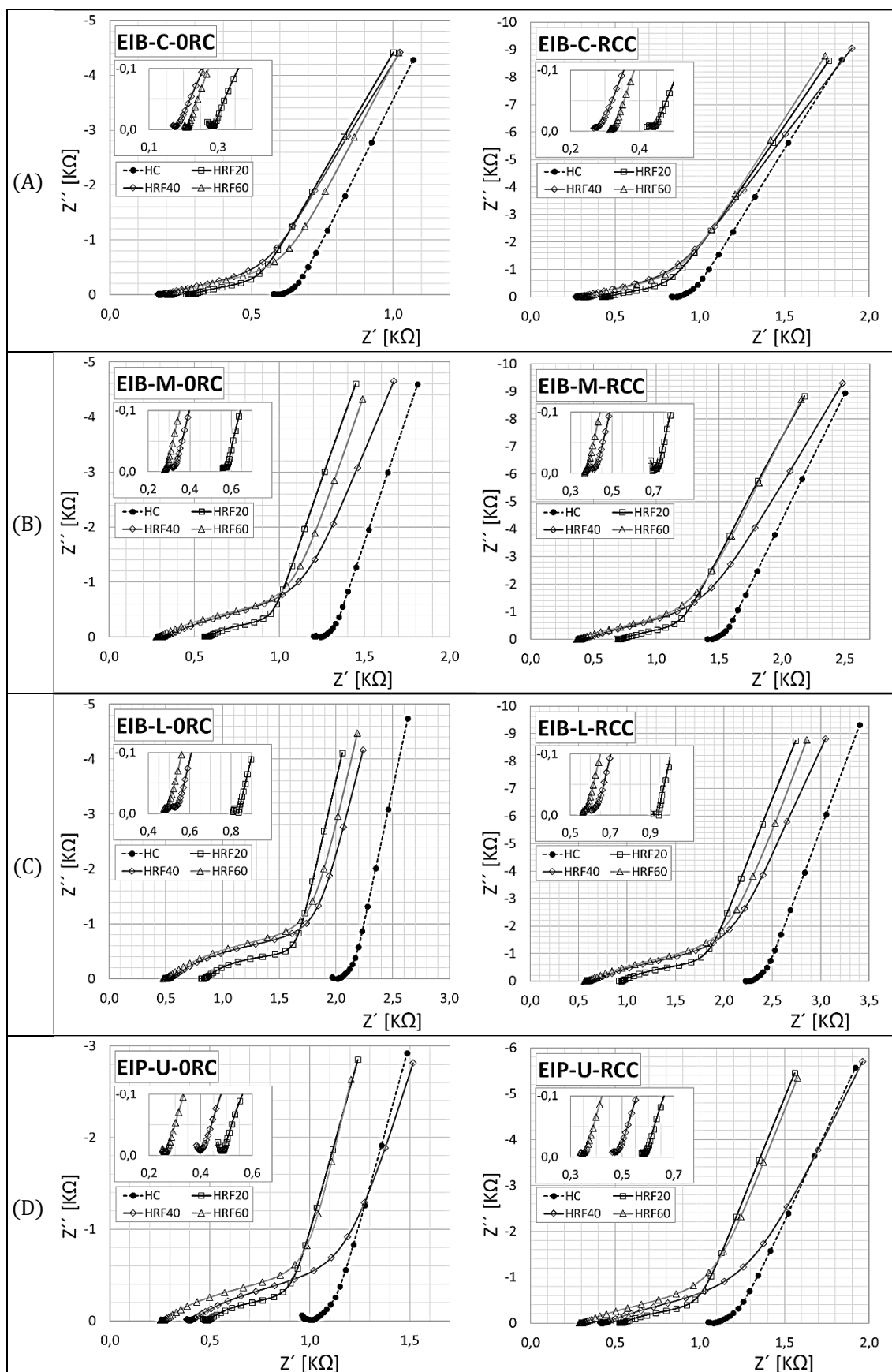


Figura 6 – Contraste de diagramas de Nyquist de hormigones evaluados bajo ocho configuraciones de medición. (A) – configuración EIB-C. (B) – Configuración EIB-M. (C) – Configuración EIB-L. (D) – Configuración EIP-U.

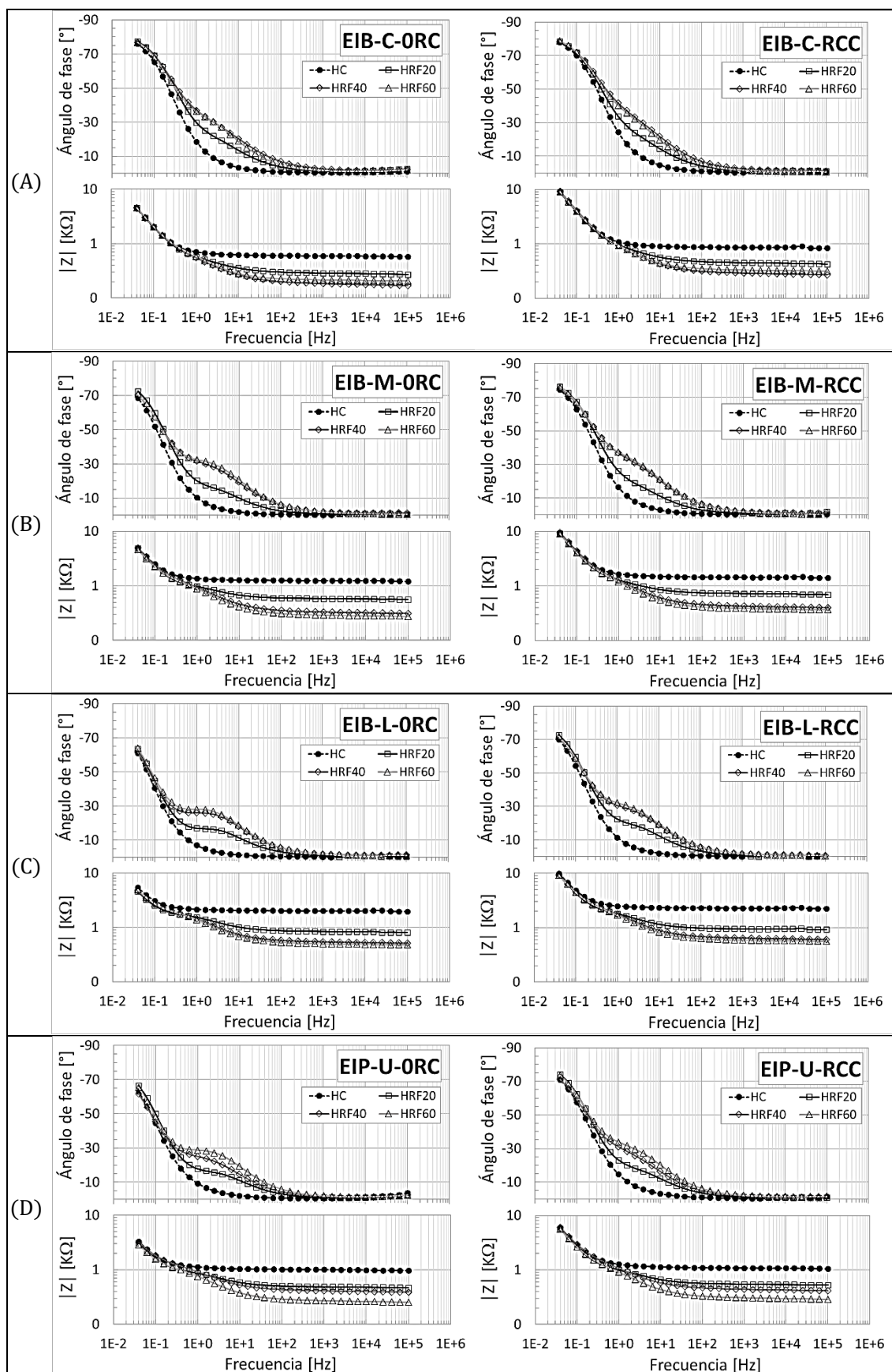


Figura 7 – Contraste de diagramas de Bode de hormigones evaluados bajo ocho configuraciones de medición. (A) – configuración EIB-C. (B) – Configuración EIB-M. (C) – Configuración EIB-L. (D) – Configuración EIP-U.

En todas las figuras presentadas se puede notar que la presencia de fibras en el hormigón modifica la forma de los diagramas. A frecuencias bajas, los diagramas de HRF muestran comportamiento similar a los diagramas de HC. Si analizamos que sucede a medida que la frecuencia aumenta, podemos notar que mientras la curva de HC avanza hacia el “rebote” del diagrama de Nyquist (condición $Z'' \rightarrow 0$) asociado a la resistencia del hormigón (electrolito), las curvas de HRF muestran un desvío del diagrama de Nyquist (quiebre en la curva) que desplaza la posición del “rebote” de la curva hacia valores de Z' más bajos. Es decir, la resistencia del electrolito se ve afectada por la presencia de las fibras. Esto también queda en evidencia en los diagramas de bode: A frecuencias altas, el $|Z|$ de los HRF es más bajo que el $|Z|$ del HC; a medida que bajan las frecuencias, el $|Z|$ y el ángulo de fase de los HRF varían mientras que en el HC se mantiene estable; finalmente a frecuencias bajas, se puede observar que el comportamiento de los diagramas es similar para todos los tipos de hormigones.

De acuerdo con estos resultados se reconocen los siguientes patrones en los diagramas de impedancia asociados a la presencia de fibras:

- **Reducción de la impedancia inicial asociada al electrolito ($Z'' \rightarrow 0$):** A altas frecuencias el “rebote” en el diagrama de Nyquist se da para valores de impedancia menores (menor valor de Z'). También se puede notar la diferencia de los valores de impedancia en módulo, entre HRF y HC, en los diagramas de Bode.
- **Desarrollo y estabilización de impedancia prematura asociada a las fibras:** A frecuencias mayores a 1 Hz, mientras que en HC no se observan cambios significativos de la impedancia inicial, en los HRF se puede notar un aumento prematuro (a partir de 100 Hz aproximadamente) que tiende a estabilizarse (entre 1 y 0,1 Hz), antes de aumentar por influencia de los electrodos. Esto queda en evidencia en las mesetas post “rebote” en los diagramas de Nyquist y en la meseta post incremento del ángulo de fase en los diagramas de Bode.
- **Transición en el aumento de impedancias del sistema:** En HRF, se observa que la impedancia prematura inicial asociada a las fibras se estabiliza y convive con el aumento inicial de impedancias asociado a los electrodos para un rango de frecuencias entre 1 y 0,1 Hz aproximadamente. Este período resulta de interés ya que los valores del $|Z|$ podrían estar asociados directamente a la resistencia del hormigón puro ya que tanto la influencia de los electrodos como de las fibras resultan mínimas.
- **Desarrollo inalterado de la impedancia del sistema a bajas frecuencias:** A bajas frecuencias ($< 0,1$ Hz) aumenta la impedancia de todo el sistema sin que la presencia de fibras tenga efecto sobre este comportamiento. El inicio del crecimiento de las impedancias, asociadas a los electrodos metálicos, se puede notar en el quiebre de las curvas de los diagramas de Nyquist hacia valores más altos de Z'' . A medida que baja la frecuencia, las impedancias aumentan de manera similar para todos los tipos de hormigones evaluados como se puede notar en los diagramas de Nyquist y Bode.

En términos de la sensibilidad de las mediciones, para detectar la influencia de la presencia de fibras de acero, se plantea que cuanto más claros sean los registros de los patrones de los diagramas planteados, más efectiva será una medición. En este sentido, al evaluar los resultados para las diferentes configuraciones geométricas podemos observar que:

- Mayor distancia entre electrodos genera registros más efectivos. Esto se puede notar en los diagramas de Nyquist de la Figura 5 y los diagramas de Bode de la Figura 7, en donde se observa que la configuración con mayor distancia entre el WE y RE (EIB-L) registra mejor el aumento prematuro y la estabilización de las impedancias asociados a fibras respecto a las otras configuraciones con menor distanciamiento. En el caso de la configuración EIB-C, con la menor distancia entre electrodos considerada, la estabilización no se llega a observar en ningún caso.
- Ante distanciamientos similares entre electrodos, electrodos con más superficie obtienen registros más efectivos. Esto se puede notar al comparar las configuraciones EIB-M (electrodos tipo barra) con las configuraciones EIP-U (electrodos tipo placa) bajo la configuración de conexión ORC.

Por otro lado, en términos de configuración de conexión, el sistema de tres electrodos genera mediciones más efectivas bajo todas las configuraciones geométricas evaluadas. Se puede notar que con RCC solo se alcanza la estabilidad de la impedancia asociada a fibras con el mayor distanciamiento evaluado (EIB-L), mientras que con ORC se alcanza la estabilidad en todas las configuraciones geométricas evaluadas.

Las Figuras 8 y 9 evalúan la influencia de la humedad y el tipo de EIS respectivamente, utilizando las mediciones realizadas en HRF60 con la configuración geométrica EIP-U y las configuraciones de conexión ORC y RCC. Se puede notar que la presencia de menor humedad en el hormigón (más seco) genera una leve mejoría en la sensibilidad para detectar la estabilización de la impedancia asociada a las fibras sin generar grandes cambios en las impedancias medidas. Si bien la configuración de conexión ORC sigue siendo más efectiva, la configuración RCC puede ofrecer información suficiente para evaluar la presencia de fibras y es de aplicación más sencilla a la hora de considerar la utilización de electrodos externos.

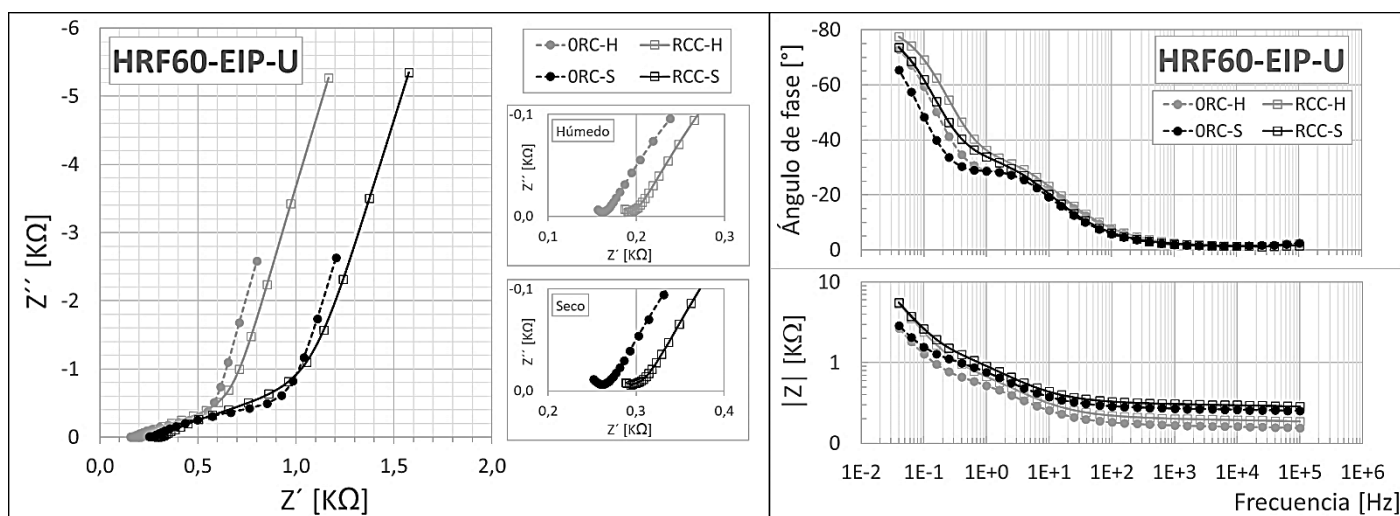


Figura 8 – Diagramas de Nyquist y Bode en HRF60 con variando de humedad bajo configuración EIP-U.

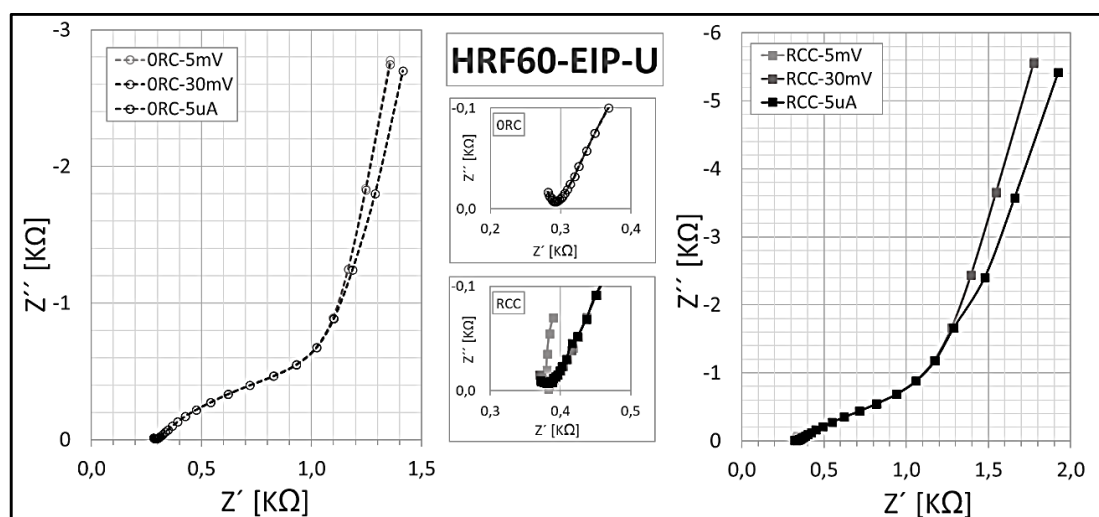


Figura 9 – Diagramas de Nyquist en HRF60 utilizando PEIS (5 y 30mV) y GEIS (5μA) bajo configuración EIP-U.

Finalmente, al analizar el tipo de EIS utilizada, a partir de la Figura 9, se puede notar que tanto la utilización de PIES (imposición de potencial alterno) como GEIS (imposición de corriente alterna) generan registros similares para los rangos de frecuencia de interés para evaluar la presencia de fibras (>0,1 Hz). A frecuencias menores los registros de impedancia obtenidos con GEIS muestran un apartamiento hacia valores de Z' mayores (más notorio con la

configuración RCC), que pueden estar asociados con la polarización de los electrodos al aumentar el tiempo de exposición a las corrientes.

Conclusiones

Se analizaron diferentes variables geométricas, de conexión y de ejecución de ensayos EIS para evaluar su viabilidad como técnica no destructiva capaz de detectar la presencia de fibras de acero en el hormigón. En función a los resultados obtenidos se concluye que:

1. La EIS, ya sea GEIS o PEIS, tiene la capacidad de detectar la presencia de fibras de acero en el hormigón.
2. Los diagramas de Nyquist y Bode muestran cuatro comportamientos patrones que pueden ser utilizados para evaluar la presencia de fibras: la reducción de la impedancia inicial asociada al electrolito, el desarrollo y estabilización de impedancia prematura asociada a la presencia de fibras, transición en el aumento de impedancia del sistema y el desarrollo inalterado de la impedancia del sistema a bajas frecuencias.
3. En términos de configuración geométrica, mayor superficie de electrodos y mayor distancia entre WE y RE generan registros más efectivos
4. En términos de configuraciones de conexión, sistemas de tres electrodos con RE independiente (ORC) generan registros más efectivos. Bajo un diseño experimental adecuado, sistemas de dos electrodos (RCC) pueden generar registros efectivos.
5. Hormigones más secos generan leves mejorías en la efectividad de las mediciones.

Referencias

- ACI 544.6R-15. (2015). Report on design and construction of steel fiber-reinforced concrete elevated slabs. American Concrete Institute.
- ACI 544.7R-16. (2016). Report on design and construction of fiber reinforced precast concrete tunnel segments. American Concrete Institute.
- ASTM C1399. (2015). Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber reinforced concrete. ASTM International. DOI: 10.1520/C1399_C1399M-10R15
- ASTM C1550. (2020). Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel). ASTM International. DOI: 10.1520/C1550-20
- ASTM C1609. (2012). Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM International. DOI: 10.1520/C1609_C1609M-12
- Barsoukov, E & Macdonald, J. (2005). Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Wiley Library. DOI:10.1002/9781119381860
- Conforti, A.; Zerbino, R.; 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. DOI:10.1002/suco.201800079
- Duffo, G. & Farina, S. (2016). La corrosión de estructuras de hormigón armado. Editorial Académica Española.
- EN 14651. (2005). Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength. European Committee for Standardization.
- fib Bulletin 83. (2017). Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete. International Federation for Structural Concrete. DOI: 10.35789/fib.BULL.0083
- fib Model Code for Concrete Structures. (2012). International Federation for Structural Concrete.
- Ford, S.; Shane, J. & Mason, T. (1998). Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system. *Cement and Concrete Research*, 28 (12), 1737-1751, DOI:10.1016/S0008-8846(98)00156-2
- Gomez, E.; Leporace-Guimil, B.; Conforti, A.; Plizzari, G.; Duffo, 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/10.1002/suco.202200302>
- Lazanas, A. & Prodromidis, M. (2023). Electrochemical Impedance Spectroscopy – A Tutorial. *ACS Measurement Science*, 3 (3), 162-193. DOI:10.1021/acsmeasuresciau.2c00070
- Mason, T.; Campo, M.; Hixon, A. & Woo, L. (2002). Impedance spectroscopy of fiber reinforced cement composites. *Cement and concrete composites*, 24 (5), 457–465. DOI:10.1016/S0958-9465(01)00077-4
- Minelli, F. & Plizzari, G. (2013). On the effectiveness of steel fibres as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 110 (3), 379-389. DOI:10.14359/51685596

- Orazem, M. & Tribollet, B. (2020). A Tutorial on Electrochemical Impedance Spectroscopy. *ChemTexts*, 6 (1), Article N°12. DOI:10.1007/s40828-020-0110-7
- Orazem, M. & Tribollet, B. (2008). *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Wiley Library. DOI:10.1002/9780470381588
- Ozyurt, N.; Mason, T. & Shah, S. (2006). Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research*, 36 (9), 1653-1660. DOI:10.1016/j.cemconres.2006.05.026
- Sagoe-Crentsil, K.; Glasser, F. & Irvine, J. (1992). Electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion as determined by impedance spectroscopy. *British Corrosion Journal*, 27 (2), 113-118. DOI: 10.1179/000705992798268774
- Tiberti, G.; Minelli, F.; Plizzari, G. (2015). Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: a comprehensive experimental study. *Cement and Concrete Research*, 68 (1), 24-34. DOI:10.1016/j.cemconres.2014.10.011
- Torrents, J.; Blanco, A.; Pujadas, P.; Aguado, A.; Garcia, P. & Sanchez-Moragues, M. (2012). Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials & Structures*, 45 (1), 1577–1592 (2012). DOI:10.1617/s11527-012-9858-6
- Vennesland, Ø.; Raupach, M. & Andrade, C. (2007). Recommendation of Rilem TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete – measurements with embedded probes. *Materials & Structures*, 40 (1), 745–758. DOI:10.1617/s11527-006-9219-4
- Woo, L.; Wansom, S.; Hixson, A.; Campo, M. & Mason, T. (2003). A universal equivalent circuit model for the impedance response of composites. *Journal of Materials Science*, 38 (1), 2265–2270. DOI:10.1023/A:1023773424538
- Zerbino R. (2022). Hormigón reforzado con fibras. AATH Serie Hormigones Especiales.