



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

DURABILIDAD EN AMBIENTE SALINO DEL CONCRETO REFORZADO FABRICADO CON AGREGADO GRUESO RECICLADO

O.H. Acuña Agüero¹, S.P. Arredondo Rea¹, F.G. Cabrera Covarrubias², J.L. Almaral Sánchez¹, J.M. Gómez Soberón², R. Corral Higuera¹

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis. Fuente de Poseidón y Ángel Flores, Ciudad Universitaria, C.P. 81223. Los Mochis, Sinaloa, México.

² Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Avenida Gregorio Marañón 44-50, Z.C. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

Un desafío urgente para nuestra sociedad es el cuidado del medio ambiente mediante el desarrollo sustentable de cada industria. Debido a que el concreto es el material de mayor demanda en el mundo, en la industria de la construcción, algunas estrategias importantes y contributivas al desarrollo sustentable son incrementar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, reducir el consumo de energía y materias primas así como reciclar y reutilizar materiales de desecho. El objetivo de este estudio, fue evaluar la influencia que ejerce el uso de diferentes porcentajes (0, 25, 50 y 100) de agregado grueso reciclado en la resistencia y durabilidad del concreto reforzado. La durabilidad fue evaluada en función de la densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo en probetas expuestas a ambiente marino. De los resultados obtenidos se concluye que el concreto fabricado con 25% de agregado grueso reciclado mantiene una durabilidad similar a la del concreto convencional.

Palabras Clave: Concreto, agregado reciclado, sustentabilidad, durabilidad, medio ambiente

ABSTRACT

An urgent challenge for our society is the care of the environment through sustainable development of each industry. Because concrete is the material most in demand in the world, in the construction industry, some important strategies and sustainable development are contributory to increase the durability of reinforced concrete structures, reduce the consumption of energy and raw materials as well how to recycle and reuse waste materials. The aim of this study was to evaluate the influence of using different percentages (0, 25, 50 and 100) of recycled coarse aggregate in the strength and durability of reinforced concrete. The durability was evaluated based on the corrosion current density of reinforcing steel specimens exposed to marine environment. From the results obtained it is concluded that the concrete made with 25% recycled coarse aggregate has a durability similar to conventional concrete.

Key words: Concrete, recycled aggregate, sustainability, durability, environment

INTRODUCCIÓN

En una mezcla de concreto, los agregados constituyen aproximadamente el 70% del volumen, por lo que, en todo el mundo grandes cantidades de roca triturada, grava y arena son extraídas, procesadas y transportadas, generando costos económicos y ambientales. El uso de agregados de concreto reciclado (ACR) para la elaboración de concreto inicio al fin de la segunda guerra mundial. Escombros obtenidos de la demolición del concreto de pavimentos, caminos, cimentaciones y estructuras de edificios fueron reutilizados satisfactoriamente alrededor del mundo [1]. A partir de entonces se ha investigado acerca del tema; sin embargo, el número de investigaciones se ha incrementado significativamente a partir del año 2000 cuando retomaron fuerza los términos “calentamiento global” y “desarrollo sustentable”. El interés de investigar y utilizar los ACR para fabricar nuevo concreto se debe a que el concreto es un material que se demanda al ritmo del crecimiento poblacional, y a que el uso de ACR representa una alternativa a los agregados naturales y tiene potencial de explotación por las grandes cantidades de residuos de construcción y demolición que se generan anualmente en todo el mundo.

Por otro lado, debido a la necesidad de garantizar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, principalmente contra la corrosión del acero por ser una de las patologías más recurrentes, se observa una tendencia de incorporación de conceptos más avanzados de durabilidad en las bases del diseño de las normativas. Existen muchas propuestas basadas en el modelado de mecanismos de ataque para la predicción de la vida útil [2,3]. No obstante, a pesar de la evidente importancia de tenerse en cuenta propiedades reales en la estimación de la durabilidad para evitar importantes errores en los resultados, solamente algunos de ellos están basados en las “prestaciones” del concreto y son llamados indicadores de durabilidad [4,5]. Uno de esos indicadores de durabilidad es la resistividad eléctrica del concreto (ρ), inversa de la conductividad y se trata de una medida volumétrica de la resistencia electrolítica (R_e) del material, que mediante la ley de Ohm se expresa como la relación entre el voltaje y la corriente aplicada ($R_e = V/I$). Ha sido desarrollada inicialmente en el campo de la geofísica [6] y es una propiedad que refleja la capacidad del medio poroso para el transporte de carga eléctrica en un volumen finito o semi-infinito. En la Figura 3 se esquematiza el proceso de corrosión del acero de refuerzo, donde la superficie del acero corroído funciona como un electrodo mixto que está compuesto de ánodos y cátodos eléctricamente conectados a través del mismo cuerpo del acero, sobre el cual toma lugar un par de reacciones anódica y catódica.

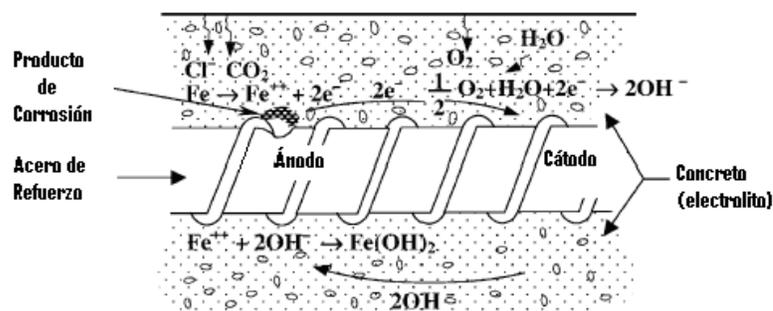


Figura 1. Ilustración esquemática de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto, como un proceso electroquímico.

La solución de poro del concreto funciona como un medio acuoso, es decir, un electrolito por donde los iones transportan carga eléctrica. Así, ρ resulta ser un parámetro clave en el proceso de corrosión porque refleja la capacidad de transportar carga eléctrica en los iones disueltos en la fase acuosa contenida en los poros del concreto.

Algunas investigaciones sobre concreto con agregado reciclado (CAR) demuestran que el uso de ACR incrementa la porosidad del nuevo concreto [7-9], misma que está ligada a ρ por representar esta las rutas de conductividad iónica [10-12]. Es evidente y en algunas investigaciones se ha corroborado [13,14] que ρ es inversamente proporcional a la densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo (i_{corr}) por lo que resulta ser un parámetro fundamental en el proceso de corrosión electroquímica del acero embebido en el concreto. Con el objetivo de determinar la influencia que ejerce el uso del ACR en la resistividad eléctrica del concreto y en la densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo, se evaluaron con técnicas electroquímicas tales parámetros de durabilidad variando el porcentaje de agregado grueso de concreto reciclado (AGCR) contenido en el concreto.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

El cemento utilizado fue Cemento Portland Compuesto de resistencia 30 (CPC 30R), los requerimientos físico-químicos se estipulan en la norma NMX-C-414 y equivale al cemento Portland ordinario Tipo III que establece ASTM C150. El agregado grueso natural utilizado tiene una masa específica relativa de 2.5, una masa volumétrica seca de 1614.58 kg/m³ y un tamaño máximo nominal de 25 mm. Con las pruebas realizadas en el laboratorio resultó una absorción de 0.52% y una humedad de 0.28%. El agregado fino tiene una masa específica relativa de 2.43, una masa volumétrica seca de 1609.09 kg/m³ y modulo de finura de 3. Con las pruebas realizadas en el laboratorio resultó una absorción de 4.08% y una humedad de 6.15%. Los agregados naturales se obtuvieron de la planta Cemex Concretos. El AGCR procedió de la trituración de probetas de laboratorio con resistencia a compresión de 20 MPa; su densidad relativa fue de 2.1, su absorción de 6.25%, su masa volumétrica de 1383 kg/m³ y humedad de 1.26%.

La distribución granulométrica de los agregados utilizados se muestra en la Figura 2, donde se puede observar que el agregado grueso se sale de los límites ASTM en los tamaños mayores. Esta distribución es la que utiliza la planta concretera para tener un mayor volumen de agregado y disminuir el consumo de cemento sin sacrificar el desempeño del concreto.

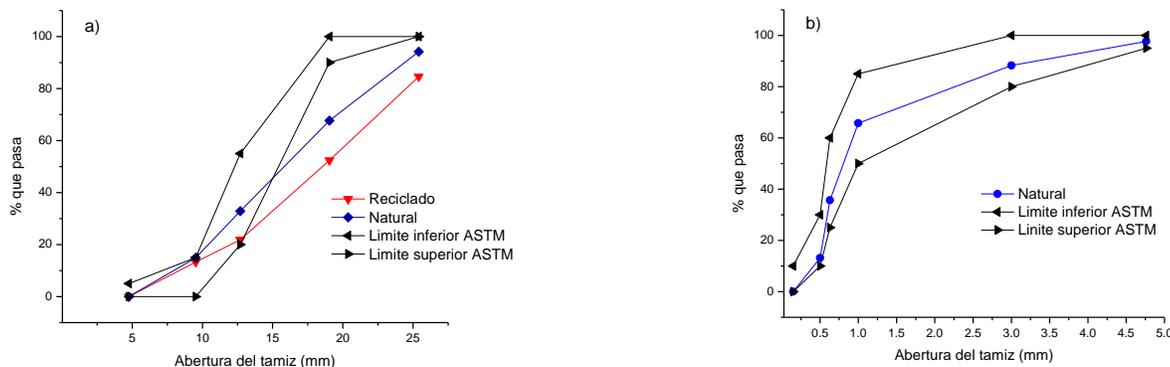


Figura 2. Distribución granulométrica de los agregados: a) Grueso, b) Fino

Para evaluar los parámetros de durabilidad del concreto reforzado fabricado con AGCR, se diseñaron 4 mezclas con relación agua-cemento de 0.5: 1) 100 % AGCR, 2) 50 % AGCR, 3) 25% AGCR y 4) 0% AGCR.

Probetas y ensayos

Para evaluar los parámetros de durabilidad, se fabricaron dos probetas cilíndricas (longitud=200 mm, diámetro=100 mm) de cada mezcla sometidas a curado durante 28 días por inmersión en agua. A cada probeta se le embebió una barra corrugada de acero al carbono de 13 mm de diámetro con área expuesta de 39 cm^2 y con 45 mm de recubrimiento. El diseño de las probetas se muestra en la Figura 3. Después del tiempo de curado, y para acelerar el proceso de ingreso de cloruros, las probetas se sumergieron en una solución acuosa con 3.5% de NaCl. El proceso de inmersión en esta solución se realizó en ciclos semanales de humectación (se mantuvieron sumergidas las probetas por 5 días) – secado (4 días en horno a 40° C). Al final del periodo de inmersión, se llevaron a cabo los ensayos electroquímicos para determinar i_{corr} y ρ .

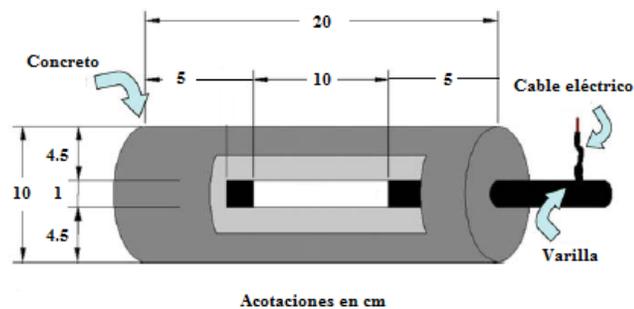


Figura 3. Diseño de la probeta para evaluación de parámetros.

Para llevar a cabo los ensayos electroquímicos se utilizó el arreglo mostrado en la Figura 4 y se hicieron mediante un potenciostato-galvanostato de ACM Instruments Field Machine 1525 con un electrodo de referencia (ER) de Ag/AgCl (plata/cloruro de plata), un electrodo auxiliar (EA) de acero inoxidable y usando el acero de refuerzo como electrodo de trabajo (ET).

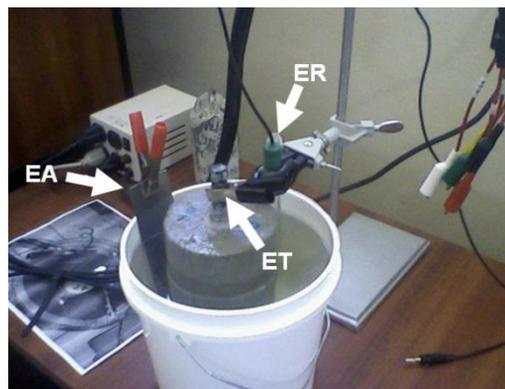


Figura 4. Arreglo experimental para los ensayos electroquímicos

Resistencia a la Polarización Lineal (RPL).

Para determinar i_{corr} , se realizó la prueba de RPL con un barrido de potencial de -20 mV a 20 mV con una velocidad de barrido de 10 mV/min. La resistencia a la polarización (R_p) se determinó de la curva potencial contra corriente obtenida del ensayo de RPL, tomando como valor de R_p la pendiente de la parte lineal de dicha curva, tal como se muestra en la Figura 5.

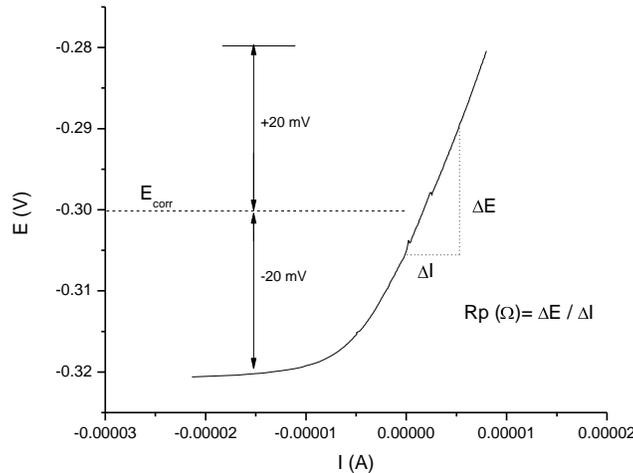


Figura 5. Curva típica de un ensayo de RPL

Una vez obtenida la R_p , mediante la ecuación (1) deducida por Stern y Geary [15], se determinó i_{corr} , donde B es una constante que puede variar de 0.026 V a 0.052 V, y para este caso se consideró de 0.026 V.

$$i_{corr} = B/R_p \quad (1)$$

Finalmente se determinó la velocidad de corrosión (V_{corr}) o penetración de la corrosión en el acero de refuerzo mediante la ecuación 2.

$$V_{corr} (mm/año) = 0.0116 i_{corr} \quad (2)$$

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE).

Para determinar ρ se realizó la prueba de EIE con los parámetros de prueba de 20 mV de amplitud para mantener la linealidad del sistema en un rango de frecuencias de 100000 Hz a 0.1 Hz. La Resistencia electrolítica (R_e) se obtuvo del cambio de pendiente a altas frecuencias de los diagramas de Nyquist, como es mostrado en la Figura 6.

Una vez obtenida la R_e se determinó ρ mediante la ecuación (3).

$$R_e = \rho C_c ; \quad \rho = R_e / C_c \quad (3)$$

Donde C_c es una constante de celda que depende de la geometría y condiciones del cuerpo conductor [16].

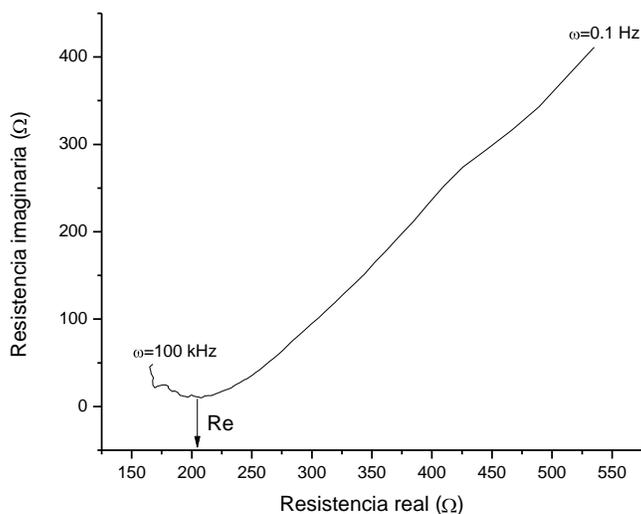


Figura 6. Diagrama de Nyquist típico de un ensayo de EIE a altas frecuencias

RESULTADOS

La ρ en función del tiempo de exposición que se muestra en la Figura 7 permite confirmar que el uso del AGCR produce incrementos en la conductividad eléctrica del concreto y por lo tanto mayor susceptibilidad a la corrosión tendrá el acero embebido en el. La ρ de los especímenes con 50 y 100% de AGCR no supera los 5 k Ω -cm. En cuanto al espécimen con un 25% de AGCR, es destacable la similitud de su ρ con la del espécimen de referencia superando ambos, en la semana cinco, los 10 k Ω -cm lo cual significa en una ρ hasta cuatro veces más grande que los sistemas con 50 y 100% AGCR.

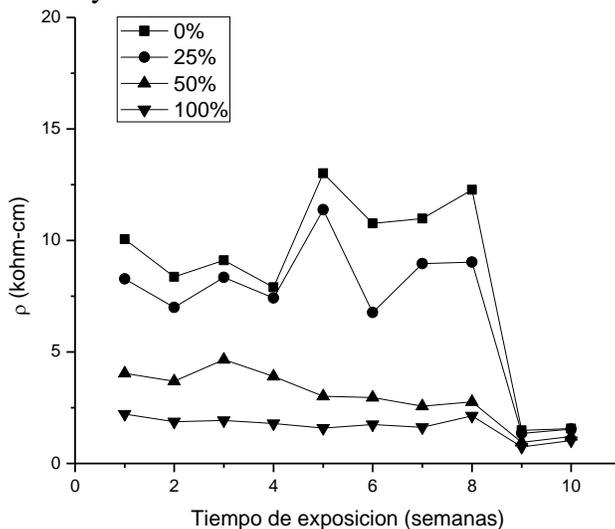


Figura 7. Evolución de la ρ en función del tiempo de exposición.

El hecho de que la ρ se vea disminuida al aumentar la cantidad de AGCR se atribuye a que la porosidad efectiva (poros continuos por donde se lleva a cabo la conductividad iónica) del concreto se ve incrementada conforme crece la cantidad de AGCR utilizado. El incremento de la porosidad en función de la cantidad de AGCR ha sido bien documentado en una investigación

anterior [7]. La caída drástica de la ρ en la semana nueve, para todos los sistemas, se atribuye a la descomposición térmica (deshidratación) de los principales compuestos de la matriz cementante (silicatos de calcio hidratados e hidróxido de calcio) por un calentamiento involuntario excesivo de las probetas, durante el secado, a temperatura de aproximadamente 300 °C. La deshidratación de estos productos deja huecos y se traduce en un incremento abrupto en la porosidad dando lugar a conductividades iónicas mayores.

Los resultados de i_{corr} se presentan en la Figura 8, permitiendo comparar la resistencia a la corrosión de los sistemas acero-concreto bajo estudio.

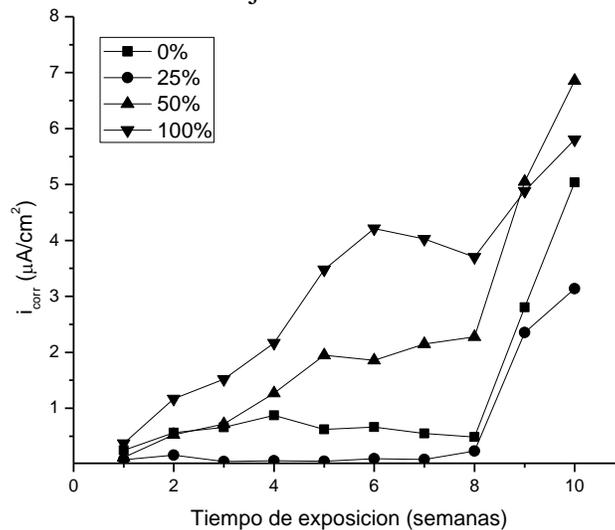


Figura 8. Variación de i_{corr} en función del tiempo de exposición

Se puede observar en la Figura 8 que tanto el sistema con 25% de AGCR como el sistema de referencia presentan comportamientos muy similares manteniéndose en todo momento en estado pasivo, mientras que en los sistemas con 50% y 100% de AR se incrementó significativamente i_{corr} en la semana cuatro y dos, respectivamente, además de mantener una tendencia ascendente.

Con los resultados obtenidos se puede apreciar que i_{corr} es inversamente proporcional a ρ y esta última dilucida de forma más nítida el efecto de la cantidad de AGCR en la conductividad iónica de especies en el concreto porque no es susceptible a concentración de oxígeno disuelto, ni al estado superficial, tipo y forma de óxidos del acero de refuerzo; cosa que no sucede con i_{corr} y por ello la variabilidad de los resultados a los primeros ciclos y entre los sistemas con 0 y 25% de AGCR.

La correlación entre estos dos parámetros se muestra en la Figura 9.

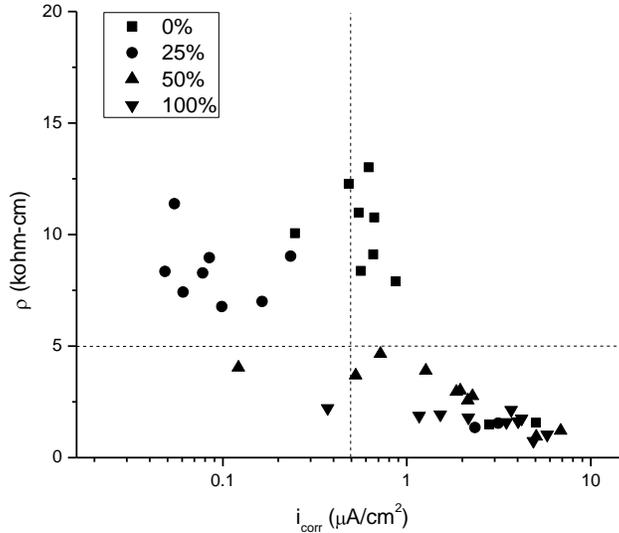


Figura 9. Correlación de ρ con i_{corr}

La relación ρ - i_{corr} mostrada en la Figura 9 es similar a la encontrada en mediciones realizadas en estructuras de concreto reforzado existentes [17]. De los resultados mostrados en la Figura 9, puede establecerse que para mediciones en concreto saturado con solución salina cuando ρ no supera los 5 $\text{k}\Omega\text{-cm}$ se presentan valores de i_{corr} predominantemente superiores a los $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ representando esto de moderadas a altas velocidades de corrosión del refuerzo; cuando ρ sobrepasa los 5 $\text{k}\Omega\text{-cm}$ se encontraron valores de i_{corr} predominantemente inferiores a los $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lo que se considera como bajas velocidades de corrosión del refuerzo. Estos valores umbrales son consistentes con los encontrados por Andrade y Alonso [17].

Los valores de i_{corr} se convirtieron a V_{corr} mediante la ecuación 2 y los resultados se muestran en la Figura 10.

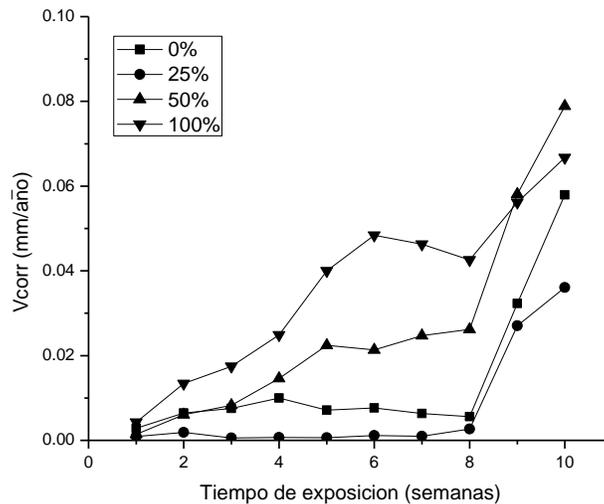


Figura 10. Velocidad de corrosión del acero en función del no. de ciclos.

A partir de los valores de V_{corr} en la semana ocho, considerando que el nivel de corrosión se mantiene constante y que cuando el acero de refuerzo reduce en un 5% su diámetro inicial se

producen agrietamientos mayores en el concreto y termina su vida útil, se determinó esta última a tal nivel de daño para cada mezcla de prueba y los resultados son mostrados en la Figura 11.

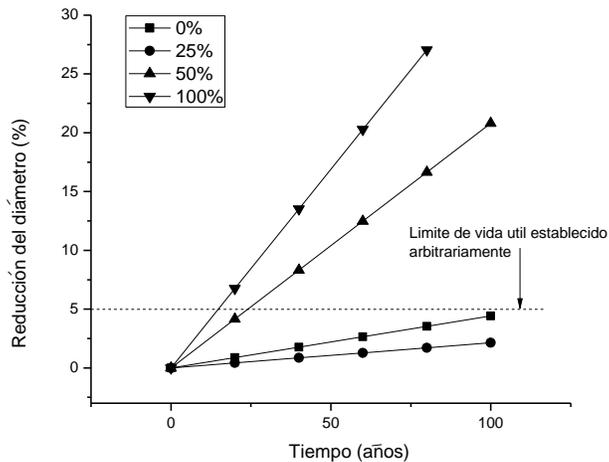


Figura 11. Vida útil en función del deterioro por corrosión

En la Figura 11, puede observarse una diferencia importante entre la durabilidad del sistema con 25% de AGCR con el de los sistemas con 50% y 100% de AGCR. Mientras que con un 25% de AGCR la durabilidad sobrepasaría los 100 años, con 50% y 100% apenas alcanzaría los 25 años. Esto demuestra que usar AGCR en cantidades superiores al 25% se traduce en una reducción de vida útil significativa del sistema concreto-acero.

CONCLUSIONES

- En lo que respecta a densidad de corriente de corrosión del acero de refuerzo, tanto el sistema con 25% de AGCR como el sistema de referencia presentaron comportamientos muy similares manteniéndose predominantemente por debajo de los $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Los sistemas con 50% y 100% de AGCR cambiaron superaron este umbral en el ciclo cuatro y dos, respectivamente, además de que su densidad de corriente de corrosión mantuvo una tendencia ascendente.
- En cuanto a resistividad eléctrica del concreto, hubo similitud entre el concreto de referencia y el concreto con 25% de AGCR superando ambos, en el ciclo 5, los $10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$. La resistividad de estos concretos llegó a ser hasta cuatro veces más grande que la de los concretos con 50 y 100% AGCR.
- Se corroboró que la densidad de corriente de corrosión del acero es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica del concreto, y para las condiciones experimentales de este estudio, se proponen valores umbrales de $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para la primera y de $5 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ para la segunda.
- Con un 25% de AGCR la durabilidad del concreto reforzado sería muy similar al concreto convencional y hasta cuatro veces superior que el concreto con 50% y 100% de AR.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma de Sinaloa por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través de su infraestructura.

REFERENCIAS

- [1] Olorunsogo, F. and N. Padayachee, (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32(2): p. 179-185.
- [2] Page C.L., Short, N.R., El Tarras, A., (1981). Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 11(3): p. 395-406.
- [3] Tuutti, K., (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete research Institute.
- [4] Keddam, M., Takenouti, H., Nóvoa, X.R., Andrade, C., Alonso, C., (1997). Impedance measurements on cement paste. *Cement and Concrete Research*, 27(8): p. 1191-1201.
- [5] Baroghel-Bouny, V., Sato, R., Fujimoto, Y., Dohi, T, (2004). Durability indicators: a basic tool for performance-based evaluation and prediction of reinforced concrete durability. *Proceedings of international seminar on durability and lifecycle evaluation of concrete structures*.
- [6] Wenner, F., (1915). A method for measuring earth resistivity. National Bureau of Standards, USA.
- [7] Gómez-Soberón, J., (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregates an experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8): p. 1301-1311.
- [8] Poon, C., et al., (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1): p. 31-36.
- [9] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of concrete research*, 58 (10): p. 683-690.
- [10] P.J. Tumidajski, A.S. Shumacher, S. Perron, P. Gu, J.J. Beaudoin, (1996). On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, 26 (4): p. 539-544.
- [11] Tumidajski, P.J., (2005). Relationship between resistivity, diffusivity and microstructural descriptors for mortars with silica fume. *Cement and Concrete Research*, 35 (7): p.1262-1268.
- [12] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, O.E. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, M. Raupach, (2000). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33 (12): p. 603-611.
- [13] Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S.P., Neri-Flores, M.A., Gómez-Soberón, J.M., Almaral-Sánchez, J.L., Castorena-González, J.H., Martínez-Villafañe, A., Almeraya-Calderón, F., (2011). Chloride ion penetrability and Corrosion Behavior of Steel in Concrete with Sustainability Characteristics. *International Journal of Electrochemical Science*, 6 (3): p. 958-970.
- [14] Fajardo, G., Valdez, P., Pacheco, J., (2009). Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides. *Construction and Building Materials*, 23 (2): p. 768-774.
- [15] Stern, M., Geary, A., (1957). Electrochemical polarization. *Journal of the electrochemical society*, 104 (1): p. 56-63.
- [16] Torrents, J., J. Roncero, et al. (1998). Utilization of impedance spectroscopy for studying the retarding effect of a superplasticizer on the setting of cement. *Cement and Concrete Research*, 28(9): P. 1325-1333.
- [17] Andrade, C., Alonso, C., (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10 (5): p. 315-328.