

# Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios

## Chloride corrosion of embedded reinforced steel on concrete elaborated from recycled coarse aggregates and supplementary cement materials

Ramón Corral H.<sup>1\*</sup>, Susana Arredondo R.<sup>\*</sup>, Jorge Almaral S.<sup>\*</sup>, José Gómez S.<sup>\*\*</sup>

\* Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa. MÉXICO

\*\* Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. ESPAÑA

Fecha de Recepción: 30/10/2012

Fecha de Aceptación: 30/01/2013

PAG 21 - 35

### Resumen

Como estrategias contributivas de sustentabilidad en la industria del concreto, en la actualidad se está investigando en mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, como así también en el reemplazo parcial o total de sus componentes por materiales reciclados. En el caso de las barras de acero, la corrosión se considera el principal problema de durabilidad del concreto reforzado. En esta investigación, se utilizó agregado grueso de concreto reciclado y materiales cementantes suplementarios subproductos de procesos industriales tales como las cenizas volantes y el humo de sílice para la fabricación de concretos con características de sustentabilidad y para la evaluación de su comportamiento ante la exposición a cloruros. De los especímenes de prueba resultantes, se determinaron los parámetros de resistencia a compresión, resistividad eléctrica, resistencia a la transferencia de carga y resistencia a la penetración del ión cloruro, que especifican los mínimos de las propiedades exigibles a los concreto en acuerdo a normativa para garantizar su durabilidad ante la acción de los cloruros. De los resultados obtenidos, se concluye que el concreto fabricado con 100% de agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios mejora su desempeño, en cuanto a resistencia y durabilidad al ser comparado con el concreto convencional.

**Palabras Clave:** Concreto reciclado, corrosión, resistividad eléctrica, espectroscopía de impedancia electroquímica, penetración de cloruros

### Abstract

*As a result of contributive and sustainable strategies on concrete industry, researches are presently being developed, which are focused on improving durability of reinforced concrete structures as well as partially or completely replacing their components by recycled materials. In the case of steel bars, corrosion is considered as the major durability menace to reinforced concrete. The present research employed coarse aggregate from recycled concrete and supplementary cement materials, which are byproducts of industrial processes, such as fly ashes and silica fume, for the elaboration of sustainable concretes and for the evaluation of their behavior faced to chlorides exposure. Compressive resistance, electric resistivity, loading transfer resistance and ion chloride permeability resistance are the parameters which were determined from the resulting test specimens, thus specifying the minimum required properties for concrete, in accordance with regulations that guarantee its durability faced to chloride actions. From results obtained it is concluded that concrete elaborated using a 100% of recycled coarse aggregate and supplementary cement materials improves its behavior as far as resistance and durability are concerned, in comparison to conventional concrete.*

**Keywords:** recycled concrete, corrosion, electric resistivity, electro-chemical impedance spectroscopy, chloride permeability

## 1. Introducción

Como causa del importante impacto ambiental que provoca el proceso de fabricación del concreto y como contribución en la sustentabilidad de esta industria, en la actualidad se están implementando mejoras de su durabilidad, así como también, el reemplazo de sus componentes por materiales reciclables alternativos. Entre los materiales alternativos más utilizados en la fabricación de concreto están los que reemplazan parcialmente al cemento Portland (Materiales Cementantes Suplementarios [SCM]) como el humo de sílice (SF), la ceniza volante (FA) y la escoria de alto horno; en cuanto a los agregados, los Agregados de Concreto Reciclado (RCA) se están empleando como reemplazo de los agregados naturales.

## 1. Introduction

*As a result of the significant environmental impact caused by the concrete elaboration process and as contributive sustainability measures in this industry, improvements are presently being implemented to concrete durability, as well as the replacement of its components by alternative recycled materials. Among the most common alternative materials for concrete elaboration we find those partially replacing Portland cement (Supplementary Cement Materials [SCM]), such as silica fume (SF), flying ashes (FA) and blast furnace slag. As far as aggregates are concerned Recycled Concrete Aggregates (RCA) are being used to replace natural aggregates.*

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: rmn1779@gmail.com



En una mezcla de concreto, los agregados constituyen aproximadamente el 70% del volumen, por lo que grandes cantidades de roca triturada, grava y arena son requeridas para su extracción, proceso y transporte, generando importantes costos económicos y ambientales. El reciclaje del concreto producto de la demolición y el residuos de la construcción ha sido tema de estudio desde los años 50, siendo hace 10 años, que se incrementó de forma significativa el número de investigaciones a este respecto (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; Chen et al., 2003; Katz, 2003; Poon et al., 2004; Topçu y Sengel, 2004; Tu et al., 2006; Martínez y Mendoza, 2006; Rahal, 2007; Casuccio et al., 2008; Padmini et al., 2009); sin embargo, la mayoría de éstas se han centrado en el estudio de propiedades físico-mecánicas de los RCA y del concreto hecho con ellos (Concreto con Agregado Reciclado [RAC]), dejando sin investigar hasta la actualidad el efecto que presentan los RCA en la corrosión del acero de refuerzo embebido en RAC expuesto a condiciones ambientales severas, como por ejemplo el ambiente marino.

En la actualidad, la patología más importante de las estructuras de concreto reforzado es el deterioro por corrosión, el cual es causado por la penetración de cloruros a través del concreto, así como en menor grado por la carbonatación del mismo. La corrosión, causante de afectaciones en la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, ha llegado a reportar pérdidas económicas del orden de hasta 276 billones de dólares anuales (Federal Highway Administration, 2002).

Por otra parte, concretos con la adición de SCM están reportando buena aceptación para su uso (Ann et al., 2008; González y Martínex, 2008; Kou y Poon, 2008; Berndt, 2009; Corinaldesi y Moriconi, 2009), resaltándose el impacto favorable de los SCM en el desempeño de su resistencia y durabilidad, así como en el beneficio medioambiental que éstos conllevan.

Los concretos fabricados con materiales reciclados (SCM ó RCA) presentan diferente microestructura y en el caso del concreto con RCA una mayor porosidad que los concretos convencionales (Gómez, 2002; Poon et al., 2004; Tam et al., 2005; Etxeberriá et al., 2007); por otra parte, se ha demostrado que la resistividad eléctrica del concreto se relaciona con la microestructura de la matriz cementante (distribución de poros) y con la velocidad de corrosión del acero de refuerzo (Tumidajski et al., 1996; Tumidajski, 2005; Polder et al., 2000), por lo tanto, la resistividad eléctrica se utiliza como un parámetro para evaluar la durabilidad del concreto. El objetivo de esta investigación es analizar la resistividad eléctrica y respuesta electroquímica del concreto reforzado para conocer el efecto de los RCA y SCM en el inicio y velocidad de corrosión del refuerzo inducida por el ingreso acelerado de cloruros. En especímenes de concreto reforzado se realizaron ensayos de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) para determinar la resistividad eléctrica y la resistencia a la transferencia de carga, con el fin de poder evaluar el proceso de corrosión. Como parámetros adicionales, se caracterizó el comportamiento mecánico y la resistencia a la penetración del ión cloruro mediante ensayos de resistencia a la compresión y prueba rápida de penetración de cloruros, respectivamente.

*In a regular concrete mix, aggregates correspond to approximately a 70% of its volume. Therefore, great amounts of crushed stone, gravel and sand are extracted, processed and transported thus generating important economical and environmental costs. Recycling concrete from demolition works and construction's waste materials have been studied since the 50's, however only ten years ago the number of researches have been increased on this subject (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2002; Chen et al., 2003; Katz, 2003; Poon et al., 2004; Topçu and Sengel, 2004; Tu et al., 2006; Martínez and Mendoza, 2006; Rahal, 2007; Casuccio et al., 2008; Padmini et al., 2009). Nevertheless, most of them have focused their studies on RCA's physic-mechanical properties and concrete made from Recycled Aggregate Concrete [RAC], not considering so far the RCA corrosion effect of embedded reinforced steel on RAC exposed to adverse environmental conditions, such as marine environment.*

*Nowadays, the most important pathology suffered by reinforced concrete structures is corrosion damage, which is caused by chloride penetration into concrete and, also concrete carbonation at a lesser extent. Corrosion, which limits duration of reinforced concrete structures, has even reported economical losses of about 276 billion dollars a year (Federal Highway Administration, 2002).*

*On the other hand, concretes with SCM addition are reporting a proper acceptance for this purpose (Ann et al., 2008; González and Martínex, 2008; Kou and Poon, 2008; Berndt, 2009; Corinaldesi and Moriconi, 2009), highlighting the positive impact of SCM on resistance and durability behaviors, as well as the environmental benefits they provide.*

*Concretes elaborated from recycled materials (SCM or RCA) have different micro-structure. In the case of RCA concrete, it has greater porosity than conventional concretes (Gómez, 2002; Poon et al., 2004; Tam et al., 2005; Etxeberriá et al., 2007). On the other hand, it has been demonstrated that concrete electric resistivity is associated with the micro-structure of cement matrix (pores distribution) and with the corrosion rate of reinforced steel (Tumidajski et al., 1996; Tumidajski, 2005; Polder et al., 2000). Therefore, the electric resistivity is used as a parameter to evaluate concrete durability. The purpose of this research is to analyze electric resistivity and the electro-chemical response of reinforced concrete to obtain the RCA and SCM effects on the reinforcement corrosion beginning and rate induced by the accelerated chloride penetration. On reinforced concrete specimens tests of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) were carried out in order to determine the electric resistivity and loading transfer resistance, so as to evaluate the corrosion process. Additional parameters were employed by characterizing the mechanical behavior and the ion chloride penetration resistance by means of compressive resistance tests and chloride rapid chloride permeability tests, respectively.*

## 2. Metodología experimental

Se fabricaron cuatro series de probetas con relación agua-material cementante de 0.48: a) serie de referencia fabricada con agregado natural (NA) y 100% de Cemento Portland (PC) Tipo I conforme ASTM C150, b) serie realizada con RCA grueso y 100% PC, c) serie realizada con RCA grueso y 30% FA como reemplazo parcial del PC, y por último, d) serie fabricada con RCA grueso y 10% SF como reemplazo parcial del PC. Las características y proporciones de las mezclas para su estudio se presentan en la Tabla 1. La cantidad de agua reportada en la Tabla 1 corresponde a el agua efectiva porque los agregados reciclados fueron saturados durante 10 minutos previos al mezclado

## 2. Experimental methodology

Four specimen series were elaborated using water-cement material of 0.48 ratios: a) reference series elaborated from natural aggregate (NA) and 100% of Portland Cement (PC) Type I in accordance with ASTM C150; b) series made up from coarse aggregate and 100% PC; c) series elaborated from coarse RCA and 30% FA as partial replacement of PC and; at last d) series fabricated from coarse RCA and 10% SF as partial replacement of PC. The characteristics and proportions of mixes under study are presented on Table 1. Water amount reported on Table 1 corresponds to the actual amount of water because the recycled aggregates were saturated during ten minutes before mixing took place.

**Tabla 1.** Características y proporciones de las mezclas de estudio (Relativo a 1m<sup>3</sup> de concreto)

**Table 1.** Characteristics and proportions of mixes under study (considering 1m<sup>3</sup> concrete)

Materiales/Materials (Kg)	Identificación de las mezclas/Mixes Identification (a/mc=0.48)			
	Agregado grueso y fino natural/Coarse and fine natural aggregate	Agregado grueso reciclado, arena natural y SCM/Recycled coarse aggregate, natural sand and SCM		
	NA 100% PC	RCA 100% PC	RCA 30% FA	RCA 10% SF
Agua/Water*	213.31	213.31	213.31	213.31
Grava/Gravel**	994.55	870.58	870.58	870.58
Arena/Sand	766.17	915.35	915.35	915.35
Cemento/Cement	444.44	444.44	311.11	400.00
SCM	0.000	0.000	133.33	44.44

\*Agua efectiva de mezclado/Actual content of mixing water  
 \*\*Saturado con superficie seca/Saturated surface dry

### Materiales

El RCA tiene procedencia de la trituración de probetas de concreto fabricadas con: agregados naturales, PC tipo I, relación agua/ cemento de 0.50 (resistencia a compresión de 30 MPa) y curadas durante un periodo de 28 días a temperatura y humedad relativa (HR) de  $23 \pm 2$  °C y  $98 \pm 1\%$  respectivamente. Los agregados naturales proceden de roca triturada de cantera (grueso) y de arena de río (fino). Todos los agregados utilizados reportaron graduación granulométrica dentro de los límites establecidos por ASTM C33 (Figura 1 y Figura 2) y algunas de las propiedades físicas de estos se muestran en la Tabla 2. Los agregados naturales para fabricar el concreto de origen y los concretos bajo estudio fueron del mismo lote.

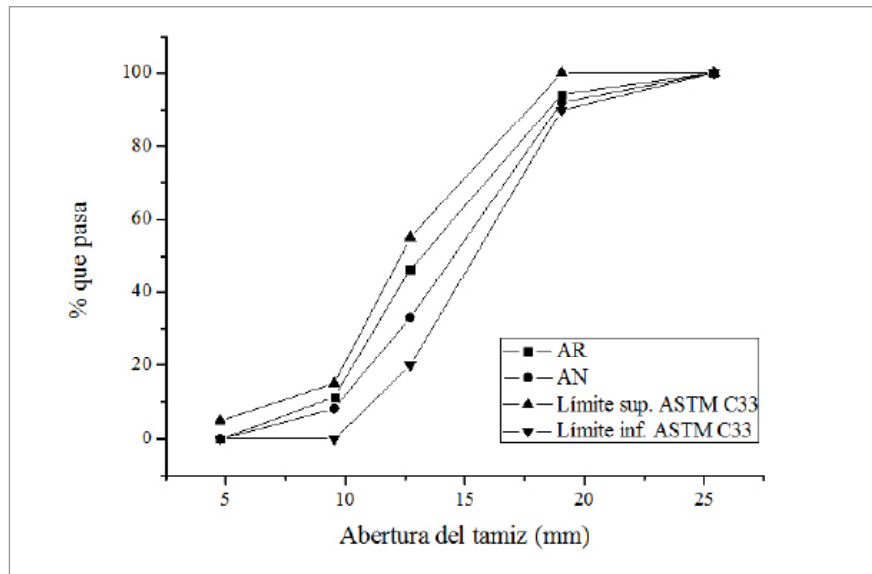
Como SCM se utilizó FA mexicana baja en calcio Clase F según norma ASTM C618 y SF norteamericano con los requerimientos que marca la norma ASTM C1240. En la Tabla 3 se muestran las propiedades físico-químicas de estos materiales.

### Materials

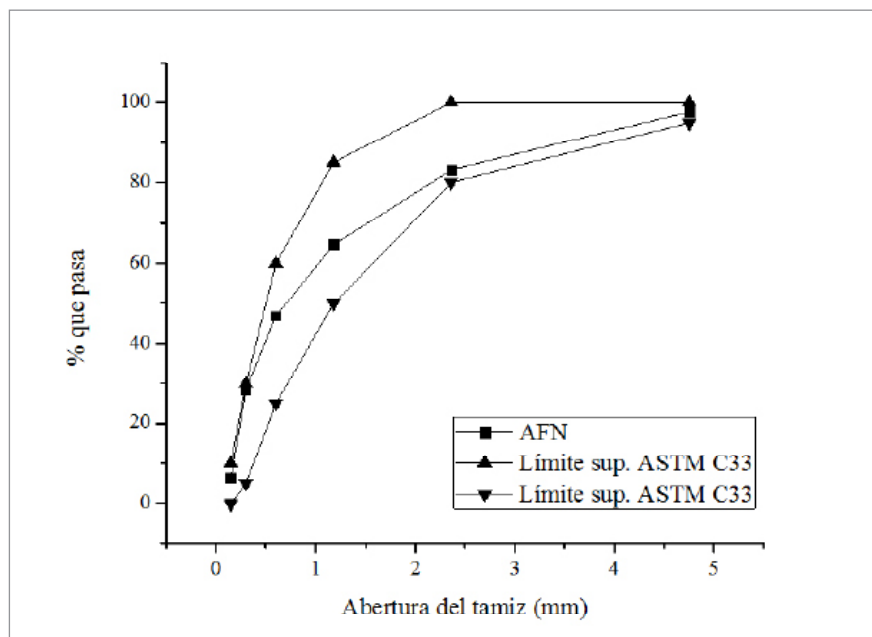
RCA comes from the process of crushing concrete specimens elaborated with: natural aggregates, PC type I, water/cement ratio of 0.50 (compression resistance at 30 MPa) and they were cured during a period of 28 days at relative temperature and humidity (RH) of  $23 \pm 2$  °C and  $98 \pm 1\%$ , respectively. Natural aggregates come from quarry crushed stones (coarse) and river sand (fine). All the employed aggregates reported a proper grain size distribution, in accordance with limits established by ASTM C33 (Figure 1 and Figure 2) and, some of their physical properties are shown on Table 2. Natural aggregates to be used for elaborating the source concrete and concretes under study come from the same excavation site.

Low-calcium Mexican FA, Class F was employed as SCM in accordance with ASTM C618 regulation and also American SF, which meet the requirements established by ASTM C1240 standard. Table 3 shows the physical-chemical properties of such materials.





**Figura 1.** Graduación granulométrica de los agregados gruesos  
**Figure 1.** Grain size distribution of coarse aggregates



**Figura 2.** Graduación granulométrica del agregado fino  
**Figure 2.** Grain size distribution of fine aggregate

**Tabla 2.** Propiedades físicas de los agregados  
**Table 2.** Aggregates physical properties

Tipo de agregado Type of aggregate	Densidad relativa Relative Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción Absorption (%)	Módulo de finura Fineness modulus (%)	Tamaño máximo Maximum size (mm)
Grueso reciclado/ Recycled coarse	2.19	6.55	-	19
Grueso Natural/ Natural coarse	2.50	0.44	-	19
Fino Natural/ Natural fine	2.43	4.08	2.73	4.76

**Tabla 3.** Propiedades físico-químicas de los materiales cementantes

**Table 3.** Physical-chemical properties of cement materials

Composición química (% en peso)/Chemical composition (% weight)								
Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO
PC	19.94	4.40	2.97	63.50	3.08	0.42	0.12	-
FA	58.84	16.72	3.52	7.35	0.13	0.79	0.94	1.76
SF	95.22	0.08	2.37	0.26	0.11	0.56	0.30	0.24
Propiedades Físicas/Physical properties								
	Densidad/Density (g/cm <sup>3</sup> )	Superficie específica, BET/Specific surface, BET (m <sup>2</sup> /kg)		Tamaño Promedio/Average size (µm)				
PC	3.15	1400		15-25				
FA	2.35	1200		5-15				
SF	2.27	19600		0.1-0.2				

### Resistencia a la compresión y porosidad total

La evaluación de la resistencia a compresión de cada serie se llevó a cabo en nueve probetas cilíndricas ( $h=30$  cm,  $\Phi=15$  cm); siguiendo el procedimiento estándar ASTM C39, tres probetas cilíndricas de cada mezcla fueron sometidas al ensayo de compresión a los 28, 90 y 180 días de curado. Las probetas utilizadas fueron curadas en una cámara con temperatura de  $23 \pm 2$  °C y  $98 \pm 1\%$  de HR. Transcurridos 90 días de curado, la porosidad total de los concretos en estudio fue determinada siguiendo el procedimiento estándar ASTM C642. Para ello se prepararon tres probetas de 5 cm de espesor y 10 cm de diámetro para cada mezcla en estudio.

### Espectroscopía de impedancia electroquímica

Para evaluar la resistividad eléctrica y la resistencia a la transferencia de carga de los sistemas acero-concreto en estudio, se prepararon tres probetas cilíndricas ( $L=30$  cm,  $\Phi=15$  cm) para cada mezcla identificada en la Tabla 1. Cada probeta fue provista con dos barras embebidas de acero al carbono UNS G10180 de  $\Phi = 0.95$  cm, con un área expuesta de 64 cm<sup>2</sup> y localizadas a 4.5 cm del exterior. Las barras de acero fueron decapadas y limpiadas antes de su colocación. Superado el tiempo de curado de 28 días, los especímenes fueron parcialmente inmersos (20 cm de profundidad) en una solución acuosa al 3.5% de NaCl. El periodo de inmersión fue de seis meses, y a partir de entonces, se aceleró el ingreso de cloruros sometiendo los especímenes a ciclos de humectación y secado (se mantenían sumergidas las probetas por tres días y posteriormente se sometían a secado en una cámara con ventilación forzada a 40°C durante cuatro días). Cada mes se evaluó, en condición sumergida, tanto la variación de la Resistencia electrolítica ( $R_e$ ), correlativa con la resistividad del concreto ( $\rho$ ), como la variación de la Resistencia de transferencia de carga ( $R_{ct}$ ), correlativa con la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) del refuerzo.

### Compressive resistance and total porosity

The assessment of compressive resistance on each series was carried out by using nine cylindrical specimens ( $h=30$  cm,  $\Phi=15$  cm); by following the standard procedure ASTM C39. Three cylindrical specimens of each mix were tested under compression at 28, 90 and 180 days of curing process. The employed samples were cured by a chamber at temperatures of  $23 \pm 2$  °C and  $98 \pm 1\%$  of RH. After 90 curing days, the total porosity of concretes under study was determined by following the standard procedure ASTM C642. For this purpose, three specimens were prepared, each having 5 cm thickness and 10 cm diameter for each mixture under study.

### Electro-chemical Impedance Spectroscopy

So as to evaluate the electrical resistivity and the loading transfer resistance of steel-concrete systems under study, three cylindrical specimens were elaborated ( $L=30$  cm,  $\Phi=15$  cm) for each mix identified on Table 1. Each specimen was supplied with two carbon steel embedded bars UNS G10180 of  $\Phi=0.95$  cm, having an exposed area of 64 cm<sup>2</sup> and they were placed at 4.5 cm from the outside. Steel bars were paint-peeled and cleaned before installing. After the 28 days of curing process was over, the specimens were partially submerged (at 20 cm depth) in a liquid solution of NaCl 3.5%. Submersion period took six months, since then the chloride penetration was accelerated by subjecting the specimens to humectation and drying cycles (the specimens were submerged for three days and then they were dried in a forced ventilation chamber at 40°C during four days). The electrolytic variation ( $R_e$ ), corresponding to concrete resistivity ( $\rho$ ), as well as loading transfer resistance variation ( $R_{ct}$ ) corresponding to corrosion current density ( $i_{corr}$ ) of the reinforcement were monthly measured under submersion conditions.

La evaluación de los parámetros ( $R_e$  y  $R_{ct}$ ) se realizó por EIS en un potenciostato/galvanostato/zra de ACM Instruments; los parámetros de prueba fueron un potencial de 10 mV de amplitud para mantener la linealidad del sistema en un rango de frecuencias de 1 mHz a 10 kHz. El arreglo experimental de los ensayos se muestra en la Figura 3.

Los resultados de EIS se representaron con los diagramas de Nyquist [Figura 4 a)], y se usó un circuito eléctrico equivalente (EEC) tipo Randles como el mostrado en la Figura 4 b) para determinar con precisión el valor de la intersección a bajas frecuencias de la curva con el eje de impedancia real y así poder calcular  $R_{ct}$ .

The evaluation of parameters ( $R_e$  and  $R_{ct}$ ) was developed by means of EIS in a potentiostat/galvanostat/zero resistance ammeter manufactured by ACM Instruments. Test parameters corresponded to a 10 mV amplitude potential in order to maintain a linearity of the system, at a frequency range from 1 mHz to 10 kHz. The experimental test layout is shown on Figure 3.

The EIS results were represented by means of Nyquist diagrams [Figure 4 a)] and an equivalent electric circuit (EEC) of Randles type - as the one shown on Figure 4b) - was used to accurately determine the intersection value at low frequencies of the curve with the actual impedance axis, so that  $R_{ct}$  could be calculated.

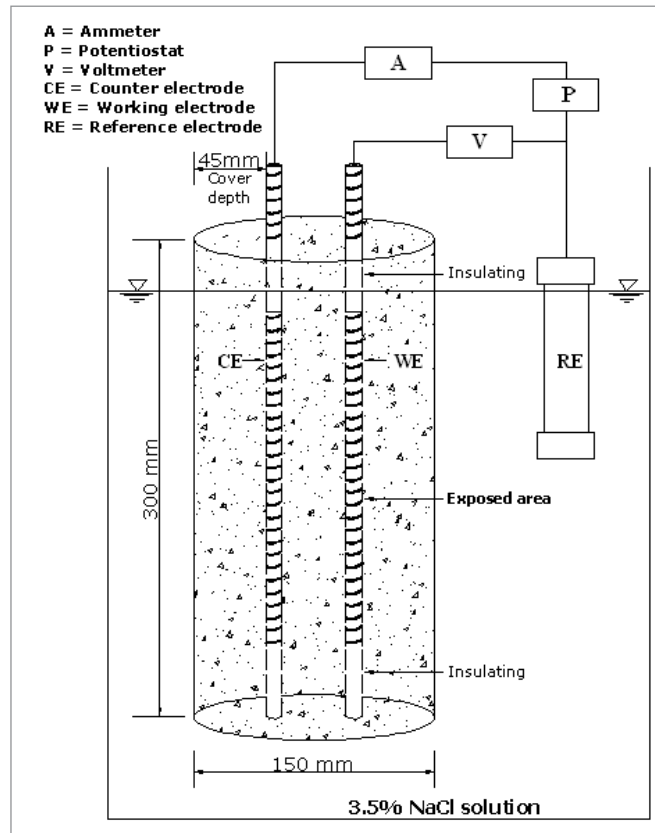


Figura 3. Arreglo experimental para los ensayos de EIS

Figure 3. Experimental set up for EIS test

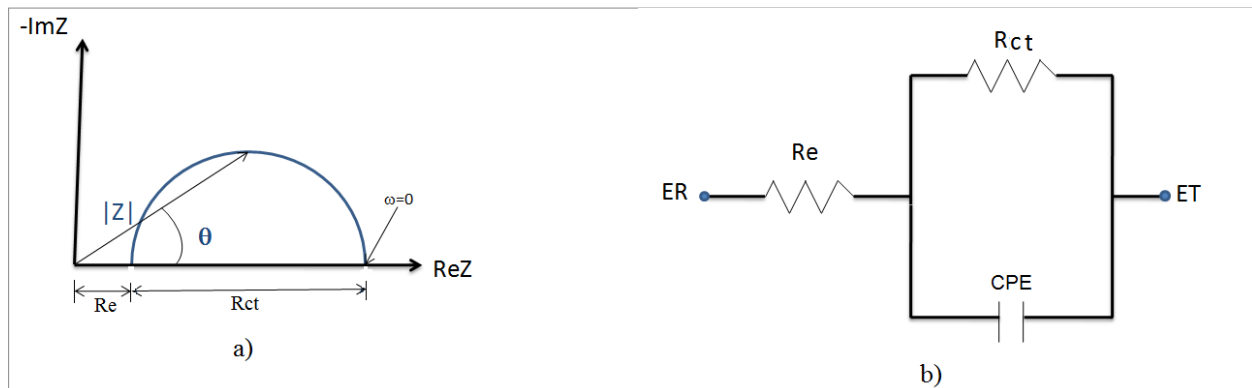


Figura 4. a) Diagrama de Nyquist ideal, b) EEC usado para determinar  $R_{ct}$

Figure 4. a) Ideal Nyquist diagram, b) EEC used to determine  $R_{ct}$

La  $R_{ct}$  resultante y la  $R_e$  obtenida de la intersección a altas frecuencias de los diagramas de Nyquist con el eje de impedancia real fueron usados para determinar  $i_{corr}$  y la resistividad eléctrica del concreto ( $\rho$ ), respectivamente. Utilizando la Ecuación 1 (Stern y Geary, 1957) se calculó  $i_{corr}$  en donde  $B$  es la constante de Tafel con valor recomendado (Dhir et al., 1993; González et al., 1996; Gowers y Milard, 1993; Mangat y Molloy, 1992) de 0.052 V para corrosión pasiva del acero de refuerzo y 0.026 V para corrosión activa;  $\rho$  fue determinada a partir de la Ecuación 2, donde  $C_c$  es una constante de celda que depende de la geometría del cuerpo conductor (Torrents et al., 1998).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_{ct}} \quad (1)$$

$$R_e = \rho \cdot C_c \quad (2)$$

Donde:  $C_c$  es una constante de celda (58.47 cm),  $L$  es la longitud sumergida de la probeta de concreto reforzado durante el ensayo (20 cm),  $D$  es el diámetro de la probeta de concreto (15 cm),  $d$  es el diámetro del acero de refuerzo (0.95 cm) y  $z$  es la distancia entre el centro de la probeta de concreto y el centro de la barra de refuerzo (5.05 cm).

La constante de celda  $C_c$  fue determinada analíticamente (Ecuación 3) aplicando los principios de conducción de calor a través de elementos (Sunderland y Johnson, 1964). La Ecuación de Laplace fue resuelta considerando como límites de frontera la temperatura del cuerpo de acero (refuerzo)  $T_1$ , y la temperatura del cuerpo de concreto  $T_2$ ; siendo  $T_1 = T_2 =$  constante.

$$C_c = \left( \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D^2 + d^2 - 4z^2}{2Dd}\right)} \right) \quad (3)$$

### Resistencia a la penetración del ión cloruro

Se efectuó la llamada Prueba Rápida de Penetración de Cloruros (RCPT) en acuerdo con ASTM C 1202. Los ensayos se llevaron a cabo en probetas a 90 días de curado ( $h=5$  cm,  $\Phi=10$  cm) extraídas de la parte central de cilindros de concreto ( $h=20$  cm). Transcurridas las 24 horas de su preparación, las probetas se colocaron entre dos celdas de acrílico conectadas a un potenciostato. Una de las celdas se llenó con solución acuosa al 0.3 N de NaOH y la otra con solución acuosa al 3% de NaCl. Las celdas se conectaron a la fuente de suministro de voltaje, en donde el electrodo de la celda con NaCl fungió como cátodo y el electrodo en NaOH funcionó como ánodo. Se aplicó un voltaje constante de 60 V durante seis horas y se llevó un registro de la corriente cada media hora. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 5.

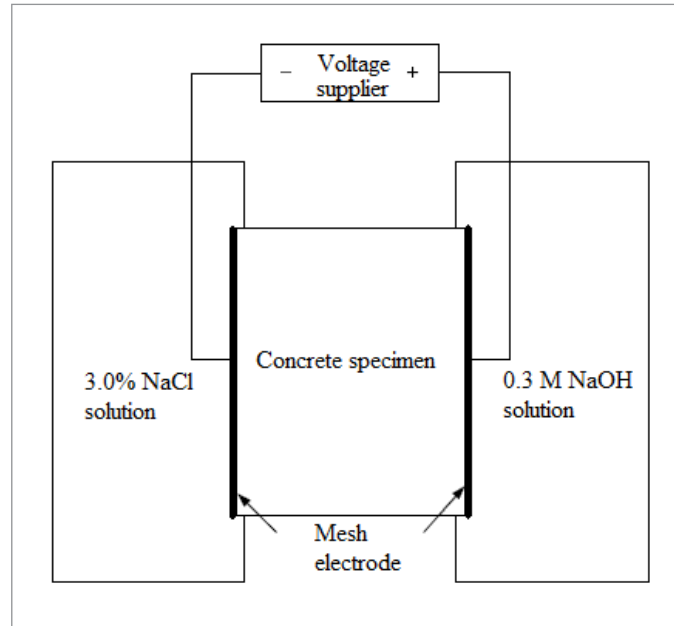
*The resulting  $R_{ct}$  and the  $R_e$ , obtained from the intersection at high frequencies of Nyquist diagrams with the actual impedance axis, were used to determine  $i_{corr}$  and the concrete electric resistivity ( $\rho$ ), respectively. By using Equation 1 (Stern and Geary, 1957)  $i_{corr}$  was calculated, where  $B$  is Tafel constant at a recommended value of 0.052 V (Dhir et al., 1993; González et al., 1996; Gowers and Milard, 1993; Mangat and Molloy, 1992) for passive reinforcement steel corrosion and; 0.026 V for active corrosion.  $\rho$  was determined by means of Equation 2, where  $C_c$  is a cell constant, which depends on the geometry of the conductive body (Torrents et al., 1998).*

*Where:  $C_c$  is a cell constant (58.47 cm);  $L$  is the submerged length of reinforced concrete specimen during the test (20 cm);  $D$  is the diameter of concrete specimen (15 cm);  $d$  is the diameter of reinforced steel (0.95 cm) and;  $z$  is the distance between the concrete specimen core and the reinforcement bar center (5.05 cm).*

*The cell constant  $C_c$  was analytically determined (Equation 3) by applying heat conductive principles throughout the elements (Sunderland and Johnson, 1964). Laplace Equation was solved by considering the temperature of steel body (reinforcement)  $T_1$ , and the temperature of concrete Body  $T_2$  as boundary limits; where  $T_1 = T_2 =$  constant.*

### Ion chloride penetration resistance

*The so called Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) was performed in accordance with ASTM C1202. The tests were carried out on specimens at 90 curing days ( $h=5$  cm,  $\Phi=10$  cm), which were extracted from the concrete cylinders cores ( $h=20$  cm). After 24 hours from their elaboration, the specimens were placed between two acrylic cells connected to a potentiostat. One of the specimens was filled up with a NaOH liquid solution at 0.3 N and; the other specimen with a liquid solution of 3% NaCl. Cells were connected to the power supply source, where the electrode of the NaCl cell acted as a cathode and, the electrode filled up with NaOH worked as an anode. A constant power supply of 60 V was applied during six hours and, the power was registered every half an hour. The test layout is shown on Figure 5.*



**Figura 5.** Configuración experimental para la RCPT  
**Figure 5.** Experimental configuration to RCPT

La carga total (Q) que pasó a través de la probeta fue calculada con la Ecuación 4 de acuerdo con la regla trapezoidal.

Total load (Q) passing through the specimen was calculated by means of Equation 4, in accordance with the trapezoid rule.

$$Q = 900x(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (4)$$

Donde: Q se expresa en Coulombs, e In es la corriente (A) a n minutos después de que el potencial es aplicado. Puesto que Q está relacionada con la resistencia del concreto a la penetración del ión cloruro, ésta se determinó mediante el criterio cualitativo propuesto en ASTM C1202 y es mostrado en la Tabla 4.

Where: Q is expressed in Coulombs; and “In” corresponds to power supply (A); “a” corresponds to “n” minutes after the power is applied. Since Q is associated with the concrete resistance faced to ion chloride penetration, it was determined by means of a qualitative criterion proposed by ASTM C1202, as shown on Table 4.

**Tabla 4.** Penetrabilidad al ión cloruro basada en la carga pasada  
**Table 4.** Ion chloride penetration based on passing load

Carga Pasada/Passing load (C)	Penetrabilidad al ión cloruro/Ion chloride penetration
> 4000	Alta/High
2000 – 4000	Moderada/Moderate
1000 – 2000	Baja/Low
100 – 1000	Muy baja/Very low
< 100	Insignificante/Insignificant

### 3. Resultados y discusión

#### Resistencia a la compresión y porosidad total

Los porcentajes de porosidad total para las variables NA 100% PC, RCA 100% PC, RCA 30% FA y RCA 10% SF fueron del 22, 26, 23 y 17, respectivamente. De acuerdo a estos resultados el uso de RAC incrementó de manera importante la porosidad del concreto, mientras que el uso de SCM la redujo,

### 3. Results and discussion

#### Compressive resistance and total porosity

The obtained percentages of total porosity for variables NA 100% PC; RCA 100% PC, RCA 30% FA and RCA 10% SF were 22, 26, 23 y 17, respectively. In accordance with such results, the use of RAC significantly incremented the concrete porosity, while the use of SCM reduced it.



comportamiento observado también en otras investigaciones (Corinaldesi y Moriconi, 2009; Gómez, 2002)

La resistencia a compresión de las cuatro variables de estudio se representa en la Tabla 5, en ésta, se puede constatar el efecto de los RCA y los SCM en la evolución de la resistencia a compresión. La mezcla que evalúa el efecto de los RCA en la resistencia a compresión (RCA 100% PC) desarrolló resistencias de 26, 28 y 32 MPa a los 28, 90 y 180 días de curado respectivamente; estos valores, representan una pérdida de resistencia del 13, 15 y 10% respectivamente con respecto a la variable de control, lo cual es coherente con otras investigaciones (Katz, 2003; Topçu y Sengel, 2004; Martínez y Mendoza, 2006; Rahal, 2007; Casuccio et al., 2008). La variable RCA 10% SF reportó el mayor valor de resistencia a compresión a los 28, 90 y 180 días de curado (37, 41 y 43 MPa, respectivamente), lo que indica que el uso del 10% de SF se traduce en una ganancia de resistencia de 45, 44 y 35% más que la variable RCA 100% PC; además también, que éstas son superiores a las obtenidas en la variable de concreto convencional (NA 100% PC). En cuanto al uso de FA, la mezcla RCA 30% FA presentó las resistencias más bajas (17, 21 y 27 MPa), con pérdidas del 32, 25 y 15 % con respecto a la variable RCA 100% PC (28, 90 y 180 días de curado, respectivamente). Aunque el uso de RCA y FA conlleva pérdida de resistencia a compresión, las mezclas con estos materiales sobrepasan a los 90 días la resistencia de 20 MPa.

*This behavior was also observed by other researchers (Corinaldesi and Moriconi, 2009; Gómez, 2002).*

*The compressive resistance of four variables under study is presented on Table 5, which validates the RCA and SCM effects on the evolution of compressive resistance. The mix used to evaluate RCA effect on compressive resistance (RCA 100% PC) developed resistances of 26, 28 and 32 MPa at 28, 90 and 180 curing days, respectively. These values represent resistance losses of 13, 15 and 10%, respectively, compared to the control variable; which is in line with other researchers (Katz, 2003; Topçu and Sengel, 2004; Martínez and Mendoza, 2006; Rahal, 2007; Casuccio et al., 2008). The variable RCA 10% SF reported the highest compressive resistance value at 28, 90 and 180 curing days (37, 41 and 43 MPa, respectively), which indicates that the use of 10% SF is translated into a resistance gain of 45, 44 and 35% higher than the variable RCA 100% PC. Furthermore, these gains are higher than the ones obtained by the conventional concrete variable (NA 100% PC). As far as the use of FA is concerned, the mix RCA 30% FA delivered the lowest resistances (17, 21 and 27 Mpa), yielding losses of 32, 25 and 15% in comparison to the variable RCA 100% PC (28, 90 and 180 curing days, respectively). Although the use of RCA and FA leads to compressive resistance losses, the mixes containing such materials exceed resistances by 20 MPa at 90 days.*

**Tabla 5.** Resistencia a la compresión de los concretos investigados  
**Table 5.** Compressive resistance of concretes under study

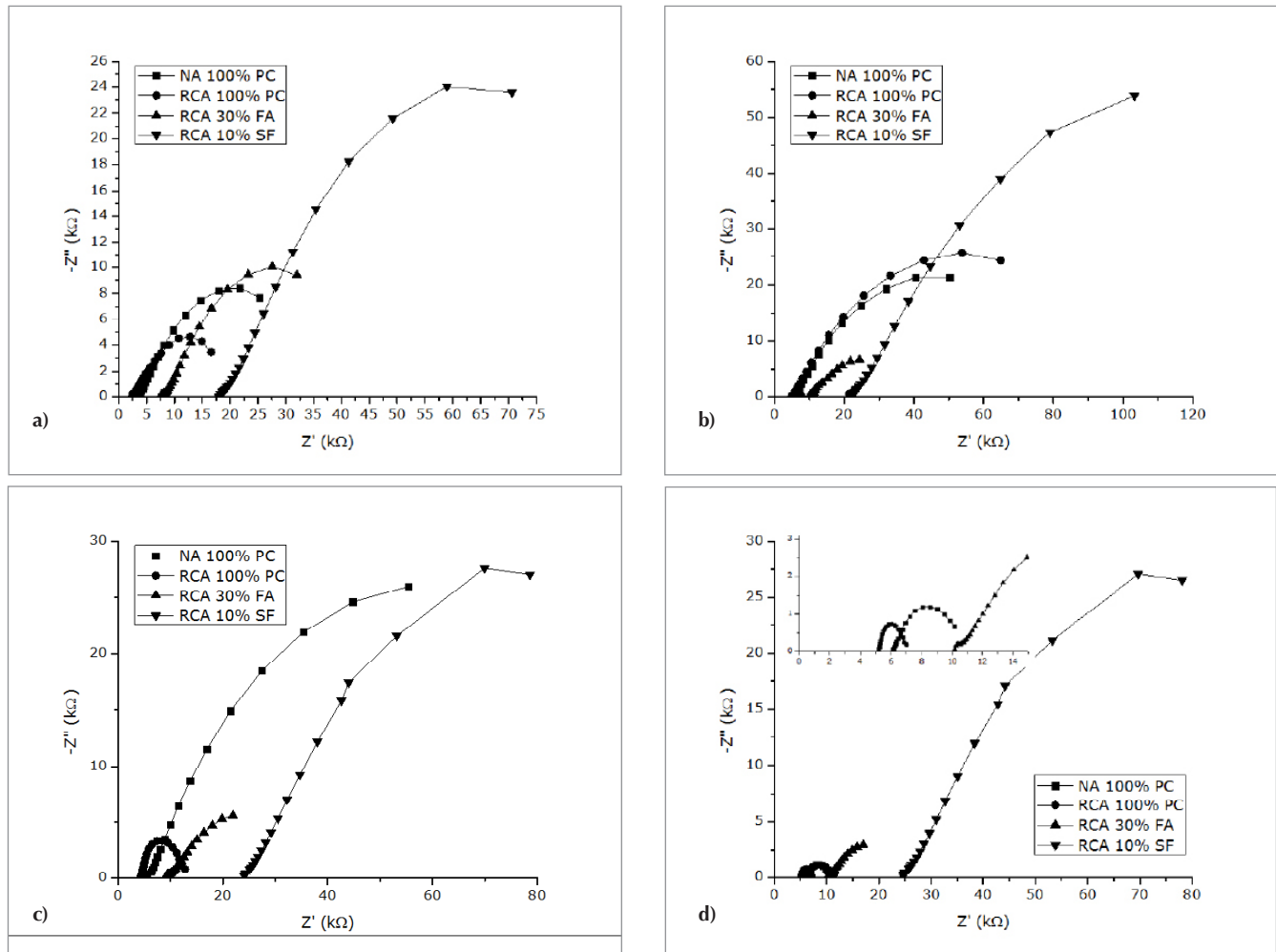
Mezcla/Mix	Resistencia a compresión/Compressive resistance (MPa)		
	28 días/28 days	90 días/90 days	180 días/180 days
NA 100% PC	29.25	33.16	35.35
RCA 100% PC	25.57	28.35	31.83
RCA 30% FA	17.39	21.26	27.06
RCA 10% SF	37.08	40.82	42.97

### Espectroscopía de impedancia electroquímica

Las propiedades dieléctricas y electroquímicas de los sistemas concreto-acero a 3, 6, 9 y 12 meses de exposición se representan en los diagramas de Nyquist de las Figura 6a a 6d. En éstos, puede observarse la influencia de los RCA en la Re (intersección de la curva a altas frecuencias) y en la Rct (diámetro del semicírculo o arco). El sistema RCA 100% PC presenta los valores de Re más bajos (de 1.22 a 3.30 x10<sup>2</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>), lo cual indica que el uso de 100% de RCA aumenta la conductividad eléctrica del concreto. Sin embargo, al reemplazar cemento por FA y SF la Re del concreto aumenta de forma considerable (disminuye la conductividad eléctrica), sobre todo al usar SF (de 4.16 x10<sup>2</sup> a 1.48 x10<sup>3</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>). En cuanto a la Rct, se aprecia un comportamiento similar, siendo el sistema RCA 10% SF el que reporta los valores máximos de Rct durante el tiempo de exposición (de 6.25 x10<sup>2</sup> a 6.79 x10<sup>3</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>), mientras que el sistema RCA 100% PC reportó los valores mínimos de Rct (8.64 x 10<sup>2</sup> a 7.98 x 10<sup>1</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>).

### Electro-chemical Impedance Spectroscopy

Dielectric and electro-chemical properties of concrete-steel systems at 3, 6, 9 and 12 months of exposure are represented by Nyquist diagrams on Figures 6a and 6d. They show the influence of RCA on Re (curve intersection at high frequencies) and also on the Rct (semi-circle diameter or arc). The system RCA 100% PC delivers the lowest Re values (1.22 a 3.30 x10<sup>2</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>), which indicates that the use of 100 % RCA increases the electric conductivity of concrete. However, when replacing cement by FA and SF, the concrete Re significantly increases (decreasing the electric conductivity), specially when using SF (from 4.16 x10<sup>2</sup> to 1.48 x10<sup>3</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>). As far as Rct is concerned, it shows a similar behavior; thus being the RCA 10% the one that reports maximum Rct values during the exposure period (from 6.25 x10<sup>2</sup> to 6.79 x10<sup>3</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>, while the RCA 100% PC reported minimum Rct values (8.64 x 10<sup>2</sup> to 7.98 x 10<sup>1</sup> kΩ-cm<sup>2</sup>).



**Figura 6.** Diagramas de Nyquist para los sistemas concreto-acero a diferentes edades de exposición: a) 3 meses, b) 6 meses, c) 9 meses y d) 12 meses

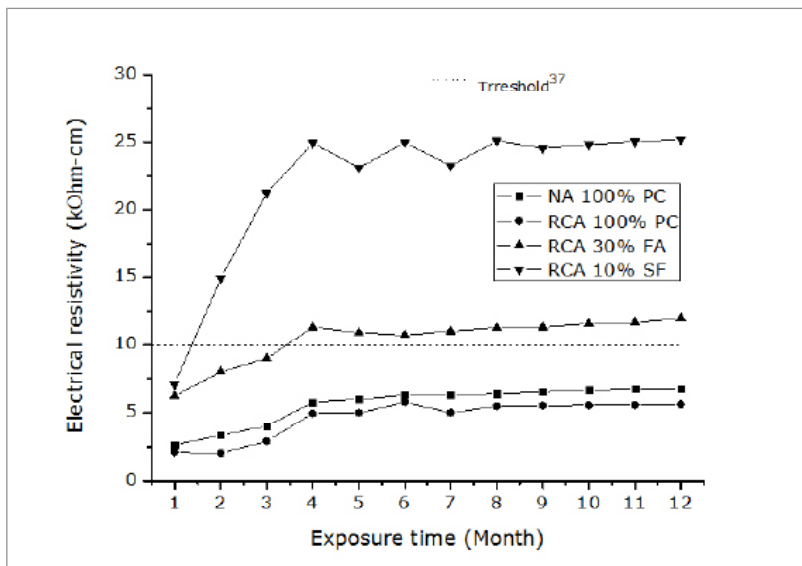
**Figure 6.** Nyquist diagram for concrete-steel systems to different exposed ages: a) 3 months, b) 6 months, c) 9 months and d) 12 months

La  $\rho$  en función del tiempo de exposición que se muestra en la Figura 7, permite corroborar que el uso del 100% de RCA origina incrementos de la conductividad eléctrica del concreto atribuido al incremento en la porosidad que reportan los concretos con RCA facilitando la conducción iónica. La  $\rho$  de los sistemas sin SCM (NA 100% PC y RCA 100% PC) no superan el umbral (Andrade y Alonso, 1996) de los 10  $k\Omega\text{-cm}$ . En cuanto a los sistemas con SCM, es destacable el efecto positivo de éstos en la  $\rho$  del concreto; la  $\rho$  del sistema RCA 30% FA es el doble que la de los sistemas sin SCM mientras que la del sistema RCA 10% SF es cuatro veces más grande. Resultados similares fueron encontrados por Fajardo et al. (2009).

Se puede observar en la Figura 7 que en los primeros tres meses de ensayo, la  $\rho$  de los sistemas con SCM se incrementa de forma rápida, para a continuación, estabilizarse; lo anterior se puede explicar, si se asume que las reacciones se acercan al equilibrio pasando un periodo del orden de 90 días de exposición. El aumento de la  $\rho$  de los sistemas con SCM se atribuye al decremento del sistema poroso que se produce por el aumento en la formación de SCH y reducción de la formación de CH producto de la reacción puzolánica entre éste último y el  $\text{SiO}_2$  contenido en los SCM. Se puede observar en la Tabla 3 que el SF es del orden de 100 veces más fino que el cemento y el FA, y aporta mayor cantidad de  $\text{SiO}_2$ .

The  $\rho$  as function of exposure period is shown on Figure 7, proving that the use of 100% RCA increases concrete electric conductivity, which is attributed to the porosity increase reported by RCA concretes, that facilitate the ionic conductivity. The  $\rho$  of SCM-free systems (NA 100% PC and RCA 100% PC) do not exceed the 10  $k\Omega\text{-cm}$  threshold (Andrade and Alonso, 1996). Regarding SCM systems, they have a significant and positive effect on the  $\rho$  of concrete; the  $\rho$  of system RCA 30% FA doubles the value of SCM systems; while  $\rho$  of RCA 10% SF system is four times higher. Similar results were found by Fajardo et al. (2009).

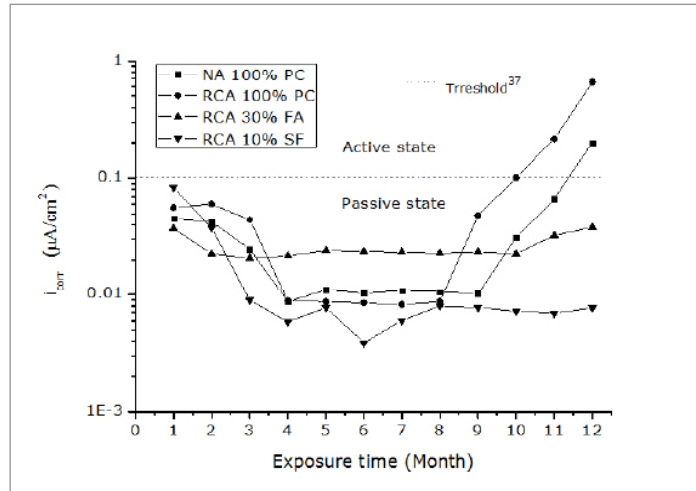
Figure 7 shows that during the first three months of testing process, the  $\rho$  of SCM systems is quickly increased, which is further on stabilized. The latter can be explained by assuming that reactions are close to a balance after an exposure period of approximately 90 days. The increasing  $\rho$  of SCM systems is attributed to the decrease of pore system, which takes place due to the SCH formation and because of the reduction of CH formation caused by the pozzolanic reaction between them and the  $\text{SiO}_2$  contained by SCMs. Table 3 shows that SF is about 100 times finer than cement and FA and it delivers a higher amount of  $\text{SiO}_2$ .



**Figura 7.** Evolución de la resistividad eléctrica en función del tiempo de exposición  
**Figure 7.** Evolution of electric resistivity as a function of exposure time

Los resultados de  $i_{corr}$ , determinados a partir de los valores de  $R_{ct}$  se presentan en la Figura 8, permitiendo verificar la resistencia a la corrosión de los sistemas acero-concreto de este estudio. En general, se puede observar que en el cuarto mes de ensayo se localiza un punto de inflexión entre dos estados de corrosión con diferente grado de actividad; esta sectorización, se atribuye a que a partir de este punto, las reacciones de hidratación-puzolánica del cemento y SCM alcanzaron un estado de equilibrio, y por ello, se estabiliza su velocidad. Se puede observar además que el sistema que presenta mayor resistencia a la corrosión es el RCA 10% SF, puesto que a pesar de que su actividad corrosiva fue la mayor en el primer mes, disminuye significativamente en el transcurso de los meses subsiguientes hasta llegar a tener un nivel de corrosión mínimo ( $0.004 \mu A/cm^2$ ) en el sexto mes de ensayo, con un promedio de  $0.016 \mu A/cm^2$  en todo su periodo de prueba; además, también se observa que el uso de SF retrasa de forma importante el inicio de la corrosión porque hasta el mes doce permanece en estado pasivo. Por otra parte, el sistema RCA 100% PC reporta los niveles de corrosión máximos (de  $0.044$  a  $0.060 \mu A/cm^2$ ) hasta el tercer mes; y aunque entre los meses cuatro a ocho su actividad corrosiva disminuye considerablemente, registra el mayor promedio de  $i_{corr}$  ( $0.102 \mu A/cm^2$ ) para todo el periodo. Esto lo clasifica como el sistema con menor resistencia a la corrosión y dilucida el efecto negativo de los RCA en la susceptibilidad a la corrosión del refuerzo ya que su actividad corrosiva pasó del estado pasivo al activo en el octavo mes (antes que cualquier otro sistema). El sistema RCA 30% FA reporta niveles bajos de corrosión hasta el mes dos de prueba (de  $0.022$  a  $0.037 \mu A/cm^2$ ), manteniéndose su actividad en ese nivel para los meses subsiguientes; su  $i_{corr}$  promedio fue de  $0.026 \mu A/cm^2$ , y se puede observar que el uso de FA retrasa el tiempo de despasivación del refuerzo.

The  $i_{corr}$  results determined from  $R_{ct}$  values are presented on Figure 8, thus enabling us to confirm the corrosion resistance of steel-concrete systems in this research. In general, during the fourth testing month, an inflection point is localized between two corrosion states at different activity level. This sectorization is explained because from this point further the hydration-pozzolanic reactions of the cement and the SCM reached a balance state and, therefore their speed is also stabilized. Besides, it is observed that the system showing highest corrosion resistance is RCA 10% SF, in spite of the fact that its corrosion activity was the highest during the first month; then it significantly decreases as months went by until reaching a minimum corrosion rate ( $0.004 \mu A/cm^2$ ) in the sixth testing month, with an average of  $0.016 \mu A/cm^2$  for the whole test period. It is also observed that the use of SF significantly delays the beginning of corrosion because it keeps under a passive state until month twelve. On the other hand, the system RCA 100% PC reported the maximum corrosion levels (from  $0.044$  to  $0.060 \mu A/cm^2$ ) until the third month and; although between the fourth and eighth month its corrosion activity substantially decreases, it registers the highest  $i_{corr}$  average ( $0.102 \mu A/cm^2$ ) for the whole period. Therefore, this system is classified as the one with lowest corrosion resistance and discloses the negative effect of RCAs on reinforcement corrosion susceptibility, because its corrosion activity turned from passive to active state during the eighth month (before than any other system). The system RCA 30% FA reports low corrosion levels until the second testing month (from  $0.022$  to  $0.037 \mu A/cm^2$ ), maintaining its activity at that level during the consecutive months; its average  $i_{corr}$  was  $0.026 \mu A/cm^2$ , and it can be observed that the use of FA delays depassivation time of the reinforcement.

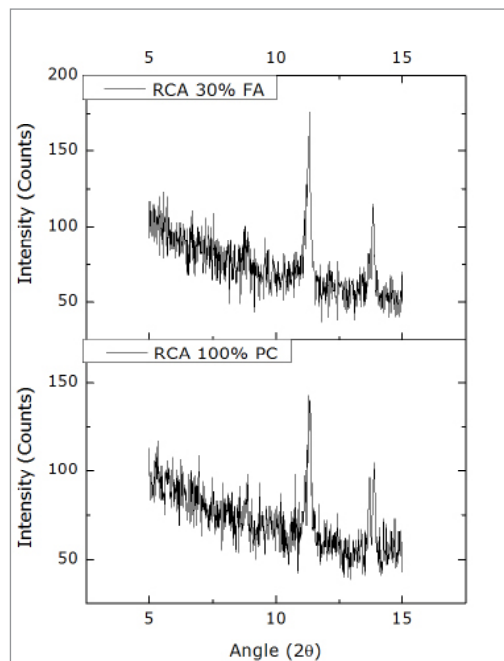


**Figura 8.** Variación de la densidad de corriente de corrosión en función del tiempo de exposición

**Figure 9.** Variation of corrosion current density as a function of exposure time

Los resultados anteriores indican que aunque existe una diferencia significativa en cuanto a  $\rho$  de los sistemas con SCM, su resistencia a la corrosión se mantiene en el mismo orden de magnitud; lo anterior, es atribuible al alto contenido de  $Al_2O_3$  ( $\cong 17\%$ ) de la FA que contribuye a la formación de sal de Friedel o cloroaluminato tricálcico ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ). Por lo tanto, la adición de FA genera, en la matriz cementante, un contenido más alto de sal de Friedel, y en consecuencia niveles más bajos de cloruros libres, los cuales son responsables en este caso de la corrosión localizada del acero de refuerzo. Lo anterior se constató mediante el uso de XRD y como puede observarse en la Figura 9, dicho compuesto se detectó (pico más intenso en  $2\theta = 11.18$ ) en cada una de las mezclas (con 100% PC y reemplazando PC con 30% FA); sin embargo, se observan intensidades más altas para la mezcla con FA que para la mezcla con 100% PC.

Above results indicate that although there is a significant difference of  $\rho$  values among SCM systems, their corrosion resistance is maintained at the same magnitude level; this is explained because of the high content of  $Al_2O_3$  ( $\cong 17\%$ ) in the FA that contributes to the formation of Friedel's salt or tri-calcium chloride-hydrate aluminates ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ). Therefore, the addition of FA leads to a higher content of Friedel's salt in the cement matrix, and therefore to lower levels of free chlorides which are responsible of corrosion located on the reinforcement steel in this case. Above has been proven by means of the use of an XDR, as shown on Figure 9. Such compound was detected (highest peak of  $2\theta = 11.18$ ) in each one of the mixes (100% PC, replacing PC by a 30% of FA). Nevertheless, higher intensities are observed for the FA mix than for the 100% PC mix.



**Figura 9.** Patrón de rayos X – Sal de Friedel

**Figure 9.** X Ray pattern of Friedel Salt

### Resistencia a la penetración del ión cloruro

En la Figura 10 se presentan los resultados de carga pasada en acuerdo al procedimiento de prueba ASTM C1202. Los resultados indican, por un lado, que el uso de 100% de RCA condiciona al concreto a disminuir su capacidad de resistencia a la penetración del ion cloruro en aproximadamente un 30% con respecto al concreto convencional. Por otro lado, puede observarse que el uso de FA y SF proporcionan al concreto gran capacidad para inhibir la penetración de iones cloruro, porque la carga pasada de las mezcla RCA 30% FA y RCA 10% SF es tres y cinco veces menor, respectivamente, que la de la mezcla RCA 100% PC. Bajo el criterio propuesto por ASTM C1202 (Tabla 4), las mezclas sin SCM presentan una alta penetrabilidad del ion cloruro porque rebasan los 4000 Coulombs, mientras que la penetrabilidad de las mezclas con SCM se designa como baja por estar entre 1000 y 2000 Coulombs. Estos resultados son compatibles con los reportados con Ann et al. (2008).

La alta resistencia a la penetración del ion cloruro de la mezcla con SF se debe a la mayor densificación de la matriz cementante observada en la Figura 11c (micrografía obtenida por SEM), lo cual reduce de forma importante la porosidad, restringiendo la permeabilidad de cloruros. En cuanto a la mezcla con FA, a pesar de que su matriz cementante tiene compacidad similar que la mezcla con 100% PC (Figuras 11a y 11b), la formación de sal de Friedel en mayor cantidad y la obstrucción de poros con partículas de FA sin reaccionar contribuye a la menor permeabilidad de los iones cloruro.

### Resistance to ion chloride penetration

Figure 10 shows the results of passing load in accordance with test procedure ASTM C1202. On one hand, the results indicate that the use of 100% RCA conditions concrete to decrease its ion chloride penetration resistance in about 30%, in comparison to conventional concrete. On the other hand, it is observed that the use of FA and SF provide concrete with a great ability to inhibit ion chloride penetration, because the passing loads of mixes RCA 30% FA and RCA 10% SF are three and five times lower, respectively than in the mix RCA 100% PC. As per the criterion proposed by ASTM C1202 (Table 4), SCM-free mixes show a high ion chloride penetration because they exceed 4000 Coulombs, while the penetration capacity of SCM mixes is between 1000 and 2000 Coulombs which is considered low. These results agree with the ones reported by Ann et al. (2008).

The high ion chloride penetration resistance of SF mix is explained by the higher cement matrix densification, observed on Figure 11c (micro-graphy obtained by SEM), which substantially reduces porosity by restricting chloride permeability. Regarding the FA mix, in spite of the fact that its cement matrix has a similar compaction to the 100% PC mix (Figures 11a and 11b), the formation of Friedel's salt in a higher amount and the pores obstruction with non-reacting FA particles contribute to a lower ion chloride permeability.

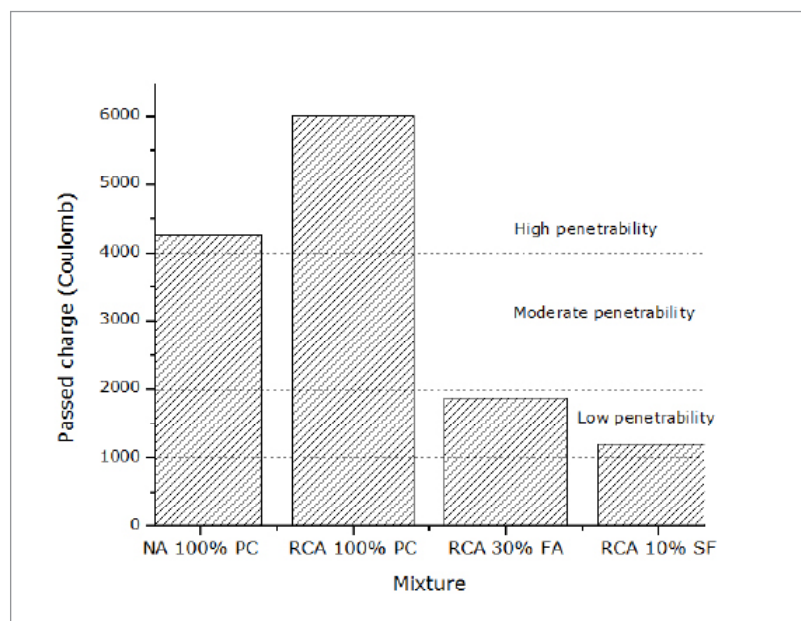
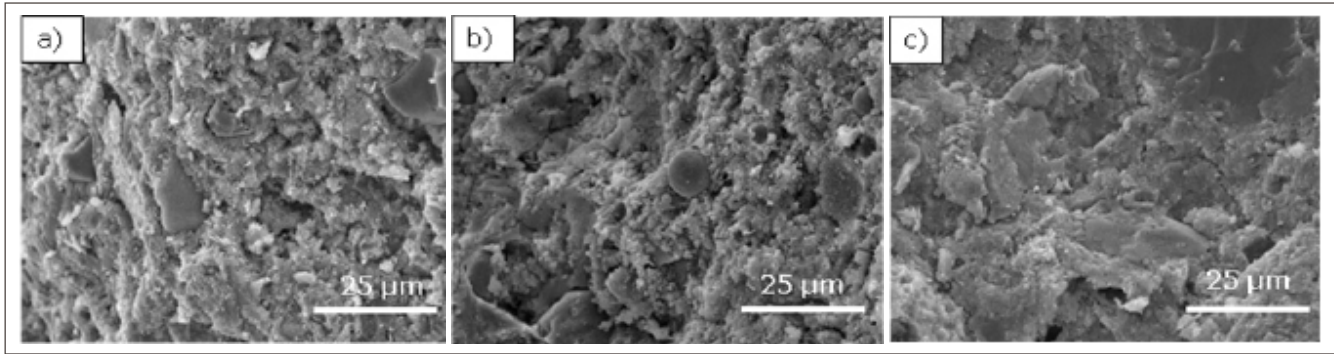


Figura 10. Resistencia a la penetración del ión cloruro

Figure 10. Resistance to chloride ion penetration



**Figura 11.** Microestructura de la matriz cementante a 90 días de hidratación: a) 100% PC, b) 70% PC – 30% FA, c) 90% PC – 10% SF  
**Figure 11.** Cementing matrix microstructure to 90 days hydration: a) 100% PC, b) 70% PC – 30% FA, c) 90% PC – 10% SF

## 4. Conclusiones

Bajo las condiciones experimentales de este estudio se concluye que:

- El reemplazo del 100% de agregado natural por RCA disminuye la resistividad eléctrica del concreto y el tiempo de inicio de la corrosión del refuerzo, además de incrementar la velocidad de corrosión del mismo.
- La ceniza volante y el humo de sílice duplican y cuadruplican, respectivamente, la resistividad eléctrica del concreto, retrasan el inicio de la corrosión del refuerzo y disminuyen su velocidad.
- Aunque la magnitud de la resistividad eléctrica del concreto con humo de sílice es el doble que la del concreto con ceniza volante, la resistencia a la corrosión de ambos es similar debido al alto contenido de  $Al_2O_3$  de la ceniza volante, que contribuye a la formación de sal de Friedel y reduce la permeabilidad del ion cloruro.
- Los resultados de porosidad total y de la PRPC indican que en el concreto fabricado con RCA la estructura de poros es más abierta que la del concreto convencional. El uso de 30% FA y 10% HS repercute en una disminución de tres y cinco veces, respectivamente, la carga total pasada a través del concreto, lo que significa un incremento considerable en la resistencia a la penetración del ión cloruro.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por su apoyo económico. A la Universidad Autónoma de Sinaloa, al Centro de Investigación en Materiales avanzados, SC y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo en la caracterización de muestras y análisis de resultados.

## 4. Conclusions

Under the experimental conditions of this research, it is concluded that:

- The replacement of 100% of natural aggregate by RCA decreases concrete electric resistivity and the beginning time of reinforcement corrosion, besides increasing its corrosion speed.
- Flying ashes and silica fume double and quadruplicate, respectively the concrete electric resistivity; they delay the beginning of reinforcement corrosion and decrease its speed.
- Although the electric resistivity magnitude of concrete with silica fume is double than the one for concrete containing flying ashes, both corrosion resistances are similar due to a high content of  $Al_2O_3$  in flying ashes, that contributes to the formation of Friedel's salt and reduces the ion chloride permeability.
- The results for total porosity and for PRPC indicate that concrete elaborated with RCA has a pore structure more open than conventional concrete. The use of 30% FA and 10% HS leads to a decrease from three to five times, respectively, of the total load passing throughout concrete, which means a considerable increase of the ion chloride penetration resistance.

## 5. Acknowledgements

Authors wish to thank CONACYT for the economical contribution granted. Special thanks to the Autonomous University of Sinaloa, Research Center of Advanced Materials, SC and; to the Autonomous University of Nuevo León for the support in the samples characterization and results analysis.

## 6. Referencias/References

- Ajdkiewicz, A & Kliszczewicz, A. (2002)**, 'Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC', *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, no. 2, pp. 269-279.
- Andrade, C & Alonso, C. (1996)**, 'Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site', *Construction and Building Materials*, vol. 10, no. 5, pp. 315-328.
- Ann K.Y, Moon H.Y, Kim Y.B & Ryou, J. (2008)**, 'Durability of Recycled Aggregate Concrete using Pozzolanic Materials', *Waste Management*, vol. 28, no. 6, pp. 993-999.
- Berndt, M.L. (2009)**, 'Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate', *Construction and Buildings Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2606-2613.
- Dhir R.K, Jones M.R & McCarthy M.J. (1993)**, 'Quantifying chloride-induced corrosion from half-cell potential', *Cement and Concrete Research*, vol. 23, no. 6, pp. 1443-1454.
- Casuccio M, Torrijos M.C, Giaccio G & Zerbino, R. (2008)**, 'Failure mechanism of recycled aggregate concrete', *Construction and Buildings Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 1500-1506.
- Chen H, Yen T, & Chen, K. (2003)**, 'Use of building rubbles as recycled aggregates', *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 1, pp.125-133.
- Corinaldesi, V & Moriconi, G. (2009)**, 'Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete', *Construction and Buildings Materials*, vol. 23, no. 8, pp. 2869-2876.
- Etxeberria M, Vazquez E & Mari, A. (2007)**, 'Recycled aggregate concrete as structural material', *Materials and Structures*, vol. 40, no. 5, pp. 529-541.
- Fajardo G, Valdez P & Pacheco, J. (2009)**, 'Corrosion of steel rebar embedded in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides', *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp.768-774.
- Federal Highway Administration. (2002)**, 'Corrosion Costs and Preventative Strategies in the United States', Publication No. FHWA-RD-01-156.
- González J.A, Ramírez E, Bautista A, Feliú, S. (1996)**, 'The behavior of pre-rusted steel in concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 3, pp. 501-511.
- Gómez, J.M.V. (2002)**, 'Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study', *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 8, pp. 1301-1311.
- González B & Martínez, F. (2008)**, 'Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume'. *Materials and mechanical properties*, *Building and Environment*, vol. 43, no. 4, pp. 429-437.
- Gowers, K.R & Millard, S.G. (1993)**, 'On-site linear polarization resistance mapping of reinforced concrete structures', *Corrosion Science*, vol. 35, no. 5-8, pp. 1593-1600.
- Katz, A. (2003)**, 'Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 5, pp.703-711.
- Kou S.C, Poon C.S & Chan, D. (2008)**, 'Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete', *Materials and Structures*, vol. 41, no. 7, pp. 1191-1201.
- Mangat, P.S & Molloy, B.T. (1992)**, 'Factors influencing chloride corrosion of reinforcement in concrete', *Materials and Structures*, vol. 25, no. 7, pp. 404-411.
- Martínez, I & Mendoza, C. (2006)**, 'Comportamiento mecánico de hormigón fabricado con agregados reciclados', *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 7, no. 3, pp. 151-164.
- Padmini A.K, Ramamurthy K, & Mathews, M.S. (2009)**, 'Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete', *Construction and Buildings Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 829-836.
- Polder R, Andrade C, Elsener B, Vennesland O.E, Gulikers J, Weidert R & Raupach, M. (2000)**, 'Test methods for on site measurement of resistivity of concrete', *Materials and Structures*, vol. 33, no. 10, pp. 603-611.
- Poon C.S., Shui Z.H., Lam L, Fok H & Kou, S.C. (2004)**, 'Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 1, pp. 31-36.
- Poon C.S, Shui Z.H & Lam, L. (2004)**, 'Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates', *Construction and Buildings Materials*, vol. 18, no. 6, pp. 461-468.
- Rahal, K. (2007)**, 'Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate', *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 407-415.
- Stern, M & Geary, A. (1957)**, 'Electrochemical Polarization', *Journal of the electrochemical society*, vol. 104, no. 56, pp. 56-63.
- Sunderland, J.E & Johnson, K.R. (1964)**. 'Shape factors for heat conduction through bodies with isothermal or convective boundary conditions', *ASHRAE 71st Annual Meeting*, Cleveland.
- Tam V.W.Y, Gao X.F & Tam, C.M. (2005)**, 'Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach', *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1195-1203.
- Topçu, I & Sengel, S. (2004)**, 'Properties of concretes produced with waste concrete aggregate', *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 8, pp.1307-1312.
- Torrents J.M, Roncero J & Gettu, R. (1998)**, 'Utilization of impedance spectroscopy for studying the retarding effect of a superplasticizer on the setting of cement', *Cement and Concrete Research*, vol. 28, no. 9, pp. 1325-1333.
- Tu T, Chen Y & Hwang, C. (2006)**, 'Properties of HPC with recycled aggregates', *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 5, pp. 943-950.
- Tumidajski P.J, Shumacher A.S, Perron S, Gu P & Beaudoin, J.J. (1996)**, 'On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems', *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 4, pp. 539-544.
- Tumidajski, P.J. (2005)**, 'Relationship between resistivity, diffusivity and microstructural descriptors for mortars with silica fume', *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 7, pp. 1262-1268.