

Capítulo 4

Uso de Materiales Reciclados para el Mejoramiento de las Propiedades Mecánicas y Electroquímicas de Concreto Reforzado

Sandra Viveros-Aguirre¹, Ibeth Rivera-Ortíz¹, Alberto Álvarez-Castillo², Carmina Menchaca-Campos¹, Jorge Uruchurtu-Chavarín¹

¹Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, México.

²Instituto Tecnológico de Zacatepec (ITZ), Calzada Instituto Tecnológico 27, Col. Ampl. Plan de Ayala, C.P. 62780, Zacatepec, Morelos, México.

sandra.viveros@uaem.mx, ibeth.rivera@uaem.mx, nuabli@hotmail.com, cmenchaca@uaem.mx, juch25@uaem.mx

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.244>

Referenciar este capítulo

Viveros-Aguirre, S., Rivera-Ortíz, I., Álvarez-Castillo, A., Menchaca-Campos, C., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2015). Uso de materiales reciclados para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y electroquímicas de concreto reforzado. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 61-71.

1. Introducción

En la actualidad existe un problema latente que afecta la infraestructura y economía de todos los países del mundo, es lamentablemente un problema global, denominado corrosión. La corrosión en alguna de sus definiciones es el deterioro de las propiedades físicas y/o químicas de un material por el paso del tiempo a consecuencia de los efectos ambientales (Schweitzer, 1996).

El fenómeno de la corrosión en metales se refiere a una reacción electroquímica que ocurre en la interfase metal-medio ambiente; es decir, la corrosión, en cualquiera de sus tipos, se presentará en la superficie del metal que se encuentra en contacto con un medio electrolítico; dando como resultado la transformación irreversible del metal a un estado de oxidación (Cembrero, 2005). Esta transformación propicia que el metal pierda sus propiedades físicas y químicas, dando lugar a que ya no sea utilizable o idóneo en el desempeño para el que fue seleccionado.

Para controlar el fenómeno de corrosión se utilizan los recubrimientos metálicos y/o orgánicos, los cuales presentan una barrera física entre el metal y el medio para reducir sus efectos. También es común utilizar los inhibidores de la corrosión, sustancias químicas que reaccionan o interaccionan con el metal o el medio para reducir la velocidad de disolución metálica, permitiendo que el metal alcance o supere su vida útil.

Una aplicación importante de los metales es su uso en la construcción; ya que es utilizado durante el proceso de construcción y también como elemento estructural. El concreto reforzado, es un sistema ampliamente utilizado por presentar excelentes propiedades mecánicas a la tensión y compresión que le imparten sus elementos constitutivos. Además de esto, el pH del concreto (aproximadamente 12.5) ofrece condiciones ideales para la pasivación del acero.

El concreto es la mezcla homogénea de materiales granulométricos, un cementante y un hidratante. Está formado por arena, grava, cemento y agua y cuando integra elementos metálicos como varilla corrugada se conoce como concreto reforzado. También es considerada la relación de vacíos que contiene, puesto que esta indica la porosidad de la estructura (Valera, 2005).

El acero en la construcción es sumamente importante, ya que refuerza al concreto para permitir que el elemento estructural tenga óptimas propiedades mecánicas de flexión y compresión, es decir que soporte la carga o peso para el que fue diseñado, aunado a que abata los efectos de pandeo o deformación longitudinal (Gutiérrez de López, 2003).

La resistencia a la deformación longitudinal es el aporte del acero de refuerzo en la estructura, ya que tiene una propiedad mecánica denominada flexión, que permite que se pueda deformar y regresar a su forma original un gran número de veces.

El tiempo de vida de un concreto reforzado, se determina tomando en cuenta diversos factores como: cementante, agregados y tipo de agua utilizada, tipo de suelo donde se construye la estructura, capacidad de carga que debe soportar, cantidad de acero de refuerzo necesario, tipo de edificación según su uso y las *cargas móviles vivas* (Tejero, 1987).

Las condiciones ambientales dañan a una estructura de concreto reforzado o metálica, debido a la interacción que tienen los metales con los parámetros meteorológicos que prevalecen en el ambiente, aunado a los contaminantes como cloruros o sulfatos procedentes del mar o de las industrias (Del Ángel, Frías, Batista, Córdoba & Rodríguez, 2007).

La gravedad del fenómeno en los metales utilizados como elementos estructurales se debe a que, con el paso del tiempo, y los contaminantes presentes en el medio ambiente (cloruros, sulfatos y bióxido de carbono) atacará el metal estructural o modificará al concreto, propiciando la corrosión metálica de tal forma que el elemento estructural quede inhabilitado, y facilitando que a largo plazo se produzca el colapso de toda la estructura (Sidney, 1992).

Por ello cuando los parámetros ambientales afectan las estructuras, existe la opción de utilizar productos denominados “inhibidores de la corrosión”, que son sustancias que reducen de manera significativa la velocidad del proceso de corrosión (Gómez de León & Alcaraz, 2004). La utilización de estos depende del metal a proteger, del medio al que estará expuesto, de su disponibilidad y costo en el mercado (CIMCOOL, 2004).

1.1. Antecedentes

En la constante búsqueda de mejorar la calidad de vida del ser humano, las estructuras de concreto reforzado han ido cambiando paulatinamente, ahora no solo se deben diseñar las estructuras con base a un reglamento, sino que además se busca la conformación de nuevos tipos de concreto reforzado.

Dichas conformaciones no implican modificar la estructura original del concreto, sino que solo proveen un refuerzo adicional al del acero, ya sea con el agregado de fibras cerámicas, poliméricas o metálicas (IMCyC, 2007); o con la inclusión de diversos tipos de aditivos a la mezcla del concreto; aditivos que aceleren el *fraguado*, que mejoren la resistencia a la compresión, que disminuyan la porosidad del concreto y/o que inhiban la corrosión del acero.

Se han utilizado las fibras metálicas en el concreto reforzado, a fin de mejorar su módulo de ruptura, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia a la corrosión, tenacidad y módulo de elasticidad; habiendo mejoras en la resistencia a la compresión y en la tenacidad (Castañeda, Olague, Almeraya, Gaona & Martínez, 2000).

Uno de los principales agregados en los concretos reforzados son las fibras poliméricas o sintéticas; las cuales reducen las fisuras por asentamiento y por contracción plástica, disminuye la permeabilidad e incrementan la resistencia a la fractura, al impacto y a la abrasión, en comparación con el concreto reforzado simple (NRMCA, 1998). Los agregados poliméricos ofrecen estas ventajas ya que es un material, que dependiendo de su estructura cristalográfica, proporcionará propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, ópticas y fisicoquímicas, superiores al resto de los materiales; ya que cada polímero es sintetizado específicamente para mejorar lo ya existente (Nicholson, 2006).

Se conocen en la actualidad tres formas de utilizar los polímeros en la construcción (Ramírez, 1999):

- Concreto reforzado modificado con polímeros: se logra adicionando la resina en el mezclado del concreto, a fin de disminuir la permeabilidad (Reichhold, 2000).
- Concreto pre-esforzado por fibras sintéticas: incrementan resistencia a la fractura, impacto y abrasión (ICONTEC, 2007).

- **Concreto reforzado polimérico:** Se logra sustituyendo el cemento por resinas poliméricas: incrementa la resistencia a la fractura, compresión, tensión, disminuye permeabilidad y corrosión (Pérez, 2004).

El concreto polimérico a pesar de mejorar muchas propiedades mecánicas, no ha logrado sustituir el concreto reforzado en virtud de que su modulo de elasticidad es bajo, tiene una fluencia más acusada y susceptibilidad a la temperatura; y al no contar con una hidratación continua sus propiedades mecánicas ya logradas en el fraguado jamás pueden ser mejoradas, como sucede en el concreto reforzado convencional.

Finalmente, la construcción en nuestros días viene exigiendo nuevos materiales que superen las propiedades habituales y las limitaciones existentes. Pues en conjunto con todas las herramientas, materiales y conocimientos actuales podemos conformar un material que logre estos objetivos y vaya aún más lejos, permitiendo que la velocidad de corrosión disminuya y el tiempo de vida de las estructuras de concreto reforzado se prolongue.

El nylon es un polímero utilizado en el ramo de la construcción. Las fibras de este polímero son utilizadas para prevenir la fisura en el concreto en estado fresco o durante la retracción plástica, así como para mejorar sus propiedades a la compresión y a la flexión (ICONTEC, 2007). De igual forma el nylon ha sido utilizado en complementación del acero en forma de barra, que no sustituye al acero, pero si incrementa la resistencia a la tensión, al impacto y a la deformación del elemento estructural (Melancon, 2006). Por otra parte, en su forma líquida sella la porosidad del concreto, evitando la permeabilidad, facilitando el fraguado y disminuyendo la corrosión del acero de refuerzo (Nycote, 2002).

Con base en estas aplicaciones y resultados comprobados se ha utilizado el nylon en dos de sus composiciones: el nylon 6,6 y el nylon 6,12 que presentan similares propiedades, según la Tabla 1 (Islas & Escobar, 1991; Reséndiz & Castrellón, 2005; Parisot, 1964).

Poliamida	Color	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la Compresión (Kg/cm²)	Dureza Rockwell	Coefficiente fricción
Nylon 6,6	Traslúcido	1.14	1054.62	R 118	0.45
Nylon 6,12	Traslúcido	1.35	1328.81	R 120	0.46

Tabla 1. Tabla comparativa de propiedades físicas de las poliamidas elegidas

Alternativamente y para propósitos comparativos, se utilizaron partículas de poliestireno expandido EPS (unicel) que es un material plástico espumado, derivado del poliestireno y utilizado en el sector del envase y la construcción. Su cualidad más destacada es su higiene al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos. Es decir, no se pudre, no se enmohece ni se descompone. Otras características son su ligereza, resistencia a la humedad y capacidad de absorción de los impactos. Esta última lo convierte en un excelente acondicionador de productos frágiles o delicados.

Otra de las aplicaciones del poliestireno expandido es la de aislante térmico en el sector de la construcción, utilizándose como tal en fachadas, cubiertas, suelos, etc. Se clasifica en cinco tipos de acuerdo con la densidad y conductividad térmica que se obtenga en su fabricación. Estos

valores varían entre los 10 y 25 kg/m³ de densidad y los 0,06 y 0,03 W/m°C de conductividad térmica, aunque solo sirven de referencia, pues dependiendo del fabricante estos valores pueden ser mayores o menores. Sin embargo, tiene como desventaja el hecho de ser fácilmente inflamable y además es atacado por ciertos tipos de disolventes, barnices o pinturas.

1.2. Concreto Polimérico con Agregados

Se ha hecho un estudio comparativo de concreto con agregados poliméricos para determinar su comportamiento mecánico y electroquímico utilizando nylon y uniceL. Para mejorar la compatibilidad del polímero con el concreto, se modificó la superficie de dicho agregado al sumergirlo en una solución de poliacrilatos. Para la elaboración de esta solución polimérica, se varió el porcentaje en volumen del poliacrilato comercial, en diferentes proporciones como son 2.5%, 5% y 10% en volumen por cada 10 unidades de agua desionizada. Posteriormente se dejó impregnar durante 24 horas, a continuación se extrajo y se dejó secar por completo antes de mezclarse con los demás componentes.

Se optó por agregados de poliestireno expandido por las propiedades que tiene éste polímero, gran ligereza por su alto contenido de aire (98% aire y 2% poliestireno), así como su capacidad de absorber energía causada por golpes y vibraciones, gran aislante térmico, y es resistente a los rayos UV, ya que, aunque lo decolora ligeramente, la exposición a estos rayos no afectan sus propiedades mecánicas. Otra razón por la que se utilizó poliestireno expandido, es porque, aunque es reciclable la mayoría de las personas no lo hace. En México cada año solo el 12% de los desechos de uniceL se recicla (SEMARNAT, 2012) y a comparación con los 30% - 60% de los países desarrollados, esta es una pequeña cifra si consideramos que, la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC) calcula que hay 3.8 millones de toneladas de basura plástica generada anualmente.

En el ejemplo presentado en este capítulo, para preparar el concreto con agregados poliméricos de nylon y uniceL reciclado, lo que varió en la elaboración fue el porcentaje en volumen de la arena en diferentes proporciones como son: 50% arena y 50% polímero, 75% arena y 25% polímero, 85% arena y 15% polímero. Los demás materiales utilizados para la fabricación del concreto, como son el cemento, grava y agua, se mantuvieron igual en las tres proporciones.

2. Discusión

2.1. Muestras de Concreto

De acuerdo a esto se elaboran cilindros de concreto simple para las pruebas de resistencia a la compresión y cilindros de concreto reforzado para las pruebas electroquímicas por inmersión, considerando la norma NMX-C-281, que permite la utilización de moldes de plásticos (PVC) con base de cartón impermeabilizada, con 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, y su proceso de curado cumple la norma NMX-C-159-ONNCCE (2004), tal como se muestra en la Figura 1a.

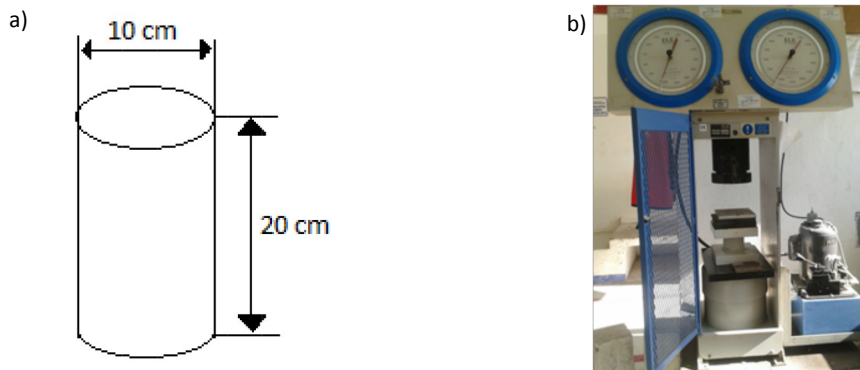


Figura 1. Geometría de los cilindros elaborados para las pruebas mecánicas

El concreto se elabora con base en las siguientes dosificaciones de material (Tabla 2): área por cilindro de 0.00785 m^2 , acero de refuerzo: varilla corrugada de 1" tipo C1042, volumen por cilindro de 0.00157 m^3 .

Material	Para 1m^3
Cemento Portland (CPP 30R/RS/BRA)	400 kg
Agua limpia	228 l
Arena (pasa Malla No. 4, retenida malla 200)	532 l
Grava (3/4")	760 l
Poliamida (solo utilizado en 10 cilindros)	100 g

Tabla 2. Características del concreto

2.2. Pruebas Mecánicas y de Corrosión

2.2.1. Resistencia a la Compresión

Los cilindros se desmoldan y se sumergen en el tanque de curado por un período total de 28 días como se establece en la norma ASTM C39. Para medir su resistencia a la compresión se utiliza una prensa universal hidráulica, a este proceso se le conoce en la jerga ingenieril como "tronado". Para poder tronarlos es necesario preparar los cilindros; primero deben retirarse del tanque de curado hasta que eliminen la sobresaturación de agua, se miden los diámetros para constatar un posible cambio, posteriormente se cabecean ambas bases con azufre fundido mismo que funcionará como nivelador y amortiguador entre las dos superficies de contacto y finalmente son colocados en la prensa universal. La resistencia a la compresión será medible en el momento en que el cilindro presente la primer fractura o grieta, o en su defecto la prensa se detenga. En la Figura 1b se muestra la prensa hidráulica utilizada para estas pruebas.

Los materiales de desecho, como el poliestireno expandido (EPS) o el nylon 6,6 son candidatos prometedores para ser utilizados como aditivos para el concreto reforzado. Los resultados experimentales basados en la determinación de las propiedades mecánicas y electroquímicas proporcionan un panorama de los posibles efectos benéficos derivados de su aplicación. Se

presenta el estudio comparativo en el rendimiento general del comportamiento de concreto armado y su posible aplicación como elemento en la construcción con el valor agregado obtenido de la inclusión de estos materiales reciclados.

En la Figura 2 se pueden observar las diferencias de las muestras de concreto con unigel y con nylon 6, 6, donde se observa que en ambos casos en presencia de los agregados la resistencia a la compresión disminuye, comparada con la muestra sin agregados o “blanco”. Sin embargo, en ambos casos la mejor relación fue de 75% arena y 25% para el agregado, resultando que las muestras de nylon 6,6 alcanzan valores de 210 kg/cm² siendo éstas las que presentan mejores valores de resistencia a la compresión. El valor del concreto sin agregados alcanza 250 kg/cm² que es el valor mínimo recomendado por la norma para estructuras con carga máxima. Sin embargo, a pesar de que los valores de resistencia a la compresión están por debajo de los nominales, el concreto reforzado con agregados poliméricos puede tener aplicaciones en estructuras que no requieran de niveles de carga máxima.

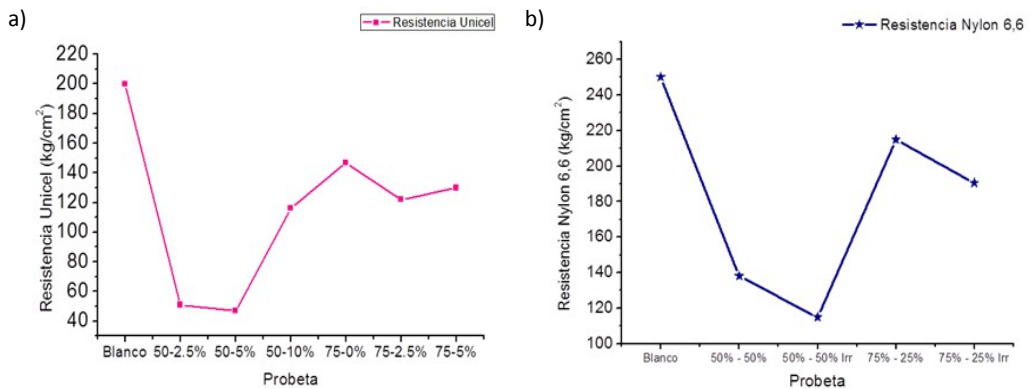


Figura 2. Resistencia a la Compresión de a) concreto reforzado con unigel, b) concreto reforzado con nylon 6,6 irradiado

2.3. Pruebas Electroquímicas

Para evaluar las condiciones termodinámicas y cinéticas de la corrosión de las varillas embebidas en concreto se utilizan pruebas aceleradas de inmersión en un electrólito agresivo, mediante pruebas electroquímicas de potencial de corrosión, resistencia a la polarización y ruido electroquímico. Estas son muy efectivas en la evaluación de la velocidad de corrosión (Meas & Genescá, 2002).

2.3.1. Medición de Potenciales en Varillas de Refuerzo

En la Figura 3a se observan las mediciones de potencial realizadas mediante un voltímetro y con un electrodo de referencia de calomel a cada una de las varillas de cada cilindro, inicialmente se toman las mediciones durante los 28 días de curado, posteriormente se agrega al tanque de curado con una solución de NaCl al 3% para simular un ambiente marino agresivo, de igual forma se realizan mediciones durante 36 días. Para las muestras con unigel los potenciales tienden a

hacerse más negativos o activos. En el caso de las muestras con nylon 6,6 los valores se mantienen estables o se hacen más positivos o nobles. Los valores entre -250 mV y -650mV son el intervalo en donde la posibilidad de corrosión es mayor.

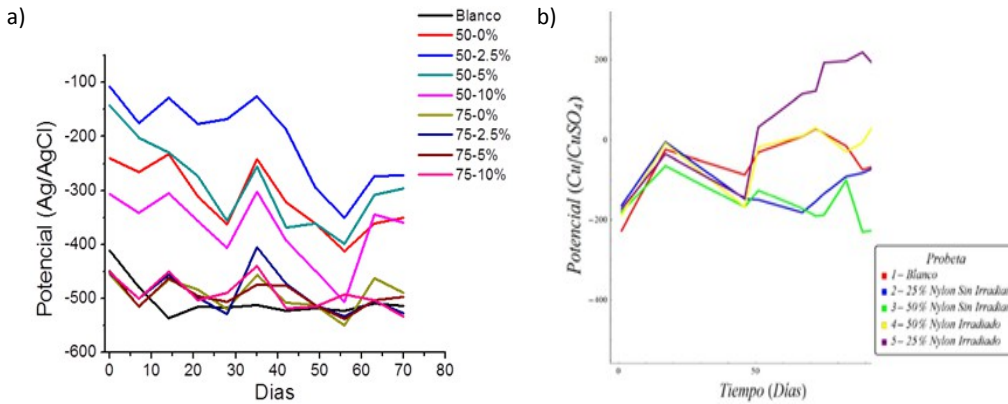


Figura 3. Mediciones de Potencial en Concreto con agregados de a) uncel y b) nylon 6,6

2.4. Resistencia a la Polarización

La Figura 4 presenta valores de resistencia a la polarización, que es inversamente proporcional a la corrosión global de las muestras de varillas de refuerzo. Las muestras con uncel presentan valores estables entre 100 y 1000 ohms-cm² con los valores más altos de la muestra 50-2.5%. En el caso de las muestras con nylon 6,6 los valores se ubican entre 50 y 500 ohms.cm², observándose los valores mayores para la muestra sin agregados. De acuerdo con estos resultados, las muestras que contienen agregados de uncel tendrían un comportamiento ligeramente superior.

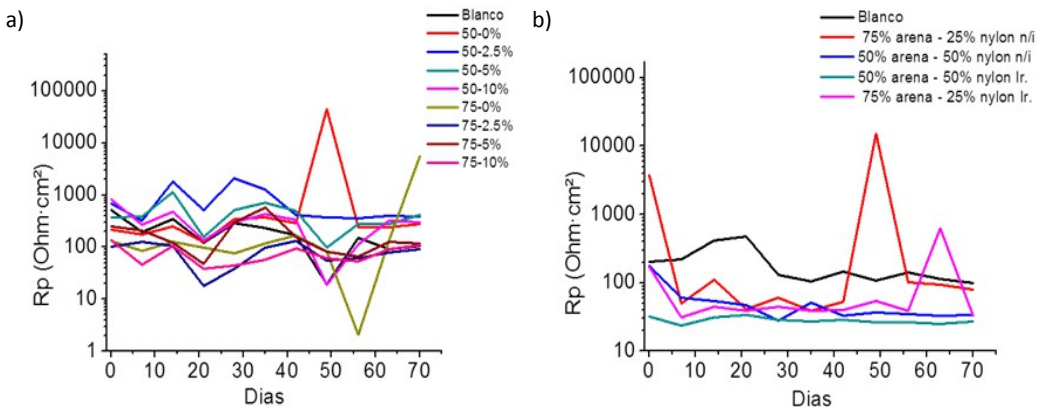


Figura 4. Mediciones de Resistencia a la Polarización en Concreto con agregados de a) uncel y b) nylon 6,6

2.4.1. Ruido Electroquímico

Los resultados anteriores contrastan con los valores de ruido electroquímico que muestran resistencias de ruido entre $1E6$ ohm-cm² para las muestras con uncel, y un orden de magnitud mayor de $1E7$ ohm-cm² para las muestras con nylon 6,6 como se observa en la Figura 5. Esto de manera inversa al caso anterior, debido a que el ruido electroquímico magnifica la corrosión localizada. Esto significa que las muestras con agregados de nylon 6,6 sufren de un ataque más localizado debido a rompimientos de la capa de óxido pasivante, formado por encima del pH 12. La Figura 6 muestra un comparativo de ambas técnicas.

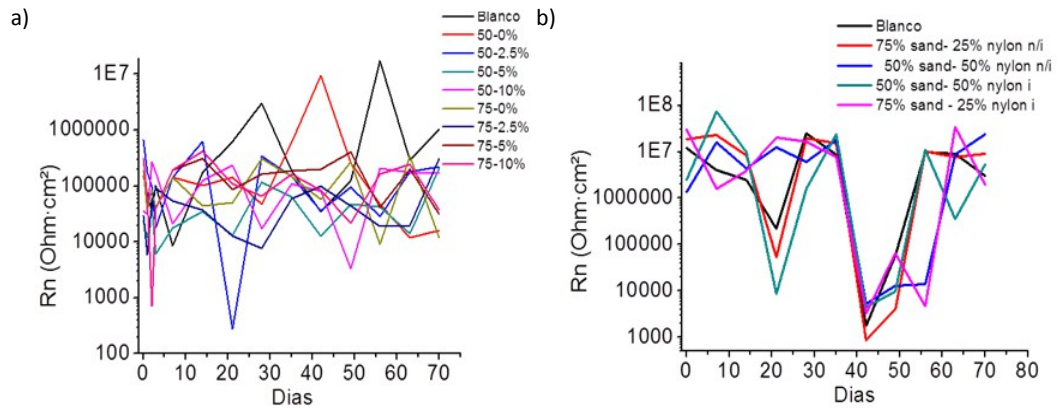


Figura 5. Mediciones de Ruido Electroquímico en Concreto con agregados de a) uncel y b) nylon 6,6

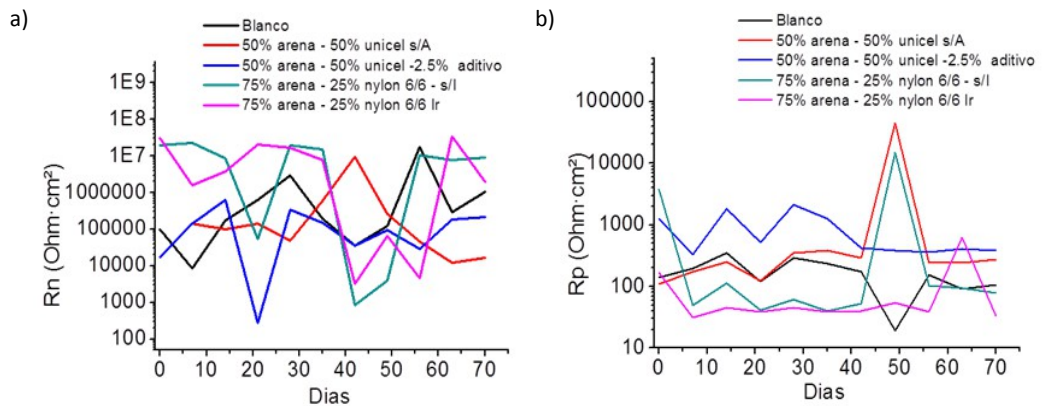


Figura 6. Comparativas de concreto a) Ruido Electroquímico, b) Resistencia a la Polarización

2.4.2. Investigaciones Futuras

Dentro del desarrollo de concretos con agregados es de suma importancia el estudio del efecto de surfactantes para mejorar la compatibilidad del concreto con el uso de polímeros. Sin embargo el uso de materiales reciclados como agregados puede darle valor agregado a este tipo de estructuras.

3. Conclusiones

El uso de agregados poliméricos puede ser ventajoso, aunque existen problemas por resolver para alcanzar las condiciones óptimas de resistencia mecánica y electroquímica. En el caso de la resistencia mecánica, las muestras con agregados de nylon fue superior, y en el caso de las pruebas electroquímicas el comportamiento de las muestras con los dos agregados fue variable.

Agradecimientos

Al CONACyT y al PRODEP por financiar estos estudios.

Referencias

Castañeda, J., Olague, C., Almeraya, F., Gaona, C., & Martínez, A. (2000). Análisis comparativo entre el concreto hidráulico simple y el reforzado con fibras de acero. *Revista Ingeniería de Construcción*, 15(1), 20-27.

Cembrero, C.J. (2005). *Ciencia y Tecnología de Materiales* (pp. 695). México: Ed. Pearson.

CIMCOOL (2004). *Reporte técnico CIMCOOL, Selección de un inhibidor de la corrosión*. Milacron Marketing CO., 1-3.

Del Ángel, M.E., Frías, M.D.M., Batista, R.R., Córdoba, H.S., & Rodríguez, Z.M. (2007). Comportamiento del acero galvanizado en un ambiente marino costero de Tabasco, *Memorias de la Semana de Divulgación y Video Científico 2007*. 303-308.

Gómez de León, F., & Alcaraz, L.D. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros* (pp. 175). España: Universidad de Murcia servicios de publicaciones.

Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Bogotá Colombia: Ed. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia.

ICONTEC (2007). Explorando el concreto reforzado con fibras CRF. *Noticreto*, 1(84).

IMCyC (2007). Concreto reforzado con fibras.- El concreto en la obra, problemas, causas y soluciones. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, 1(13).

Islas, D., & Escobar, A. (1991). *Síntesis, proceso y caracterización de Nylon 6,10*. Proyecto Terminal, UAM Iztapalapa, México.

- Meas, Y., & Genescá, J. (2002). *Teoría electroquímica de la corrosión. Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión*. México: Ed. UNAM.
- Melancon, P. (2006). *Devices, systems and methods for reinforced concrete and/or asphalt cement*. U.S.
- Nicholson, J.W. (2006). *The Chemistry of Polymers*. USA: University of Greenwich.
- NRMCA (1998). *Fibras sintéticas para el concreto. Qué? Por qué? y Cómo? El concreto en la práctica, 24*, USA.
- NMX-C-159-ONNCCE (2004). *Industria de la Construcción, Concreto, Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. A., México.
- Nycote (2002). *Nylon líquide protective coatings*. Nycote Laboratories Corporation.
- Parisot, A. (1964). *Relación entre la estructura química y las propiedades de las fibras artificiales y sintéticas* (pp. 61-78). UPC Commons Revistes.
- Pérez, J. (2004). *Diseño Experimental y Análisis para comprobar la tenacidad de diferentes tipos de concreto*. Tesis Maestría Universidad Iberoamericana. México.
- Ramírez, J.L. (1999). La múltiple identidad del concreto, *Informes de la Construcción. IMCyC, 49*, 545.
- Reichhold (2000). *Uso de polímeros en concretos*. Fecha último acceso: Agosto 2014. www.proquirsas.com/pdf/introduccion.pdf
- Reséndiz, M.C., & Castrellón, J. (2005). *Microscopio de Fuerza Atómica, Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica* (pp. 1-6). Zacatecas, México.
- SEMARNAT (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. Edición 2012. México. Capítulo 7. p. 317-361. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- Schweitzer, P. (1996). *Corrosion Engineering Handbook*. New York USA: Marcel Dekker.
- Sidney, H.A. (1992). *Introducción a la Metalurgia Física* (pp. 695). México: McGraw-Hill,
- Tejero, E. (1987). *Hormigón armado*. España: Ed. Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón.
- Valera, J.P. (2005). *Apuntes de Física General*. México:Ed. UNAM.