



EVALUACION ELECTROQUIMICA DE CONCRETOS REFORZADOS ALIGERADOS

E P. Reyes Díaz¹, F. Almeraya Calderón², J. G. Osuna³, D. Paredes Ortíz⁴, A. Borunda²,
J. A. Castañeda⁴, C. Gaona Tiburcio^{2*}

¹Univ. Autónoma de Coahuila. Fac. Ing. Civil Unidad Torreón, Torreón, Coahuila, México.

²Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Chihuahua, México.

³Univ. Autónoma de Coahuila. Facultad de C. Quím. Unidad Saltillo Coahuila, México.

⁴Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ingeniería. Chihuahua, Chihuahua, México.

*e-mail: citlalli.gaona@cimav.edu.mx

RESUMEN

Con el fin de generar concretos más versátiles, resistentes y más ligeros, el concreto se encuentra en una investigación constante. El acero de refuerzo es otro elemento que esta también en estudio para su protección en contra de la corrosión dentro de la estructura del concreto ya que presenta deterioro tanto en estructuras normales como las que se encuentran inmersas en medios salinas.

En el presente trabajo se pretende lograr concretos de densidades menores (1,350-1,850 kg/m³) empleando agregados ligeros como la piedra pómez y fibras de polipropileno, materiales re utilizados de desecho tanto de uso común como industrial, así como la evaluación de la resistencia a la corrosión de concretos reforzados ligeros, elaborados con mezclas que incorporan ceniza volante y escoria de alto horno (mezclas ternarias), los concretos que incluyen este tipo de cementantes, pueden desarrollar propiedades ventajosas y mayores resistencias a las esperadas, así como dar mejor protección a los refuerzos metálicos embebidos.

Palabras claves: concreto aligerado, piedra pómez, polipropileno, cenizas volantes, escoria de alto horno, potenciales de corrosión, material de re uso, ruido electroquímico.



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el concreto es el material de construcción más importante y utilizado con mayor frecuencia en las grandes construcciones de complejos industriales, vías de comunicación y edificaciones en todo el mundo.

El inicio del concreto armado ocurrió en la segunda mitad del siglo XIX con la introducción del acero como material de refuerzo al concreto, hecha por Lambot en 1855 en la construcción de barcos de ferrocemento; ya en 1897 Hennebique construyó la primer estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña en el Molino de Weaver [1].

Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los materiales constructivos, agregados especiales (los diversos agregados ligeros o pesados), aditivos (plastificantes, micro sílice, ceniza volante) [2].

El incorporar materiales cementantes suplementarios al cemento Pórtland (mezclas ternarias) presenta grandes ventajas, debido a que desarrolla excelentes propiedades mecánicas y características de larga durabilidad [3].

El concreto ligero (liviano) estructural es un concreto similar al concreto de peso normal, excepto que tiene una densidad menor (1350 a 1850 kg/m³) [4]. Se le produce con agregados ligeros o con una combinación de agregados ligeros y normales o a través del procesamiento de otros tipos de materiales, tales como escorias y piedra pómez natural [4] o artificiales y en la actualidad con el uso de materiales de desecho de uso común o industrial

El objetivo de este trabajo es mejorar las propiedades del concreto generando concretos reforzados aligerados sustituyendo cemento Pórtland por ceniza volante y escoria de alto horno; siendo los agentes aligerantes materiales de re uso (piedra pómez del lavado de la mezclilla y polipropileno material de desecho de costales) y realizando mediciones de potenciales y evaluaciones de ruido electroquímico.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Condiciones Experimentales

2.1.1. *Material*

La piedra pómez es una roca común de origen volcánico lo suficientemente fuerte y ligera, con pesos específicos reales alrededor de 2.40 kg/dm^3 [5]. En este trabajo se re usó piedra pómez del lavado de la mezclilla.

El polipropileno estructuralmente es un polímero vinílico, pertenece al grupo de los termoplásticos, la densidad, esta comprendida entre 0.90 y 0.93 g/cm^3 , es un material fácil de reciclar, tiene buena resistencia química a la humedad y al calor sin deformarse, buena dureza superficial y estabilidad dimensional, posee gran resistencia a agentes químicos y presenta poca absorción de agua [6]. Se utilizó material de desecho de costales de polipropileno en donde se deposita azúcar: El costal es deshilado, el ancho de los hilos que se obtiene varía de 2 a 4 mm con un largo de 1.25 cm.

La caliza es una roca sedimentaria, con dureza de 3; la densidad, puede variar de acuerdo a la cantidad de restos fósiles y silicatos que esta contenga, pero generalmente son ligeras 2.71 g/cm^3 . El uso de las rocas calizas es muy extenso, su mayor utilización es en la construcción.

La escoria, se produce de siderúrgica de alto horno, la cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio.

La ceniza volante es el producto sólido y en estado de fina división, procedente de la combustión de carbón pulverizado de centrales térmicas, que es arrastrado por los gases del proceso y recuperado de ellos, en filtros [7]. Es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio, de color gris o marrón [4].

2.1.2. Preparación de Muestras

Se constituyo el diseño de las dosificaciones, Tablas 1 y 2.

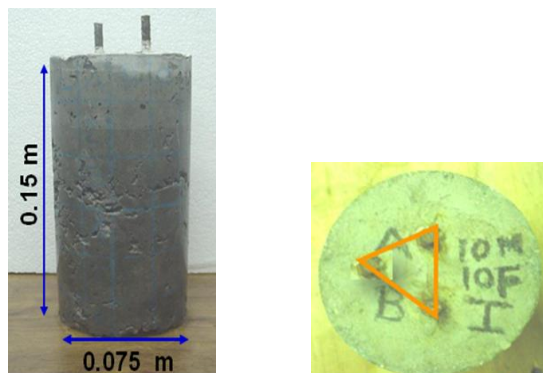
Tabla 1. Dosificaciones elaboradas para especímenes testigos.

| Formula | F1 | F2 | F3 | Formula | F4 | F5 | F6 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----|------|-----|
| Material | (%) | (%) | (%) | Material | (%) | (%) | (%) |
| Caliza +10 | 20 | 22.5 | 25 | Caliza +10 | 20 | 22.5 | 25 |
| Caliza +50 | 30 | 30 | 30 | Caliza +50 | 30 | 30 | 30 |
| Caliza Fina | 10 | 12.5 | 15 | Caliza Fina | 10 | 12.5 | 15 |
| Cemento | 20 | 20 | 20 | Cemento | 20 | 20 | 20 |
| Piedra | 20 | 15 | 10 | Polipropileno | 20 | 15 | 10 |
| Pómez | 2.5 (+10) | 2.5(+10) | 2.5(+10) | | 100 | 100 | 100 |
| | 10(+50) | 10(+50) | 5(+50) | | | | |
| | 7.5(fina) | 2.5(fina) | 2.5(fina) | | | | |
| | 100 | 100 | 100 | | | | |

Tabla 2. Dosificaciones elaboradas para especímenes en por ciento de materias primas.

| Fórmula | F7 | F8 | F9 | F10 | F11 | F12 | F13 | F14 | F15 |
|----------------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|
| Materiales | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Caliza +10 | 20 | 20 | 20 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 25 | 25 | 25 |
| Caliza +50 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Caliza Fina | 10 | 10 | 10 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 15 | 15 | 15 |
| Escoria | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 |
| Cemento | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 |
| Piedra pómez | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| Fórmula | F16 | F17 | F18 | F19 | F20 | F21 | F22 | F23 | F24 |
| Materiales | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Caliza +10 | 20 | 20 | 20 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 25 | 25 | 25 |
| Caliza +50 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Caliza Fina | 10 | 10 | 10 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 15 | 15 | 15 |
| Escoria | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 |
| Cemento | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 |
| Polipropileno | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| Fórmula | F25 | F26 | F27 | F28 | F29 | F30 | F31 | F32 | F33 |
| Materiales | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Caliza +10 | 20 | 20 | 20 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 25 | 25 | 25 |
| Caliza +50 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Caliza Fina | 10 | 10 | 10 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 15 | 15 | 15 |
| Ceniza volante | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 |
| Cemento | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 |
| Piedra pómez | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |
| Fórmula | F34 | F35 | F36 | F37 | F38 | F39 | F40 | F41 | F42 |
| Materiales | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Caliza +10 | 20 | 20 | 20 | 22.5 | 22.5 | 22.5 | 25 | 25 | 25 |
| Caliza +50 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Caliza Fina | 10 | 10 | 10 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 15 | 15 | 15 |
| Ceniza volante | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 | 10 | 5 | 15 |
| Cemento | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 |
| Polipropileno | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 | 10 |

Se elaboraron muestras cilíndricas (0.15m de altura y 0.075m de diámetro) incrustando tres varillas de acero de refuerzo metálicos idénticos formando un triángulo, Figura 1. Se estudiaron dos lotes, uno nombrado acero limpio (se sometió a un cepillado con cerdas metálicas) y otro acero pre oxidado (dos ciclos de inmersión completa en agua y secado al aire libre, sin limpieza posterior), con el objetivo de inducir actividad corrosiva en un menor periodo de tiempo. Los especímenes se sometieron a tiempo de curado normal a 28 días, una vez cubierto este tiempo fueron expuestos a un medio salino

**Figura 1.** Esquema del espécimen empleado

2.2. Mediciones electroquímicas

Para realizar las mediciones de potencial de corrosión, se utilizó el electrodo de referencia de Cu/CuSO₄ (Figura 2), se colocó sobre la superficie del hormigón una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-hormigón. Se tomaron lecturas al momento de su inmersión tanto en el curado normal como en el agua salina, y a los 1, 3, 7, 14, 21 y 28 días. El análisis de las graficas se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación (tabla 3), de la norma ASTM C876 [9].



Figura 2. Mediciones de potenciales de corrosión.

Tabla 3. Criterios de potencial de corrosión (norma ASTM C876).

| Potencial Ecorr (V) | Riesgo de daño |
|----------------------------|----------------------------------|
| Más positivos que -0.200 | 10% de probabilidad de corrosión |
| -0.200 a -0.350 | Cierta incertidumbre |
| Más negativos que -0.350 | 90% de probabilidad de corrosión |

Se generaron series de tiempo para potencial y corriente, con 1024 registros tomando 1 dato por segundo. Se hizo un análisis estadístico de la series, y se obtuvieron los valores de velocidad de corrosión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 3, los especímenes de pómez (acero limpio), en curado normal muestran actividad corrosiva moderada baja, no así con los especímenes de pómez(15%)-caliza(65%) que muestra valores de -0,480V y con una variación pronunciada. En el medio salino los especímenes muestran una variación uniforme en aumento en la actividad

En curado normal las muestras de polipropileno en los porcentajes de 20, al momento de inmersión inician con actividad corrosiva moderada baja y en el transcurso del tiempo de inmersión llega a un valor de $-0,108V$, los especímenes de porcentaje 15, inicia con valores de baja corrosividad y conforme transcurren los días aumenta a moderada alta, el porcentaje de 10, se comporta con variación uniforme de moderada corrosividad.

Al momento de inmersión en medio salino los especímenes (20% y 10%) muestran índices bajos, a excepción del espécimen de 15% de potencial de corrosión moderado alto, en el transcurso del curado muestran corrosividad alta, con variación moderada entre los especímenes.

Las muestras de pomez en relación con las de polipropileno (curado normal) muestran corrosividad baja y las de polipropileno moderada.

En el medio salino muestran ambos tipos de especímenes un corrosividad moderada alta.

Los valores de los especímenes en acero per oxidado de pomez muestran entre si variación en su comportamiento en el curado en agua, la muestra de pomez (20%), inicia con un valor de $-0,497V$ y comportándose de manera irregular en el tiempo de curado, manteniendo una corrosividad moderada. La muestra de porcentaje 15, se comporta sin mucha variación de corrosividad baja, no así llegado a $-0,477v$ en el día 28. La muestra de porcentaje 10, tiene variación de una baja actividad corrosiva al momento de la inmersión y en el día 28 llega a un valor de $-0,555V$.

Al momento de la inmersión en medio salino presentaron diferentes valores, en el transcurso del curado los especímenes muestran una variación uniforme entre sí con actividad corrosiva moderada.

Los especímenes de polipropileno en curado en agua, ingresan con valores de actividad corrosiva moderada, las muestras de polipropileno (20%) disminuyen sus valores de corrosividad, las muestras de polipropileno (15%) obtiene valor alto en pocos días de la inmersión $-0,603V$ y llegando al día 28 con un valor de $-0,447V$, en un porcentaje medio entre las anteriores muestras de polipropileno se presenta la muestra de 10%, con un comportamiento de variación moderado en una baja actividad corrosiva. Los especímenes muestran un comportamiento variado irregular en el medio salino, las muestras con mayor variación fueron los de polipropileno 10%, mostrando valor máximo de $-0,833V$, con una corrosividad moderada alta.

Tanto en los especímenes de polipropileno como de pómez en curado normal, aun en acero pre oxidado muestran una actividad corrosiva moderada y en tanto en medio salino una corrosividad alta

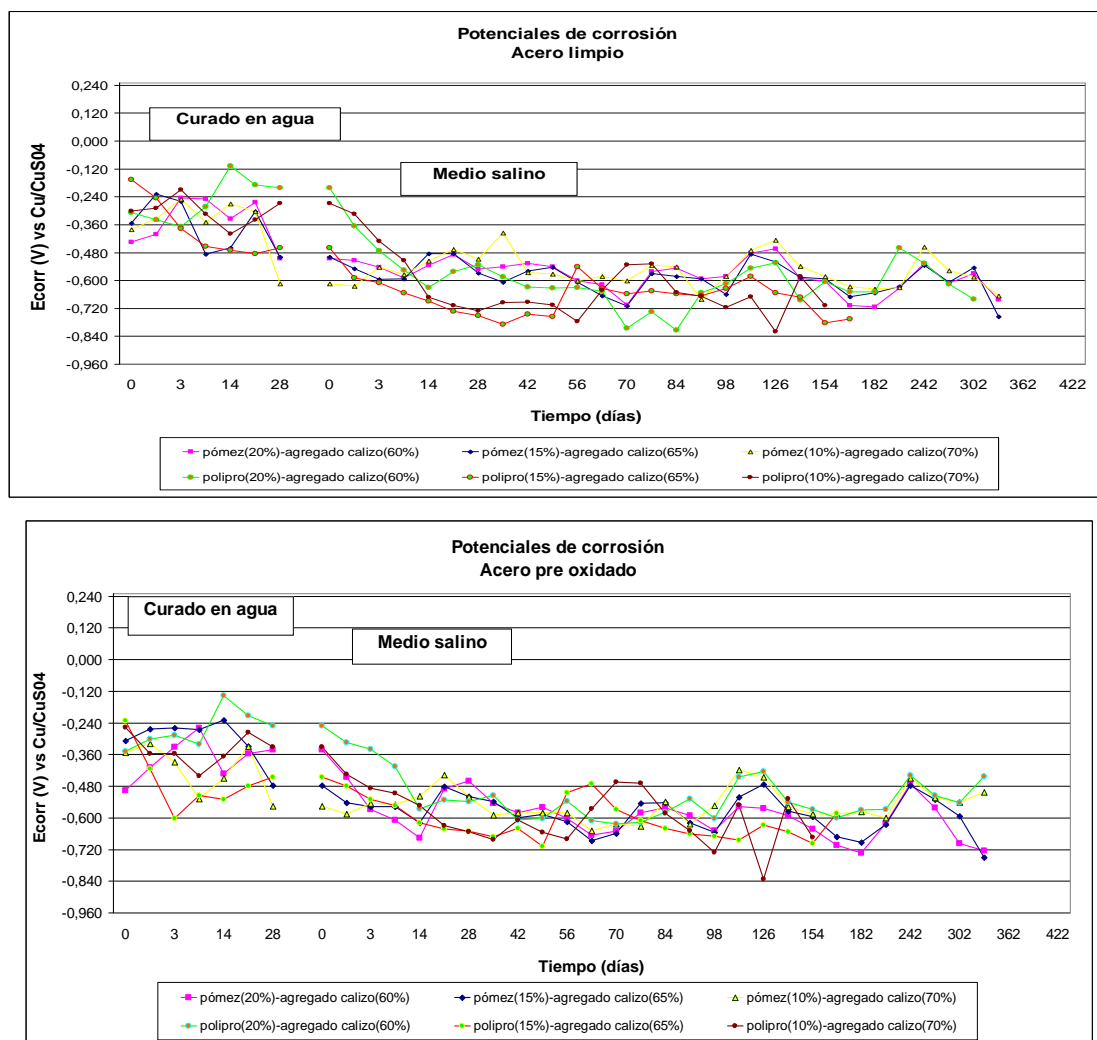


Figura 3. Potenciales de corrosión del espécimen con relación pómez-agregado calizo (testigo).

En la Figura 4. Para el acero limpio, la corrosividad de moderada a alta, no así para caliza (60%) pómez (20%) escoria (15%) que obtiene valores de $-0,734\text{V}$, poca variación entre especímenes. En el medio salino, corrosividad de moderada a alta, variación uniforme en el día 77, los valores tienden a bajar y a partir de este día se da una pronunciada variación llegando al día 126 con un máximo de $-0,920\text{V}$ y un mínimo de $-0,433\text{V}$.

Con variación pronunciada para los especímenes de acero per oxidado, con baja corrosividad al momento de inmersión, caliza(70%) pómez(19%) escoria(5%) con $-0,248\text{V}$ el día 21 la muestra de caliza(65%) pómez(15%) escoria (5%) en el día 14 con $-0,313\text{V}$ llegando a $-0,584\text{V}$ el día 28. Valores de alta corrosividad se presenta caliza(60%) pómez(20%) escoria(10%) al momento de inmersión de $-0,470\text{V}$ con un máximo de $-0,690\text{V}$ en el día 7, para caliza (60%) pómez(20%) escoria(15%) alta corrosividad obteniendo un valor de $-0,785\text{V}$ al día 3 y en disminución al día 28 con $-0,597\text{V}$. Con un comportamiento de moderada corrosividad y poca variación hasta llegar al día 77 en medio salino, con un máximo de $-0,860\text{V}$ al día 126, tendiente a moderada corrosividad.

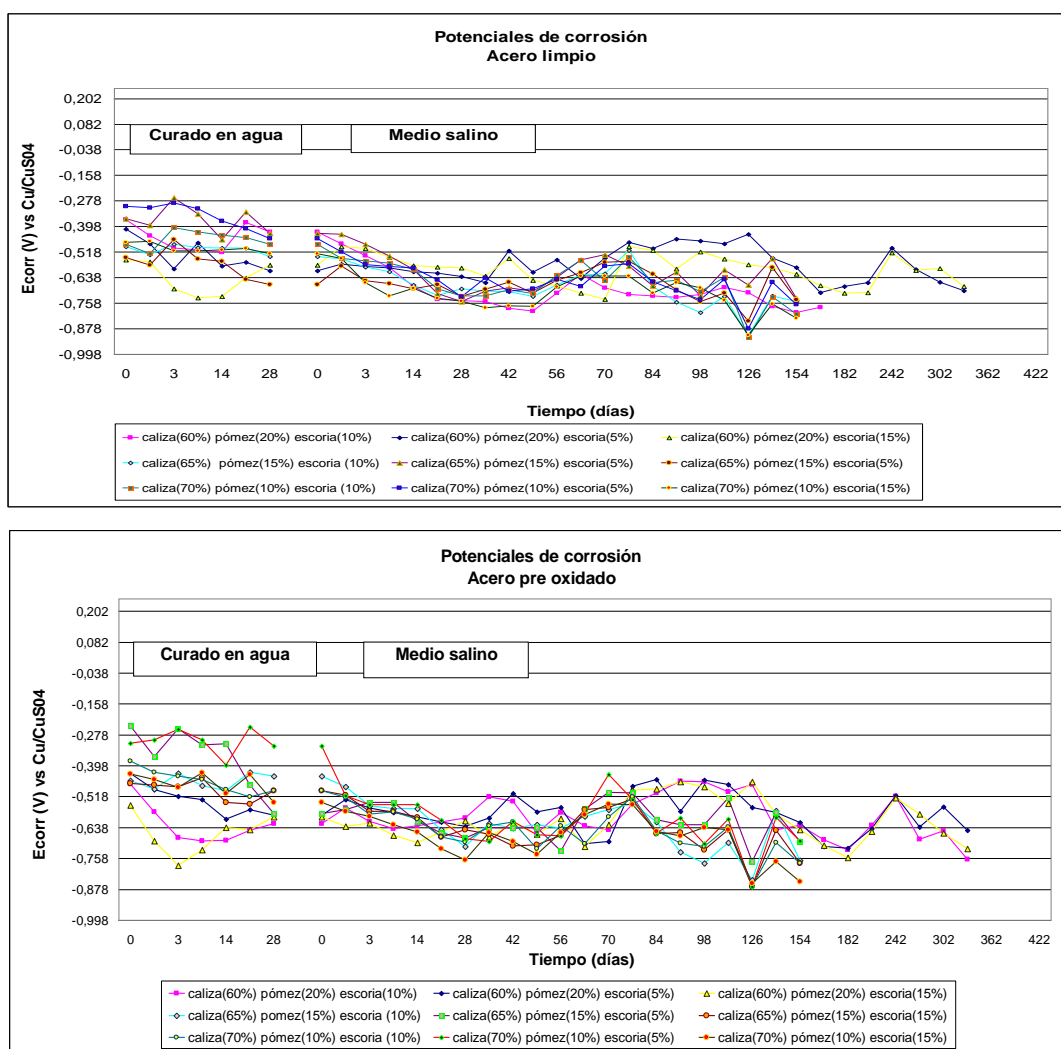


Figura 4. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - pómez -escoria (10, 5, 15%).

En la Figura 5. Los especímenes en acero limpio con variación uniforme entre sí, con actividad de moderada a moderada alta, en caliza (60%) polipropileno-escoria(5%), variación pronunciada con un valor en inmersión de $-0,414\text{V}$ y de $-0,341\text{V}$ al día 3 y de $-0,482\text{V}$ al día 28 y en caliza (70%) polipropileno-escoria(15%) con valores de $-0,459\text{V}$ a $-0,667\text{V}$.

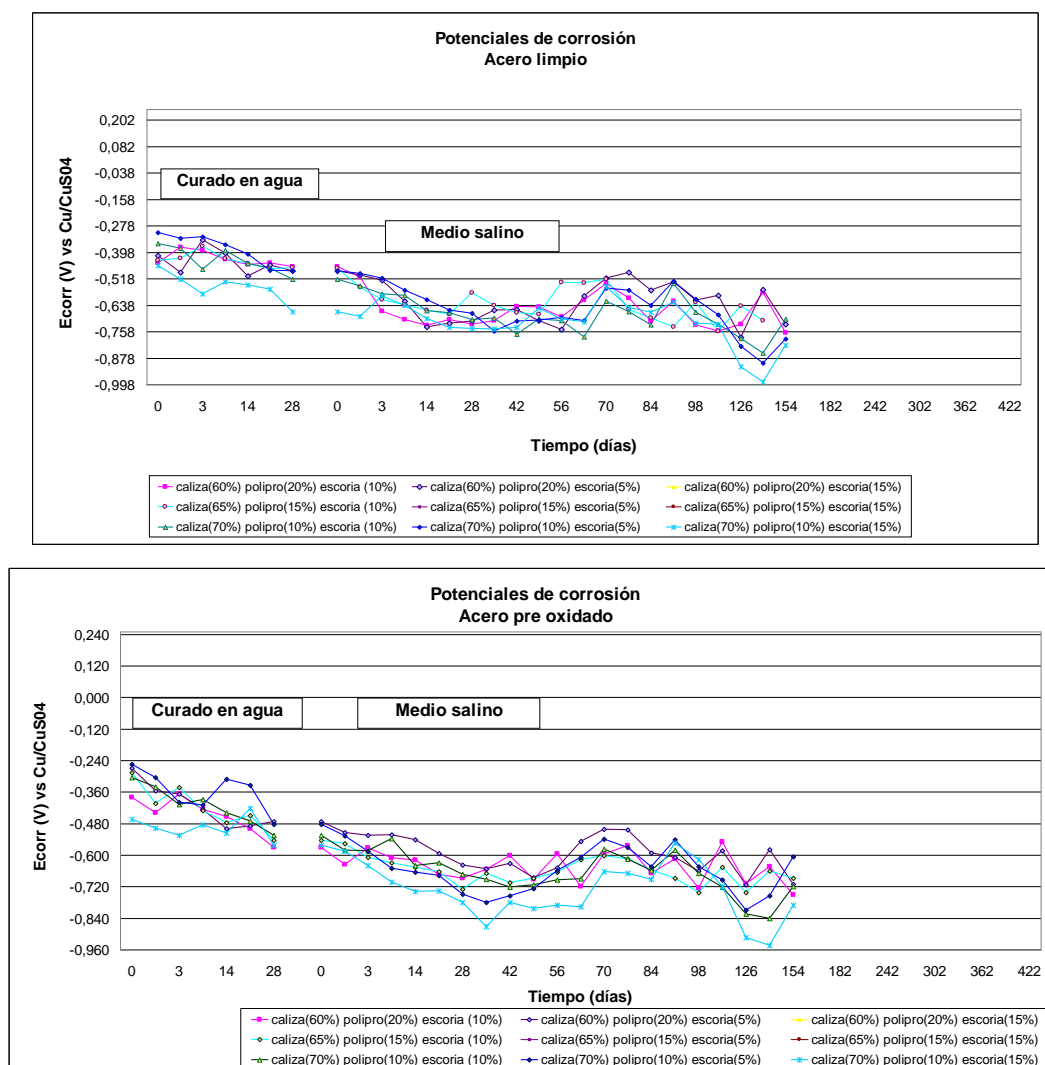


Figura 5. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - polipropileno -escoria (10, 5, 15%).

De variación moderada en medio salino al día 77 en donde se marca una variación de $-0,567\text{V}$ a $-0,985\text{V}$ en el día 140, actividad corrosiva moderada alta.

Para los especímenes de acero pre oxidado la variación es uniforme de baja a moderada actividad corrosiva, con excepción de caliza(70%) polipro-escoria(10%), con un valor de $-0,667\text{V}$.

0,253V al momento de inmersión, al día 7 con -0,410V y en caliza(70%) polipro-escoria (15%) inicia con actividad corrosiva moderada de -0,464V y -0,562V al día 28.

Los valores al momento de inmersión al medio salino se encuentran en una actividad corrosiva baja en aumento con forme transcurren los días, variación moderada entre los especímenes llegando a valor de -0,943V

En la Figura 6, en curado normal los especímenes en acero limpio muestran variación pronunciada en las muestras en caliza(60%) en sus tres diferentes porcentajes y mezclas de pómez-ceniza de corrosividad moderada, con valores de -0,351V, -0,378V y -0,417V al momento de inmersión, llegando a un valor de -0,636V al día 3 y al día 28 -0,610V. Se muestra una actividad corrosiva moderada baja.

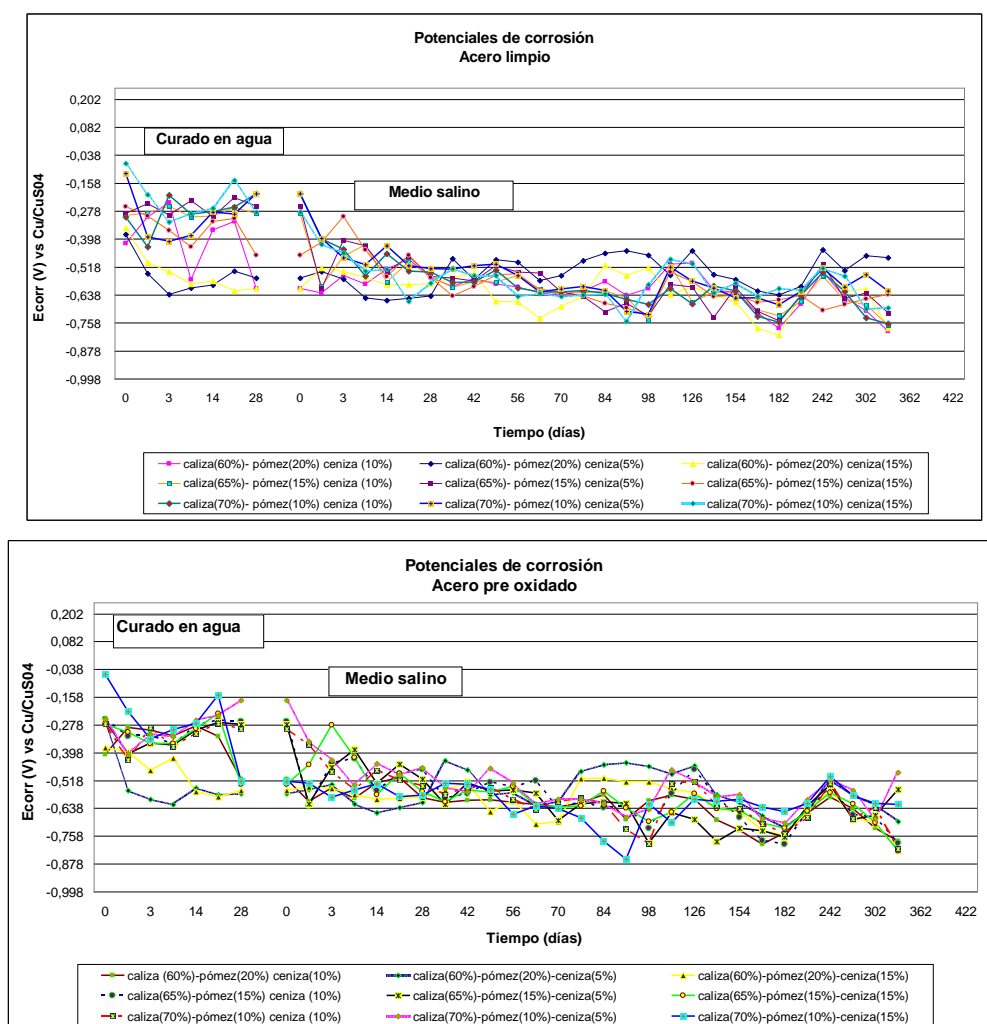


Figura 6. Potenciales de corrosión de los especímenes con agregado calizo - pómez - ceniza (10, 5, 15%).

Los especímenes en el medio salino se comportan con variación moderada entre sí, mostrando una actividad corrosiva moderada alta en el transcurso de tiempo de curado con valores de -0,44V a -0,810V.

En similitud con el acero limpio, el comportamiento entre especímenes de acero pre oxidado es de una variación moderada, con excepción de la combinación de caliza (60%)-pómez-ceniza(5%) con valor de inmersión -0,269V llegando al día 7 con -0,621V, de igual comportamiento se encuentra caliza(70%)-pómez-ceniza(15%), con una variación de -0,060V en inmersión, en día 3 -0,339, día 21 -0,150V y día 28 -0,520V, actividad corrosiva moderada. En medio salino muestran variación moderada entre especímenes en general, llegado el 91 se observa valor de -0,441V en la muestra caliza (60%)-pómez-ceniza(5%) y de -0,858V en caliza (70%)-pómez-ceniza(5%), actividad corrosiva moderada alta.

La figura 7 muestra las series de tiempo en corriente y potencial para el espécimen pómez-ceniza con refuerzo preoxidado, y se observa baja actividad con una velocidad de corrosión de $3.28E-05$ mm/año.

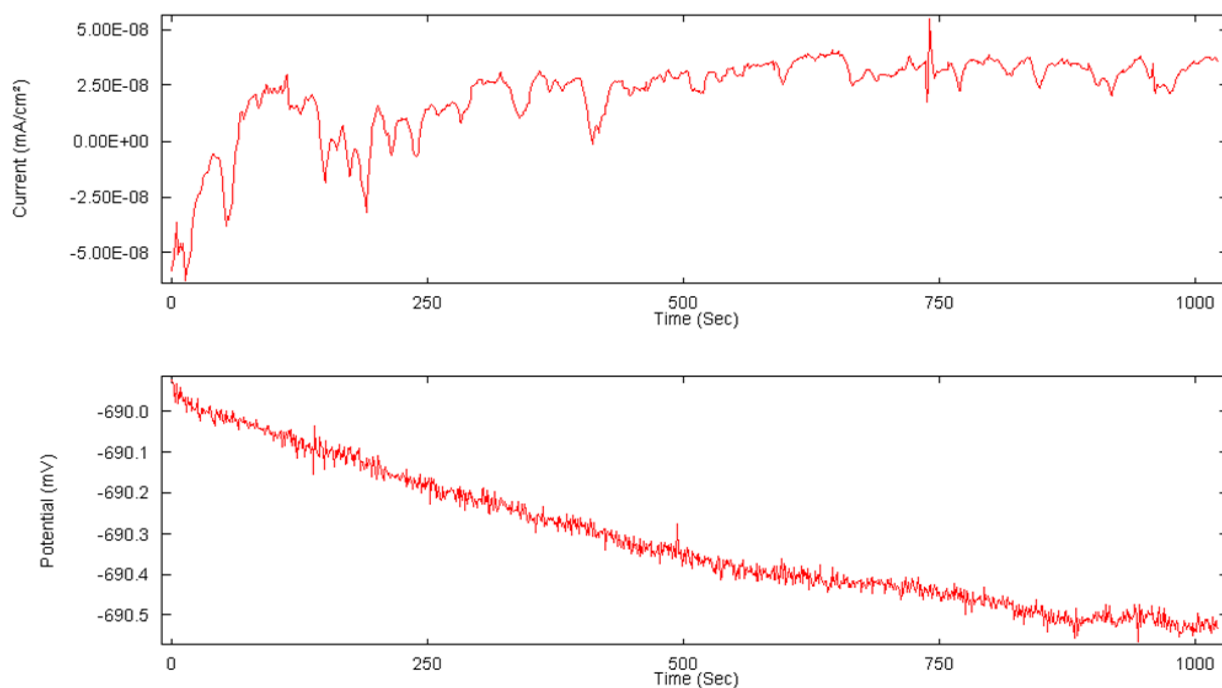


Figura 7. Especímenes elaborados con agregado calizo (60,65,70%) pómez (20,15,10%) –ceniza (10, 5, 15%)

4. CONCLUSIONES

Tras el periodo de curado normal, los especímenes pómez-ceniza muestran potenciales de baja probabilidad de corrosión y/o pasividad para los especímenes con porcentajes bajos de agregado aligerante, tanto para acero limpio como para preoxidado.

En los especímenes elaborados con polipropileno como aligerante, al momento de inmersión en curado normal se tiene baja probabilidad de corrosión, pero conforme pasan los días inicia mayor actividad, alcanzando potenciales que denotan 90% de probabilidad de corrosión. Estos especímenes en general, desde edades tempranas muestran potenciales de corrosión aún en curado normal, y cuando están inmersos en medio salino tornan con un 90% de probabilidad de que estén sufriendo corrosión activa.

Las mediciones y las series de tiempo de ruido electroquímico han permitido calcular la velocidad de corrosión de los especímenes, y en algunos casos particulares se ha encontrado que es aún baja. Se pretende seguir el monitoreo, complementar el análisis de resultados empleando densidades espectrales, y a largo plazo hacer una inspección microscópica y visual del estado de los refuerzos.

5. AGRADECIMIENTOS

Al apoyo otorgado para la realización de este trabajo al Centro de Investigación en Materiales Avanzados, a la Universidad Autónoma de Coahuila, y a la Universidad Autónoma de Chihuahua.

6. REFERENCIAS

- [1] P. Castro-Borges, M. Castillo, J. Carpio, J. Genescá, P. Helene, W. López, J. Pazini, A. Sanjuán y L. Véleva, *Corrosión en estructuras de concreto armado*, IMCYC, México (2001).
- [2] A. H. Nilson, *Diseño de estructuras de concreto*, Mc. Graw Hill, Colombia, (1999).
- [3] R.E. Núñez, C. Gaona-Tiburcio, J. Uruchurutu, C. P. Barrios, F. Almeraya-Calderón y A. Martínez-Villafañe, *Corrosion Evaluation of Modified Reinforcement Concrete by Electrochemical Noise Techiques, Portugalie Electrochimica*, Acta 23 (2005).
- [4] S. H. Kosmatks, B. Kerkhoff; *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, PCA, (2004).
- [5] A. J. Marulanda, M. Matarija; *Agregados Livianos para Concreto Estructural Ligero*, Sociedad colombiana de Ingenieros, (1979).
- [6] e-Industria. com.

[7] L. E. S. Valencia, R. S. Correa, *Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (Termopaipa IV) y agua constante*, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, No. 14, 14-19, (Nov. 2004).

[8] O. Trocónis, L. Uller, I. Alanis, P. Helene, R. Mejías, U. O'reilly, C. Andrade, J. Carpio, I. Díaz, M. Salta. G. Rodríguez, A. Romero y A. Sagues., *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, DURAR*, (1997).

[9] A.M. Neville, *Tecnología del Concreto*, IMCYC, México (1999).