



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

EFFECTO DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO EN EL CONCRETO ALIGERADO: ANÁLISIS DE SUS PROPIEDADES ELECTROQUÍMICAS.

**E.E. Maldonado-Bandala¹, M.A. Baltazar-Zamora¹, J. A. Castro-Nieto¹, E. Garcez-V¹,
H.E. Hernandez-M¹, F. Almeraya², C.P. Barrios Durstewitz³**

- 1 Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil-Xalapa, Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria 91090, Xalapa, Veracruz, México
- 2 Universidad Autónoma de Nuevo León. FIME - Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica. Av. Universidad s/n. Cd. Universitaria. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
- 3 Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa. Fuente de Poseidón y Prol. Ángel Flores S/N, Los Mochis, Sinaloa C.P. 81223, México.

RESUMEN

Actualmente, la espuma de poliestireno expandido (EPS) es uno de los residuos industriales que mas contaminación produce al medio ambiente, ya que no se descompone ni se integra a la naturaleza. En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental sobre las propiedades mecánicas y el efecto ante la corrosión de concretos aligerados con poliestireno expandido térmicamente modificado (MEPS). El EPS se trató térmicamente, manteniéndolo en un horno de aire caliente a 110 °C durante 10 minutos. Se diseñaron 5 mezclas de concreto aligerado sustituyendo la grava a los niveles de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% en volumen por MEPS y una relación $a/c=0.65$. El comportamiento ante la corrosión se monitoreó durante 105 días meses en NaCl al 3.5% y en un cuarto de curado a una temperatura de 23 °C y humedad relativa del 90%, se emplearon las técnicas electroquímicas de Potenciales de Corrosión (E_{corr}) y Resistencia a la Polarización Lineal (R_p), además se relacionaron los resultados con la técnica de resistencia mecánica (f_c), velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Bajo las condiciones de estudio se observó una estrecha relación entre las diferentes técnicas, para deducir el comportamiento de los concretos aligerados con MEPS, donde se determinó que los blocks de concreto aligerado con el 75 y 100% de MEPS, presentaron resistencias mecánicas inferiores a los 15 MPa, pero suficiente para lo establecido en la norma mexicana de blocks de concreto, además en la solución de 3.5% NaCl y CC presentaron una mejor protección ante la corrosión, ayudando a mantener en estado pasivo el acero de refuerzo.

Palabras claves: Concreto aligerado, poliestireno expandido modificado térmicamente, resistencia a la polarización lineal, corrosión, resistencia mecánica.

INTRODUCCIÓN

En muchos países, el incremento en los costos y la continua reducción de los recursos naturales, hace que el uso de desechos, como materiales de construcción, sea una alternativa viable en la industria de la edificación; además, la continua y siempre creciente extracción de agregados naturales provoca serios problemas ambientales, que pueden ocasionar la destrucción de ecosistemas por la erosión del suelo y alterar de forma permanente la topografía de zonas rurales [1]. Siendo así, el concreto el material de construcción más usado a nivel mundial. En épocas recientes, se ha incrementado el uso de concretos aligerados, para aplicaciones estructurales y no estructurales.

El concreto ligero puede ser producido mediante la introducción de polvo de aluminio o agentes espumantes, agregado mineral ligero, tales como perlita, vermiculita, piedra pómez, esquisto expandido, pizarra, arcilla, etc., o la inclusión de gránulos de plástico como por ejemplo, agregados materiales polímeros de poliestireno o de otro tipo [2-4].

El poliestireno expandido (EPS) es una espuma estable de baja densidad y estructura no absorbente y naturaleza hidrofóbica [5,6]. Debido a esto, puede ser usado como agregado ultra ligero adecuado para el desarrollo de concretos, tanto para aplicaciones estructurales y no estructurales mediante la variación de su porcentaje en volumen en el concreto [7-9].

Existen algunas publicaciones que mencionan la utilización del EPS como un agregado del concreto, sin embargo, los resultados mostraron especímenes con una apariencia que comprometía la integridad estructural de los mismos, ya que este material solo cuenta con una densidad extremadamente ligera de 12 -20 kg/m³; en otras publicaciones, solo se limitaron al estudio de algunas de las características de las mezclas de concreto adicionadas con éste material inorgánico como la densidad, conductividad térmica, resistencia a la compresión, absorción y congelamiento. Sin embargo, en el 2009, se desarrolló una técnica novedosa para la densificación del EPS mediante un tratamiento térmico sencillo, generando una espuma de poliestireno modificado térmicamente (MEPS) el cual proporciona un mejor acomodo de la partícula dentro del concreto aumentando la trabajabilidad y compactado del concreto aligerado. Empleando esta técnica y considerando que aún no existen estudios donde se evalúe la velocidad de corrosión en estructuras de concretos aligerados con estos materiales, en este trabajo se realizó la evaluación experimental del comportamiento electroquímico de concretos aligerados con MEPS durante 105 días en una solución de NaCl al 3.5% y en cuarto de curado a 23 °C y humedad relativa de 90%, se emplearon las técnicas electroquímicas de Potenciales de Corrosión (E_{corr}) y Resistencia a la Polarización Lineal (R_p), además se relacionaron los resultados con la técnica de resistencia mecánica (f_c).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diseño experimental.

Se desarrolló un diseño experimental para evaluar los efectos de la sustitución de grava por MEPS en las propiedades mecánicas y electroquímicas de los bloques de concreto aligerado. Las variables que se consideraron en este estudio, fueron la cantidad de MEPS (tipo de mezcla), el tiempo de ensayo (edad) y el medio de exposición (para pruebas electroquímicas), manteniendo constante la relación $a/c=0.65$. En cuanto a los niveles de la variable de sustitución, se diseñaron 5 mezclas de concreto aligerado sustituyendo la grava a los niveles de 0% (CTRL), 25% (25MEPS-75CA), 50% (50MEPS-50CA), 75% (75MEPS-25CA) y 100% (100MEPS-0CA) en volumen por MEPS y una relación $a/c=0.65$. En lo que respecta a la variable de tiempo de ensayo, se consideró de 14 y 28 días para las pruebas mecánicas y de 107 días para las pruebas electroquímicas; la respuesta de estas variables fueron los resultados de resistencia a la compresión axial, velocidad de pulso ultrasónico, coeficiente de absorción capilar, potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Los detalles del diseño experimental se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental

Propiedades Mecánicas				
Variable	Nivel	Descripción	Repeticiones	Respuesta
Tipo de Concreto	5	CTRL (100CA) 25MEPS-75CA 50MEPS-50CA 25MEPS-75CA 100MEPS-0CA	5	Esfuerzo a la compresión ($f'c$) Velocidad de pulso ultrasónico (UPV)
Tiempo transcurrido desde su fabricación	2	7 y 14 días		
Medio de exposición	1	Cuarto de curado a 90% de humedad relativa y temperatura de 23°C		
Caracterización Electroquímica				
Variable	Nivel	Descripción	Repeticiones	Respuesta
Tipo de Concreto	5	CTRL (100CA) 25MEPS-75CA 50MEPS-50CA 25MEPS-75CA 100MEPS-0CA	2	Potencial de Corrosión (E_{corr}) Velocidad de corrosión (i_{corr})
Tiempo transcurrido desde su fabricación	14	Cada semana durante 107 días		
Medio de exposición	2	Solución de NaCl al 3.5%		

Materiales.

Se utilizó Cemento Portland tipo CPC 30R de acuerdo a la normativa NMX-C-414-ONNCCE-2004, el agua se obtuvo de la red de agua municipal la cual cumple con la normativa NMX-C-ONNCCE-2004. Se empleó agregado fino del río Atliyac, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México; y agregado grueso de material calizo de la zona centro del Golfo de México

del estado de Veracruz, ambos cumpliendo las especificaciones de C-111-ONNCCE-2004 (ver Tabla 2).

Tabla 2. Características físicas de los agregados pétreos.

Propiedad física	Grava	Arena
Peso específico (g/cm ³)	2.66	2.60
Peso volumétrico varillado (kg/cm ³)	1380	- - -
Absorción (%)	4.00	3.8
Módulo de Finura	- - -	2.4
Tamaño máximo de agregado (in.)	¾	- - -

El MEPS que se usó como agregado se obtuvo a partir de los desechos de EPS, los cuales se trataron térmicamente bajo condiciones controladas de laboratorio [2]. Algunas de las características del MEPS se pueden apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Características físicas del MEPS

Especificaciones promedio del MEPS	
Densidad (kg/m ³)	205
Esfuerzo a la compresión (MPa)	7.69
Conductividad térmica (w/mk)	0.059
Absorción en volumen (S _h) (%)	0.58
Absorción en peso (S _a) (%)	4.10

El método utilizado para el proporcionamiento de las mezclas de concreto fue la establecida por el ACI 211.1 [5], y el cual se basa en principalmente en las características físicas de los materiales y los agregados utilizados en las mezclas. Las mezclas se realizaron por medios mecánicos, es muy importante poner especial atención en la preparación de la mezclas con MEPS, por a la dificultad que representan éstas para hacerlas homogéneas [3]. El MEPS fue usado en un 25%, 50%, 75% y 100% para sustituir al agregado grueso por volumen, se determinó el peso unitario y el revenimiento inmediatamente después de homogenizar la mezcla [4,5,6] (ver Tabla 4).

Tabla 4. Detalles de las mezclas de concreto ensayadas (1 m³)

Concreto	Cemento		Agua		Grava		19 mm MEPS		Arena		Concreto Fresco	
	kg	m³	kg	m³	kg	m³	kg	m³	kg	m³	Reven. (cm)	Peso unitario (kg/m³)
CTRL (100CA)	402	0.127	261.31	0.261	1010.6	0.38	0	0	551.2	0.212	22	2276.7
25MEPS-75CA	402	0.127	261.31	0.261	758.1	0.285	19.47	0.95	551.2	0.212	20	1978.6
50MEPS-50CA	402	0.127	261.31	0.261	505.4	0.19	38.95	0.19	551.2	0.212	19	1786.5
75MEPS-25CA	402	0.127	261.31	0.261	252.7	0.095	58.425	0.285	551.2	0.212	16	1644.9
100MEPS-CA	402	0.127	261.31	0.261	0	0	77.9	0.38	551.2	0.212	12	1441.3

Propiedades mecánicas

Para determinar la resistencia a la compresión axial se fabricaron blocks de concreto aligerado con MEPS de 12×15×30 cm y se ensayaron de acuerdo a la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004. El criterio de evaluación se realizó de acuerdo a la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, donde se establecen las resistencias a la compresión mínimas para blocks de concreto 10 MPa y para Sand-Lime Bricks 6 MPa. La velocidad de pulso ultrasónico (UPV) se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 597-02, empleando un dispositivo marca Schaffner, modelo PUNDIT 6 con una frecuencia de vibración de 50 kHz, la relación que se empleó para obtener la velocidad de pulso ultrasónico fue $UPV = \frac{L}{T}$, donde L es la longitud del espécimen (30 cm), T es el tiempo en el que viaja la señal del emisor al receptor. Para determinar la calidad de la mezcla a partir de la velocidad de pulso ultrasónico se usaron los parámetros de Leslie –Cheesman, donde $UPV < 2130$ m/s, concreto de condición muy pobre, para $2130 \text{ m/s} < UPV < 3050$ m/s, concreto de condición pobre; para $3050 \text{ m/s} < UPV < 3650$ m/s, concreto de condición regular o dudosa; para $3650 \text{ m/s} < UPV < 4750$ m/s, concreto de condición buena; y para $UPV > 4750$ m/s, concreto de condición excelente. Los resultados de los esfuerzos mecánicos y velocidad de pulso ultrasónico se relacionaron con el coeficiente de absorción capilar (k) de cada concreto, este ensaye se realizó de acuerdo a la norma NC: 345:2005 y el ensayo de Fagerlund.

Técnicas electroquímicas.

No solamente es importante cumplir con los requisitos de resistencia, también es necesario cumplir con especificaciones necesarias para alcanzar la durabilidad del concreto diseñado expuesto en diferentes ambientes, por esta razón se evaluó la protección ante la corrosión que proveen los concretos aligerados con MEPS a la varilla de refuerzo. Se realizaron pequeños especímenes prismáticos de 9×15×15 cm, como se observa en la Fig. 1, y se diseñaron 4 con concreto aligerado con MEPS y 1 CTRL, con dos barras de acero embebidas que fueron usadas como electrodo de trabajo (WT) y electrodo auxiliar (CE) durante las mediciones electroquímicas, se expusieron en una solución de NaCl al 3.5% y en un cuarto de curado a una temperatura de 23 °C y humedad relativa del 90% durante 107 días.

El comportamiento electroquímico fue evaluado con un potenciostato/galvanostato-ZRA marca ACM Instrument, se emplearon las siguientes técnicas: (a) Potencial de corrosión (E_{corr}). Los valores de E_{corr} fueron usados para determinar la probabilidad de corrosión. De acuerdo a la norma ASTM C876-99, para $E_{corr} < -0.350$ mV vs. Cu/CuSO₄ alta probabilidad de corrosión (~90%), para $-0.350 \text{ mV} < E_{corr} < -0.200$ mV vs. Cu/CuSO₄ incertidumbre de corrosión, y para $E_{corr} > -0.200$ mV vs. Cu/CuSO₄ 10% de probabilidad de corrosión [19]. (b) Resistencia a la polarización lineal (R_p). ($R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$) de acuerdo a la ecuación de Stern-Geary [20] $i_{corr} = \frac{B}{R_p}$,

aplicando $\Delta E \pm 20$ mV con una velocidad de barrido de 0.16 mV s⁻¹; la constante B fue de 26 mV. Los niveles de corrosión fueron definidos de acuerdo a las especificaciones de la Red Durar [21]. para $i_{corr} < 0.1 \mu\text{A cm}^{-2}$ pasividad, para $0.1 \mu\text{A cm}^{-2} < i_{corr} < 0.5 \mu\text{A cm}^{-2}$ corrosión moderada, para $0.5 \mu\text{A cm}^{-2} < i_{corr} < 1.0 \mu\text{A cm}^{-2}$ corrosión elevada, y para $i_{corr} > 1.0 \mu\text{A cm}^{-2}$ corrosión muy elevada.

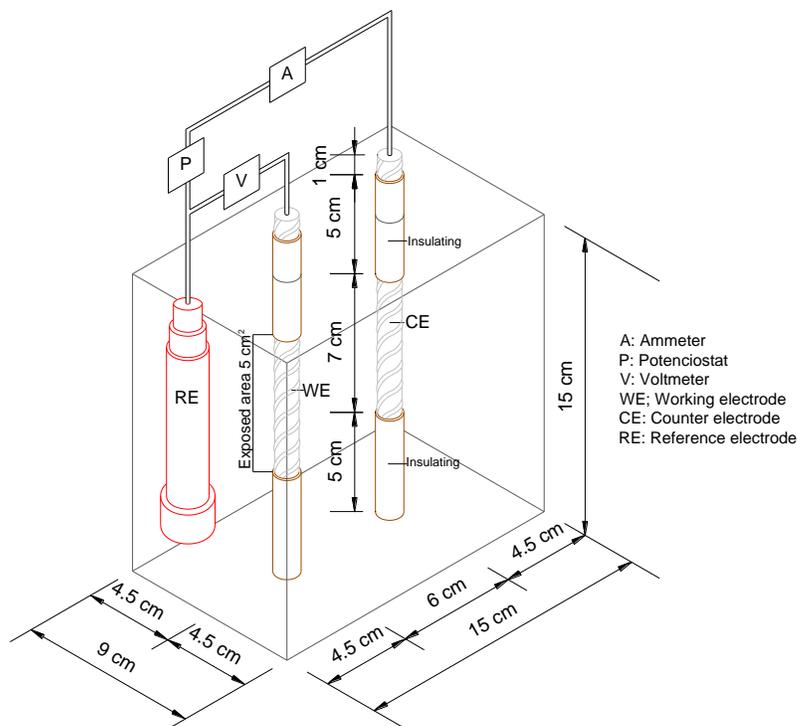


Figura 1. Esquema del espécimen prismático empleado y celda de medición para E_{corr} y R_p .

RESULTADOS

En la Tabla 5, detallan los resultados de la prueba de resistencia a la compresión simple de cada uno de los especímenes ensayados, así mismo se muestra el resultado promedio de cada serie estudiada, así como la desviación estándar y el coeficiente de variación de los ensayos.

Tabla 5. Resistencia a la compresión de los Blocks de concreto (MPa).

Concreto	CTRL (100CA)		25MEPS-75CA		50MEPS-50CA		75MEPS-25CA		100MEPS-0CA	
	14	28	14	28	14	28	14	28	14	28
1	35.3	37.4	22.3	22.8	17.3	17.2	15.5	14.2	10.0	11.1
2	34.8	36.2	21.6	20.8	16.2	16.7	14.3	14.3	11.8	10.9
3	34.6	37.3	20.9	21.6	16.0	16.3	13.9	16.0	10.6	11.4
4	35.3	38.3	21.3	20.5	16.4	17.3	14.8	14.6	11.2	10.9
5	34.4	37.8	21.3	22.3	16.7	16.5	14.7	14.7	11.0	10.8
Prom (MPa)	34.9	37.4	21.5	21.6	16.5	16.8	14.6	14.8	10.9	11.0
SD (MPa)	0.41	0.78	0.52	0.97	0.51	0.44	0.60	0.72	0.67	0.24
CV (%)	1.17	2.08	2.43	4.50	3.07	2.59	4.09	4.90	6.16	2.17

En la Figura 2, se aprecia claramente como a medida de que se sustituye agregado grueso por MEPS, la resistencia a la compresión se ve disminuida gravemente, sin embargo, no en todo es negativo, ya que si se comparan los resultados de todas las mezclas donde se colocó en algún porcentaje el MEPS, y la resistencia mínima permitida para los Blocks de concreto y tabiques de arcilla-arena (NMX-404-ONNCCE-2005), se observa que hasta con un 100% de sustitución de agregado grueso por MEPS (100MEPS-0CA) los resultados son favorables para su uso en muros de carga.

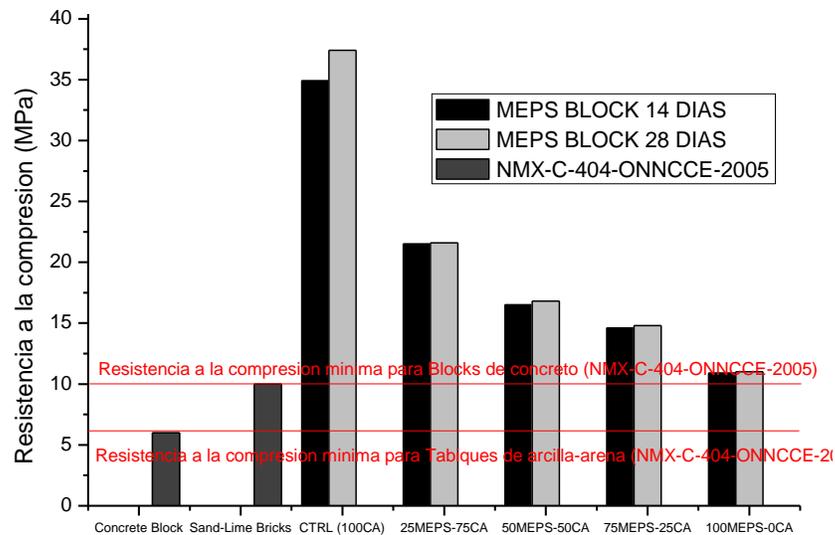


Figura 2. Resultados a la compresión simple de los blocks de concreto aligerado ensayados

Los estudios realizados con el método de velocidad de pulso ultrasónico, demuestran una relación muy estrecha con los resultados de resistencia a la compresión simple, ya que al realizar una comparación (ver figura 3) se demostró que para velocidades ultrasónicas mayores a 3800 m/s, se presentan las resistencias más elevadas, para este caso de estudio fueron mayores a 35 MPa, y para velocidades inferiores a 2800 m/s se relacionaron con resistencias cercanas a los 10 MPa. Al graficar esta relación y ajustar una línea de tendencia se obtuvo la ecuación $f'c = 7.31E - 05 * \exp(-UPV / 302.513) + 10.52$, con una R^2 de 0.985. Esto indica que con la ecuación obtenida se puede predecir de una manera sencilla el comportamiento mecánico exclusivamente de este tipo de concretos para las condiciones estudiadas.

En cuanto a los resultados obtenidos con la técnica de medición de potenciales de Corrosión (Figura 4), se observó que el espécimen todos los concretos estudiados presentan valores del 90% de probabilidad de corrosión, sin embargo, el concreto CTRL(100CA), es el que desde el día 36 tiene los valores más negativos desde -541 mV vs. Cu/CuSO₄ hasta los -617 mV vs. Cu/CuSO₄, además se aprecia claramente que todos los concretos con sustitución de agregado grueso por MEPS, presentan valores más positivos que el CTR(100CA). El concreto aligerado que mejor desempeño mostró durante el periodo de evaluación fue el 100MEPS-0CA.

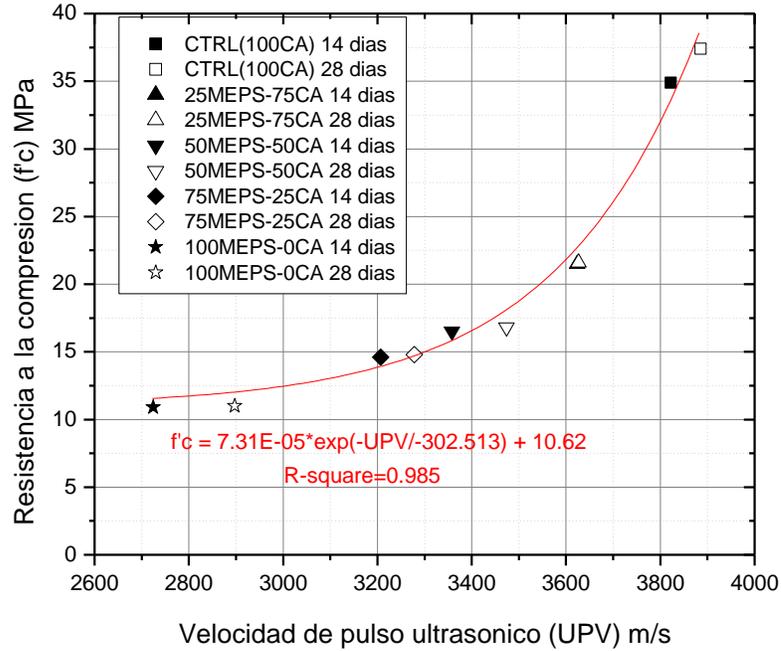


Figura 3. Relación Resistencia a la compresión vs velocidad de pulso ultrasónico.

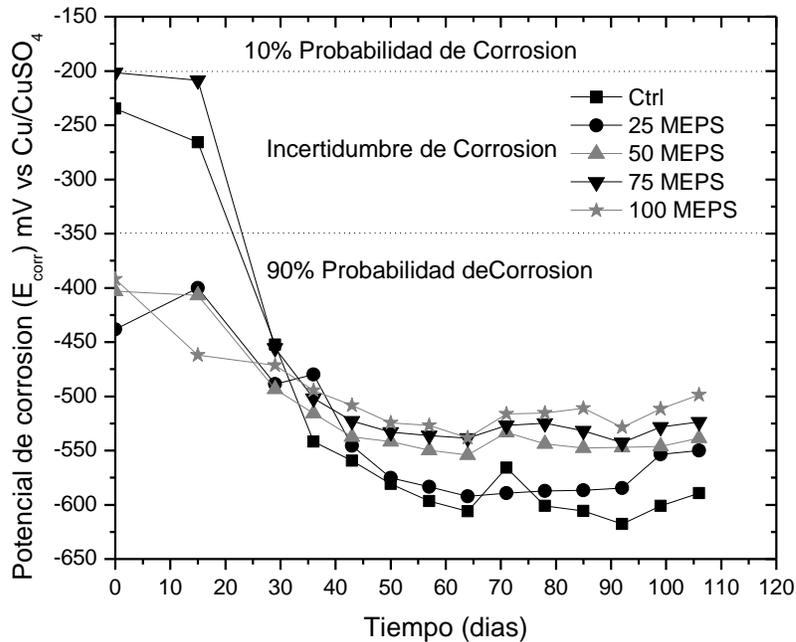


Figura4. Medición de Potenciales de Corrosión (E_{corr}) vs tiempo de exposición.

En la Figura 5 se presentan los resultados de la velocidad de corrosión obtenidas mediante la técnica de Rp, donde el concreto CTR(100CA), el primer día de exposición presentó valores de

0.187 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (corrosión moderada), pero desde el día 36, incrementó valores de densidad de corriente hasta situarse en corrosión muy elevada manteniéndose en este estado con valores de hasta 3.84 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, sin embargo, de manera proporcional a la sustitución de agregado grueso por MEPS, se observó el también el desempeño ante la corrosión de los concretos aligerados. En el caso del espécimen 100MEPS-0CA, el primer día devaluación, presentó valores de pasividad, los cuales incrementaron a corrosión moderada desde el día 43, estabilizándose así hasta el día 107, con valores de 0.401 a 0.685 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. En este sentido se puede decir que los concretos aligerados con MEPS pueden disminuir la velocidad de corrosión del acero de refuerzo expuestos en medios salinos con NaCl.

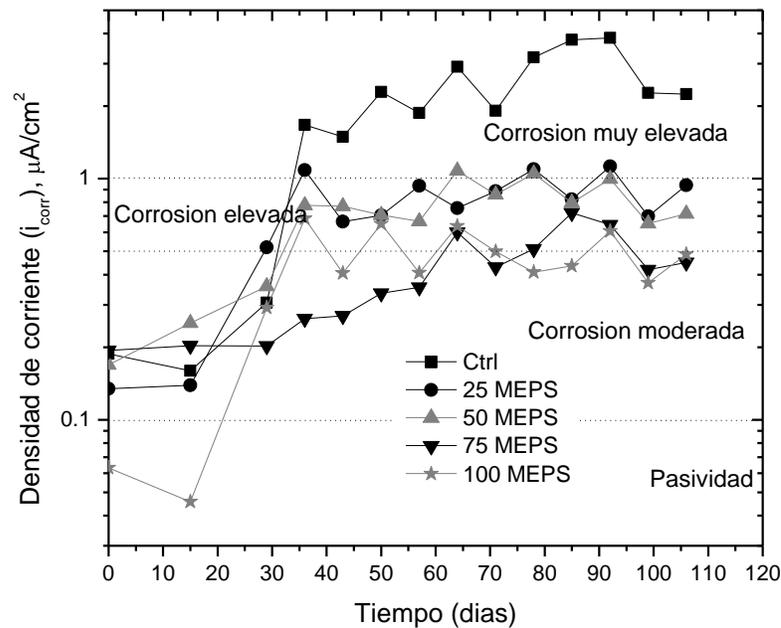


Figura5. Medición densidad de corriente (i_{corr}) vs tiempo de exposición.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el presente estudio se concluye el MEPS es un excelente material aligerante, siempre y cuando se realice un buen tratamiento térmico para su modificación; es importante observar que las resistencias a mecánicas disminuyen de manera significativa mientras mas sustitución de agregado grueso por MEPS contenga el concreto, pero para el uso como Block de mampostería estructural en muros de carga se puede emplear adecuadamente, ya que presentan resistencias superiores a las establecidas por la normatividad vigente en cuanto a Blocks de concreto. El desempeño como protección ante la corrosión de estos concretos ha sido sumamente superior a las de un concreto convencional con el 100% de agregado pétreo. La velocidad de corrosión se ve disminuida de proporcional a la cantidad de sustitución de grava por MEPS, así mismo el concreto aligerado que mejor protección ante la corrosión presentó en los 107 días de evaluación fue el que tuvo una sustitución del 100 de MEPS.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección del Área académica Técnica de la Universidad Veracruzana por el apoyo económico para la presentación del presente trabajo y para el proyecto PIFI 2010-2011 .

REFERENCIAS

- [1] Valdez Guzmán, L.F., Suárez Alcívar, G.E. & Proaño Cadena, G., 2010. Hormigones livianos.
- [2] Kan, A. & Demirboga, R., 2009a. A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), pp.2994–3000.
- [3] Kan, A. & Demirboga, R., 2009b. A novel material for lightweight concrete production. *Cement and concrete composites*, 31, pp.489–495.
- [4] Método de prueba estándar para determinar el peso unitario, volumen producido y contenido de aire del concreto por medio del método gravimétrico. IMCYC, 2000.
- [5] Método de prueba estándar para la determinación del revenimiento en concreto a base de cemento hidráulico. IMCYC, 2000.
- [6] Práctica estándar para la fabricación y curado en la obra de especímenes de concreto para pruebas. IMCYC, 2000.
- [7] American Society for Testing and Materials. Standard test method for compressive