



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**EVALUACION EN CAMARA DE NIEBLA SALINA EL SISTEMA ACERO-CONCRETO
CELULAR MEDIANTE TECNICAS ELECTROQUIMICAS**

A. Trejo Larguero ², V. Orozco Carmona ¹, C. Gaona Tiburcio ¹, L. López², J.M. Lugo Cuevas¹,
A. Martínez Villafañe ¹, F. Almeraya Calderón ¹,

¹Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV),
Departamento de Física de Materiales/Grupo Corrosión
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua,
Chihuahua, Chih., México.

²Universidad Autónoma de Chihuahua

Resumen

El presente estudio se ha enfocado a determinar la velocidad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto celular, concreto celular previamente carbonatado y concreto convencional (patrón de comparación), expuesto en cámara de niebla salina bajo la Norma ASTM B-117, mediante dos técnicas electroquímicas: medición de potencial de corrosión a circuito abierto y resistencia a la polarización lineal, durante 24 semanas de exposición. Los resultados obtenidos, destacan que el concreto celular reforzado sin alteraciones en su material prima (sin presencia de carbonatación) presentó un comportamiento mucho más resistente a la corrosión que el concreto convencional reforzado. Por otra parte, el concreto celular reforzado previamente carbonatado, presentó la mayor resistencia a la corrosión, dado que probablemente los poros de dicho concreto se saturaron con los productos de carbonatación, disminuyendo la difusión de los iones Cl⁻ hacia la varilla de refuerzo.

Palabras claves: concreto celular, concreto convencional, técnicas electroquímicas, carbonatación, cámara salina.

Abstract

The present study has been focused in the determination of corrosion rates in reinforced steel embedded in cellular concrete, previously carbonated cellular concrete, and conventional concrete (comparison pattern), exposed in fog chamber through ASTM B-117 norm, using two electrochemical techniques, open circuit corrosion potential measurement and linear polarization resistance, during 624 exposition weeks. The results show that no carbonated reinforced cellular concrete has a better performance against corrosion than conventional reinforced steel. Furthermore, the carbonated reinforced cellular concrete presented the greater resistance to the corrosion, given that probably the pores of said concrete were saturated with the products of carbonation, diminishing the diffusion of the ions Cl⁻ toward the reinforcement steel.

Key words: cellular concrete, conventional concrete, electrochemical techniques, carbonation, fog chamber.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



INTRODUCCIÓN

En los Estados Unidos, una estimación del 35% de todos los puentes del inventario federal son catalogados estructuralmente como deficientes o funcionalmente obsoletos y requieren reparación, ser reforzados, ampliados o reemplazados. Materiales convencionales como el acero, concreto y madera han tenido numerosas ventajas, siendo una de las mejores el bajo costo de los materiales y la construcción.

Sin embargo, es claro que los materiales y tecnologías convencionales, aunque conveniente en muchos casos y con una buena aplicabilidad, la falta en la longevidad a veces y en otros casos el ser susceptible a un rápido deterioro, acentuando la necesidad para mejorar el grado de estos materiales o generar nuevas tecnologías para suplir los convencionalmente utilizados.

Por lo tanto, hay una necesidad crítica para el uso de nuevos y emergentes materiales y tecnologías, con el objetivo final de facilitar la funcionalidad y eficiencia [1].

El concreto celular puede ser obtenido reemplazando agregados estándar totalmente o parcialmente, por uno de menor peso y preferentemente por componentes de bajos de costo [2]. El concreto celular es económico, ambientalmente amigable, ligero, provee aislamiento térmico y acústico y tiene buena resistencia al fuego [3].

El concreto celular esta compuesto de mortero rodeado de burbujas de aire discontinuas, el aire típicamente ocupa más del 50% del volumen. Las burbujas de aire son resultado de gas o espuma formado dentro del mortero introducido en la mezcla. Los granos de cemento en este tipo de sistema son depositados en las proximidades de la superficie de las burbujas.

Dado que los bordes hidratados son desarrollados alrededor de cada grano de cemento, la pasta de cemento Pórtland hidratada es formada alrededor de cada burbuja de aire. La incorporación de poros de aire esférico dentro de la matriz del mortero genera un ligero peso, elevados valores de aislamiento, y bajos esfuerzos cuando es comparado con el concreto convencional.

El concreto celular es relativamente un nuevo material de construcción cuando es comparado con el concreto convencional reforzado. El mayor factor limitante del empleo del concreto celular en aplicaciones donde la durabilidad es concerniente es la falta de información y guías de diseño respecto al aceptable desarrollo de este material. Para los materiales de construcción empleados comúnmente, como el concreto convencional, la durabilidad del material es un buen tópico de investigación.

Existen estándares de pruebas y criterios de elaboración para concreto convencional y concreto ligero, proporcionando especificaciones y herramientas de diseño para el desarrollo de productos específicos. Siendo no este el caso para el concreto celular [4]. Debido a lo anterior, como todo nuevo material, la durabilidad de las estructuras de concreto celular depende de diversos factores que tienen que ser evaluados cuando se diseñan.

Dado que originalmente, se pensó que la vida útil del concreto reforzado en general era un material de construcción ilimitada. Sin embargo, el deterioro prematuro causado por la corrosión



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



del refuerzo ha sido reportado en un número creciente de estructuras. En general, ese tipo de corrosión es causado por el ataque destructivo de iones de cloruro que penetran del exterior por difusión y/o otros mecanismos de penetración, por incorporación inicial en la mezcla de concreto, por carbonatación del concreto que cubre la varilla de refuerzo o una combinación de ellos [5].

La gran mayoría de inspecciones de estructuras de concreto reforzado son llevadas a cabo después de que su deterioro se haga patente. Dado que las varillas de refuerzo no son visualmente accesibles, este enfoque significa que ese daño es a menudo ya significativo.

Predecir la vida de servicio residual y controlar la eficiencia de los sistemas de protección empleados (técnicas de restauración o reparación), necesariamente requiere procedimientos para establecer si los elementos estructurales se corroen activamente y para medir la velocidad de corrosión. Establecer mapeos de potenciales de una estructura, según la norma ASTM C876-91, es la técnica electroquímica más comúnmente aplicada para diagnosticar el estado y riesgo de corrosión en estructuras de concreto reforzado.

Sin embargo, es generalmente aceptado que las mediciones de potenciales de corrosión (E_{corr}) deben ser complementadas por otros métodos, porque aunque las relaciones entre el potencial y la velocidad de corrosión puedan ser encontradas en el laboratorio para condiciones bien establecidas, éstos no pueden ser generalizados de ninguna manera, dado que variaciones en la velocidad de corrosión son posibles en una gama muy estrecha de potenciales.

En este sentido, el mejor complemento puede ser el tener información cuantitativa de la velocidad de corrosión determinadas por técnicas electroquímicas de corriente alterna o continua [6].

Numerosos estudios experimentales han sido realizados en cemento carbonatado. El contenido de bióxido de carbono y permeabilidad de agua han sido valorados como una función del grado de la saturación. Sin embargo, sólo unos pocos estudios han sido llevados a cabo con respecto a la conducta de la corrosión de acero embebido en un concreto carbonatado [7].

El interés del presente estudio es determinar la velocidad de corrosión generada en el acero de refuerzo embebido en concreto convencional (patrón de comparación), concreto celular y concreto celular previamente carbonatado, en cámara de niebla salina, mediante dos técnicas electroquímicas: medición de potencial de corrosión a circuito abierto y resistencia a la polarización lineal. El estudio se realizó durante 24 semanas con una periodicidad de monitoreo de 1 semana.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Muestras

Se emplearon 6 muestras de concreto para el presente estudio: 2 fueron de concreto celular, 2 de concreto celular previamente carbonatados y 2 de concreto convencional (cemento Pórtland, grava y arena). Se expusieron en una cámara de niebla salina con la finalidad de ver la resistencia a la corrosión en medio volátil contaminado con iones Cl^- , bajo la norma ASTM B-117 (ver figura 1). Es importante señalar que el concreto celular carbonatado, para que presentara este tipo de

contaminación, previamente fue expuesto durante 2 meses en una cámara de carbonatación con una concentración de CO₂ de 3.17% molar.



Figura 1. Especímenes de concreto evaluados en el presente estudio.

Medición de Potenciales de Corrosión.

Se determinó el E_{corr} a circuito abierto, utilizando un electrodo de referencia de calomel y un multímetro de alta impedancia, con una periodicidad de 1 semana hasta completar 24 semanas.

Medición de Velocidad de Corrosión.

Se utilizó la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal, aplicando un barrido de $\pm 20\text{mV}$ vs E_{corr} a una velocidad de $10\text{mV}/\text{min}$; como electrodo de referencia se empleó uno de calomel, utilizando para ello un equipo de corrosión electroquímica *Potenciostato/Galvanostato/ZRA* marca *Solartron*. Se monitoreó con la misma periodicidad realizada para la medición del E_{corr} .

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio, destacando que el concreto celular reforzado carbonatado presentó un comportamiento mucho más resistente a la corrosión que el concreto convencional reforzado y el mismo concreto celular reforzado sin carbonatación al ser expuestos en cámara de niebla salina, como se puede apreciar en las figuras 2 y 3, donde el concreto celular carbonatado presenta una cinética de corrosión del orden de $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ver gráfica azul) que de acuerdo a la clasificación de la i_{corr} en términos de vida útil determinado por CYTED [8], el sistema se encuentra en una velocidad de corrosión de moderada a elevada.

Lo anterior probablemente se deba a que el proceso de carbonatación, haya generado la oclusión de los poros del concreto celular, no permitiendo el paso libre del ión cloro hacia la varilla de refuerzo. El concreto convencional reforzado así como el concreto celular reforzado, después de

transcurridas 2 y 5 semanas de exposición respectivamente el grado de corrosión, de acuerdo a la tabla 2, presenta un nivel de corrosión muy elevada ($>1\mu\text{A}/\text{cm}^2$) manteniéndose en ese nivel a lo largo de las restantes 24 semanas de monitoreo (ver gráfica roja y negra respectivamente), siendo el concreto celular reforzado el que presenta una pequeña mejor resistencia a la corrosión que el concreto convencional.

El comportamiento de que el concreto celular reforzado presente una mejor resistencia a la corrosión se justifica en el hecho de que a pesar que el concreto celular presente una alta densidad de poros, no implica que dichos poros estén interconectados entre si, no siendo una vía propicia para la difusión de los iones agresivos hacia la varilla de refuerzo.

Es importante señalar que el ambiente generado en la cámara salina bajo la norma ASTM B-117, generó en los tres sistemas en experimentación un grado de corrosión de elevado a muy elevado en términos generales, lo cual no indica, que la porosidad en el concreto convencional y celular permiten que fácilmente se difundan los iones Cl^- hacia la varilla de refuerzo.

Lo anterior, no muestra que mediante el presente arreglo experimental se puede determinar la cinética de corrosión en una gran gama de sistemas acero-concreto que serán sometidos en ambiente volátiles contaminados con iones Cl^- (medio ambiente prevaleciente en zonas costeras), permitiendo seleccionar las mejores combinaciones acero-concreto ha ser puestas en condiciones normales de exposición en base ha este parámetro.

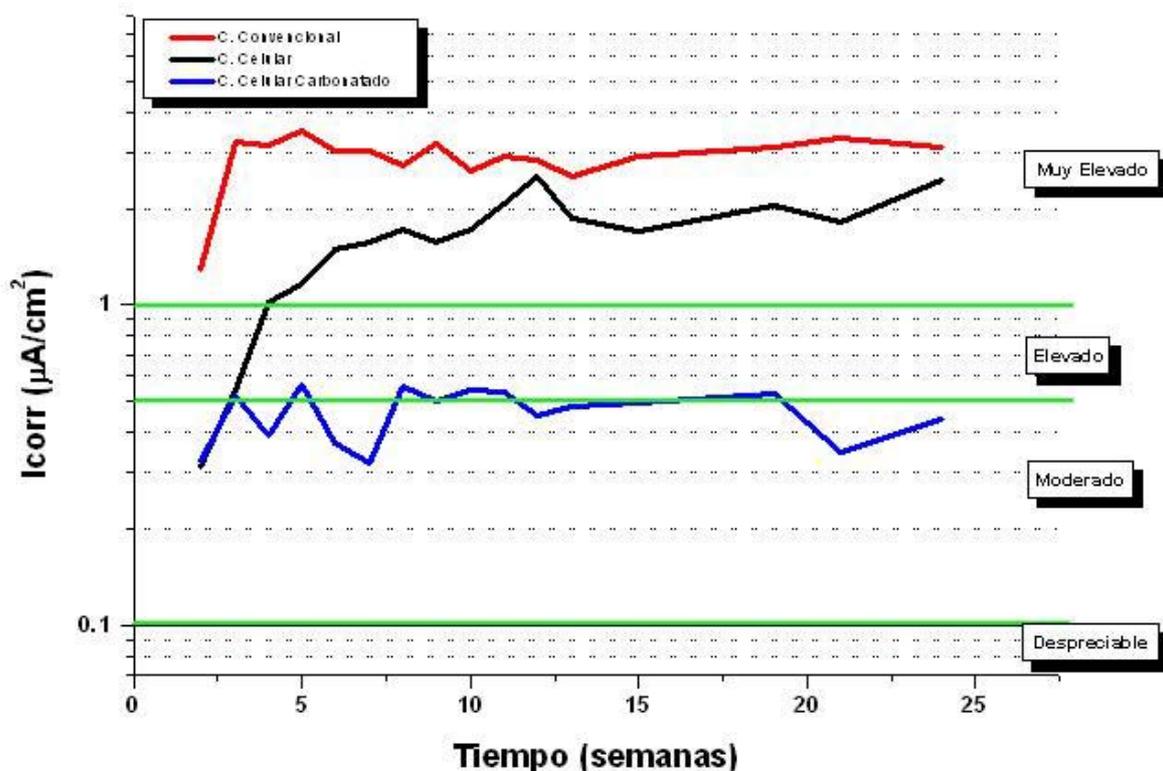


Figura 2. Intensidad de corrosión de la varilla de refuerzo embebida en concreto convencional, celular y celular carbonatado, expuesta en cámara de niebla salina.

Tabla 1. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil [8].

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

El comportamiento de la figura 2 (Intensidad de corrosión de la varilla de refuerzo embebida en concreto convencional, celular y celular carbonatado), se confirma con los resultados observados en la figura 3 (Potencial de corrosión de la varilla de refuerzo embebida en concreto convencional, celular y celular carbonatado), donde los sistemas en evaluación que presentan un 90% de probabilidad de corrosión durante todo el periodo de exposición (ver tabla 2), son las varillas de refuerzo embebidas en concreto convencional y concreto celular (ver gráficas roja y negra respectivamente). El concreto celular previamente carbonatado aunque también presenta potencial de corrosión con un 90% de probabilidad de corrosión, dichos valores de potencial son muy cercanos al límite (inclusive sobrepasándolo en ciertos momento del monitoreo) en el cual existe una cierta incertidumbre de la probabilidad de corrosión (ver gráfica azul).

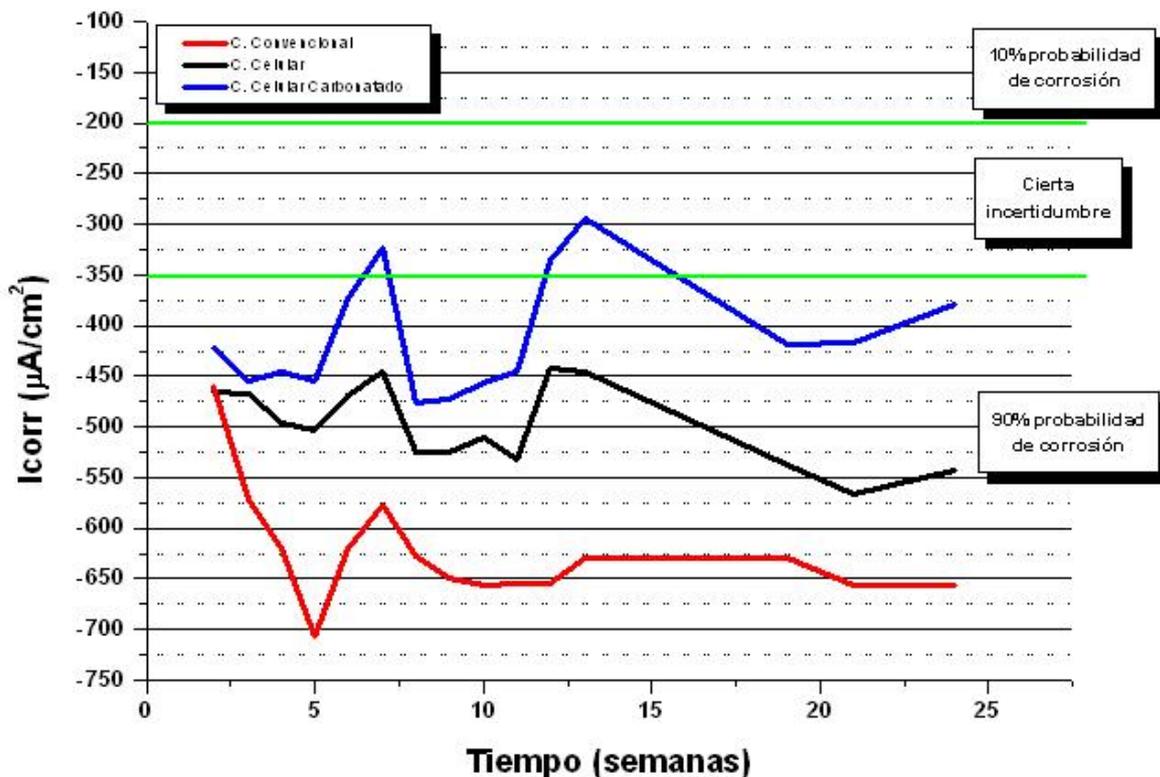


Figura 3. Potencial de corrosión de la varilla de refuerzo embebida en concreto convencional, celular y celular carbonatado, expuesta en cámara de niebla salina.



Tabla 2. Clasificación del E_{corr} [9].

E_{corr} (mV)	Riesgo de Daño
< -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
> -350	90 % de probabilidad de corrosión

CONCLUSIONES

- El concreto celular le propicia una protección adicional con respecto al concreto convencional en contra de la corrosión a la varilla de refuerzo al ser expuesto en ambientes volátiles contaminados con iones Cl^- , pero sin llegar a ser considerable, ya que los índices de velocidad de corrosión en ambos casos es catalogada como muy elevada ($>1\mu A/cm^2$).
- A pesar de que el concreto celular presenta una porosidad por demás superior que la presente en el concreto convencional, es de notar que dicho parámetros no influye en la cinética de corrosión al ser expuesto en cámara de niebla salina, lo que indica que dicha porosidad es aislada
- Proceso de carbonatación en sistemas acero- concreto celular elevados al ser expuesto en cámara de niebla salina, influyen positivamente en la cinética de corrosión de las varillas de refuerzo, ya que dicho refuerzo presentan niveles de corrosión entre moderados y, presentando valores de i_{corr} alrededor de $0.5 \mu A/cm^2$. Lo que se asocia a un proceso de oclusión de los poros presentes en el concreto celular por los carbonatos producidos durante el proceso de carbonatación. Los valores de cinética de corrosión son considerablemente menores a los observados en sistema de concreto celular sin problemas de carbonatación y concreto convencional.

REFERENCIAS.

1. Vistasp M. Karbhari, Lei Zhao. Use of composites for 21st century civil infrastructure. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 185 (2000). Págs. 433-454.
2. D. Bouvard, J.M. Chaix, R. Dendievel, A. Fazekas, J.M. Létang, G. Peix, D. Quenard. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. *Cement and Concrete Research* 37 (2007). Págs. 1666–1673
3. X.C. Qiao , B.R. Ng, M. Tyrer, C.S. Poon, C.R. Cheeseman. Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash. *Construction and Building Materials* 22 (2008). Págs. 473–480.
4. Paul J. Tikalskya, James Pospisilb, William MacDonaldc. A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 889–893
5. O. Troconis de Rincón, Duracon Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment* 41 (2006). Págs. 952–962



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



6. J.A. González, J.M. Miranda, S. Feliu. Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete. *Corrosion Science* 46 (2004). Págs. 2467–2485
7. Bruno Huet, Valérie L'Hostis, Frédéric Miserque, Hassane Idrissi. Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. *Electrochimica Acta* 51 (2005). Págs. 172–180
8. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, ISBN 980-296-541-3, pág. 134.
9. Norma ASTM C 876 – 91 (Reapproved 1999), Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Pág. 5.