

Acción del microambiente sobre el concreto reforzado

Alda Cedeño de Sánchez ^{a,b} , Cecilio Hernández ¹ , Fidedigna Ortiz de Vergara ¹ , Jesús Alberto Villar ¹ 

¹Universidad Tecnológica de Panamá

¹{alda.cedeno, cecilio.hernandez, fidedigna.vergara, jesus.villar}@utp.ac.pa

DOI: 10.33412/pri.v13.1.2545



Resumen: *En las construcciones de concreto reforzado es importante realizar estudios a fin de que el concreto y el acero trabajen en conjunto ofreciendo durabilidad a la edificación. La presente investigación se centra en el estudio de la corrosión del refuerzo en losas de concreto expuestas a la agresión atmosférica y ambiental de 3 sitios característicos en Panamá. Se utilizaron métodos de evaluación fisicoquímicos, medición de potencial de corrosión de media celda y análisis de imágenes ópticas con estero microscopio. El experimento tuvo una duración de 1.5 años. Los resultados se presentan en tablas e imágenes estero microscópicas que evidencian los daños del ambiente local sobre los especímenes de muestra.*

Palabras clave: *capa pasiva, corrosión, Estero microscopio, impurezas en el concreto.*

Title: Action of the microenvironment on reinforced concrete.

Abstract: In reinforced concrete constructions it is important to carry out studies so that concrete and steel work together offering durability to the building. This research focuses on the study of reinforcement corrosion on concrete slabs exposed to atmospheric aggression and environmental from 3 characteristic sites in Panama. Physicochemical evaluation methods, measurement of medium-cell corrosion potential and analysis of optical images with stereo microscope were used. The experiment lasted 1.5 years. The results are presented in microscopic tables and stereo images that show local environmental damage to sample specimens.

Key words: passive layer, corrosion, stereo microscope, impurities in concrete.

Tipo de artículo: investigación.

Fecha de recepción: 9 de mayo de 2020.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2022.

1. Introducción

Los materiales de construcción son importantes en el desarrollo de un país en lo que a infraestructura se refiere. El acero de refuerzo hace que ambos materiales trabajen en conjunto. Si la edificación se ubica en un ambiente urbano y/o marino la corrosión de la armadura puede ocurrir ocasionando un problema muy complejo a solucionar para asegurar la integridad de los usuarios y disminuir los costos en reparación y mantenimiento [1]. Si la calidad del concreto es buena y posee el recubrimiento adecuado los efectos del ambiente sobre la armadura deben ser despreciables [2], aun así, las edificaciones presentan deterioro, en particular en climas tropicales. En base al problema expuesto, el objetivo es proponer ensayos básicos cuya información pudiese ser suficiente en la determinación de las causales de daños originados por el ambiente a temprana edad en la edificación, probablemente sugieran que se requieran otros de mayor nivel técnico. Se plantea en la presente investigación el uso de técnicas de caracterización fisicoquímica, en particular el pH, los niveles de cloruros, la medición de potencial de media celda y análisis de la morfología de la superficie del concreto por microscopía óptica. Todos permiten la obtención de la información de manera rápida y técnicamente muy simplificado.

2. Antecedentes

El estado del acero de refuerzo es un factor que contribuye a la durabilidad de edificaciones de concreto armado.

Uno de los medios promotores de corrosión son los gases atmosféricos que involucran la combustión de carbón o petróleo y gases industriales. Este proceso puede ocurrir en ambiente seco como húmedo con humedad relativa del ambiente igual o mayor que 70% [3]. Los daños por corrosión del acero embebido dependerán de varios factores como: las condiciones climáticas, contaminantes, calidad y recubrimiento del hormigón, y relación agua/cemento [4]. La corrosión electroquímica es la más común en los metales. Consiste en la pérdida de electrones de los átomos para convertirse en iones, frecuentemente, tiene lugar en un medio acuoso: en agua, tierra o aire húmedo creando un circuito eléctrico denominado celda electroquímica compuesta por un ánodo, cátodo, medio de contacto y un electrolito. La ionización de los átomos del metal o ánodo ocurren por la reacción de oxidación en éste. La tendencia de un metal a ceder sus electrones se determina midiendo la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo estándar de media celda cuando se abre el circuito. Si el potencial es negativo, el metal tiene una tendencia a ceder electrones o se comporta como ánodo, si es positivo el metal se comporta como cátodo. Cuánto más negativo es el resultado, el metal es electropositivo o tiene alta tendencia a la reacción de oxidación [5].

Durante el proceso de hidratación la pasta de cemento del concreto induce una capa protectora en la superficie del acero llamada capa pasiva provocada por las especies alcalinas KOH , NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Esta capa es reforzada por el pH alcalino que se alcanza después del proceso de hidratación que lo protege químicamente. Pero, el contacto de las estructuras con el entorno afecta la capa protectora del acero permitiendo el ataque por agentes agresivos, principalmente el cloruro proveniente de medios marinos y la carbonatación que procede de zonas industriales [6]. La corrosión por iones de cloruro se manifiesta por el óxido formado por la disminución de la sección del acero de refuerzo ejerciendo presión al concreto creando fisuras que desaparecen la adherencia del conjunto concreto-acero. La norma ASTM C- 876 presenta un procedimiento para evaluar la corrosión potencial del acero de refuerzo del concreto, a través del potencial de media celda, y en donde se establece que para niveles de potencial mayores a -120 mV hay sólo un 10% de probabilidad que ocurra corrosión en el acero, mientras que para valores menores a -270 mV, la probabilidad aumenta a 90%. En el rango de -120 mV a -270 mV se concibe una región de incertidumbre [7].

Por otro lado, la reacción agregado-álcali es un fenómeno que contribuye en el proceso de la corrosión del acero de refuerzo. Esta reacción ocurre en presencia de tres factores: los compuestos químicos dióxido de sodio (Na_2O) y dióxido de potasio (K_2O), los cuales pueden proceder del agua de diseño, del cemento, de los agregados, de aditivos o del entorno de exposición del concreto, y aunado a una humedad relativa entre 80–85% y altas temperaturas, intensifica su acción. Para determinar la reacción agregado-álcali en su etapa inicial, se puede hacer uso de la norma ASTM C 856 efectuando un examen petrográfico del concreto, con la ayuda de un estereomicroscopio [8].

3. Materiales y métodos:

La investigación es experimental, sin manipulación de las condiciones de muestreo. Se manufacturaron 12 losas de concreto reforzada en ambas direcciones. Por sus dimensiones, distancia y tiempo entre los sitios de monitoreo y mano de obra el tipo de muestra es no probabilística [9].

El concreto se dosificó por el método de volumen absoluto según ACI 211, como sigue: Concreto expuesto a humedad en ambiente con presencia de cloruros y sulfatos. La resistencia a la compresión especificada es de 280 kg/cm^2 (4000 lb/pulg^2). El revenimiento entre 25mm y 75mm. Se utilizó un agregado grueso de 25mm, bien graduado, con masa específica relativa seca de 2.68, absorción de 0.5%. El cemento utilizado fue un tipo HE (alta resistencia inicial), con masa específica relativa de 3.0. Se efectuó la mezcla sin aditivos y sin aire incluido. El Agregado fino: arena presenta una masa específica relativa de 2.64%, absorción de 0.7% y módulo de finura de 2.8. Se utilizó agua potable y una relación agua-cemento igual a 0.4. Las dimensiones de las losas eran de: 0.6 m X 0.6 m X 0.15 m.

El curado de las muestras duró 31 días y el monitoreo fue desde tres sitios de la República de Panamá por presentar diferentes características atmosféricas que podrían suministrar los elementos necesarios para una celda electroquímica y promover la corrosión naturalmente. El primer sitio escogido fue Tocumen, Provincia de Panamá, por la cantidad de vehículos (automóviles y aviones), industrias y su cercanía al Océano

Pacífico. El segundo sitio fue Sherman, en la Provincia de Colón en el que la circulación de vehículos es menor que en la estación anterior, pero existe el paso de los buques que transitan por el Canal de Panamá y está próximo al mar Caribe. La particularidad de la estación Sherman es su altísima concentración de cloruro atmosférico, lo cual es ocasionado por el choque de las olas en el rompeolas localizado en dicho sitio La tercera estación fue Coclé porque presenta el crecimiento de edificios de mediana altura, vientos fuertes, cercanía al Océano Pacífico, tránsito constante de vehículos y la presencia de algunas industrias.

Las muestras consistieron en losas reforzadas en ambas direcciones con acero 1/2, 5/8, 3/4, y 7/8 de pulgadas de diámetro, grado 40 y recubrimiento de 7cm. Para propiciar el proceso de oxidación se dejaron los extremos de las barras expuestas. Los excedentes de acero fueron pintados con antioxidante antes de colocarlos en los sitios de monitoreo y cada losa fue colocada separada 6 pulgadas del suelo. En la figura 1 se presenta una imagen de la losa obtenida luego de su proceso de fabricación, con la disposición del acero de refuerzo para estudio.



Figura 1. Ubicación de losas en sitios de monitoreo

Los ensayos de potencial de corrosión de media celda se presentan a 1.5 años de exposición. En la figura 2 se da un ejemplo de la ejecución del método sobre la losa de concreto. La medición se hace sobre diferentes áreas de los especímenes, determinando la diferencia de potencial eléctrico entre el acero expuesto de la armadura y el electrodo de referencia colocado en la superficie de cada losa de hormigón. Para garantizar el buen contacto se humedece la superficie, el polo positivo se conecta a las armaduras y el negativo o de referencia sobre la superficie del concreto.



Figura 2. Medición del potencial de corrosión sobre las losas

Las muestras se prepararon a partir de núcleos de concreto de dos pulgadas de diámetro para el desarrollo de los ensayos químicos y petrográfico. A estos se le hicieron cuatro cortes o capas, de unos centímetros, desde la superficie hacia el interior resultando 48 especímenes preparados y 16 evaluados, que representan a los testigos en cuatro estaciones con entornos ambientales diferentes afectados por 1.5 años.

Para el análisis de cloruros, se utilizó la norma ASTM C1218 y por titulación, el pH se determinó con la ayuda de un medidor multiparámetros. Para evaluar el potencial de media celda se utilizó un medidor de potencial marca Humbolt, modelo H-2872. En la petrografía se utilizó un estereomicroscopio Accu-Scope.

4. Resultado y discusión

Los resultados de la determinación de cloruros (%Cl) y pH de los constituyentes de concreto, se presentan en la tabla 1. Los ensayos se efectuaron de acuerdo con la norma ASTM C 1218. Todos los valores son relativamente bajos y en el mismo orden de magnitud.

Tabla 1. Cloruros y pH de los componentes del concreto.

	Agua	Arena	Agregado	Cemento
pH	7.0	7.0	7.0	11.0
%Cl	0.0071	0.0071	0.0035	0.0035

En vista que se trata de un diseño propio, se conoce los niveles de contenido de cemento en el concreto y podemos ponderar de manera aproximada las contribuciones de cloruros de todos los constituyentes, lo cual un valor de 0.005% respecto a la masa de cemento del diseño, el cual es bajo respecto a los niveles cloruros permitido de 0,15% respecto a la masa del cemento (rmc) del concreto reforzado, es de 0.020%, de acuerdo con la norma ACI 318.

El contenido de cloruros, a 1.5 años de exposición, en las 3 estaciones, se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. %Cl y pH de las losas expuestas 1.5 años en ambiente natural.

Muestra	%Cl	pH
Control 1	0.008	12,12
Control 2	0.006	12,52
Control 3	0.006	12,59
Control 4	0.004	12,57
Coclé 1	0.007	11,57
Coclé 2	0.008	12,54
Coclé 3	0.006	12,54
Coclé 4	0.005	12,26
Tocumen 1	0.012	11,43
Tocumen 2	0.009	12,57
Tocumen 3	0.006	12,56
Tocumen 4	0.008	12,55
Sherman 1	0.044	11,93
Sherman 2	0.053	12,50
Sherman 3	0.019	12,61
Sherman 4	0.028	12,58

Los especímenes de Control, Tocumen y Coclé presentan niveles de cloruros en el mismo orden de magnitud, próximo a 0.16% (rmc), lo cual sigue siendo bajo de acuerdo con la ACI 318 (0.15%). Mientras que para Sherman los valores son muy elevados 0.2% (rmc)

En Sherman las capas más externas y expuestas (1,2) presentan mayores niveles de cloruros (aproximadamente 0.16% (rmc), respecto a las capas más internas (capa 3 y 4), con aproximadamente 0,08% (rmc). Esto refleja el complejo proceso de movilidad de las especies solubles, como los cloruros en una estructura porosa y altamente afectada por el medioambiente, como el concreto. Dicho comportamiento es característico al perfil de afectación por cloruros en el hormigón [10]. Parte del cloruro que penetran al hormigón reacciona con los componentes de hidratación del cemento, el resto queda libre, y penetra hasta zonas más profundas, pudiendo ocasionar corrosión en el acero de refuerzo.

En la tabla 1, se presenta, además, los resultados de pH hasta 1.5 años. En todos los tipos de ambientes, incluyendo el control, se observa la misma conducta: la muestra más expuesta, la más externa presenta menor pH, respecto a las capas más profundas en el mismo periodo. Sin embargo, se observa diferencias leves: En Coclé y Tocumen el pH de la capa externa disminuye casi una unidad de pH respecto a las capas más profundas, mientras en el Control sólo es 0.4 unidades de pH. En Sherman la disminución es de 0.6 unidades de pH. Esto refleja un mayor efecto del CO₂ sobre las capas externas del concreto de Tocumen y Coclé, que cuentan con alta actividad vehicular respecto de Sherman, y por ende están afectados por el efecto de la carbonatación [11]. Todo indica que la protección natural contra la corrosión suministrada por la disminución del pH a través del tiempo puede perderse.

En la tabla 3 se presenta los resultados de potencial de corrosión, según la norma ASTM C- 876, obtenidos de los especímenes con 1.5 años de exposición en las 3 estaciones estudiadas.

Tabla 3. Medición de potencial, 1.5 años de exposición en ambiente natural.

No.	Control	Coclé	Tocumen	Sherman
1	-16.0	-78.8	-89.7	-188.6
2	-30.5	-70.3	-60.6	-165.8
3	32.9	-75.3	-65.9	-167.8
4	-50.9	-54.7	-95.7	-201.7
5	-40.3	-72.3	-95.4	-159.9
6	-51.7	-75.9	-97.2	-147.7
7	-58.8	-72.0	-65.7	-185.2
8	-57.8	-64.5	-67.1	-182.3
9	-41.1	-76.0	-87.1	-156.3
10	-56.7	-77.5	-87.4	-144.6
11	-46.5	-76.7	-93.3	-152.4
12	-55.3	-83.6	-95.5	-177.3

Se observa que las losas de Control, Coclé, y Tocumen (sector Pacífico), presentaron valores de potencial de corrosión mayores a -120 mV, lo cual indica que existe un 10% de probabilidad que ocurra corrosión, es decir son sitios con menor agresividad relativa. Mientras que la losa de Sherman (sector Atlántico), exhibió valores de potencial de corrosión en el rango de -165 mV a -188.6 mV, o se encuentran en la zona de -120 mV a -270 mV, dicho de otra manera, están en el rango de incertidumbre, en otras palabras, dependiendo de otros factores puede incrementarse o limitarse la corrosión del acero de refuerzo. Sin embargo, los niveles de potencial de Sherman a 1.5 años de exposición, son aproximadamente 10 veces superiores a los de Tocumen y Coclé, lo cual ya se trata de un hecho significativo y se correlacionan de manera directa a los altos niveles de cloruros del medio ambiente de Sherman y por ende en los niveles de cloruros presentes en la estructura de concreto en todas las capas evaluadas, esto es un indicio de que el acero de refuerzo ya debe estar en un proceso de corrosión activa, y por la calidad de la unión hormigón-acero pueden estar comprometida porque el potencial electroquímico del acero de refuerzo está relacionado con la cantidad de oxígeno que alcanza la superficie del acero y promover la corrosión [10].

Los resultados de los ensayos petrográficos con la ayuda del estereomicroscopio y en base a ASTM C856, para un 1 año de exposición se presenta desde la figura 4 hasta la 7:



Figura 4. Hallazgos de daños, muestra control, un año de exposición ambiental.

La figura 4 corresponde al Control, donde son evidentes los siguientes defectos: (1) inicio de la reacción agregado-álcalis, (2) poros irregulares de gran tamaño, (3) poros en el agregado, (4) impurezas o inicio de reacción agregado álcali, (5) interfase concreto agregado irregular, (6) presencia de pasta sobre los poros del agregado, (7) vidrio volcánico sobre el agregado.

En la figura 5 se presenta el espécimen de Coclé, la cual exhibe: (1) poros grandes regulares y limpios, (2) poros regulares pequeños limpios, (3) inicio de la reacción agregado álcalis o impurezas, (4) fisuras sobre el agregado e inicio de la reacción agregado álcalis, (5) impurezas.

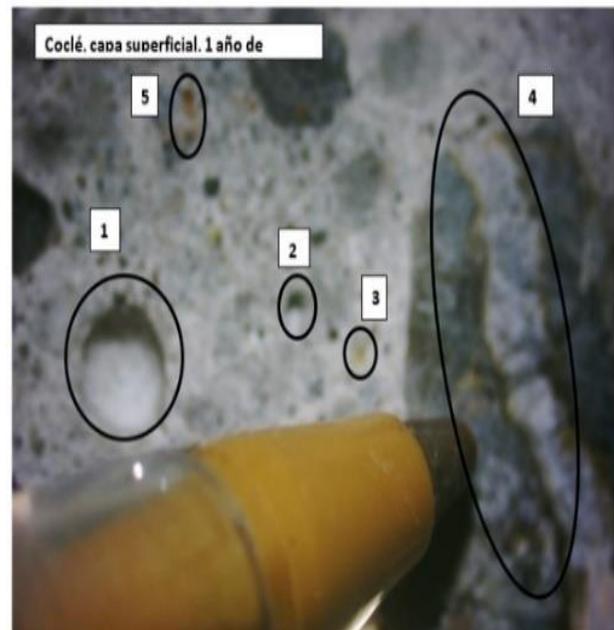


Figura 5. Hallazgos de daños, muestra Coclé, un año de exposición ambiental.

La muestra Tocumen aparece en la figura 6, y se observa lo siguiente: (1) pasta sobre los poros del agregado, (2) poros pequeños limpios, (3) inicio de la reacción agregado álcali, (4) vidrio volcánico sobre el agregado, (5) poros sobre el agregado. En la periferia de la muestra puede observarse la degradación de la superficie respecto a la pasta en su interior.

Por otro lado, la figura 7 se refiere a la estación Sherman: (1) porosidad por pérdida de material en la superficie, (2) una superficie con textura degradada y clara presencia de impurezas, (3) fisuras, (4) inicio de reacción agregado álcalis.

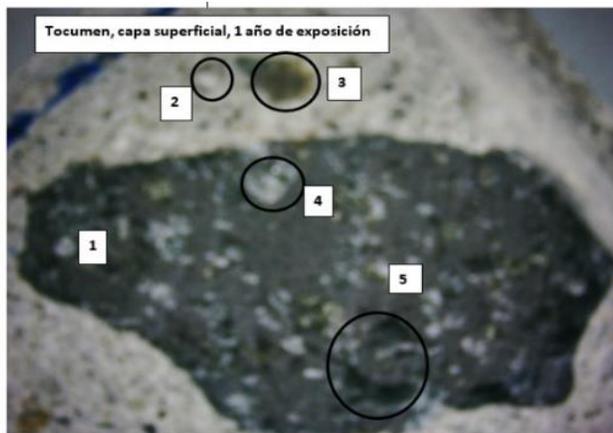


Figura 6. Hallazgos de daños, muestra Tocumen, un año de exposición ambiental.



Figura 7. Hallazgos de daños, muestra Sherman, un año de exposición ambiental.

Los resultados de los ensayos petrográficos a 1.5 años de exposición se presentan desde la figura 8 a la 11:

En la figura 8 se presenta el Control, en la cual es evidente una superficie con fisuras (1), (2) y (3) e impurezas en su superficie.

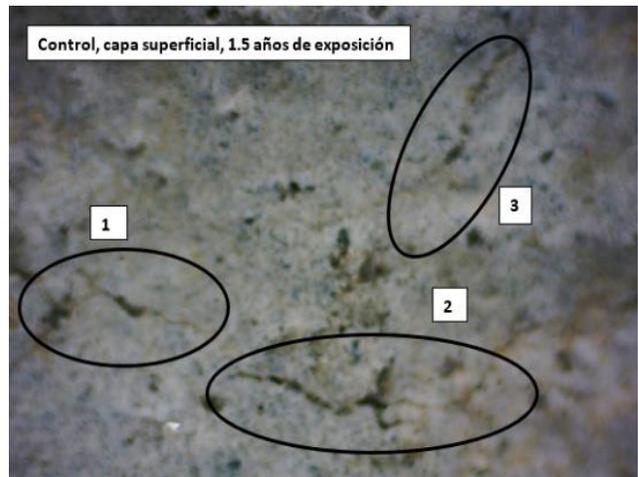


Figura 8. Hallazgos de daños, muestra control, 1.5 años de exposición ambiental.

El espécimen de Coclé presenta en la figura 9, en donde son evidentes ciertos cambios, tales como: (1) inicio de reacción agregado álcalis, (2) y (3) cambio de color y consistencia del agregado o avance de la reacción agregado álcali, (4) interfase agregado concreto irregular, pero intacta o sin afectación.

Como se observa en la figura 10, Tocumen presenta los siguientes defectos: (1) inicio de reacción agregado álcali, (2) impurezas o agregado reactivo, (3) fisura, (4) poros pequeños por pérdida de material, (4) poros grandes limpios, (6) fisuras.

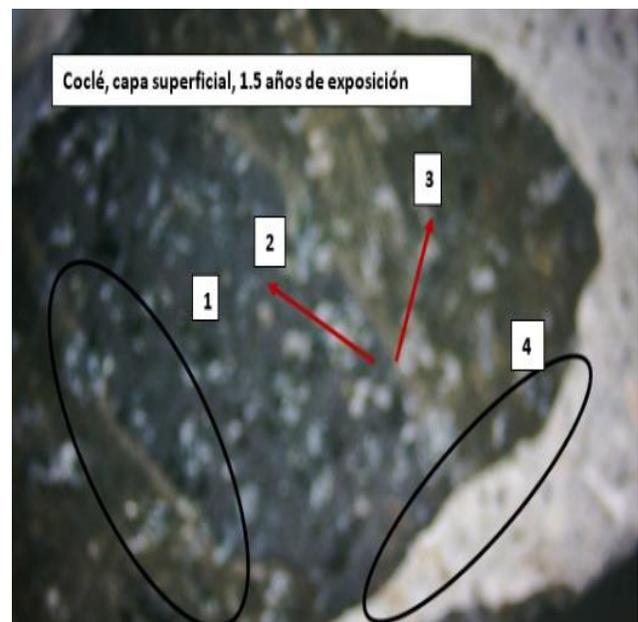


Figura 9. Hallazgos de daños, muestra Coclé, 1.5 años de exposición ambiental.

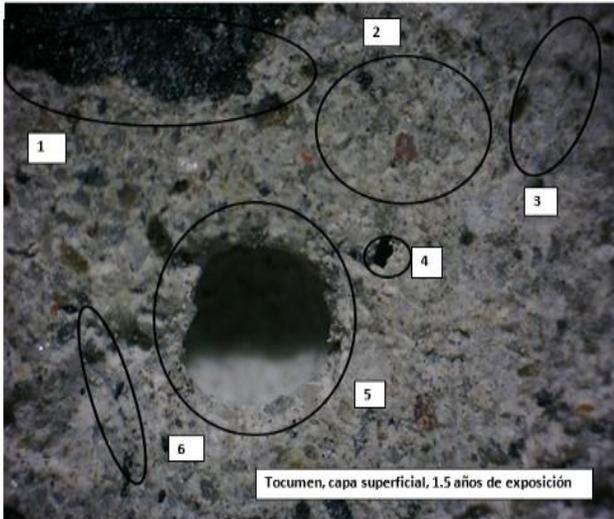


Figura 10. Hallazgo de daños, muestra Tocumen, 1.5 años después de exposición ambiental.

La figura 11 se observa el espécimen de Sherman, con evidencias de deterioro, tales como: (1) superficie invadida de impurezas, (2) poros por pérdida de material, evidencia de la reacción agregado álcalis, (3) poros pequeños limpios.

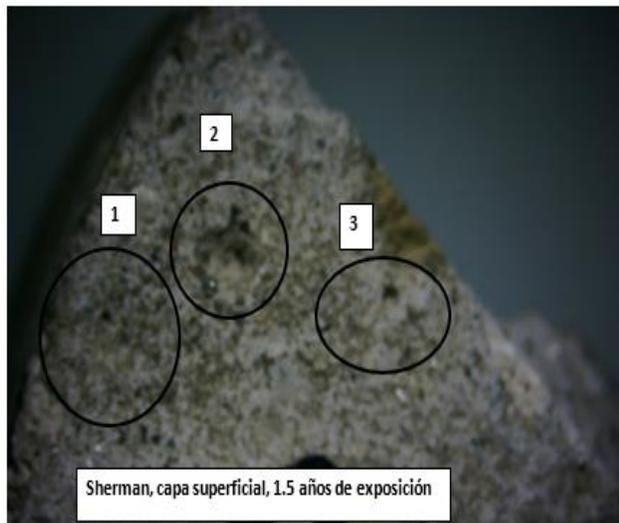


Figura 11. Hallazgos de daños, muestra Sherman, 1.5 años de exposición ambiental.

En general, en el interior o capas 2, 3 y 4 de cada losa se observa una matriz en buen estado indicativo de una buena relación agua cemento. La relación de microporos grandes a pequeños observada en las 48 muestras es de 1 a 3, lo cual es un indicio de la permeabilidad del conjunto por la interconexión de microporos. Los agregados gruesos presentaron poros, pero se ha reportado que los que aportan más a la permeabilidad son los poros de la pasta. Recordando que los agregados representan $\frac{3}{4}$ partes del volumen del concreto, es muy posible esperar que contribuirán a la permeabilidad del concreto y por

ende a bajar la resistencia de este. Esta técnica nos permite ver el avance de meteorización en el agregado, las fracturas en él, el contacto con la pasta de cemento y si existe indicios de geles hidratados [12], [13].

Conclusión

Los ensayos practicados permitieron evaluar preliminarmente la susceptibilidad del concreto reforzado frente los contaminantes del ambiente.

Los poros de los agregados y la pasta de cemento son pequeños, pero pueden albergar partículas de gel de silicio que hacen daño al concreto.

Los cloruros han podido penetrar a la matriz de concreto y movilizarse gracias a los poros existente en el concreto hasta la capa 2 en donde se han presentado cambios en el pH y en la concentración de cloruros. Sin embargo, la relación agua-cemento utilizada de 0.4, el tipo de cemento HE, el recubrimiento y el tiempo de curado han protegido a las losas de concreto como lo demuestran los resultados de cloruro y pH en las capas interiores en 1.5 años de exposición en ambientes agresivos. Todo indica que la protección natural contra la corrosión suministrada por la disminución del pH a través del tiempo puede perderse.

Indicios de la reacción agregado álcali pueden ser investigados en forma rápida y sencilla monitoreando la estructura o haciendo un ensayo técnico de petrografía con estereomicroscopio desde 1.5 años de construcción. Esta técnica nos permite ver el avance de meteorización en el agregado, las fracturas en él, el contacto con la pasta de cemento y si existe indicios de geles hidratados.

Se recomienda estudios complejos posteriores sobre el mismo tema iniciando con las muestras de Sherman o sector Atlántico por presentar la más alta afectación, seguidos por las muestras de Tocumen o las del área del Pacífico y por último las de la región central del país o Coclé.

Agradecimiento

Agradecemos a los siguientes colaboradores de LABAICA: Lic. Mario Altamirano y Técnico José M. Pérez, así como al Ing. Josué Pazmiño, del Laboratorio de Ensayos de Materiales, del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá, por su apoyo en el desarrollo de los ensayos y preparación de las muestras del trabajo.

De la misma forma, reconocemos a la Universidad Tecnológica de Panamá el apoyo suministrado en poner a disposición el equipamiento, capacidad técnica y experiencia, para ser utilizado en la presente investigación.

Referencias

- [1] A. Castañeda, M. Rodríguez, "Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado", Revista CENIC, Vol. 45, pp. 52-59, 2014.
- [2] M. Ramón, T. Pérez, F. Corvo, A. Torres, O. Tronconis, "Estudio del deterioro de Especímenes de concreto armado expuestos a 300 m de la costa Campeche, México", Revista CENIC, vol. 46, pp. 81-89, 2015
- [3] R. Marrero, A. Zelaya, "Evaluation of Corrosion Problems on Pipelines of a Hydroelectric Power Station", REDALYC, vol. XXXIV, PP. 5-12, Abril 2014.

- [4] D. Fernández, A. Castañeda, "Estudio de la corrosión atmosférica en el Puerto de Mariel de Cuba", Rev. CENIC, vol.46, pp.47-59, 2015.
- [5] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, sexta edición, CENGAGE Learning, México, Traducido y publicado, 2013.
- [6] J. Guerrero, H. Montoya, M. De La Cruz, "Identificación y evaluación del riesgo de la corrosión en estructuras de concreto armado en plantas industriales sometidas a ambiente ácido", Rev. Ciencia Cierta, No.46, jun. 2016.
- [7] W. Aperador, J. Bautista, A. Delgado, "Monitoreo de la corrosión de aceros embebidos en concretos obtenidos a partir de subproductos industriales", Scielo, vol. 24, pp. 55-66, 2013.
- [8] C. Bedoya, J. Tobón, J. Monsalve, C. Palacios, "Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica", Research Gate, vol. 80, no.2, diciembre 2016. <http://doi:1023850/22565035.491>
- [9] A. Porras V., "Tipos de muestreo", Centro de Investigación en Geografía y Geomática (CONACYT), México, p 2-6, 2017.
- [10] A. M. Aguirre, R. Mejía de Gutiérrez, "Durability of Reinforced Concrete Exposed to Aggressive Conditions", *Materiales de Construcción*, Vol. 63, pp. 7-38, enero-marzo 2013.
- [11] J. Carrillo, J. Cárdenas, W. Aperador, "Effect of Chloride ion on the compressive mechanical properties of RC-65/35-BN steel fiber reinforced concrete", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 33, no 2, 2145-9371 (online), 2015. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.33.2.7075>
- [12] J. Giraldo, R. Pérez, "Concreto Bajo El Microscopio, Petrografía: Ciencia Aplicada al Estudio Del Concreto y sus materias primas", Asociación Colombiana de Productos de Concreto, Available: <https://docplayer.es/64753055-Petrografia-concreto-ba-jo-el-microscopio-ciencia-aplicada-al-estudio-del-concreto-y-sus-materias-primas.html>
- [13] L. M. Vélez, "Permeabilidad y Porosidad en Concreto", Rev. Tecnológicas No. 25, pp. 169-187, diciembre de 2010.