

Estudio del efecto ambiental industrial y marino sobre concreto reforzado expuesto en dos ciudades del pacífico panameño

Study of the industrial and marine environmental effect on reinforced concrete exposed in two cities in the Panamanian Pacific

Alda de Sánchez^{1*}, Cecilio Hernández²

¹ Facultad de Ingeniería Civil - Centro Regional de Panamá Oeste, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

² Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: alda.cedeno@utp.ac.pa

RESUMEN. El océano pacífico baña la costa sur de la nación panameña en su totalidad y gran parte de las construcciones importantes se ubican paralelas a esta. La investigación tiene el objetivo de examinar, cualitativamente, el perfil del concreto reforzado desde la superficie hasta cuatro centímetros de profundidad de losas de concreto reforzado expuestas naturalmente por un año a ambientes influenciados por aerosoles de tipo marinos y marino – industrial, ambos sitios se ubican aproximadamente a 20km del litoral. Los resultados obtenidos por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y medición de potencial se compararon con los obtenidos en una losa patrón resguardada en ambiente controlado. Los resultados nos llevan a concluir que la influencia marino-industrial tiene más afectación sobre el concreto reforzado. Para continuar la investigación, estos resultados se compararán con muestras de concreto de las mismas características de fabricación y exposición, pero ubicadas en el litoral atlántico. Estamos seguros de que la información suministrada representa un valioso aporte al sistema constructivo de losas de concreto reforzado.

Palabras clave- *Exposición ambiental, espectroscopía infrarroja de Fourier, concreto reforzado.*

ABSTRACT. The Pacific Ocean bathes the southern coast of the Panamanian nation in its entirety and many of the important buildings are located parallel to it. The research aims to examine, qualitatively, the profile of reinforced concrete from the surface up to four centimetres deep of reinforced concrete slabs naturally exposed for one year to environments influenced by marine and marine – industrial aerosols, both sites are located approximately 20km from the coast. Results from Fourier's infrared transform spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and potential measurement were compared to those obtained in a pattern slabs guarded in a controlled environment. The results lead us to conclude that marine-industrial influence has more impact on reinforced concrete. To continue with the research, these results will be compared with concrete samples of the same manufacturing and exposure characteristics but located on the Atlantic coast. We are confident that the information provided represents a valuable contribution to the construction system of reinforced concrete handles.

Keywords- *Environmental exposure, Fourier infrared spectroscopy, reinforced concrete.*

1. Introducción

El concreto u hormigón es un material que se caracteriza principalmente por su alta resistencia. Sin embargo, no está exento de daños, entre ellos, los ocasionados por el ambiente alrededor suyo cargado de cloruros, sulfatos, carbonatos que desencadenan en la corrosión del acero de refuerzo. La problemática ambiental surgida por la proximidad de las

construcciones a la costa y a ambientes industriales toma cada día más importancia en los costos de mantenimiento y reparación de las estructuras de hormigón armado. La corrosión del acero de refuerzo es un de las principales preocupaciones de los especialistas en construcción.

Existen algunos estudios donde sugieren que la ubicación geográfica de la edificación juega un papel importante en el deterioro por cloruros de acuerdo con la

Citación: A. Sánchez y C. Hernández, “Estudio del efecto ambiental industrial y marino sobre concreto reforzado expuesto en dos ciudades del pacífico panameño”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 2, pp. (), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 28 de febrero de 2021. **Recibido con correcciones:** 28 de julio de 2021. **Aceptado:** 3 de julio 2021.

DOI.

Copyright: 2021 A. Sánchez y C. Hernández. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

concentración de las sales presentes en el agua que invade a la estructura por diferentes medios. Otros sugieren medir cualitativamente el perfil de cloruros en el concreto [1], [2], [3]. El problema de los contaminantes sobre el concreto es complejo; por lo que se aproximan los resultados finales.

En la construcción podemos encontrar losas de concreto diseñadas tomando en cuenta excelentes tecnologías para evitar la corrosión del acero embebido en hormigón. Sin embargo, existen condiciones y especificaciones en cuanto al uso del concreto que sirven de referencia en el diseño de la mezcla tales como humedad, ambiente al que se expondrá, resistencia a la compresión especificada, asentamiento tamaño de agregado, tipo de cemento y relación agua/cemento que garantizan la durabilidad del elemento de concreto.

Para el diseño y ensayos desarrollados se ha considerado elaborar losas que se expondrán a la humedad, en ambiente severo de exposición marino y marino-industrial, con resistencia a la compresión de 4000lb/pulg² a los 28 días, sin aditivos, con asentamiento entre 25mm y 75mm, el tipo de cemento es HE (alta resistencia a edades tempranas) según ACI 211.

En la investigación se propone diseñar losas de concreto reforzadas en ambas direcciones y estudiar el comportamiento de éstas a ambientes marinos y marino-industrial para valorar su respuesta a corrosión frente a los contaminantes existentes en su entorno, con el propósito de aportar nueva información que pueda ser considerada al momento del diseño del hormigón.

El sistema de muestreo y análisis de laboratorio tiene el objetivo de observar la tendencia y los perfiles de reacciones del concreto sometido a diferentes climas para evaluar si el material estudiado ha reaccionado según lo esperado.

Con el propósito de comprender los límites y el alcance de la investigación, los ensayos aplicables y el sistema de monitoreo se realizó una revisión bibliográfica del estado del arte respecto, entre otros, al efecto del ambiente sobre el concreto, la hidratación del cemento, los contaminantes que afectan al hormigón, los métodos de ensayos aplicables al análisis del perfil del concreto y la corrosión del acero embebido en el concreto [2], [3], [4], [5], [6].

Seguidamente, se presentan el proceso de investigación y análisis de los resultados enfatizando en la observación de la tendencia y los perfiles de reacción del concreto a partir de las sugerencias de las referencias bibliográficas revisadas.

Por último, exponemos las conclusiones de la investigación realizada.

2. Materiales y metodología

A partir del estado del arte se procedió a escoger el sistema de muestreo y ensayos de laboratorios más convenientes para la recolección y análisis de los datos. La validación de los resultados consistió en la comparación con una losa patrón colocada en condiciones ambientales controladas. Es por ello por lo que, hemos considerado el estudio de muestras de concreto reforzado expuestas por un año en ambientes diferentes, situados aproximadamente a 20km de la costa pacífica, con el objetivo de dar seguimiento al proceso de hidratación del cemento y corrosión del acero de refuerzo en un año de exposición ambiental. El plan de monitoreo incluye dos estaciones con características ambientales diferentes que serán contrastadas con una muestra patrón. La primera se encuentra en la ciudad de Penonomé con relativa presencia de árboles y densidad media de construcciones y la otra en la ciudad de Tocumen situada en un ambiente industrializado. Se diseñó un concreto con relación agua/cemento igual a 0.4, f'c de 4000 lb/pulg², agregado grueso 3/8 de pulgadas y arena tamaño máximo 6mm, armado en dos direcciones. Los análisis presentados en este artículo, además de los tradicionales, consisten en espectroscopía infrarroja de Transformada de Fourier y medición de potencial de media celda [3], [4], [5], [6], [7], [8]. El aporte significativo de los resultados estriba en que las muestras situadas en el ambiente industrial se vieron más afectadas.

Posteriormente, las losas fueron confeccionadas con medidas de 0.6m X 0.6m X 0.15m, armadas en dos direcciones con barras de acero # 5, curadas por 28 días. Se midió el potencial de corrosión antes de colocarlas en las estaciones de monitoreo por un año con el fin de estudiar su comportamiento en ese periodo.

3. Resultados y discusión

A partir de las losas expuestas, los estudios sobre la penetración del ion cloruro en el concreto fueron hechos midiendo cualitativamente el perfil del cloruro a través de la profundidad del concreto, desde la superficie hasta cuatro cm en su interior. Recordemos que la exposición de las muestras se dio en condiciones naturales de uso por un año y la data del experimento fue comparada con los resultados de la losa patrón.

La tendencia y los perfiles de reacciones del concreto en tiempo real fueron observados mediante varios métodos, siendo uno de ellos el uso de la espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). Para ello, el rango de número de onda estudiado es de 4000cm^{-1} a 500cm^{-1} . La hidratación del cemento se da en cinco etapas. Las primeras tres ocurren en un periodo aproximado de siete horas, desde que el cemento hace contacto con el agua hasta que fragua. Allí se forma $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etringita, y el silicato tricálcico. En la cuarta etapa la pasta endurece, se consume el yeso y la etringita se convierte en mono sulfato. A partir de este momento, ocurre un proceso difusivo y la pasta continúa hidratándose, pero en forma lenta [3]. Entonces, la investigación se centra en el proceso difusivo por un año. Es por ello por lo que, a partir de la figura 1 a la 4 analizaremos algunos números de onda cuya formación de picos nos dará a conocer la posibilidad de la formación o no de productos de la hidratación del cemento en un año.

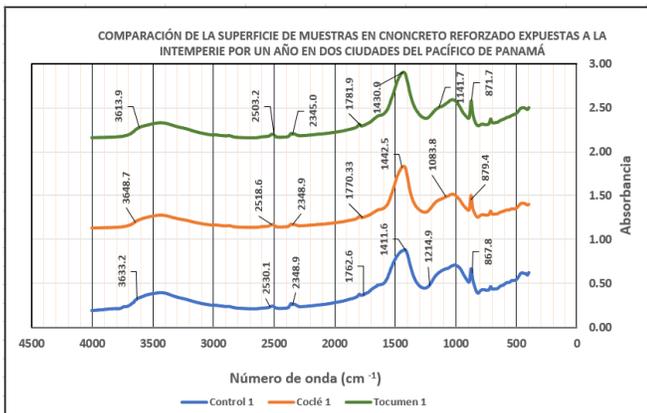


Figura 1. Espectro de la superficie de las muestras de concreto expuestas por un año.

El análisis por FTIR aquí presentado nos da indicio de los productos y los mecanismos de la hidratación que se forman en el proceso de difusión o en el periodo posterior al fraguado del concreto.

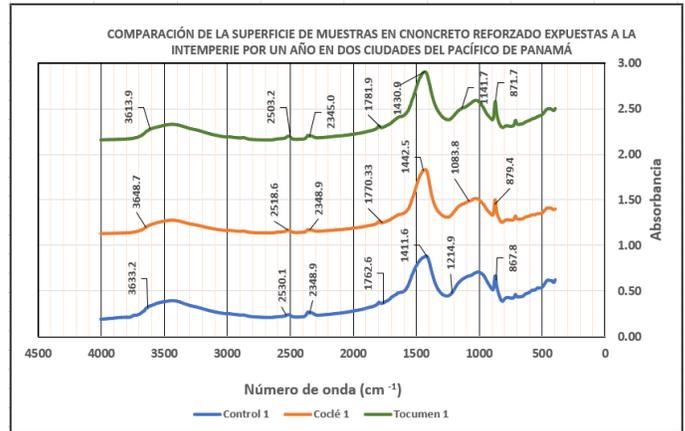


Figura 2. Espectro a dos cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

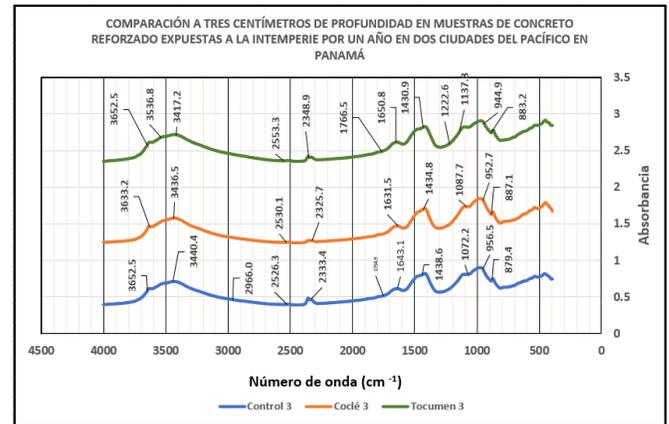


Figura 3. Espectro a tres cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

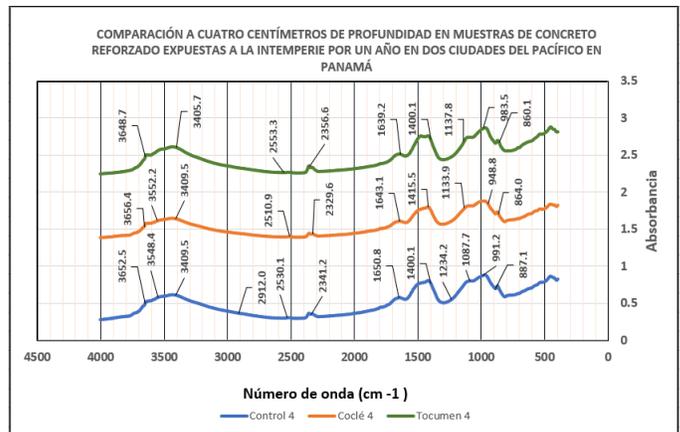


Figura 4. Espectro a cuatro cm de profundidad de las muestras de concreto expuestas por un año.

El primer número de onda que veremos es la de 3643cm^{-1} en donde se da la formación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En la superficie no se evidenció la existencia de este producto, mientras que, a dos

centímetros de profundidad las muestras patrón y Penonomé presentan evidencia de la existencia y a los tres centímetros todas las muestras exhiben presencia del producto estudiando. A los cuatro centímetros la muestra Tocumen es más crítica.

El segundo número de onda es la de 3550cm^{-1} en donde se da la formación del Yeso. A un año de exposición ninguna de las muestras a ninguna profundidad mostró evidencia de la existencia de este producto.

El tercer grupo de números de ondas estudiadas lo componen 1796cm^{-1} , 2513cm^{-1} , 2875cm^{-1} , 2983cm^{-1} , y $1350\text{--}1550\text{cm}^{-1}$. En estas se da la formación del carbonato de calcio y en la superficie de las tres muestras estudiadas se observó solo un pico importante en el número de onda 1700cm^{-1} que evidencia su existencia.

La formación de los carbonatos se da en los números de onda 1428cm^{-1} , 878cm^{-1} , 736cm^{-1} . En la superficie se evidencian picos importantes en todas las muestras, siendo la muestra Tocumen la más crítica y a medida que se profundiza en el concreto, las intensidades de los picos bajan en todas las muestras.

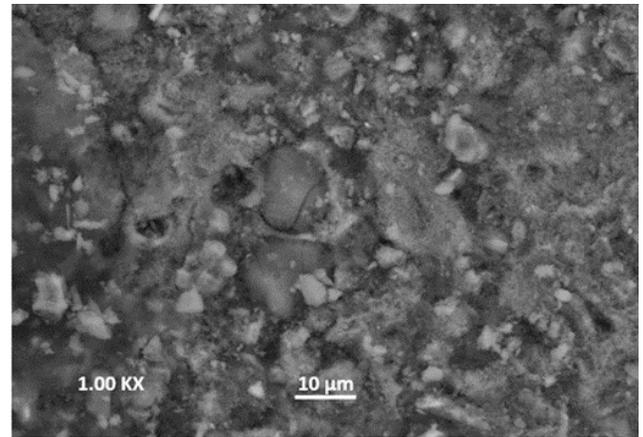
En los números de onda $970\text{--}1100\text{cm}^{-1}$ se da la formación de Silicato de calcio hidratado (C-S-H). En este rango, todas las muestras presentaron picos considerables a través de los cuatro centímetros de profundidad analizados. Sin embargo, Tocumen fue la más crítica.

Por último, tenemos el número de onda 1225cm^{-1} en la cual aparece la etringita. En ninguna de las muestras presentó formación de pico importante que evidenciara la formación de este producto.

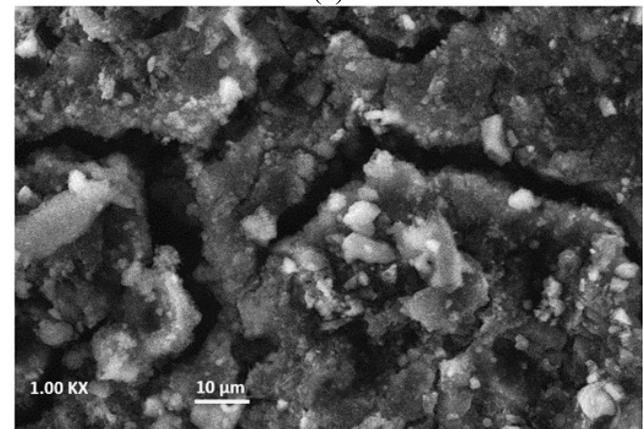
El análisis anterior nos sugiere que el proceso de Carbonatación de la estación Tocumen (ambiente marino-industrial) es mayor, y esto explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo del sitio acompañado de aerosoles marinos.

Con el objetivo de complementar los resultados por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, el uso microscopía electrónica de barrido (SEM) permiten evaluar el perfil del concreto mediante fotografías las cuales están en el orden de las micras o millonésima parte de un metro [9], [10]. En la figura 5 se muestran fotografías en el orden de $10\mu\text{m}$ de la superficie del concreto de la muestra: (a) patrón, (b) Penonomé y (c) Tocumen. Al compararlas vemos que todas las muestras presentan una morfología diferente. La muestra patrón (a) presenta una matriz hidratada, con cristales hexagonales, con poros y microfisuras. En lo que respecta a la muestra Penonomé (b) presenta cristales hexagonales y aciculares, fisuras de ancho de $10\mu\text{m}$ y

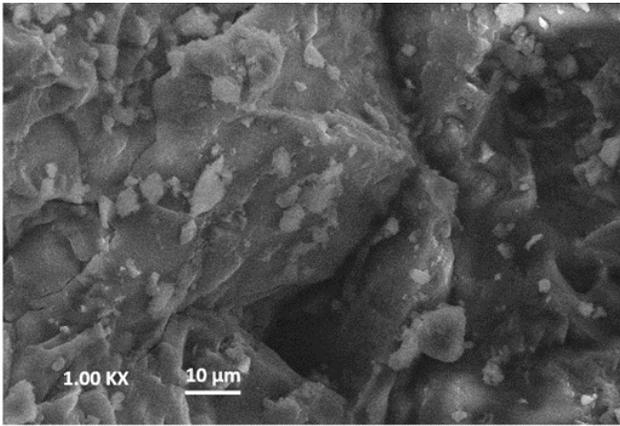
longitud de $30\mu\text{m}$ aproximadamente. Por otro lado, la muestra Tocumen (c) muestra una matriz completamente hidratada, con cristales hexagonales bien definidos y poros grandes definidos. Una matriz bien hidratada manifiesta la ganancia de resistencia a la edad de estudio. Las fisuras pueden deberse a la retracción ocurrida en la matriz y los poros a la pérdida de material por diversos medios. Sin embargo, se debe tener cuidado con las fisuras y poros pues son susceptibles a llenarse por los productos de la hidratación como el gel de sílice y desencadenar la expansión que produce la entrada de los productos de la corrosión al concreto [11]. Entonces, la estación Tocumen es más susceptible al ataque de los agentes promotores de la corrosión.



(a)



(b)



(c)

Figura 5. SEM. Grado de hidratación del cemento a un año de exposición.

La corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto obedece a un proceso electroquímico que ocurre por la difusión de los iones cloruros en el concreto a través de las fisuras. El origen de los cloruros en el concreto es diverso desde su presencia en la mezcla de concreto hasta el ambiente que rodea la edificación. Lo cierto es que, una vez la capa protectora del acero pierde su estabilidad comienza el proceso corrosivo cuyo producto expande la sección que la contiene, disminuye la sección efectiva de acero y genera la falta de adherencia al conjunto acero – concreto. Por ello, fue necesario el monitoreo de la corrosión en la investigación.

Estudios han demostrado que se puede minimizar la pérdida de la sección efectiva del acero si se diseña un concreto que se expone a condiciones marinas si es diseñado con espesores de recubrimiento igual a cuatro cm, relación agua/cemento de 0.4 y curado por 28 días. El ensayo de potencial de corrosión de media celda definió la probabilidad de ocurrencia de corrosión en el concreto reforzado en forma cualitativa, por eso se utiliza como complemento de otros ensayos. Este es normado bajo la designación ASTM C 876 cuyos criterios utilizados para medirlo son presentados en la tabla 1. Para garantizar un resultado exitoso se humedeció la superficie del hormigón y se midió la diferencia de potencial entre el acero y la superficie húmeda del hormigón que funciona como electrodo de referencia [4], [5], [6].



Figura 6. Ensayo de medición de potencial

Tabla 1. Criterio de Probabilidad de Corrosión. Norma ASTM C 876 - 91

Ecor vs ECS (mV)	Probabilidad de Corrosión
> - 120	10% probable
-120 a -270	Zona de incertidumbre
< -270	90% de probabilidad

La medida de potencial de corrosión se realizó antes de someter las losas a la intemperie y a un año de exposición. Las muestras se identificaron como control, Coclé (Penonomé) y Tocumen. Los resultados se exponen en las tablas 2 y 3. De estos resultados podemos inferir que antes de la exposición a la intemperie la muestra de Tocumen y Coclé (Penonomé) presentaba una probabilidad de 10% de ocurrencia de corrosión. Mientras que la muestra Control al inicio de la investigación se encontraba en la zona de incertidumbre establecida en la tabla 1. Ninguna de las muestras presentó la probabilidad del 90% de probabilidad de ocurrencia de corrosión. Esta situación puede deberse a que al inicio de la investigación las losas no se han secado y hay un alto contenido de humedad que facilita el proceso electroquímico en la medición inicial.

Tabla 2. Medición de potencial de corrosión de las muestras antes de la exposición a la intemperie. ASTM C 876

	1	2	3	4	5	6
control	-97.5	-131.0	-136.1	-76.6	-	-
					122.6	132.0
	7	8	9	10	11	12
	-90.5	-120.3	-131.8	-	-	-
				139.8	131.1	137.7
Coclé	1	2	3	4	5	6
	-74.1	-107.3	-109.3	-73.0	-	-
					113.4	121.8
	7	8	9	10	11	12

	-	-119.6	-112.2	-98.6	-	-74.7
	121.4				103.2	
Tocumen	1	2	3	4	5	6
	-32.3	-62.2	-63.2	-27.5	-48.5	-60.2
	7	8	9	10	11	12
	-22.6	-56.3	-62.2	-53.7	-40.8	-65.7

A un año de exposición, los valores dieron como resultado ser mayores a -120mV, lo que indica que todas las armaduras del concreto están en la región del 10% establecida en la tabla 1.

Tabla 3. Medición de potencial de corrosión de las muestras un año expuestas a la intemperie

	1	2	3	4	5	6
control	-70.3	-68.3	-64.8	-63.2	-73.1	-67.8
	7	8	9	10	11	12
	-65.3	-61.1	-54.8	-63.1	-64.4	-62.4
Coclé	1	2	3	4	5	6
	-03.6	-08.6	-02.3	-06.4	-17.3	-20.8
	7	8	9	10	11	12
	-17.2	-16.7	-18.7	-14.1	-21.4	-17.6
Tocumen	1	2	3	4	5	6
	-25.3	-20.8	-18.5	-14.8	-12.3	-12.8
	7	8	9	10	11	12
	-15.1	-11.8	-8.3	-7.0	-5.1	-6.0

De las tablas anteriores podemos observar que los valores de la losa representativa de la estación Tocumen siempre permanecieron dentro del 10% de probabilidad de ocurrir la corrosión.

Por último, los ensayos practicados son útiles para comprender el mecanismo que se da en el proceso de difusión en la hidratación del cemento en el concreto reforzado expuesto a la intemperie por un año. Sin embargo, la visita al sitio de la edificación o la extracción de núcleos son recursos que pueden indicar con certeza la situación acaecida en el lugar, además de usarlos para el ensayo de resistencia a la compresión. Si se extraen núcleos el ingeniero encargado debe escoger el lugar de la extracción con cuidado para no afectar la armadura embebida en el concreto. En la figura 7 podemos observar la distribución inadecuada del agregado como resultado de un débil mezclado a mano. Esta situación ocasiona áreas de falla por resistencia. También pueden observarse poros y agregados contaminados que debilitan la sección [12].



Figura 7. Núcleo de tres pulgadas de diámetro usado para análisis visual del perfil del concreto.

4. Conclusiones

Del presente trabajo puede concluirse:

- Los ensayos aquí presentados permitieron relacionar los resultados e indicar que el ambiente marino-industrial es el más crítico.
- El método de exposición a la intemperie de forma natural utilizado tiene la ventaja de dar las respuestas más cercanas a la realidad. Sin embargo, tiene el inconveniente de resultados a largo plazo. En lo que respecta a los métodos de ensayo podemos decir que son apropiados para mediciones no invasivas en el concreto y dan resultados en tiempo real, excepto la extracción de núcleos.
- Los resultados aquí obtenidos son aplicables a los cuidados en el diseño de concreto a utilizar según el sitio geográfico, especificaciones de diseño, relación agua/cemento y espesor de recubrimiento.
- Recomendamos se incrementen los análisis de perfiles del concreto para comprenderlo mejor. Partir del resultado obtenido en un futuro próximo se estudiará la afectación del ambiente marino-industrial existente entre muestras expuestas en el pacífico y el atlántico panameño.
- Esta investigación es parte de un programa de dos años de estudio de la durabilidad del concreto reforzado afectado por el microambiente que rodea la edificación. Esperamos infundir en estudiantes, investigadores y a la comunidad científica a plantear proyectos de investigación de nivel micro en concreto ya sea en entorno acelerado o no.

AGRADECIMIENTOS

El apoyo brindado por la Licenciada Fidedigna V. de Ortiz, el Ingeniero Ernesto Escobar, Licenciado Mario Miranda, José M. Pérez como personal técnico del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA) fue clave en la culminación de este estudio. En la misma vía, la participación del Licenciado Jesús Villar del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá fue definitivo para llegar a feliz término la investigación. Por lo antes expuesto, damos las gracias por la colaboración brindada.

REFERENCIAS

- [1] Vélez, L. M., "Permeabilidad y Porosidad en el Concreto", *Sistema de Revistas Científicas ITM, Tecnológicas*, no.25 (2010), [Online]. Available: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/869?show=full>.
- [2] Zhang, J.Z., Buenfeld, N. R., "Chloride Profiles in Surface – Treated Mortar Specimens", *Construction and Building Materials*, vo. 14, pp. 359-364, September-October 2000, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006180000043X>.
- [3] Piqué, T., Vázquez, A., Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento, *Rev. Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo*, Vol. 3, No.2, 2012.
- [4] Roa, G., Aperador, W., Delgado, E., "Design of a Remote Monitoring System for Evaluation of Corrosion in Reinforced Concrete Structures Under Chloride Ion Attack", *Rev. Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 16, Issue 4, pp. 565-572, October-December 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774315000414>.
- [5] Estrada, A., López, A., Chavarría, M., Rojas, Z., "Velocidad de Corrosión en el Sistema acero – concreto: enfoque al método de curado", *CULCYT*, Año 10, no. 51, septiembre-Diciembre (2013).
- [6] Carvajal, A., Silva, C., Valiente, J., Venegas, A., "Medidas de Potencial de Corrosión en sistemas de penetración acelerada de iones cl, en hormigón armado", *Rev. De la Construcción*, vol. 3, no.1, agosto 2004.
- [7] ACI 211 (Práctica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de densidad elevada y masivo)
- [8] Manterola, C., Otzen, T., "Why Research and How to conduct a Research", *Int. J. Morphol*, vol. 31, no.4, pp. 1498-1504, Diciembre 2013.
- [9] Hincapié, A., Montoya, Y., "La microestructura de los prefabricados de concreto", *Rev. Universidad EAFIT*, vol. 41, no.140, pp. 95-105, 2005, [Online]. Available: <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/17157/document%20-%202020-08-15T140446.782.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [10] ASTM, Designation: C856-18a, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.
- [11] Monteagudo, S., *Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [12] Hincapié, A., Valencia, J., "Resistencia al hormigón: núcleos vs cilindros", *Rev. Universidad EAFIT*, vol. 39, no. 13, pp. 87-91, 2003, [Online]. Available: [file:///C:/Users/aldac/Downloads/905-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2758-1-10-20120613%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/aldac/Downloads/905-Texto%20del%20art%C3%ADculo-2758-1-10-20120613%20(1).pdf)