



Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas

Behavior of reinforced concrete under the effect of different microclimates

Alda Cedeño¹

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

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

RESUMEN— Las edificaciones de concreto ubicadas en ambientes urbano y/o marinos experimentan ataques por agentes externos que ocasionan daños en su estructura, disminuyen la durabilidad y afectan la apariencia física de estas ocasionando gastos de mantenimiento o reparación. Debido a la problemática antes descrita, el presente estudio contempla el análisis a pequeña escala del hormigón expuesto en tres estaciones en Panamá que experimentan diferencias ambientales. La duración de la investigación fue de 1.5 años. Las experiencias aplicadas consistieron en análisis fisicoquímicos, espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los laboratorios usados pertenecen a la Universidad Tecnológica de Panamá y el Instituto SMITHSONIAN de Panamá. Los resultados se exponen a 1 y 1.5 años de exposición mediante tablas, microfotografías, y espectros de absorbancia. Aplicar los diferentes métodos fue valioso pues se pudo ver la evolución de los parámetros evaluados en el tiempo.

Palabras claves— Concreto, espectros IR, ettringita, portlandita.

ABSTRACT— Concrete buildings located in urban and/or marine environments experience attacks by external agents that cause damage to their structure, decrease durability and affect the physical appearance of these, resulting in maintenance or repair costs. Due to the problem described above, this study covers small-scale analysis of exposed concrete at three stations in Panama experiencing environmental differences. The duration of the investigation was 1.5 years. Applied experiences consisted of physicochemical analyses, Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The laboratories used belong to the University of Technology of Panama and the SMITHSONIAN Institute of Panama. The results are exposed to 1 and 1.5 years of exposure using tables, microphotographs, and absorbance spectra. Applying the different methods was valuable as you could see the evolution of the parameters evaluated over time.

Keywords— Concrete, IR spectra, ettringite, portlandite.

1. Introducción

Las edificaciones ubicadas en climas urbanos y marinos exhiben daños en el concreto de las mismas [1]. La problemática causada consiste en la disminución de la resistencia, la durabilidad y el deterioro de la apariencia física de las obras de hormigón. Los agentes agresivos que afectan a una estructura pueden ser gases, líquidos o partículas sólidas. Su agresividad está en función del entorno, la velocidad de penetración y el transporte involucrado [2]. Los agentes ambientales de una región en particular se denominan carga ambiental localizada o microclima [3]. Para abarcar regiones ambientales diferentes se escogió en el Pacífico: Tocumen, en la región central: Coclé y en el Mar Caribe: Sherman

ligadas a las estaciones meteorológicas de ETESA, denominadas Tocumen, Antón y Bocas del Toro, respectivamente [4]. Por último, se ubicó una estación de control en Tocumen.

El objetivo de este estudio es el de presentar los resultados obtenidos, al exponer por un año y medio losas de concreto armado a tres microclimas diferentes, sometidas a ensayo de espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). También se hace un análisis del cambio en pH en este periodo. La investigación desarrollada permite un mejor entendimiento de las variables puntuales del clima que afectan la durabilidad del concreto. Contribuirá con el

Citación: A. Cedeño, "Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas," *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no_modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 6 de marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 12 de enero de 2021. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI: 10.33412/it.v17.1.2931

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

ingeniero civil y profesionales afines en el entendimiento fundamentado y valioso de los daños ocurridos y sus causas a fin de tomar la mejor decisión de diseño, mantenimiento o reparación de las edificaciones.

Estudios a pequeña escala sobre el concreto evidencian la existencia de una matriz de cemento hidratado, una red de poros, portlandita, ettringita, y una fase acuosa que están en equilibrio con los hidratos del cemento, pero no con el entorno. El equilibrio del que hablamos puede verse roto por el ataque de ácidos y producir una caída de pH [5]. El cemento consiste en sílice (S), alúmina (A), óxido de calcio (C), óxido de hierro (F), y los principales compuestos son silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Las principales fases en la microestructura de pasta de cemento hidratado son el silicato cálcico (CH), silicato de calcio hidratado (C-S-H), ettringita, monosulfatos, partículas de cemento no hidratados (UH) y poros de aire. La portlandita mantiene el pH en valores altos protegiendo al concreto armado. Sin embargo, es soluble en agua y sufre lixiviación con facilidad. Al reaccionar con sulfatos se cristaliza, dando lugar a la expansión, fisuras y por último a la formación de ettringita. Al microscopio la portlandita tiene la apariencia de plaquetas hexagonales delgadas. Mientras que, la ettringita se presenta en forma de varillas alargadas. otorga cohesión al concreto cuando crece como un enrejillado en la superficie, el peligro aparece cuando se deposita y crece en las fisuras del concreto porque se acumula, se expande y ejerce presión al área donde está ubicada [6].

Para analizar la microestructura del hormigón es muy útil el microscopio electrónico de barrido que muestra imágenes en tres dimensiones, en un ambiente de alto vacío mediante un haz electrónico puntual. La ventaja que posee es la de hacer visibles objetos no perceptibles a simple vista [7]. Este método nos provee información por ejemplo de constituyentes indeseables del concreto, productos de hidratación del cemento, fisuras, y poros,

Por otro lado, el FTIR nos brinda un espectro de la absorbancia o transmitancia de energía en función del número de onda en cm^{-1} . Es una técnica que se basa en la Teoría Cuántica y es válida siempre que la molécula vibre. Para leer un espectro debemos conocer el rango del IR o infrarrojo que va desde 1.3×10^4 a 33 cm^{-1} . En esta región no podemos distinguir la luz infrarroja, por eso

nos apoyamos en los instrumentos. El IR reconoce el enlace químico y para identificar una molécula debemos observar los picos característicos que se forman en el espectro correspondiente. Existen tres zonas en el IR: el cercano (NIR) va desde 1.3×10^4 a 4000 cm^{-1} , medio (MIR) de 4000 a 625 cm^{-1} , y lejano (FIR) de 625 a 33 cm^{-1} . El NIR reconoce electrones de valencia en moléculas radicales, MIR reconoce el enlace covalente, y FIR se reconoce el enlace iónico. El enlace covalente se da entre átomos no metálicos (C, H, N, O, S). El espectrómetro mide el movimiento de la molécula y registra la radiación absorbida y la banda del IR en la que se da el máximo movimiento. Todas las señales las lee usando la Transformada de Fourier incorporada en su programa. El análisis espectral reconoce la presencia o no de grupos funcionales (dos átomos enlazados). Los grupos funcionales presentan frecuencias características o únicas. De 33 a 1500 cm^{-1} se le llama huella digital porque se ve las características de los grupos, de 1500 a 4000 cm^{-1} se les llama frecuencia de grupo. Esta zona se ha dividido en tres partes: de 4000 a 2500 cm^{-1} se ubica la frecuencia del hidrógeno, de 2500 a 2000 cm^{-1} , tenemos los triples enlaces y de 2000 cm^{-1} en adelante ocurren los doble enlaces [8], [9].

2. Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto, se diseñó una investigación experimental, sin manipulación de las condiciones de muestreo. Confeccionamos 12 losas de concreto reforzado. Por sus dimensiones, distancia y tiempo entre los sitios de monitoreo y mano de obra el tipo de muestra es no probabilística [10]. La metodología empleada consistió en dejar 3 especímenes en cada una de las estaciones de monitoreo y una en la de control. Para establecer la relación entre el efecto de deterioro o daño causado por los contaminantes ambientales o agentes externos de las zonas atlántica, central y pacífica sobre las losas expuestas, las mismas se ensayaron a 1 y 1.5 años de exposición con el fin de registrar datos observables y medibles en cada una de ellas. Este proceso inició en octubre de 2017 y finalizó en junio de 2019. los resultados se contrastaron con la losa patrón que reposó en la Extensión de la UTP en Tocumen en condiciones controladas.

2.1 Materiales

Para satisfacer las características de durabilidad, trabajabilidad y economía, el concreto a utilizar se dosificó por el método de volumen absoluto [11]. Se requirió concreto para losas reforzadas en ambas direcciones, expuestas a la humedad en ambientes desde insignificante a severo en presencia de cloruros y sulfatos. La resistencia a la compresión especificada es de 280kg/cm^2 (4000 lb/pulg^2) a los 28 días, no hay datos estadísticos disponibles, el revenimiento debe estar entre 25 y 75mm y agregado de tamaño máximo nominal de 25mm, bien graduado, con masa específica relativa seca en el horno de 2.68, absorción de 0.5%. Cada espécimen tendrá dimensiones de $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.15\text{m}$, el cemento utilizado es tipo HE (alta resistencia inicial) con masa específica relativa de 3.0, sin aditivos y sin aire incluido. El agregado fino es una arena natural, con masa específica relativa seca al horno de 2.64%, con absorción de 0.7% y un módulo de finura de 2.8 con relación agua/cemento igual a 0.4.

2.2 Métodos

Pasado el tiempo estipulado en cada caso, a cada losa se le extrajo un cilindro de 2 pulgadas para la realizar los ensayos fisicoquímicos y las técnicas de caracterización FTIR y SEM. Los núcleos de 2 pulgadas se les hizo un corte de 4 capas de 1cm de espesor, con el fin de verificar la afectación del ambiente desde la superficie hasta el interior. Correspondiendo el número de identificación 1 a la capa de la superficie o expuesta, sucesivamente 2, 3, 4 a las capas siguientes hacia el interior de la probeta. El espécimen resultante puede verse en la siguiente figura 1.



Figura 1. Probeta de 2 pulgadas cortada en capas de 1cm.

Las losas se confeccionaron a finales de octubre del 2017, se sometieron a curado y fueron trasladadas a las

estaciones en enero de 2018. En enero de 2019, un año después, se realizó el primer juego de ensayos. En junio de 2019 tuvo lugar al segundo juego de análisis. Los ensayos practicados son espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los métodos se seleccionaron debido a la necesidad de contar rápidamente con información más detallada sobre productos de la hidratación y microestructura del concreto.

El ensayo por FTIR se practicó a las capas 1, 2, 3, y 4 de los cilindros arriba descritos. En la preparación de las muestras se utilizó el método KBr [12]. Las combinaciones muestra-KBr utilizadas en la confección de las pastillas fue de 1:10 (0.025 de muestra a 0.25 de KBr), la presión aplicada estuvo en el rango de 7.5 a 8.5 toneladas. El análisis se realizó a cada espécimen a 1 y año, 1.5 años. Los espectros mostrados están en el rango de infrarrojo medio ($4000 - 400\text{cm}^{-1}$), en los mismos se muestran la cantidad de energía absorbida por número de longitud de onda en cm^{-1} .

El análisis morfológico se realizó mediante el análisis de imágenes por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM). En la preparación de la muestra o el “*sputtering*”, inicialmente se trató de recubrir con una capa muy fina de oro a las muestras para otorgarles propiedades conductoras. Sin embargo, presentaron molestias por tal motivo, se tomó la decisión de ensayarlas sin recubrimiento.

En todos los casos, presentamos la fotografía SEM solo de la capa 1 o superficial, tomadas a escala de 1,000KX ($10\mu\text{m}$) a 5,00KX ($2\mu\text{m}$).

En el análisis de pH se utilizó un potenciómetro multiparámetros de pH. Para la espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier contamos con Agilent Technologies, modelo Cary 660, Serie FTIR Spectrometer y la prensa hidráulica digital PIKE CrushIR, con una capacidad de 15 toneladas de presión en la confección de las pastillas. Mientras que, para el análisis morfológico contamos con el microscopio electrónico de barrido Zeiss Evo 40 VP. Los demás ensayos se realizaron con los equipos tradicionales normados [13].

3. Resultados y análisis

3.1 Inspección visual de los especímenes expuestos

En la figura 3 se muestran las losas con el deterioro físico sobre su superficie. Este ejercicio se realizó a 1 y 1.5 años de exposición a la intemperie:

Inspección visual a 1 año de exposición

- Control: se mantuvo sin variación apreciable en la superficie durante el estudio.
- Coclé: experimentó oquedades y fisuras superficiales. El acero no tenía oxidación apreciable.
- Tocumen: presentó una superficie cuarteada compuesta por grietas menudas superficiales en forma hexagonal irregular de 3mm de ancho aproximadamente y una consistencia blanda.
- Sherman: a 1 años de exposición presentó cambio de coloración superficial, oquedades, fisuras menudas superficiales sin patrón característico y corrosión en el acero expuesto.

Inspección visual a 1.5 años de exposición

- Control: se mantuvo sin variación apreciable en la superficie durante el estudio.
- Coclé: experimentó oquedades y fisuras superficiales. El acero expuesto exhibió oxidación.
- Tocumen: presentó una superficie cuarteada compuesta por grietas menudas superficiales en forma hexagonal irregular de 3mm de ancho aproximadamente y una consistencia blanda. El acero expuesto exhibió oxidación.
- Sherman: presentó cambio de coloración superficial, oquedades, fisuras menudas superficiales sin patrón característico. El acero expuesto estaba visiblemente corroído.

Este resultado puede deberse a las condiciones ambientales de cada sitio: acción solar, evaporación, y la acción del viento sobre la superficie del concreto.



Figura 2. Losas expuestas por 1 año: a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman.

3.2 Medición de pH

En la tabla 1 observamos los valores obtenidos de pH en cada muestra por profundidad a 1 y 1.5 años:

pH por profundidad

El pH de todas las muestras se comportó como se esperaba, siendo la capa superficial la más vulnerable al ambiente, excepto el pH a los 1.5 años de la muestra de Coclé en la capa 4 que se obtuvo un valor de 11.57.

Comparación de pH a 1 y 1.5 años

Los resultados se muestran por estación:
Control tuvo un aumento de pH en la muestra al pasar de 1 a 1.5 años.
Coclé experimentó un aumento de pH al pasar de 1 a 1.5 años, excepto en la capa 4.
Tocumen y Sherman presentaron un aumento en pH en las capas interiores 2,3, y 4. En ambas muestras la capa superficial o la que está al contacto directo al ambiente presentaron caída en los valores de pH evidenciando la vulnerabilidad de la superficie del concreto frente al ambiente del entorno.

Tabla 1. Determinación de pH en concreto expuesto

Tipo de muestra: Concreto reforzado expuesto a 3 tipos de ambientes naturales.	pH Cloruros (UAMC); ASTM 1218	
	1 año	1.5 años
Muestra expuesta a:		
Control		
1	11.93	12.12
2	12.19	12.52
3	12.44	12.59
4	12.58	12.57
Coclé		

	1	11.62	12.54
	2	12.49	12.26
	3	12.57	12.54
	4	12.61	11.57
Tocumen			
	1	11.70	11.43
	2	11.49	12.57
	3	12.54	12.56
	4	12.51	12.55
Sherman			
	1	12.22	11.93
	2	12.46	12.50
	3	12.55	12.61
	4	12.52	12.58

3.3 Resultados de ensayo por FTIR

3.3.1 Espectros por profundidad

En las figuras 3-6 se presentan por espectros FTIR de las muestras de concreto: de control y las de los sitios identificados como Coclé, Panamá y Colón, expuestas a 1 año en estos ambientes. En cada figura se presentan 4 espectros correspondientes a las 4 profundidades estudiadas: la muestra 1 que corresponde a la capa superficial, y las muestras 2, 3 y 4 obtenidas a 1, 2 y 3 cm de profundidad desde la superficie, respectivamente.

En términos generales se observa un patrón FTIR muy parecido al primer año en los 4 sitios y en las 4 profundidades:

En la muestra de la superficie (patrón 1) se observan las siguientes características en el patrón FTIR: una banda ancha y de intensidad media próxima a 3500cm^{-1} atribuida al grupo OH del agua y otras especies hidratadas; una banda próxima a 1400cm^{-1} atribuida a grupo carbonilo (CO_3^{2-}), que es la de mayor intensidad en el espectro; una banda ancha y de intensidad media entre 900 a 1200cm^{-1} ; que puede obedecer a la superposición de dos grupos químicos en el cemento hidratado: el gel C-S-H ($970-1080\text{cm}^{-1}$) y al SO_4^{2-} , lo cual dificulta resolver esta banda; a 875cm^{-1} se observa una banda bien definida de intensidad media que se puede atribuir al CO_3^{2-} y al enlace Al-O y Al-OH; y otra banda próxima a 700cm^{-1} débil, que se puede atribuir igualmente al CO_3^{2-} . La presencia de las bandas a 1400 , 875 y 700cm^{-1} , sugieren la existencia del fenómeno de carbonatación a nivel superficial en los 4 sitios, lo cual acontece por efecto de la reacción del CO_2 ambiental con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se puede observar, que la intensidad relativa de la banda próxima a 1400cm^{-1} con respecto a la banda en el rango de $900-1200\text{cm}^{-1}$, es del espectro de Tocumen es mayor con respecto al control y las estaciones de Coclé y Sherman, lo que sugiere que el nivel de Carbonatación de

esta estación es mayor, y esto explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo [14].

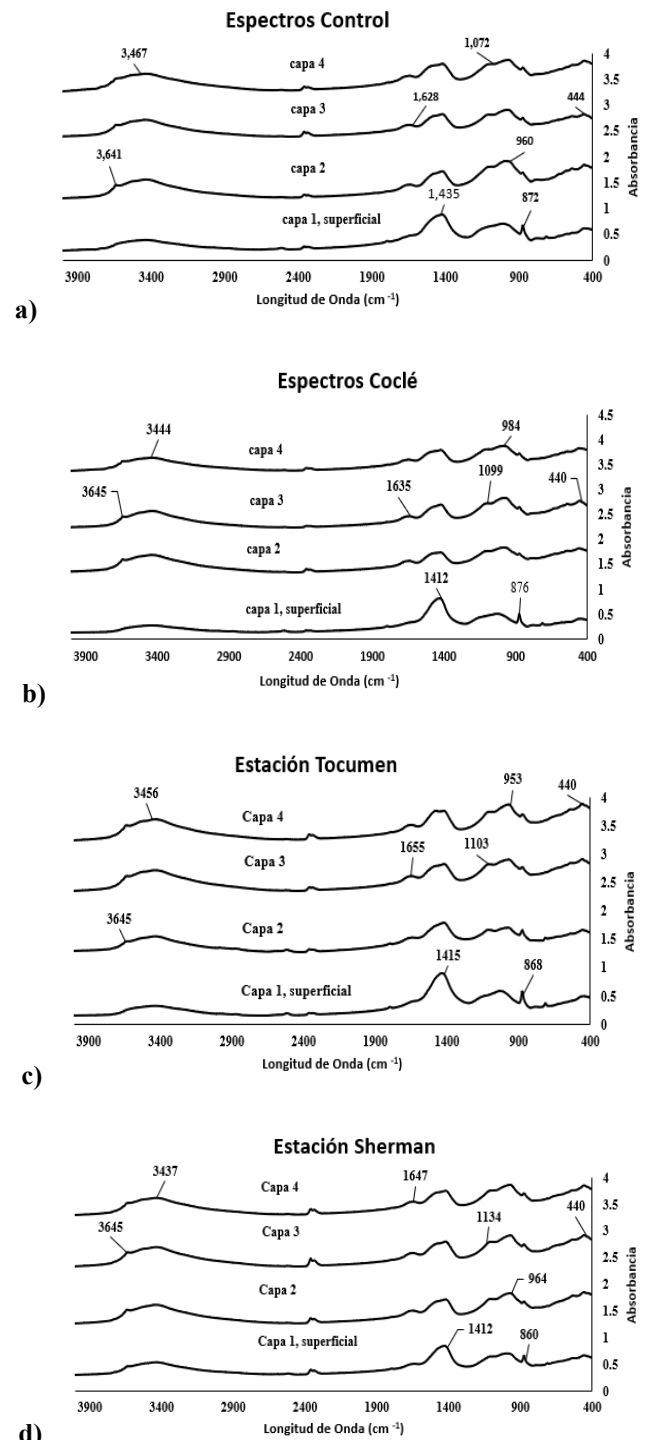


Figura 3. Espectros FTIR por profundidad: a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman

En las muestras de 1, 2 y 3cm de profundidad desde la superficie (patrones 2, 3 y 4 respectivamente de cada

sitio), se observan las siguientes características en el patrón FTIR: una banda ancha y de intensidad media próxima a 3500cm^{-1} atribuida al grupo OH del agua y otras especies hidratadas, pero en este caso de mayor intensidad; una banda próxima a 1400cm^{-1} atribuida a grupo carbonilo (CO_3^{2-}), pero que disminuye su intensidad relativa en el espectro; una banda ancha que es la de mayor intensidad en el espectro entre 900 a 1200cm^{-1} ; que obedece a la superposición del gel C-S-H ($970\text{-}1080\text{cm}^{-1}$) y al grupo SO_4^{2-} , lo cual dificulta resolver esta banda; a 875cm^{-1} se observa una banda bien definida de intensidad que disminuye su intensidad y que se puede atribuir al CO_3^{2-} y al enlace Al-O y Al-OH. La banda próxima a 700cm^{-1} que aparece con intensidad débil en la muestra de superficie (y que se atribuye al CO_3^{2-}), en este caso desaparece. En los cuatro sitios, aparece una banda débil próxima a 3600cm^{-1} , que se puede atribuir a portlandita, ettringita y el C-S-H, lo cual es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor nivel de profundidad. Igualmente aparece una banda a 1600cm^{-1} que se atribuye a la presencia de H_2O , así como al agua de constitución del SO_4^{2-} . Se observa igualmente una banda débil próxima a 1100cm^{-1} , que se puede atribuir tanto a la presencia de ettringita como el C-S-H. En vista que la banda próxima a 1400cm^{-1} presenta una intensidad menor que la banda en el rango de $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, se puede indicar en estas 3 profundidades la muestra presenta una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación, ya que la capa superficial representa una barrera o protección adecuada.

3.3.2 Comparación de espectros de las muestras expuestas a 1 y 1.5 años de exposición

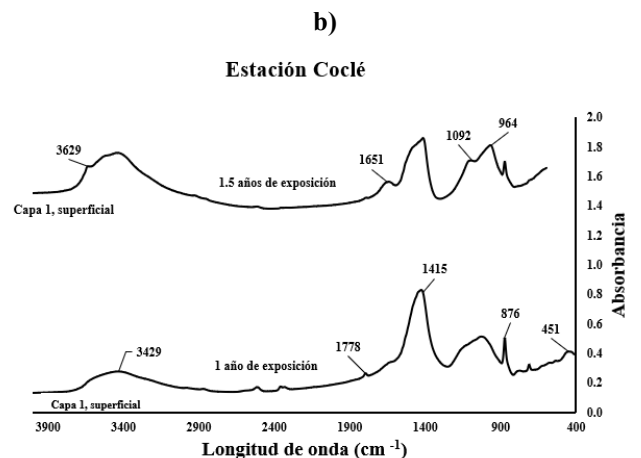
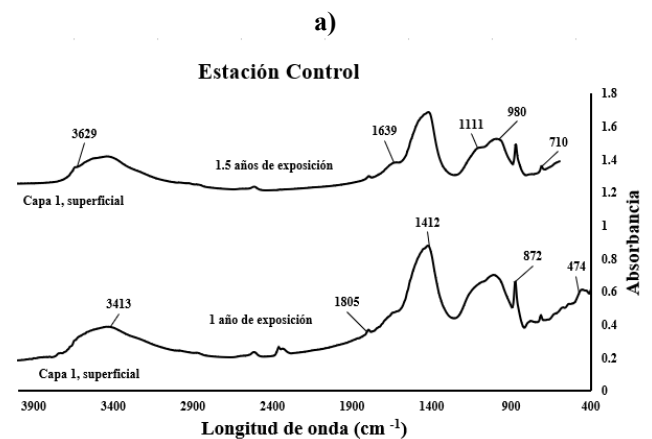
En este caso sólo se evaluará la muestra superficial.

Muestra Control: a 1.5 años no existe prácticamente diferencias significativas con respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1

Muestras Coclé: a 1.5 años de exposición, en la muestra de la superficie, aparecen bandas adicionales a las descritas en el 3.3.1: una banda a 3600cm^{-1} , una banda a 1600cm^{-1} ; se observa un incremento en la intensidad relativa de las bandas a 3500cm^{-1} y a $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$; se observa, además, la disminución de la banda a 1400cm^{-1} . El incremento relativo de la banda en el rango de $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, que se atribuye a ettringita y el C-S-H, es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor tiempo de exposición. Esto significa que a 1.5 años la muestra presenta una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación.

Muestras de Tocumen: a 1.5 años no existe prácticamente diferencias significativas con respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1 lo que sugiere esta muestra se sigue exponiendo bajo condiciones de carbonatación, como se explicó previamente.

Muestras de Colón: a 1.5 años existe poca diferenciación respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1 y en este caso, la intensidad relativa de la banda de 1400cm^{-1} con respecto al rango de 900 a 1200cm^{-1} , se incrementa por lo cual, hay evidencia del proceso de carbonatación.



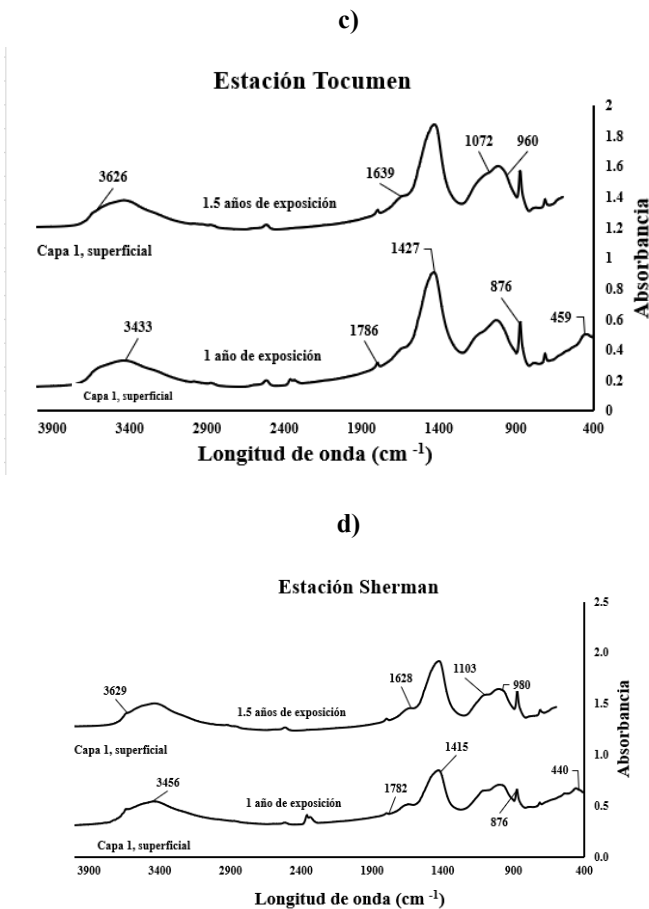


Figura 4. Espectros por estación comparados a 1 y 1.5 años.
a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman.

3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

3.4.1 Resultado a un año de exposición

En la figura 5a y 5b se presenta las imágenes SEM de la muestra de concreto Control, obtenida a nivel superficial. Se puede evidenciar, en la figura 5a), una morfología en la pasta hidratada con los siguientes micro defectos: (1) micro fisuras sobre los granos ($2\mu\text{m}$ de ancho), (2) poros con material en su interior, (3) gel amorfo, (4) cristales en forma de aguja, (5) cristales en forma de capas, (6) poros irregulares vacíos. En la figura 5b), se presenta una imagen SEM de un área seleccionada, a mayor magnitud, donde se puede apreciar con mayor precisión algunos de estos micro defectos: (1) el gel amorfo sobre la matriz, (2) fisuras finas en granos (3) gel amorfo rodeando los granos (4) cristales en forma hexagonal (5) cristales en forma de capas [5], [6],[15], [16], [17].

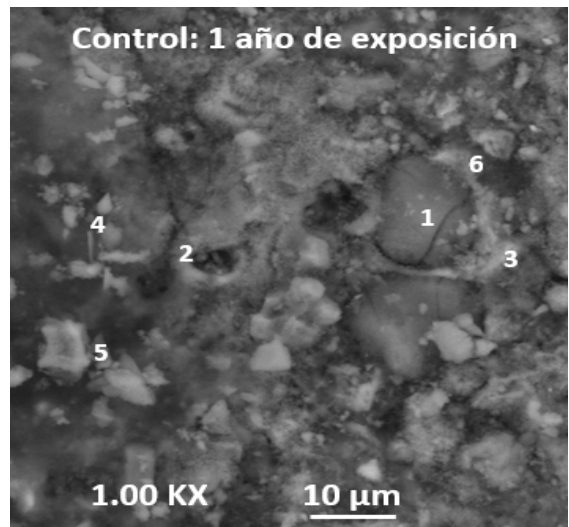


Figura 5a. Fotografía SEM, muestra control.

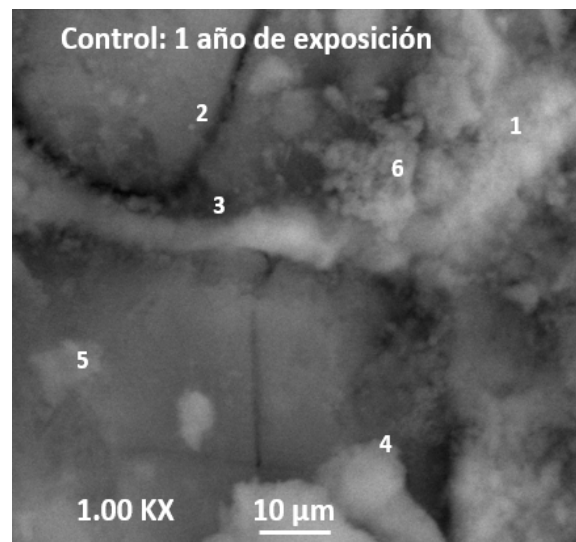


Figura 5b. Fotografía SEM, muestra control

La figura 6 presenta la imagen SEM de la muestra de concreto expuesta en la estación Coclé. En ella encontramos la microestructura del cemento hidratado, con (1) bloques blancos y cristales granulares desde $5\mu\text{m}$, (2) fracturas ($8\mu\text{m}$ de ancho), (3) poros irregulares (4) cristales dispersos (5) fisuras finas y cristales en fisura [5], [6],[15],[16].

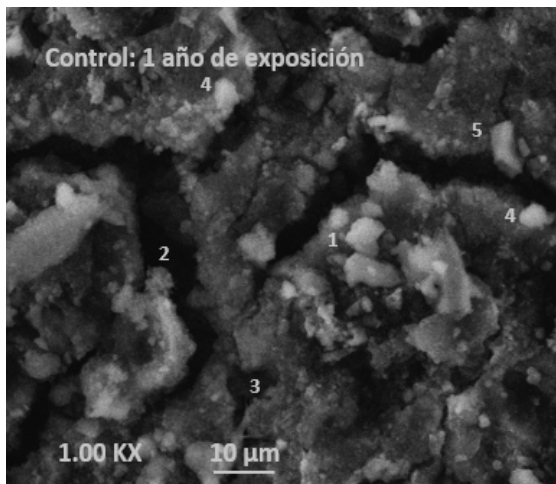


Figura 6. Fotografía SEM, muestra Coclé.

En la figura 7 se presenta la imagen SEM del concreto de la estación Tocumen. Se observa: (1) poros y cristales en forma de escamas adheridas a la superficie, (2) morfología con bloques amorfos, (3) poros irregulares limpios, (4) fisuras finas de 1 μm de ancho, (5) cristales trigonales o que hacen sus paredes 60° entre sí y cristales incrustados en las fisuras. Refleja un proceso de hidratación completo y vidrio amorfo [18], [19], [20], [21].

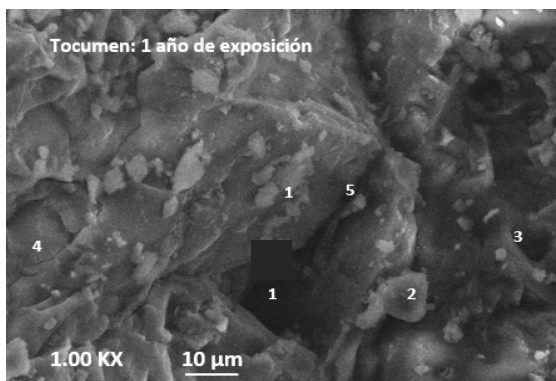


Figura 7. Fotografía SEM del concreto de la estación Tocumen.

La microestructura de la muestra de concreto expuesta en la estación de Sherman se presenta en la figura 8, y corresponde a una morfología granular. En la figura (8a) se puede apreciar: (1) cristales amorfos granulares, de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (2) granos finos en la superficie, (3) poros con material dentro, (4) poros irregulares limpios, (5) fisuras finas de 2 μm de ancho, (6) gel amorfo, muy parecidos a C-S-H. En la figura 8b se observa (1) el C-S-H ampliado [15], [16][17].

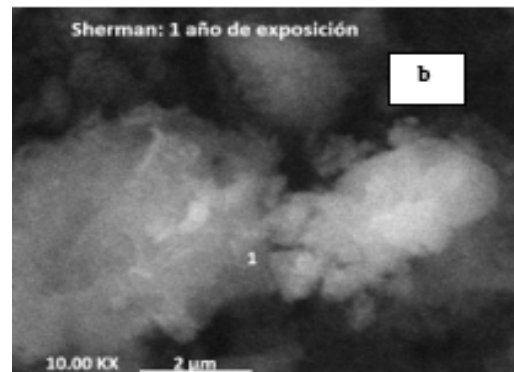
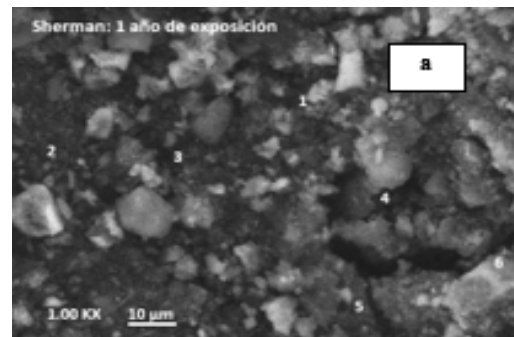


Figura 8. Fotografía SEM, muestra Sherman.

3.5 Resultados a 1.5 años de exposición

Las figura 9 corresponden a la estación Control el cual presenta el proceso de hidratación completa, una gran cantidad de cristales de hidróxido de calcio (CH) e hidróxido de calcio hidratado (C-S-H) cubriendo la matriz, (1) vacíos limpios, (2) cristales en forma de placas cruzadas en ángulos de 60°, (3) cristales hexagonales en forma de placas planas, (4) cristales sobre los vacíos, (5) fisuras de 0.02 μm. [18], [19], [20], [21].

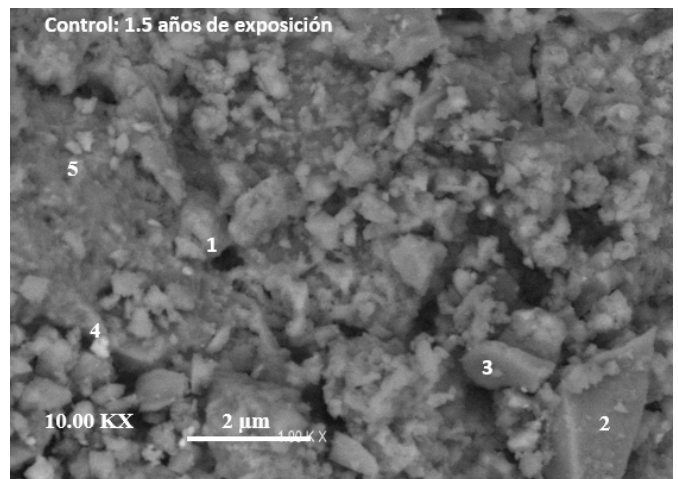


Figura 9. Fotografía SEM, muestra Control.

A 1.5 años, el concreto de la estación Coclé evolucionó, como puede verse en la figura 10 sobre una superficie completamente hidratada (1) abundantes cristales en forma de bloques blancos, (2) cristales en forma de aguja adheridos a la superficie, (3) fisuras de 1 μm de ancho, (4) cristales en forma de escamas sobre la superficie, (5) poros irregulares, (6) cristales dentro de poros, y 11b) la misma zona ampliada muestra: (1) gel blanca, y (2) cristales blanquecinos parecidos a cristales de CH similar a los productos de hidratación del cemento como el hidróxido de calcio CH, el hidróxido de calcio hidratado C-S-H y la ettringita y portlandita. (3) poros irregulares [15], [19], [20], [21].

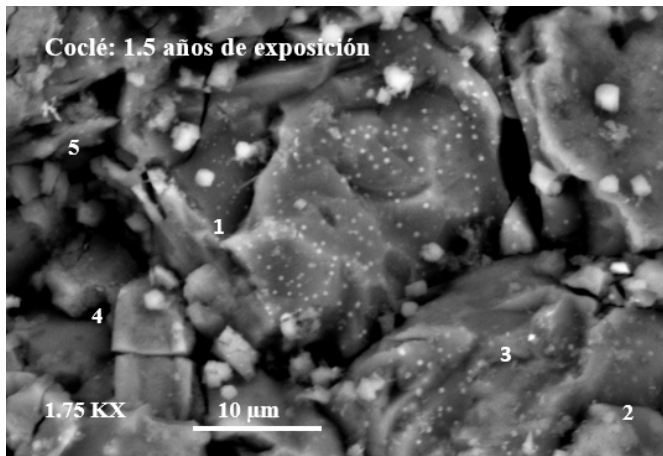


Figura 10. Fotografía SEM, muestra Coclé.

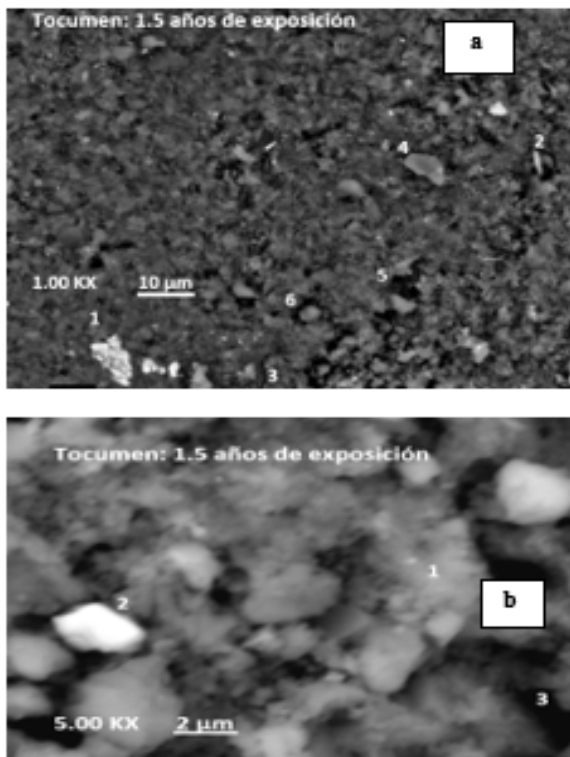


Figura 11. Fotografía SEM, muestra Tocumen.

Tocumen por su parte, presentan en la figura 11 a) una morfología hidratada de forma definida, con (1) cristales blanquecinos sobre la superficie hasta de 10 μm de largo, (2) esporádicos cristales en forma de aguja, (3) fisuras de 1 μm de ancho, (4) cristales en forma de escamas sobre la superficie, (5) poros irregulares, (6) cristales dentro de poros, y 11b) la misma zona ampliada muestra: (1) gel blanca, y (2) cristales blanquecinos parecidos a cristales de CH similar a los productos de hidratación del cemento como el hidróxido de calcio CH, el hidróxido de calcio hidratado C-S-H y la ettringita y portlandita. (3) poros irregulares [15], [16], [17], [21], [22].

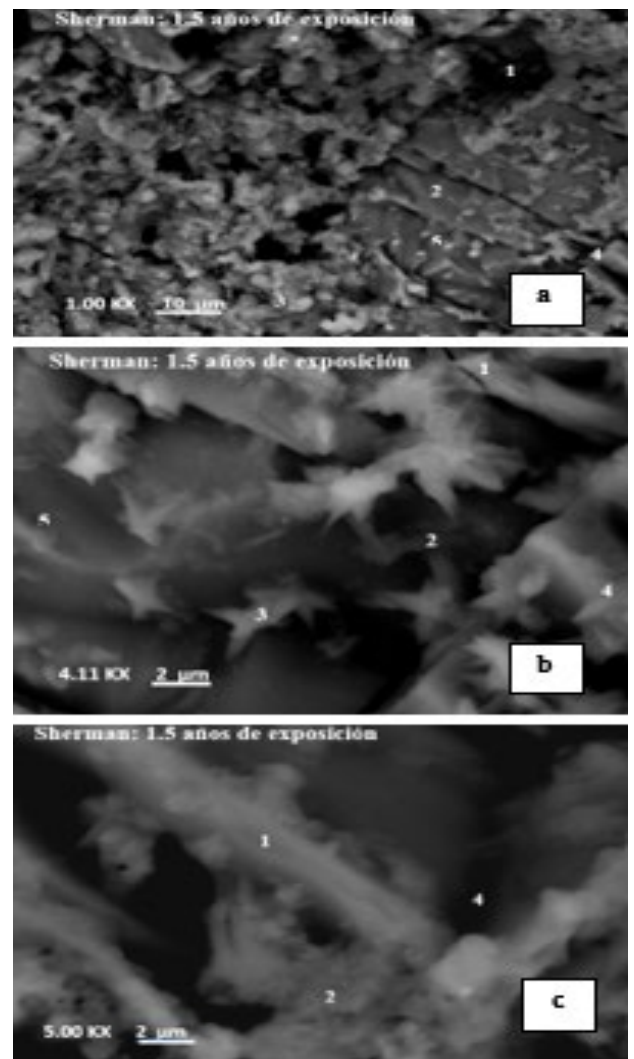


Figura 12. Fotografía SEM, muestra Sherman.

La muestra procedente de la losa expuesta en Sherman se presenta una matriz hidratada en la figura 12a) tenemos (1) poros irregulares vacíos, (2) fracturas

de granos en forma de placas, (3) cristales blanquecinos, (4) cristales en forma de placas entrecruzadas formando ángulos de 60°, (5) cristales blanquecinos diminutos. En la figura 12 b, representa la misma zona ampliada y se pueden observar: (1) fisuras de 0.01 μm de ancho, (2) poros irregulares, (3) cristales hexagonales de diferente grosor, prismáticos, cristales como agujas parecidos a ettringita y portlandita, (4) cristales en forma de placas entrecruzadas formando ángulos de 60° [6], [15], [16], [17], [20], [21], [22].

4. Conclusiones

Al comparar los resultados de la inspección visual, cambio en el pH, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM):

- En el tiempo: la muestra de Tocumen presentó mayor deterioro en el concreto con respecto al control y las estaciones de Coclé y Sherman, lo que sugiere que el nivel de Carbonatación de esta estación es mayor, y esto se explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo de la zona. Mientras que la carbonatación en la muestra de Sherman se incrementa en menor grado que la muestra de Tocumen. Por otro lado, la muestra correspondiente a Coclé presentó disminución en el mismo proceso.
- Por profundidad: las muestras presentan una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación, ya que la capa superficial representa una barrera o protección adecuada.
- En los cuatro sitios, aparece una banda débil próxima a 3600 cm^{-1} y las imágenes SEM a 1.5 años muestran cristales que se puede atribuir a portlandita, ettringita y el C-S-H, lo cual es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor nivel de profundidad.
- Los métodos de análisis empleados se complementaron en el análisis del concreto bajo la influencia de los contaminantes ambientales al que fueron expuestos los especímenes en el tiempo de duración del estudio. Con ellos puede hacerse análisis diversos de correlación entre las muestras, tiempo y condiciones de exposición.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Licenciada Fidedigna V. de Ortiz, al Ingeniero Ernesto Escobar, Licenciado Mario Miranda, José M. Pérez personal técnico del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales

(LABAICA) y al Licenciado, Jesús Villar del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo técnico en el desarrollo del estudio.

De la misma forma, reconocemos a la Universidad Tecnológica de Panamá y el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales el apoyo suministrado por poner a disposición el equipo utilizado en la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Domínguez, A. González, "Valoración Técnica del deterioro de las edificaciones en la zona costera de Santa Fe", Arquitectura y Urbanismo, Vol. 36, La Habana, abril 2015.
- [2] O. Hernández, C.J. Mendoza, "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico", Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. 17, No.1, México, marzo 2006.
- [3] E. I. Moreno, F. Ayuso-Blanco, A. Torres, O. Troconis, "Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (Proyecto DURACON)", diciembre 2009, Artículo de Investigación, Ingeniería, vol. 13, núm. 3, septiembre-diciembre, 2009, pp. 53-60 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México
- [4] Estaciones hidrometeorológicas de ETESA, [en línea], <http://www.hidromet.com.pa/documentos.php?sec=17>, [http://www.hidromet.com.pa/estaciones_satelitales.php]
- [5] T. Moragues, (2013): "Proceso de Hidratación del cemento Portland microestructura del hormigón", ataque de ácidos, E.T.S.I Caminos, Canales y Puertos, [en línea], (Sliders 43/53), <https://www.yumpu.com/es/document/read/14336336/proc-esos-de-hidratacion-del-cemento-portland-microestructura-del->
- [6] M. Giraldo, J. Tobón. "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación", Dyna, vol. 73, núm. 148, pp. 69-81, Universidad Nacional de Colombia Colombia], marzo, 2006.
- [7] J. Renau; M. Faura, "Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido", Sección de Microscopia Electrónica, Centro de Investigación, Hospital La Fe, Avda. Campanar, 21 46009 Valencia.
- [8] Lectura de Espectro IR (Infrarroja), (2016), Ciencias Químicas y Farmacología, Categoría: Ciencias y Tecnología, [en línea], Video, <https://www.youtube.com/watch?v=pI1NVcOXWHk> [Jan. 20, 2020].
- [9] Regiones básicas de un espectro de infrarrojo, [en línea], pdf, fig. IR-6 "Algoritmo para la interpretación de señales en 1850-1540 cm^{-1} , www.depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Tablas_IR_15437.pdf
- [10] A. Porras V., "Tipos de muestreo", Centro de Investigación en Geografía y Geomática (CONACYT), México, p 2-6, 2017.

- [11] ACI 211 (Práctica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de densidad elevada y masivo)
- [12] T. Piqué, A. Vásquez, "Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (FTIR) En El Estudio De La Hidratación Del Cemento", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, Volumen 3, No.2, pg. 62-71, enero-junio 2012,
- [13] Normas A.S.T.M. - C 1157, C 109-M, C187, C191, C 451, C 430, C 204, C 188, C 151, C185, C 1038, Ensayos físicos al Cemento tipo HE.
- [14] M. Palacios, C. Sierra, F. Puertas, "Métodos y Técnicas de caracterización de aditivos para el Hormigón", Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, nov. 2003, Vol. 53, No. 269, pp. 89-105.
- [15] M. T. Nooman, "Effect of Zeolite Inclusion on Some Properties of Concrete and Corrosion Rate of Reinforcing Steel Bars Imbedded in Concrete", Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Azhar, University, Nasr City 11884, Cairo, Egypt. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 13, Issue 6 Ver. I (nov. 2016), PP 51-59 www.iosrjournals.org
- [16] F. Qing, L. Beixing, Y. Jiangang, Y. Xiaolu, "Microstructural and Microanalytical Study on Concrete Exposed to Sulfate Environment", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- [17] A. Hilal, "Microstructure of Concrete", Department Civil Engineering, University of Anbar, Iraq, oct. 2016, Available: <http://dx.doi.org/10.5772/64574>.
- [18] S. Ramírez, P. Cano-Barrita, F. Julián, C. Gómez-Yáñez, Caballero, "Propiedades de durabilidad en el hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucíelago de nopal como aditivo natural", *Materiales de Construcción*, vol. 62, sept 2012, [online]
- [19] N. Xie, N. Cui, "Development of durable "green" concrete exposed to deicing chemicals via synergistic used of locally available recycled materials and multiscale modifiers", Feb 2018, Center for Environmentally Sustainable Transportation in cold Climates
- [20] J. Ortiz, A. Aguado, J. Roncero, M. Zermeno, "Influencia de la Temperatura Ambiental Sobre las propiedades de Trabajabilidad y microestructurales de Pastas y Morteros de cementos", *Investigación y Desarrollo*, [en línea], 2009, Vol. 1
- [21] S. Abduljabbar Yaseen, G. Abdaljabar Yiseen, Z. Li, "Elucidation of Calcite Structure of Calcium Carbonate Formation Based on Hydrated Cement Mixed with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide", *ACS Omega* 2019, 4, [en línea]. Available: [Feb. 3, 2020].
- [22] T. Subbulakshmi, B. Vidivelli, "SEM Investigation for Microstructure in high performance Concrete with binary and ternary mixes", Article Info, *Elixir International Journal*, 2016, [en línea], Available: www.elixirpublishers.com