

## SULFATOS EN AGUA SUBTERRÁNEA DE LA ZONA BAJA EN CHETUMAL, QUINTANA ROO

Teodoro Beutelspacher García<sup>1</sup>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 17/06/2019 Aceptado: 24/08/2019 Publicado: 03/12/2019

**Resumen.-** El diseño y construcción de estructuras de concreto hidráulico con fines de durabilidad requiere conocer la presencia de cada agente agresivo y su concentración. Para la zona baja de la ciudad de Chetumal, existe escasa información sobre el tema, por lo que son objetivos de esta investigación: Obtener muestras y determinar la concentración de sulfatos en agua subterránea de 3 puntos de la zona baja utilizando el método gravimétrico; determinar y clasificar la exposición ambiental utilizando la metodología y criterios de la NMX-C-155-ONNCCE-2014 y definir los requisitos mínimos de diseño requeridos. Los resultados obtenidos son concentraciones de 5,070.16, 6,952.28 y 6,652.24 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, que corresponden a exposiciones químicas alta y muy alta, que requieren concretos hidráulicos con f'c mínima de 35 y 40 MPa y cemento Portland RS. Los resultados aportan información inédita y establecen la necesidad de incrementar resistencias utilizadas en la zona de estudio.

**Palabras clave:** Durabilidad, Chetumal, sulfatos, agua subterránea.

## SULPHATES IN GROUNDWATER OF THE LOWER ZONE OF CHETUMAL QUINTANA ROO

**Abstract.-** The design and construction of hydraulic concrete structures for durability purposes requires to know the presence of each aggressive agent and its concentration. For the lower part of the city of Chetumal, there is scarce information on the subject. The objectives of this research were: Obtain samples and determine the sulphate concentration in groundwater of 3 points in the lower zone using the gravimetric method; determine and classify environmental exposure using the methodology and criteria of NMX-C-155-ONNCCE-2014 and define the minimum design requirements required. The results obtained are concentrations of 5,070.16, 6,952.28 and 6,652.24 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L, which correspond to chemical exposures high and very high, that require hydraulic concrete with a minimum f'c of 35 and 40 MPa with Portland type RS hydraulic cement. The results provide unpublished information and establish the need to increase resistance used in the study area.

**Keywords:** Durability, Chetumal, sulphates, groundwater.

### Introducción

La ciudad de Chetumal, Quintana Roo, colinda al sur y al este con la Bahía de Chetumal, al oeste con zona de vegetación y algunos cuerpos de agua de menor superficie (sabana) localizados en la periferia y cercanías de la ciudad, hacia el norte de esta. De acuerdo con la altura promedio la ciudad se divide en dos grandes zonas con un desnivel entre ambas que varía entre 4 y 7 m. El Atlas de Riesgo (SEDESOL, 2011) de la ciudad de Chetumal define las diferentes zonas como:

Zona alta. Se extiende tierra adentro con una elevación de 6 a 9 msnm. El subsuelo de esta zona está constituido por materiales estratificados, de colores claros (blanco, amarillo y café), del tipo de calizas cretáceas, conocidas localmente como sascab. Su espesor y carsticidad son muy variables. Este material aflora en la superficie y sólo en ocasiones se observa sobre él roca caliza dura, en pequeñas porciones o fragmentos aislados. Su textura es la de un suelo arcillo arenoso de consistencia variable; y

Zona baja. Inmediata a la bahía, tiene una elevación media de 2 m sobre el nivel del mar. En esta zona las condiciones del terreno natural son completamente diferentes a las de la zona alta, debido principalmente a la presencia superficial de depósitos marinos recientes que yacen sobre una formación similar a la de la primera. Estos depósitos marinos están poco consolidados y son de consistencia y/o compacidad muy variable, se encuentran saturados por encontrarse el

<sup>1</sup> Teodoro Beutelspacher García. Docente del Instituto Tecnológico de Chetumal. Tecnológico Nacional de México/I. T.Chetumal. tbeutelspacher@itchetumal.edu.mx (Autor correspondiente).

nivel freático a poca profundidad de la superficie (0.50 m a 1.50 m). Las condiciones son más desfavorables a medida que la distancia hacia el mar es menor.

En México, 14.9% de la población se asienta en áreas costeras (Rubio, 2008). En el caso de las estructuras de concreto en la costa, el Comité ACI 201 establece la importancia de conocer la agresividad del medio ambiente, utilizando como referencia el contenido de sulfatos, la salinidad y la dureza del agua del agua subterránea y superficial para definir los criterios de diseño por durabilidad (ACI 201, 2001).

La durabilidad del concreto hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro (ACI-201, 2008). Un concreto hidráulico durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente (ACI 201, 2001). 45 % de los problemas de durabilidad de estructuras de concreto expuestas a la agresividad del medio ambiente, están asociados al diseño, coinciden diferentes autores como Hernández Castañeda y Mendoza Escobedo (2006), Felipe García Rodríguez (2002) y Paulo Helene (1997). En la Figura 1, se aprecian adicionalmente causas asociadas a la elección y calidad de los materiales y al desarrollo del proceso constructivo.

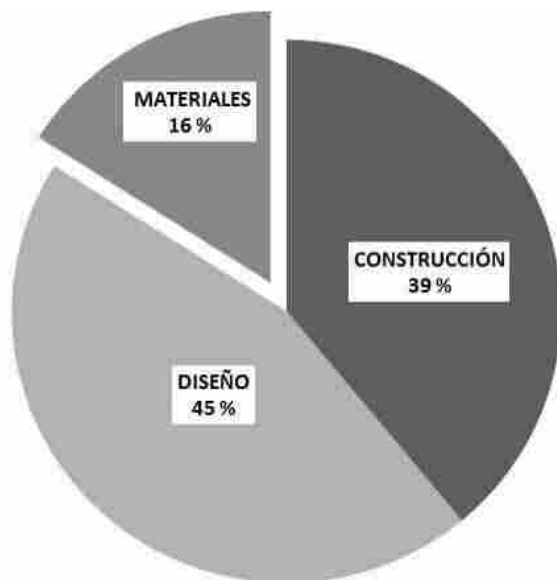


Figura 1. Causas que producen problemas de durabilidad

*NOTA: Adaptado de "Durabilidad e Infraestructura: Retos e impacto socioeconómico" de Hernández Castañeda, O., & Mendoza Escobedo, C. J. (2006). Ingeniería Investigación y tecnología FI UNAM VII.1, pág. 59*

Troconis de Rincón & et al, (2011) menciona que la alta agresividad del ambiente tropical, donde la temperatura promedio anual es mayor a 25°C, amerita mayores exigencias para la calidad del concreto que las utilizadas actualmente en los países no tropicales. Derivado de extensos procesos de investigación, países como Estados Unidos, España y México establecen requisitos mínimos de diseño por durabilidad en reglamentos y normas de construcción vigentes. En el caso de México los criterios de diseño y construcción más utilizados son el ACI-318S de Estados Unidos y las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto publicadas en la Gaceta Oficial del Distrito Federal el 6 de octubre de 2004; en ambos documentos el capítulo 4 se refiere al diseño por durabilidad. Las estructuras deberán diseñarse para una vida útil de al menos 50 años, de acuerdo con los requisitos establecidos en el Cap. 4 de la NTC concreto (2004).

El diseño de las estructuras de concreto requiere además del diseño por resistencia, el diseño por durabilidad. Es obligación del estructurista considerar ambos aspectos (NMX-C-155-ONNCCE, 2014). La clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto hidráulico, permite establecer los requisitos mínimos que deben considerarse en el diseño y construcción de elementos para cada estructura en particular, con fines de Durabilidad y Sustentabilidad. La conservación de las estructuras de concreto es el primer paso para reducir el consumo de energía y las emisiones

de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Minimizar el consumo de Clinker utilizando cementos mezclados debe ser la prioridad viable de la industria del concreto. (Mehta & Monteiro, 2006). El Comité ACI 201 establece que, para producir un ataque significativo sobre el hormigón, los químicos agresivos deben estar en solución y presentes en una concentración superior a una cierta concentración mínima. Los sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio que ocurren en la naturaleza, los cuales pueden atacar al hormigón endurecido, algunas veces se encuentran en el suelo y otras disueltos en el agua adyacente a las estructuras de hormigón. Un hormigón que está expuesto a soluciones agresivas a presión en uno de sus lados es más vulnerable que uno que no lo está, ya que la presión tiende a forzar la solución agresiva hacia el interior del hormigón (ACI 201, 2001).

El concreto, cuando es atacado por agua con altas concentraciones de sulfatos, presenta un aspecto hinchado con una superficie blanca y pastosa. La agresividad del sulfato depende del tipo de catión que lo constituye. El más nocivo corresponde al sulfato de amonio, en orden descendente le sigue el de magnesio, de sodio y finalmente el de calcio. El ataque de los sulfatos se presenta como una reacción química de los sulfatos con el hidróxido de calcio o los aluminatos de calcio y las ferritas del cemento, provocando una recristalización y el aumento de volumen antes mencionado y finalmente una disgregación por fracturación a menor escala, provocando la destrucción del cemento (Vargas & Fernández, 2002). El ataque por sulfatos afecta los componentes del concreto hidráulico mediante la formación de etringita (aluminato de calcio trisulfato 32-hidratado,  $CAO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) y yeso (sulfato de calcio dihidratado,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). (ACI-201, 2008). El comité ACI 201 menciona que la formación de etringita puede incrementar el volumen sólido del concreto, provocando su expansión y fisuración. Adicionalmente, la formación de yeso puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia del hormigón. (ACI-201, 2008). La resistencia a los sulfatos presentes en el suelo, el agua del suelo o el agua de mar se logra utilizando materiales cementicios adecuados y mezclas de hormigón correctamente dosificadas sujetas a un adecuado control de calidad (González de la Cotera S., 2003).

La protección contra los ataques por sulfatos se logra utilizando hormigones que retrasen el ingreso y el movimiento del agua e ingredientes adecuados para producir hormigones que tengan la resistencia a los sulfatos necesaria. (ACI-201, 2008). La clasificación del grado de exposición al medio ambiente permite establecer los requisitos mínimos que deben considerarse en el diseño y construcción de las estructuras de concreto para cada caso en particular incluyendo resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural, tipo de cemento hidráulico y recubrimiento del acero de refuerzo.

Datos de análisis químico de agua subterránea (INEGI, 2013), de un punto de muestreo cercano a Calderitas e identificado con el número 26 de la Carta Hidrológica de aguas subterráneas Chetumal E16-4-7 en el cual se reporta entre otros parámetros, una concentración de sulfatos por la técnica turbidimétrica de 2 119.2 mg/l a 6 m de profundidad. Por otra parte, en un estudio de caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de 53 pozos de abastecimiento una profundidad promedio de 29 m. del sur del Estado de Quintana Roo (Sánchez Sánchez, Álvarez Legorreta, Pacheco Ávila, González Herrera, & Carrillo Bribiezca, 2015) reportan en el punto O15 Calderitas una concentración de sulfatos de 2 000.0 mg/l. En ambos casos, los puntos más cercanos se ubican en el poblado de Calderitas a 9 km de Chetumal. Sin embargo, se localizan fuera de la zona baja de la ciudad de Chetumal.

Muestras de agua superficial de la Bahía de Chetumal (Canché Uuh, 2002), obtenidos por la Universidad de Quintana Roo a un metro de distancia de la orilla y a una profundidad de 0.3 m del muelle de la Universidad en un período de 02/1997 a 04/1998 permiten observar en la tabla 1, una variación importante de los datos.

Tabla 1. Resultados del muestreo de agua de la Bahía de Chetumal en periodos bimestrales.

Parámetro	Unidad	1997						1998	
		02/10	04/07	06/25	08/20	10/15	12/10	02/03	04/23
Sulfatos	mg/L	804.6	773	563.6	1541.1	7 711.2	553.9	599.1	871.5

*Nota: Adaptado de “Bahía de Chetumal: receptor principal de aguas residuales” por Canché Uuh, J. A. (2002). En F. Rosado May, R. Romero Mayo, & A. Navarrete, Contribuciones de la ciencia al manejo costero integrado de la Bahía de Chetumal y su área de influencia-Serie Bahía de Chetumal (págs. 205-210). Chetumal: Universidad de Quintana Roo.*

La información proporcionada se localiza en un punto cercano a la zona baja, por lo que se considera un aporte importante para el presente estudio, incorporando la necesidad de considerar en la investigación, el análisis de agua subterránea en un punto próximo al muelle de la Universidad de Quintana Roo.

Son objetivos de la investigación obtener muestras y determinar la concentración de sulfatos en agua subterránea de 3 puntos de la zona baja de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo; Determinar el grado y clasificación de exposición ambiental utilizando los criterios para agresividad química por sulfatos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 y definir los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio. La norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 incluye el contenido de Sulfato (en mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L), como uno de los parámetros para clasificar la agresividad química del agua.

### Metodología: materiales y métodos

La presente investigación implicó el muestreo y análisis del agua subterránea de 3 sitios para determinar la concentración de sulfatos en solución.

La selección e identificación de los sitios se realizó considerando los siguientes criterios:

a) En los extremos y al centro del boulevard costero adyacente a la ciudad de Chetumal, Quintana Roo (ver Figura 3). La distancia en línea recta entre cada punto se definió cercana a los 2 500 m y a una distancia de la costa cercana a los 150 m para 2 de los sitios; y

b) Un sitio cercano al muelle de la Universidad de Quintana Roo para comparar con estudios previos.

Cada sitio fue georeferenciado usando un navegador GPS marca Garmin, modelo eTrex H, empleando el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator). El Datum WGS84 Zona 16 Norte (Q).



Figura 1. Sitios de muestreo de agua subterránea en la zona baja de Chetumal.

*Nota: Adaptado de imagen obtenida de Google Earth el 25 de agosto de 2016.*

Los muestreos se realizaron en pozos de 200 mm de diámetro en el fondo, perforados con cavahoyos metálico con Mango de madera de 48" dentro de una excavación escalonada de 900 mm de diámetro y altura suficiente para operar la herramienta; se utilizaron adicionalmente Talacho Pico de 5 libras, barreta de punta, rastrillo y pala cuadrada como se aprecia en la Figura 3. Se definió la profundidad de excavación en un rango de 450 a 650 mm abajo del nivel freático.



Figura 2. Excavación en los diferentes puntos de muestreo. a) Punto P01 cercano a la desembocadura del río Hondo; b) Punto P02 frente a la mega escultura; c) Punto P03 a un costado del muelle de la UQROO.

La norma mexicana NMX-C-155 establece en la tabla 11, a la NMX-C-283 como método de ensaye/referencia para la caracterización de condiciones por exposición como requisitos de durabilidad.

Cada muestra se integró con porciones obtenidas de un frasco muestreador de polietileno de 0.5 dm<sup>3</sup> de capacidad, utilizando una extensión. El frasco se sumergió en el punto medio del tirante de agua.

Las muestras se conservaron y transportaron en refrigeración, almacenados en recipientes de plástico de 0.5 dm<sup>3</sup> de capacidad, con tapa de cierre hermético como se puede apreciar en las figuras 4 y 6.

Las muestras se conservaron en refrigeración por una noche y se entregaron al día siguiente al laboratorio.



Figura 4. Muestreo. a) Frasco muestreador; b) Muestras en refrigeración.

Como se aprecia en la Figura 5, en el proceso de obtención de muestras se delimitó la zona y al finalizar los análisis se rellenaron las excavaciones y se sembraron palmas, por iniciativa de los alumnos, para aprovechar las excavaciones realizadas en áreas verdes.



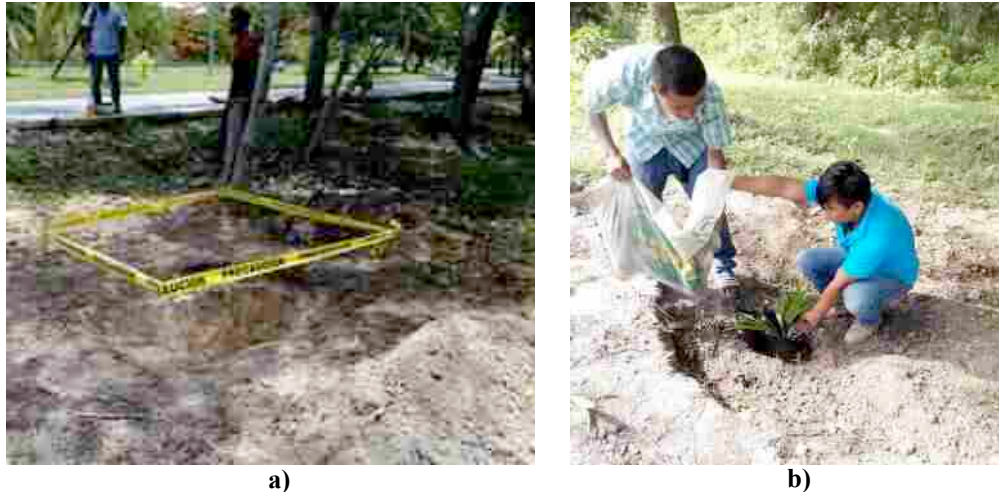


Figura 5. Actividades complementarias. a) Delimitación del área de estudio; b) Reforestación.

En el inciso 5.4 de la norma (NMX-C-283, 1982) se define el método de análisis y determinación de concentración de sulfatos en agua subterránea como  $SO_4$  que corresponde al método gravimétrico. Para garantizar el cumplimiento de los criterios de calidad, se contrató al laboratorio Hidrolab Chetumal para realizar el análisis. El muestreo fue realizado de acuerdo con los criterios de la NMX-C-277 en cumplimiento a los incisos 2 y 4 de la NMX-C-283.

### Resultados

Para determinar el grado y clasificación de exposición ambiental, se utilizaron los criterios para agresividad química por sulfatos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014; se definieron los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio.

Tabla 2. Resultados del muestreo y análisis químico por sulfatos en agua subterránea de 3 sitios de la zona baja de Chetumal, Quintana Roo

Información	Unidad	Datos <sup>1</sup>		
		P01	P02	P03
Clave de la muestra				
Contenido de Sulfatos	mg/L	<b>5 070.16</b>	<b>6 952.28</b>	<b>6 652.24</b>
Coordenadas (UTM)	X	366 170	364 510	362 194
	Y	2 048 406	2 046 347	2 045 374
Localización		Boulevard Bahía entre Av. Rafael E. Melgar y Av. Emiliano Zapata	Av. Primo de verdad entre Boulevard Bahía e Isla Contoy	Boulevard Bahía entre Av. Ignacio Comonfort y calle Pucté
Nivel freático del sitio	mm	- 950	- 1 670	- 1 710
Distancia de la costa	m	152	160	6
Tirante de agua	mm	600	450	600

*Nota: Datos del muestreo realizado el 29 de junio de 2016 en pozos de 200 mm de diámetro, y resultados del análisis químico de concentración de  $SO_4$  terminado el 05 de julio de 2016 por el método gravimétrico. La distancia entre puntos es de aproximadamente 2 510 m de P01 a P02 y 2 650 m de P02 a P03.*

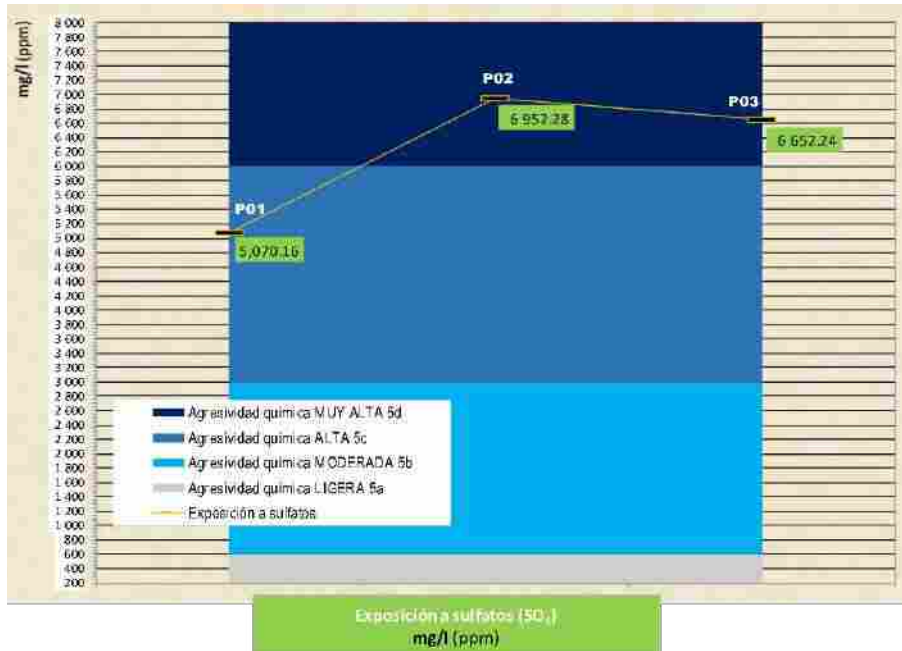


Figura 4. Gráfica de resultados del muestreo y análisis químico por sulfatos en los 3 sitios de estudio.

Nota: Los parámetros de agresividad química se obtuvieron de la tabla 9 de la NMX-C-155-ONNCCE-2014

Clasificación de exposición ambiental, se utilizaron los criterios para agresividad química por sulfatos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014; se definieron los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio. En la Tabla 3 se determinan de acuerdo con la NMX-C-155, el grado y clasificación de exposición ambiental y se definen los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio.

Clasificación de exposición ambiental, se utilizaron los criterios para agresividad química por sulfatos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014; se definieron los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio. En la Tabla 3 se determinan de acuerdo con la NMX-C-155, el grado y clasificación de exposición ambiental y se definen los requisitos mínimos de resistencia a la compresión del concreto hidráulico para uso estructural y el tipo de cemento hidráulico requerido para cada caso en estudio.

Tabla 3. Clasificación de exposición consideradas en la NMX-C-155-ONNCCE-2014 aplicables a la ciudad de Chetumal y requisitos de durabilidad relacionados con tipo de cemento y resistencia a la compresión mínima del utilizado en la construcción de elementos de estructuras de concreto hidráulico.

Concentración de Sulfatos SO <sub>4</sub>		Exposición <sup>1</sup>		f'c <sup>2</sup> mínima	Cemento <sup>2</sup>	
Sitio	mg/l (ppm)	Condición Ambiente de agresividad química	Clase	MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo <sup>3</sup>	Característica especial <sup>3</sup>
P 01	5 070.16	alta (3 001- 6 000 mg/l)	5 <sup>c</sup>	35 (350)	CPC	RS
P 02	6 952.28	muy alta (> 6 000 mg/l)	5 <sup>d</sup>	40 (400)	CPC	RS
P 03	6 652.24	muy alta (> 6 000 mg/l)	5 <sup>d</sup>	40 (400)	CPC	RS

Nota: Datos obtenidos de las Tablas 9 y 10 de la NMX-C-155-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico - Dosificado en masa – Especificaciones y métodos de ensayo*. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

- 1 datos obtenidos de las Tablas 9
- 2 datos obtenidos de las Tablas 10
- 3 consultar NMX-C-414-ONNCCE (2014)

Los datos obtenidos de los 3 sitios de muestreo presentados en la Tabla 2 son 5,70.16 mg/l (P01), 6952.28 mg/l (P02) y 6652.24 mg/l (P03) que permitieron obtener de acuerdo a la NMX-C-155, 2 clases de exposición (tabla 3), (5c, ALTA para P01 y 5d, MUY ALTA para P02 y P03), que requieren concretos hidráulicos con 2 diferentes resistencias mínimas a la compresión (35 MPa para agresividad química alta y 40 MPa para muy alta), en ambos casos se requiere utilizar cemento Portland con característica especial RS resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

## Discusión

Los resultados obtenidos aportan datos complementarios a la información obtenida en la investigación documental, que considera en 2 estudios de agua subterránea en puntos cercanos al poblado de Calderitas a 9 km de la ciudad de Chetumal, el estudio más cercano a la zona baja es un punto a un metro de distancia de la orilla y a una profundidad de 0.3 m del muelle de la Universidad de Quintana Roo, dentro de la Bahía de Chetumal, es importante destacar que no es un estudio de agua subterránea pero su cercanía y entendiendo el proceso de interacción entre el agua subterránea y la Bahía resulta interesante. En la tabla 1 se proporciona datos de la variación temporal con un máximo de concentración de sulfatos de 7 711.2 mg/l. La norma NMX-C-155 establece que se considerará para diseño el parámetro más desfavorable, la cual corresponde a octubre de 1997. Los datos obtenidos en el presente estudio para el punto P03, cercano al muelle, presentado en la tabla 2, es de 6 652.24 mg/l. En ambos casos la concentración de Sulfatos (SO<sub>4</sub>) corresponden a una Condición Ambiente de agresividad química 5d, MUY ALTA que se agrava con la condición de cercanía a la Bahía con procesos de humedecimiento y secado continuo.

Es importante mencionar que para la ciudad de Chetumal y en particular para la zona baja, en donde gran parte de las cimentaciones se construyen en contacto con el agua subterránea, es requisito considerar en el proyecto estructural, el diseño por durabilidad con base en el análisis de los agentes agresivos a los componentes del concreto estructural.

Las características físicas y químicas del medio ambiente influyen en la durabilidad de los elementos de cada estructura de concreto en particular. El ciclo de vida de la estructura en su conjunto dependerá de la interacción sistémica y de la influencia de todos los componentes físicos, químicos, biológicos, económicos y sociales.

La presencia de cada agente agresivo y su concentración, determinan el nivel de agresividad para cada elemento de una estructura. Un elemento puede estar expuesto a diferentes agentes o condiciones agresivas y en su clasificación registrará la condición más agresiva.

Las clases de exposición consideradas en la NMX-C-155-ONNCCE-2014 aplicables a la ciudad de Chetumal se presentan en la tabla 5. La clase de exposición 5b y 5d requieren protección adicional de concreto. El recubrimiento se determina en función a la resistencia  $f'_c$  para cada elemento en particular

## Conclusiones

Los datos obtenidos de los 3 sitios de muestreo (tabla 2), permitieron obtener 2 clases de exposición ambiental utilizando los criterios para agresividad química por sulfatos establecidos en la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014, que requieren concretos hidráulicos para uso estructura con 2 diferentes resistencias mínimas a la compresión (tabla 3), en ambos casos se requiere utilizar Cemento Portland con característica especial resistente a los sulfatos RS (incluido en la NMX-C-414).

Los datos obtenidos aportan información inédita, que permite el diseño de elementos de concreto en contacto con agua subterránea de la zona baja de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. La complejidad del medio ambiente local requiere continuar con estudios complementarios para obtener muestras y determinar la concentración de sulfatos en agua subterránea de zonas de la parte alta de Chetumal cercanas a lagunas y sabanas.

*Agradecimientos: Se agradece a los alumnos de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Chetumal, Eber Canté; Edgar Poot; Eusebio Cocom y Daniel Cisneros que participaron con entusiasmo en el proceso de muestreo de agua subterránea.*



**Bibliografía**

- ACI 201. (2001). ACI 201.2R-01 Guía para la Durabilidad del Hormigón. Farmington Hills, MI 48331, U. S. A.: American Concrete Institute.
- ACI 201, C. (2001). ACI 201.2R-01 Guía para la Durabilidad del Hormigón. Farmington Hills, MI 48331, U. S. A.: American Concrete Institute.
- ACI 201, C. (2008). ACI 201.2R-08 Guide to Durable Concrete. Farmington Hills, MI 48331, U.S.A.: American Concrete Institute.
- ACI-201, C. (2008). ACI 201.2R-08 Guide to Durable Concrete. Farmington Hills, MI 48331, U.S.A.: American Concrete Institute.
- ACI-318S, C. (2008). ACI-318S Reglamento para Concreto Estructural preparados por el comité del Instituto Americano del Concreto 318, Reglamento Estructural para Edificaciones. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- ACI-318S, C. (2011). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-11) preparado por el comité 318. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- Beutelspacher García , T. (2017). Clasificación de exposición ambiental en Chetumal para efectos de diseño por durabilidad. *AvaCient*, 99-111.
- Canché Uuh, J. A. (2002). Bahía de Chetumal: receptor principal de aguas residuales. En F. Rosado May, R. Romero Mayo, & A. Navarrete, Contribuciones de la ciencia al manejo costero integrado de la Bahía de Chetumal y su área de influencia-Serie Bahía de Chetumal (págs. 205-210). Chetumal: Universidad de Quintana Roo.
- García Rodríguez, F. d. (2002). Evaluación de estructuras de concreto - Técnicas y materiales para su reparación. México, D. F.: IMCYC.
- González de la Cotera S., M. (2003). Guía introductora a la durabilidad del concreto. 1-11.
- González Herrera, R. A. (2009). EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE CHETUMAL QUINTANA ROO. Universidad Autónoma de Yucatán, CONACYT – Gobierno del Estado de Quintana Roo.
- Helene, D. P. (2001). Estructuras de Concreto, Proyectar para la Durabilidad. Seccional Colombiana del ACI, 1-7.
- Helene, P. d., & Pereira, F. (2003). Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón.- Reparación, Refuerzo y Protección. Sao Paulo: CYTED.- Red Rehabilitar.-Programa Ibero Americano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Helene, P. R. (1993). Estructuras de Concreto, Proyectar para la Durabilidad. ACI Seccional Colombiana.
- Helene, P. R. (1997). Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto. México, D. F.: IMCYC.
- Hernández Castañeda, O., & Mendoza Escobedo, C. J. (2006). Durabilidad e Infraestructura : Retos e impacto socioeconómico. Ingeniería Investigación y tecnología FI UNAM VII.1, 57-70.
- INEGI. (2000). Los Análisis Físicos y Químicos en la Cartografía Hidrológica del INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).
- INEGI. (2013). CARTA HIDROLÓGICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2013). Carta Hidrológica de aguas subterráneas Chetumal E16-4-7 Escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- López Celis, R., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., & et al. (2006). PT 292 Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México, Publicación Técnica No. 292. Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte SCT. Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte SCT.
- Mehta, P. K. (2003). Concrete in the marine environment. England: Elsevier Science Publishers LTD.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2006). Concrete Microstructure, Properties and Materials (Third Edition ed.). University of California at Berkeley: McGraw-Hill.
- Mena Ferrer, M. (2005). Durabilidad de estructuras de concreto en México. Previsiones y recomendaciones. México, D.F.: IMCYC.
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción – Concreto hidráulico - Dosificado en masa – Especificaciones y métodos de ensayo. México, D.F.: ONNCCE S. C.; Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-155-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción – Concreto hidráulico - Dosificado en masa – Especificaciones y métodos de ensayo. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-277-ONNCCE. (2010). Industria de la construcción - Agua para concreto - Muestreo. México, D.F.: ONNCCE S. C.; Publicada en el Diario Oficial de la Federación.

- NMX-C-277-ONNCCE. (2010). Industria de la construcción - Agua para concreto - Muestreo. México, D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.- Declaratoria de vigencia Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de febrero de 2011.
- NMX-C-283. (1982). Industria de la construcción - Agua para concreto - Análisis. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de agosto de 1982.
- NMX-C-283-ONNCCE. (1982). Industria de la construcción - Agua para concreto - Análisis. México, D.F.: ONNCCE S. C.; Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción – Cementantes hidráulicos – Especificaciones y métodos de ensayo. México, D. F.: ONNCCE S. C.; Publicada en el Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción – Cementantes hidráulicos – Especificaciones y métodos de ensayo. ONNCCE.
- NTC concreto, G. D. (6 de octubre de 2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto. GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, TOMO I (103-BIS), págs. 88-194.
- Oliva Giralt, A. L. (2009). Influencia de las variables climáticas en el deterioro del puente en Boca de Camarioca debido a la corrosión atmosférica. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 3, núm. 3, 1-15.
- Poó Rubio, A. M. (2008). Casos de estudio en México en el sector de la construcción. *Memorias 2008, Congreso Nacional de Administración y Tecnología para la Arquitectura, Ingeniería y Diseño* (págs. 43 - 56). México, D. F.: CYAD.
- Rubio, D. A. (2008). CASOS DE ESTUDIO EN MÉXICO EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN. MEMORIAS 2008, CONGRESO NACIONAL DE ADMINISTRACIÓN Y TECNOLOGÍA PARA LA ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO (págs. 43 - 56). MEXICO: C Y A D.
- Sánchez Sánchez, J. A., Álvarez Legorreta, T., Pacheco Ávila, J. G., González Herrera, R. A., & Carrillo Briebezca, L. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 32(1), 62-76.
- SEDESOL. (2011). Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo: Centro de Información Geográfica, División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo.
- Torres Acosta, A. A., & Martínez Madrid, M. (2001). PT 181 Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, *Publicación Técnica No. 181*. Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte SCT.
- Troconis de Rincón, O. M., & et al. (Abr 2011). Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado. *REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DEL ZULIA 3ª época Año 2 N° 2 / Ciencias del Agro, Ingeniería y Tecnología /*, 100 - 154.
- Troconis de Rincón, O. M., & et al. (Abr de 2011). Impacto del ambiente tropical en la durabilidad de las estructuras de concreto armado. *REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DEL ZULIA 3ª época Año 2 N° 2 / Ciencias del Agro, Ingeniería y Tecnología /*, 100 - 154.
- Valero Gamboa, M. E. (2002). Calidad del Agua de la Bahía de Chetumal. En F. Rosado May, R. Romero Mayo, & A. d. Navarrete, *Contribuciones de la ciencia al manejo costero integrado de la Bahía de Chetumal y su área de influencia-Serie Bahía de Chetumal No. 2* (págs. 179 - 184). Chetumal, Q. Roo, México: Universidad de Quintana Roo.