

# Estudio del Agregado Calizo como Medio para el Curado Interno del Concreto en el Sureste de la Península de Yucatán

Ing. David Gustavo Rejón Parra<sup>1</sup>, Dra. Beatriz Escobar Morales<sup>2</sup>,  
Dr. Romeli Gliserio Barbosa Pool<sup>3</sup> y Dr. Julio César Cruz Argüello<sup>4</sup>

**Resumen**—Los agregados pétreos del sureste de la Península de Yucatán, se caracterizan como ligeros, susceptibles a la abrasión y de alta porosidad. En base a la metodología de la ACI y para un  $f'c$  de 250 kgf/cm<sup>2</sup>, se ensayaron cilindros de concreto con agregados gruesos en condición saturada y en condición seca; superando en un 19% y en un 5% la resistencia de diseño a los 28 días, respectivamente.

Se advierte que la porosidad de estos agregados propicia el curado interno de la pasta cementante circundante. Para corroborar su efecto micro-estructural, se analizó la interfaz de los agregados con el cemento, por medio de microscopía electrónica de barrido MEB (o SEM por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscope*).

**Palabras clave**— Concreto, curado interno, agregado calizo.

## Introducción

La resistencia mecánica a la compresión es la cualidad estructural más apreciada del concreto. Ésta propiedad está condicionada a la resistencia de la pasta cementante, del agregado y de la interfaz pasta-agregado. La resistencia del agregado depende de la naturaleza del elemento rocoso del cual se haya extraído, y los procesos industriales a los que se les someta para su fabricación, manejo, disposición e incorporación al concreto. Las resistencias de la pasta de cemento y de la interfaz pasta-agregado, se desarrollan con la hidratación paulatina y constatación del cementante, en una etapa que se llama endurecimiento o fraguado (American Concrete Institute (ACI 211.1), 2004).

Conforme se endurezca, el cementante demandará agua para su proceso de hidratación, una reacción exotérmica que propicia flujos de humedad dentro de la masa. En las capas expuestas de la mezcla, la humedad puede escapar por efectos de la humedad relativa, la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura (Sampebulu, 2012).

El procedimiento conocido como *curado* consiste en mantener saturadas las superficies del elemento de concreto en fase de fraguado, ya sea vertiendo agua, saturando de vapor el aire circundante o recubriendo con películas impermeables las superficies expuestas. Tiene como finalidad permitir un mejor desarrollo de la pasta cementante (Mousa, et al., 2014).

Pero cuando la fabricación de la mezcla implica una baja relación agua/cemento ( $a/c$ ), la permeabilidad inicial del concreto es baja; esto aumenta las fuerzas capilares que retienen la humedad, impidiendo que esta se transporte desde la superficie al interior de la mezcla (Mousa, et al., 2014). El agua de un curado tradicional sólo podría alcanzar de 30 a 50 mm, pero hacia el interior, su flujo se torna lento e insuficiente para curar el concreto (Solís-Carrión, et al., 2013).

En los años recientes, la práctica del curado interno del concreto ha ganado popularidad y está progresando de manera constante desde el laboratorio hasta el campo de aplicación (Sampebulu, 2012). De acuerdo con el Comité del American Concrete Institute (ACI 308), el curado interno se refiere... *al proceso por el que la hidratación del cemento se propicia desde una fuente de agua adicional al interior de la mezcla de concreto, y que no es parte del agua de la mezcla original*. Para lograr esto, se incorporan de agregados ligeros (porosos), previamente saturados (Mousa, et al., 2014).

La práctica del curado interno del concreto ha demostrado un aumento del proceso de hidratación y mejor desarrollo de la fuerza mecánica; la reducción del efecto de retracción autógena y el agrietamiento; también reduce la permeabilidad, y tiende a aumentar la durabilidad de los elementos (Mousa, et al., 2014).

<sup>1</sup> El Ing. David Gustavo Rejón Parra es ingeniero civil, estudiante de la Maestría en Construcción de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chetumal, Cd. de Chetumal, Quintana Roo. [dgrp27@hotmail.com](mailto:dgrp27@hotmail.com)

<sup>2</sup> La Dra. Beatriz Escobar Morales es Investigadora SNI: Nivel I y Cátedra Conacyt de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán. [beatriz.escobar@cicy.mx](mailto:beatriz.escobar@cicy.mx)

<sup>3</sup> El Dr. Romeli Gliserio Barbosa Pool es Profesor-Investigador SNI: Nivel C de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía de la Universidad de Quintana Roo, Cd. de Chetumal, Quintana Roo. [romeli@uqroo.edu.es](mailto:romeli@uqroo.edu.es)

<sup>4</sup> El Dr. Julio César Cruz Argüello especializado Electro Química, es Profesor-Investigador SNI: Nivel I de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chetumal, Cd. de Chetumal, Quintana Roo. [jcca12345@hotmail.com](mailto:jcca12345@hotmail.com) (autor corresponsal)

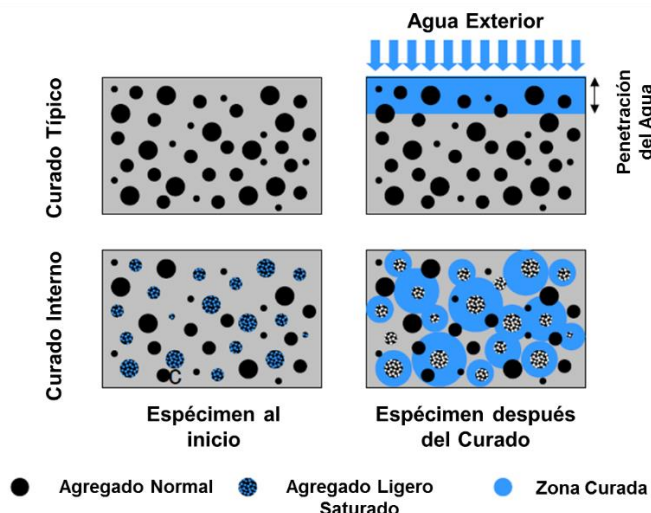


Figura 1. Ilustración de la diferencia entre el curado tradicional y el interno. Los agregados ligeros saturados deberán estar distribuidos uniformemente y cercanamente para tener una cobertura de todo el sistema de pasta cementante. Fuente: (Bentz & Weiss, 2011) modificada por los autores.

Sin embargo, hasta ahora los procedimientos para aplicar el curado interno en la práctica son los mismos que los utilizados para la fabricación de concreto aligerados; es decir, la incorporación a la mezcla de concreto de una proporción conocida de agregados ligeros (pesos específicos entre 1.2 y 2.2). Sin embargo, el gran número de variables adicionales que pueden afectar la fabricación en la práctica sugieren que lo mejor es verificar las propiedades de cada agregado a incorporar a las mezclas previamente (Bentz & Weiss, 2011).

Los agregados calizos disponibles en la Cd. de Chetumal (Sureste de la Península de Yucatán), pueden tener resistencias a la compresión en un rango que va desde no más de 250 kg/cm<sup>2</sup> hasta los 450 kg/cm<sup>2</sup>; son susceptibles a la degradación por meteorización pluvial debido a su naturaleza kárstica; su índice de porosidad promedio va en un rango del 5 al 30%, mientras que su peso específico puede ser desde 2.2 a 2.6, que clasifica como un agregado de peso normal (Hernández Hernández, 2013). En este estudio se verifica si estos agregados podrían propiciar el curado interno del concreto, sus efectos en la resistencia mecánica a la compresión y si este efecto se constata en la microestructura porosa de la pasta de cemento (Fernández-Luco, 2010).

### Descripción del Método

El desarrollo del estudio se hizo en base al diagrama de la Figura 2. En el Apéndice se describen marcas, modelos y características del equipamiento e instrumental utilizado.

#### *Diseño de la mezcla de concreto*

Los agregados fueron obtenidos de la Planta Trituradora Dos de la empresa local AGBLO S.A. de C.V y se verificó cumplieran con lo normado en NMX-C-111-ONNCCE. El cemento utilizado fue HOLCIM-APASCO Portland Gris CPC 30 R (NMX-C-414-ONNCCE) y el agua es la disponible en el sistema de abastecimiento propio del Instituto, que cumple la norma NMX-C-122-ONNCCE.

La dosificación de la mezcla teórica fue en base al método del ACI-211.1. Los resultados de la caracterización de los agregados pétreos usados en el diseño de mezcla se exponen en la Tabla 1. Se consideró una resistencia a la compresión de diseño de 250 kg/cm<sup>2</sup>, una relación agua cemento de 0.45, un revenimiento deseable de 5 cm, un contenido de aire del 2% y el tamaño máximo del agregado de 19 mm. Para condiciones de humedad del agregado, tanto seco como saturado, la proporción de la mezcla se expone en la Tabla 1 y Tabla 2.

Se fabricó concreto en base a la norma NMX-C-403-ONNCCE, tanto para las mezclas de prueba y ajuste como para las mezclas de ensayo y en cada colada se realizaron pruebas de revenimiento, contenido de aire y temperatura. Los agregados saturados se dejaron reposar previamente durante 24 horas sumergidos en agua.; mientras que los secos, se dejaron al horno a 115°C durante 24 horas para su deshidratación. Las proporciones definitivas de las mezclas se muestran en la Tabla 3.

Se dispuso que los cilindros fueran de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto para simular casos de elementos estructurales de concreto esbeltos. Los cilindros se fabricaron con la ayuda de moldes de acero con tornillos de amarre y mariposa.

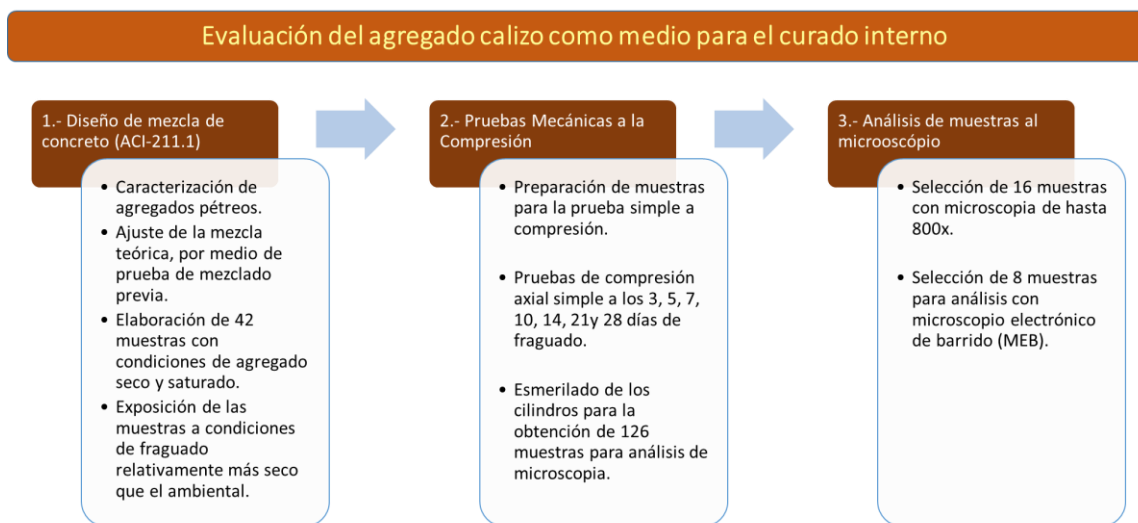


Figura 2. Metodología para el estudio del agregado calizo de la Cd. de Chetumal como medio para el curado interno de los concretos.

Tabla 1. Caracterización de los Materiales para Mezcla de Concreto en base al Método ACI-211.1.

Propiedad	Cemento	Agregado grueso	Agregado fino
Peso Específico (Peso Suelto)	3.15	2.50	2.76
Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> ) = Peso Volumétrico	3150	2501.54	2745.45
Peso Unitario Varillado Seco (kg/m <sup>3</sup> )	-	1342.94	-
Módulo de Finura	-	-	2.88
Absorción de la Humedad (%)	-	4.3	1.42
Contenido de Humedad (%)	-	7.5	7.3

Tabla 2. Resultados del diseño de mezclas teóricas acordes al procedimiento del ACI-211.1 (Pasos 1 al 8).  
(Pesos para fabricar un metro cúbico de concreto)

Componentes	Condición de Agregado Saturado	Condición de Agregado Seco
Agua (kg)	110	190
Cemento (kg)	422	422
Agregado Grueso (kg)	884	822
Arena (kg)	977	911

Tabla 3. Resultados del ajuste de mezclas acordes al procedimiento del ACI-211.1 (Pasos 9).  
(Pesos para fabricar un metro cúbico de concreto)

Componentes	Condición de Agregado Saturado	Condición de Agregado Seco
Agua (kg)	249	313
Cemento (kg)	554	697
Agregado Grueso (kg)	784	743
Arena (kg)	683	494

Los cilindros fueron desmoldados a las 24 horas de su fabricación y fueron colocados en recipientes plásticos previamente preparados con una cámara al fondo con 50 g de gel de cristales de absorción de humedad (marca DAMPRID comercial), con la finalidad de crear condiciones ambientales más secas que las condiciones del medio predominantes. Los recipientes fueron cerrados hasta probar los cilindros a la compresión.

### *Pruebas Mecánicas a la Compresión*

Tres cilindros de cada tipo de agregado fueron probados a la compresión axial simple en base a la norma NMX-C-083-ONNCCE. Previamente cada espécimen se cabeceaba siguiendo los procesos de la norma NMX-C-109-ONNCCE utilizando azufre. Los días de prueba fueron a los 3, 5, 7, 10, 15, 21 y 28 días de fraguado. La velocidad para los incrementos de carga fue aproximadamente entre 2 y 2.5 kg/cm<sup>2</sup> por segundo. La prueba culminó cuando se registraba un decremento en la capacidad de carga, producto de la deformación del elemento sometido.

Posteriormente con la ayuda de un cincel y martillo se abrieron los cilindros. Se buscó la zona de fractura ocasionada por la prueba a compresión. Se procedió a esmerilar para obtener muestras de aproximadamente 1 cm de arista en tres regiones medias del cilindro (M1, M2 y M3), en base al criterio expuesto en la Figura 3. Las muestras debían tener una porción de agregado grueso y otra de pasta de cemento para analizar su interfaz. Se obtuvieron un total de 126 muestras.

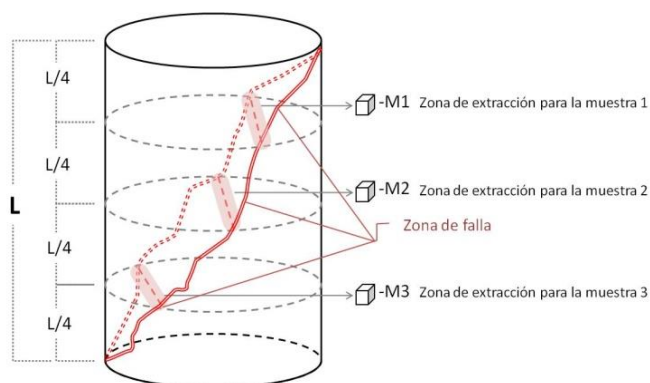


Figura 3. Ilustración del criterio utilizado para la extracción de muestras para análisis de microscopía.

### *Análisis de Muestras al Microscopio*

Se utilizó un microscopio USB digital con capacidad de 800x de acercamiento para filtrar las muestras y elegir 16 de ellas (8 en cada condición de agregado). Los criterios de búsqueda implicaban relevancia de la muestra, representatividad y patrones específicos en la conformación de la estructura de la pasta observable a 120, 400 y 800x de acercamiento. Las muestras seleccionadas fueron reducidas a dimensiones de 2 x 2 x 4 mm para posibilitar su análisis con el microscopio MEB.

Con el microscopio electrónico de barrido, se observaron 8 muestras (4 de cada condición de agregado), a escalas de 100, 400, 800, 1000, 3000, 5000 y 10,000x de acercamiento. Se usó una condición de columna de bajo vacío, puesto que las muestras de concreto son materiales no conductores eléctricos y el microscopio lanza un haz de electrones que deben viajar por la muestra para ser observable. Las muestras se prepararon en porta-muestras de platino adheridas con cinta de cobre para propiciar el flujo de electrones.

### **Comentarios Finales**

En este estudio se ha verificado el efecto que produce la condición de humedad de los agregados pétreos calizos de la Cd. de Chetumal, durante el fraguado final del concreto. Probando dos condiciones del agregado grueso (saturado y seco).

### *Resumen de resultados*

Como se aprecia en los gráficos de la Figura 4, los agregados en condición saturada superaron la resistencia de diseño de 250 kg/cm<sup>2</sup> desde el día 5 de fraguado y llegaron al día 28 con un promedio consistente de 298.88 kg/cm<sup>2</sup>.

Las muestras elaboradas con agregados en condición seca, tuvieron un comportamiento más disperso. Todas las muestras superaron la resistencia de diseño desde el día 3 de fraguado. Sin embargo, esta tendencia tornó en un punto de inflexión a la baja desde el día 7 de fraguado, promediando el día 28 de fraguado 262.06 kg/cm<sup>2</sup>.

En los resultados del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), se encontró evidencia a 1000x de acercamiento de que la pasta de cemento cambia su estructura por la condición de humedad del agregado. Como se observa en la Figura 5, en la muestra con agregado saturado, se aprecia una zona de interfaz al margen izquierdo. En el caso de la muestra con agregado seco, se observa una grieta central que corre vertical a la imagen y en medio de la pasta de cemento; se aprecia cómo se dio una mayor precipitación de los componentes del cemento, más densa alrededor de



granos de cementante, pero más porosa y débil entre ellos, signo claro de una hidratación inconclusa, como se reporta en literatura (Cánoves, et al., 2013).

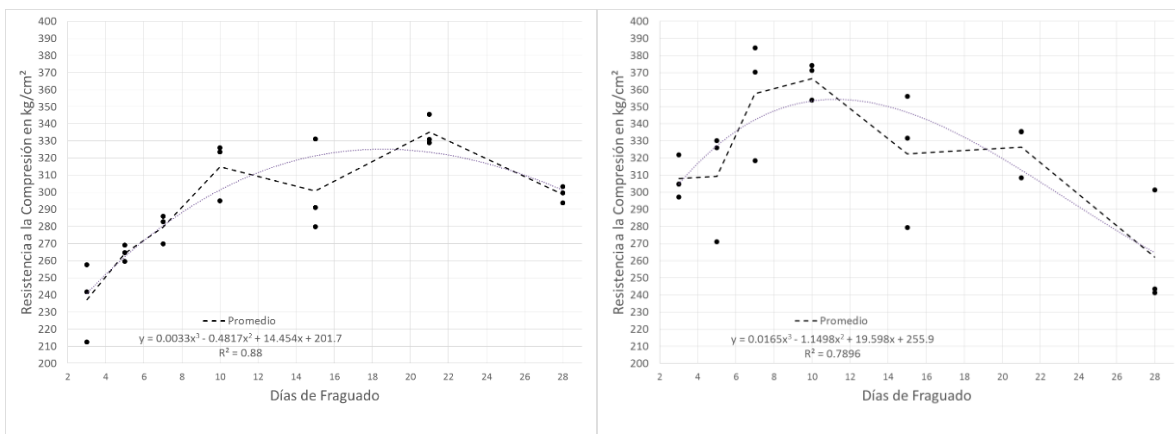


Figura 4. Gráfica de resultados de las pruebas a la compresión axial simple de los cilindros ensayados con agregado en condición seca (Der.) y saturada (Izq.) a distintas edades de fraguado.

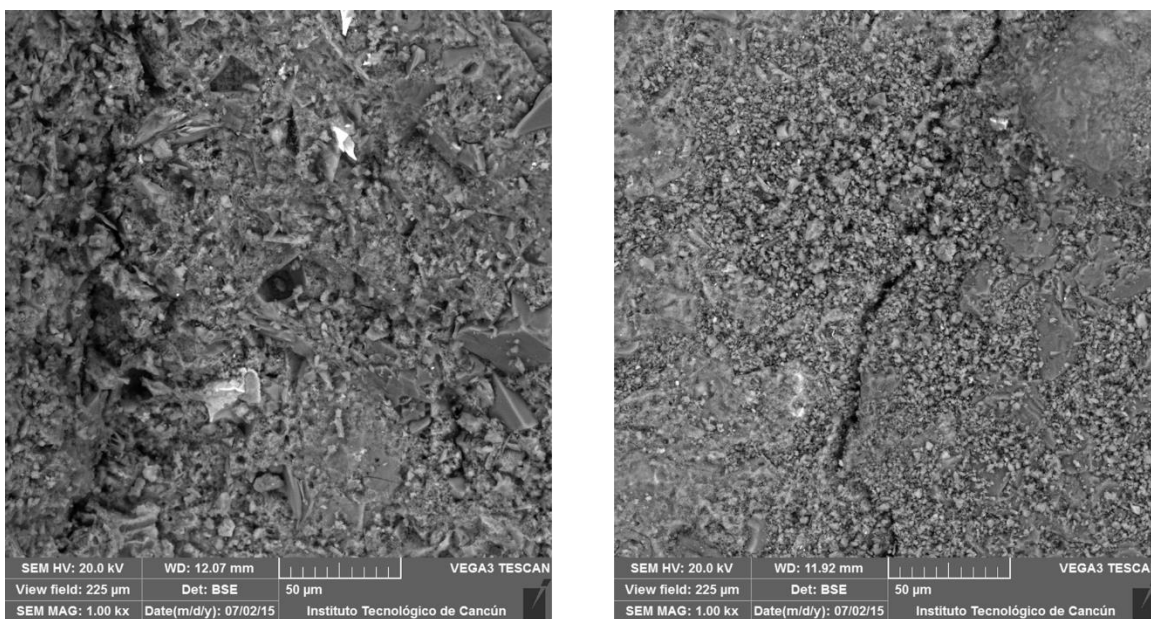


Figura 5. Imágenes de SEM a 1000x de acercamiento. A la Izq. muestra con agregado saturado que a los 10 días de fraguado alcanzó 326 kg/cm<sup>2</sup>. A la Der., muestra con agregado seco que a los 28 días de fraguado alcanzó 241 kg/cm<sup>2</sup>.

**Conclusiones**

Con los resultados de las pruebas a la compresión y las imágenes de microelectroscopia MEB, se corrobora que la pasta de cemento puede ser curada internamente, aun en condiciones de ambiente seco, con los agregados calizos que se comercializan en la Cd. de Chetumal.

Particularmente en el caso del agregado seco, los resultados apuntan a un endurecimiento prematuro producto de una múltiple reacción de hidratación que consumió toda el agua disponible en la mezcla. Cuando la humedad relativa en los poros capilares cae por debajo del 80% se detiene el proceso de hidratación; además se produce una contracción de la masa de cemento (Cano-Barrita, et al., 2004).

En más del 80% de los cilindros probados a la compresión, el sentido de la falla no fue diagonal, sino que sobrevino por el desprendimiento de las láminas externas de los cilindros. Esto corrobora que el curado externo es una práctica que no debería suprimirse en la elaboración de concreto local; particularmente en temporadas secas y cuando el agregado de haya utilizado con poco o nulo contenido de humedad.

### Recomendaciones

Los investigadores interesados en continuar nuestra investigación podrían concentrarse en una caracterización micro de los agregados calizos y su influencia en los efectos del transporte interno de humedad en la masa del concreto. Al definirse este patrón, puede proponerse mezclas de agregado local como agente auto-curante, en la fabricación del concreto incluso fuera de la zona de estudio.

### Referencias

- American Concrete Institute (ACI 211.1), 2004. *Proporcionamiento de Mezclas*. México D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C..
- Bentz, D. P. & Weiss, W. J., 2011. *Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review*, s.l.: U.S. Department of Commerce.
- Cano-Barrita, P. F. d. J. y otros, 2004. Moisture distribution in drying ordinary and high performance concrete cured in a simulated hot dry climate. *Materials and Structures*, Octubre, Volumen 37, pp. 522-531.
- Cánoves, J., Calvet, V., Benlloch, J. & Díez, R., 2013. Influencia de diferentes parámetros tecnológico-ambientales en la evolución de la resistencia del hormigón, producido en la provincia de Valencia. *Materiales de Construcción*, julio-septiembre, 63(311), pp. 327-340.
- Fernández-Luco, L., 2010. Propuesta de indicadores de la eficacia del curado en obra. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 1(2), pp. 17-29.
- Hernández Hernández, D. C., 2013. *Caracterización de la roca caliza, producto de la explotación en los bancos de material pétreo en el municipio de Othón. P. Blanco*, Cd. de Chetumal, México: Instituto Tecnológico de Chetumal.
- Mousa, M. I., Mahdy, M. G., Abdel-Reheem, A. H. & Yehia, A. Z., 2014. Mechanical properties of self-curing concrete (SUCS). *Housin and Building National Research Center HBRC Journal*, p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.06.004>.
- Mousa, M. I., Mahdy, M. G., Abdel-Reheem, A. H. & Yehia, A. Z., 2014. Physical properties of self curing concrete (SCUC). *Housing and Building National Research Center HBRC Journal*, p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2014.05.001>.
- Sampebulu, V., 2012. Increase on strengths of hot weather concrete by self-curing of wet porous aggregate. *Civil Engineering Dimension*, 14(2), pp. 92-99.
- Solís-Carcaño, R. G., Moreno, E. I. & Serrano-Zebadua, C., 2013. Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 4(2), pp. 15-25.

### APENDICE

#### Instrumentos y Equipos Utilizados en esta Investigación

1. Básculas. Marca ESNova, modelo EHC-YW, Cap Max. 30 kg, con 1 g de sensibilidad y Marca ADAM EQUIPMENT, modelo GBK 260a, Cap. Max. 120 kg, con 5 g de sensibilidad, previamente calibradas.
2. Revolvedora para mezclas de concreto portátil de 140 litros de capacidad, 610 mm de diámetro, con motor de S0.5 Hp, 50/60 Hertz con voltaje de 110-115 V y 1420 R.P.M.
3. Las pruebas de contenido de aire se realizaron con un medidor de aire en concreto marca NDT JAMES INSTRUMENTS, tipo B medidor de presión de aire A-AB-1200 normado en operación por la ASTM C-231, previamente calibrado.
4. La temperatura del concreto fresco se verificó con un termómetro marca BRANNAN de mercurio con escala graduada de 0 a 400°C a intervalos de 2°C.
5. La máquina para la prueba a la compresión axial simple es Marca ELVEC modelo F660-4C, con capacidad máxima de 150,000 kg previamente calibrado (cumple la norma NMX-C-083-ONNCCCE).
6. Esmeril Rectificador marca DREMEL modelo 200, rotativa de dos velocidades con aditamento de disco de corte diamante para rocas de la misma marca, modelo EZ545.
7. Microscopio Digital USB 2.0MP para transmisión de video, con capacidad de acercamiento de hasta 800x, que opera con el software Cooling Tech Versión 2.0. Hecho en China. Previamente calibrado.
8. Microscopio óptico electrónico de barrido MEB (SEM siglas en inglés), marca TESCAN, modelo VEGA3 con diseño de 4 lentes. Utilizado a bajo vacío. Previamente calibrado.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Cancún, en particular a la Dra. Ana María Valenzuela Muñiz, Cátedra CONACyT y al Dr. Ysmael Verde Gómez ambos adscritos a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Cancún, por el soporte técnico en el uso del Microscopio MEB.

Así como a los alumnos de la carrera de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Chetumal, Br. Lucio Armando Cervera Espadas, Br. César Yonuel Reyes Mejía y Br. Alfredo Guerra Alamilla, por su apoyo.