



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

LA MORFOLOGÍA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS REDONDEADOS EN LA EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE RUPTURA; COMPARATIVA ENTRE MEZCLA TESTIGO Y MEZCLA ADICIONADA CON FIBRAS DESHIDRATADAS DE CACTUS OPUNTIA.

J. A. Guzmán Torres¹, W. Martínez Molina², E. M. Alonso Guzmán², A. L. Del Valle Moreno³, H. L. Chávez García², A. A. Torres Acosta³, N. Díaz González¹ y M. Mondragón Ornelas¹.

1. Ingenieros del Posgrado de la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040; 2. Cuerpo Académico Consolidado-147, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58040; 3. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, México, 76703.

RESUMEN

La morfología de los agregados pétreos redondeados suelen hacer que se evite su uso en la construcción de obras civiles, pasando por alto su densidad usualmente mayor de 2.0 y su porcentaje de absorción de agua a temperatura ambiente rondando 4%. La mezcla de concreto diseñada por el método del ACI y elaborada en condiciones de laboratorio fue evaluada con pruebas destructivas como esfuerzo de ruptura a la compresión, tensión indirecta, módulo de ruptura a la flexión, y con pruebas no destructivas como velocidad de pulso ultrasónico, resistividad; las edades de prueba fueron desde 7 hasta 40 días. Los especímenes realizados con adiciones de fibras deshidratadas de cactus opuntia presentaron mayores valores bajo las sollicitaciones destructivas, sin embargo el Módulo de Ruptura, Mr, por tratarse de pétreos con morfologías redondeadas presentó valores inferiores a los sugeridos por los reglamentos vigentes.

Palabras claves: Compresión, Tensión, Flexión, Velocidad de pulso ultrasónico, Resistividad

ABSTRACT

The morphology of the rounded stone aggregates tend to avoid its use in the construction of civil works, bypassing its density usually larger than 2.0 and their percentage of water absorption at temperature environment around 4%. The concrete mixture designed by the method of the ICA and produced under laboratory conditions was evaluated with destructive tests as compression effort rupture, indirect tension, bending module and break with non-destructive testing such as speed of ultrasonic pulse, resistivity; test ages ranged from 7 up to 40 days. Specimens made with fiber additions dehydrated cactus opuntia had higher values under the destructive stresses

however Mr rupture Module, as this stone with rounded morphologies presented values lower than those suggested by the regulations.

Key words: Compression, Tension, Bending, Ultrasonic Pulse Velocity, Resistivity

INTRODUCCIÓN

Usualmente se define como concreto, la mezcla de un aglutinante, entendiendo como aglutinante el Cemento Portland hidráulico, con agregados que pueden ser gruesos y finos, los cuales tienen la finalidad de proporcionar estabilidad a la mezcla y al mismo tiempo proporcionar resistencia y volumen y, adicionalmente un solvente que en este caso es agua potable. Hay ocasiones en la que la mezcla requiere algún tipo de aditivo para mejorar sus características, en este caso en particular, se adicionó a la mezcla fibras de cactus opuntia blanco, obteniendo una mezcla endurecida con una determinada resistencia, es decir, una roca artificial.

En esta investigación se realizó la caracterización del material endurecido (roca artificial) el cual fue elaborado con un cemento portland ordinario 30R RS BRA cuya denominación ONNCCE es Cemento Portland Ordinario con 30 MPa de resistencia rápida, Resistente a los Sulfatos y con Baja Reactividad Alkali Agregado según la clasificación de cementos en México, un agregado grueso de material de canto redondo, un agregado fino obtenido del mismo material de canto redondo, agua potable y el aditivo de fibras de cactus. Aun cuando existe una norma internacional para clasificar los cementos hidráulicos ASTM C 150/C150M-11, actualmente en México los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX-C-414- ONNCCE¹. Este material se caracterizó a edades tempranas, obteniendo datos como lo son Compresión Simple, Tensión Indirecta, Esfuerzo de Flexión y Velocidad de pulso ultrasónico.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales pétreos finos y gruesos fueron muestreados² por los autores en época de estiaje. Se transportaron al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, donde se secaron, se cuartearon³ y se caracterizaron macroscópicamente. Todas las pruebas normadas realizadas se hicieron por triplicado, los valores indicados son el promedio de 3 pruebas, y no existieron variaciones de mayores al 10%, en ningún caso. La experimentación se llevó a cabo en 2 diferentes fases, la primera consistió en caracterizar los agregados gruesos y finos, realizando pruebas de Cuarteo, Densidad^{4,5}, % Humedad Actual⁶, % Absorción⁷, Masas volumétricas secas sueltas⁸, Granulometrías⁹ en finos y gruesos para obtener el Módulo de finura (MF) y el Tamaño máximo (TM) respectivamente⁹, Masas Volumétricas Secas Varilladas⁸, Colorimetría¹⁰. Al cemento se le realizaron pruebas como Tiempo de fraguado, Consistencia Normal y Densidad para poder observar las características del cemento basándose en las normas, NMX-C-059-1997-ONNCCE¹¹, NMX-C-057-1997-ONNCCE¹², NMX-C-152-ONNCCE-2010¹³ respectivamente de cada prueba la cual se comparó con una mezcla testigo de cemento con el aditivo, para poder observar ambos comportamientos. Previo a esta investigación se realizaron pruebas con diferentes porcentajes de adiciones de fibras, que variaron desde 1 hasta 10% del peso del cemento, las pruebas preliminares arrojaron que el 2% de adición en peso del cemento era el valor óptimo para las condiciones aquí descritas, para el fraguado, el descimbrado, la resistencia y la coloración del concreto¹⁴. La siguiente fase consistió en caracterizar el material una vez realizada la mezcla en estado fresco y en estado endurecido, pero para esto, el diseño de mezclas se realizó con el método de dosificación del American Concrete Institute (ACI)¹⁵. El concreto se

diseño para un $f'c$ de 200 kg/cm^2 , pero el Artículo 308 del Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán sugiere que los valores de la desviación estándar en condiciones normales debe ser del orden de 35 kg/cm^2 para lograr que sólo el 5% de los valores de los especímenes probados diera por debajo del valor del $f'c$, por lo que el valor de diseño de la mezcla de concreto calculado fue $fcr = 250 \text{ kg/cm}^2$, para tener un revenimiento o trabajabilidad de 4 pulgadas/10cm. La adición de fibras de cactus opuntia blanco fue agregada después de realizar la mezcla para evitar una posible absorción de agua y se viera modificada la mezcla, se cuantificó la Trabajabilidad para verificar el valor de diseño con la prueba de Revenimiento, siguiendo la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE¹⁶ en concreto fresco. Con la mezcla elaborada se procedió a la elaboración de especímenes de concreto según la NMX-C-159-2004-ONNCCE¹⁷, los moldes cilíndricos y prismáticos fueron recubiertos con una delgada capa de aceite para evitar adherencias con los moldes de cada uno de los especímenes en el momento de descimbrarlos una vez que se encontraran endurecidos. Se realizaron 95 cilindros en total, todos con dimensiones de 10 cm de base por 20 cm de altura siempre cuidando la relación altura-diámetro 1:2, de los cuales fueron 60 cilindros adicionados con la fibra de cactus y 35 cilindros sin aditivo. A todos los especímenes se les realizaron las pruebas de Compresión, Tensión, Resistividad y Velocidad de pulso Ultrasónico. Los especímenes se probaron a 3, 7, 14, 28 y 40 días a partir de la fecha de elaboración. Se realizaron 18 vigas en total, de las cuales 9 fueron adicionadas con la fibra de cactus deshidratada y 9 sin aditivo, a los especímenes se les realizaron las pruebas de flexión¹⁸ con el método de apoyo simple y carga al centro, en el tercio medio, los especímenes se probaron a 7, 14 y 28 días de edad a partir de la fecha de elaboración. La primera prueba no destructiva a la que se sometieron los especímenes fue la prueba de resistividad según la publicación técnica No. 328 del Instituto Mexicano del Transporte¹⁹. El equipo para cuantificar la resistividad fue el Resistómetro de Marca Nilsson. En seguida se procedió a realizar la prueba de velocidad de pulso ultrasónico esta prueba midió la velocidad, en el quipo (UPV) E49 de marca CONTROLS. El equipo tiene un manual para el usuario en el cual hay una tabla donde se indican las condiciones del concreto probado para los diferentes valores obtenidos de velocidades de pulso ultrasónico, siguiendo la norma ASTM C 597-02, 2003²⁰.

Finalizadas las pruebas no destructivas y en virtud de que se repitieron varias cuantificaciones en cada caso, se procedió a realizar las pruebas destructivas, estas pruebas son las de tensión indirecta²¹ ó prueba brasileña de tensión o prueba de Joao Carneiro, (ft); esfuerzo de ruptura a la compresión ($f'c$); y módulo de ruptura a la flexión (Mr). Las pruebas destructivas fueron llevadas a cabo en una máquina universal de pruebas marca Forney con capacidad de hasta 150 toneladas, en el rango de 75 toneladas con aproximaciones a 12.5 Kg ²². Para la prueba de compresión simple, norma NMX-C-083-ONNCCE²³, se cabecearon los especímenes con azufre para lograr la distribución uniforme de cargas sobre la superficie de contacto en los cilindros de concreto siguiendo la norma NMX-C-109-2004-ONNCCE²⁴, la carga se aplicó hasta la falla. Para la prueba de tensión indirecta, basada en norma ASTM C 496-96, el espécimen cilíndrico se colocó horizontalmente entre las platinas con un material que evitaba el rodado del cilindro, la carga se aplicó hasta la falla provocando que el cilindro se partiera en dos partes simétricas. Los prismas para la prueba de Módulo de Ruptura a la Flexión se probaron también en la máquina universal Forney en el rango de 7500 kg, se identificaron los sitios de apoyo simple, los 3 tercios medios para aplicar la carga, se empleó un dispositivo mecánico para tal fin. Todas las fallas ocurrieron en el tercio medio de los prismas. Según la norma NMX-C-191-ONNCCE-2004.

RESULTADOS

Los resultados de las pruebas realizadas al Cemento CPO 30R RS BRA empleado se muestran en las tablas 1 y 2.

En la Tabla 1 se exponen los resultados de las pruebas de densidad del cemento y tiempos de fraguado inicial y final, sin fibras (S/F); y adicionado con fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco (C/F).

Tabla 1. Resultados de pruebas del cemento

NORMA	Prueba	Resultado
NMX-C-152-ONNCCE-2010	Densidad del Cemento	3.11 gr/cm ³
NMX-C-057-1997-ONNCCE	Fraguado Inicial	S/F 3h 44 min
		C/F 4h 32 min
NMX-C-059-1997-ONNCCE	Fraguado Final	S/F 8h 02 min
		C/F 9 h 12 min

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los resultados de las pruebas realizadas a los agregados pétreos finos y gruesos.

Tabla 2. Resumen de resultados

Norma	Prueba	Resultado Promedio/unidades
NMX-C-030-ONNCCE-2004	Muestreo	-
NMX-C-170-1997-ONNCCE.	Cuarteo	-
NMX-C-166-ONNCCE-2006	% Humedad Actual Grava	1.92 %
NMX-C-166-ONNCCE-2006	% Humedad Actual Arena	1.17 %
NMX-C-165-ONNCCE-2004	% Absorción Grava	4.72 %
NMX-C-164-ONNCCE-2004	% Absorción Arena	3.22 %
NMX-C-077-1997-ONNCCE	Módulo de Finura	3.22
NMX-C-077-1997-ONNCCE	Tamaño Máximo	¾"
NMX-C-073-ONNCCE-2004	MVSS arena	1.47 g/cm ³
NMX-C-073-ONNCCE-2004	MVSV arena	1.54 g/cm ³
NMX-C-073-ONNCCE-2004	MVSS grava	1.33 g/cm ³
NMX-C-073-ONNCCE-2004	PVSV grava	1.46 g/cm ³
ASTM C-40-99	Colorimetría	No. 3 de la tabla colorimétrica
NMX-C-416-0NNCCE	Material que pasa malla 200	5.79 %
ASTMC 127-01	Gravedad Específica Grava	2.38 g/cm ³
ASTM C 128-01	Gravedad Específica Arena	2.25 g/cm ³

En la Figura 1 se muestra la resistencia a la compresión simple en porcentaje del fcr contra la edad de los especímenes probados según la norma NMX-C-083-ONNCCE, para los especímenes de concreto endurecido con y sin adición de fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco.

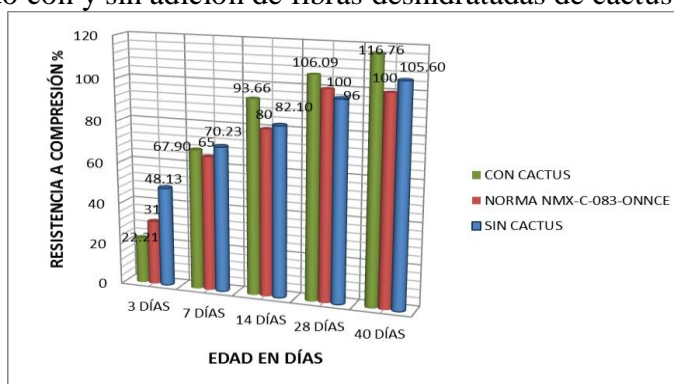


Figura 1. Comparación de resultados a compresión entre ambas mezclas

En la Figura 2 se muestra el resumen del comportamiento de resistencia a la tensión indirecta de especímenes con y sin adición de fibras de cactus opuntia blanco a las diferentes edades de prueba. Siguiendo la norma ASTM C 496-96

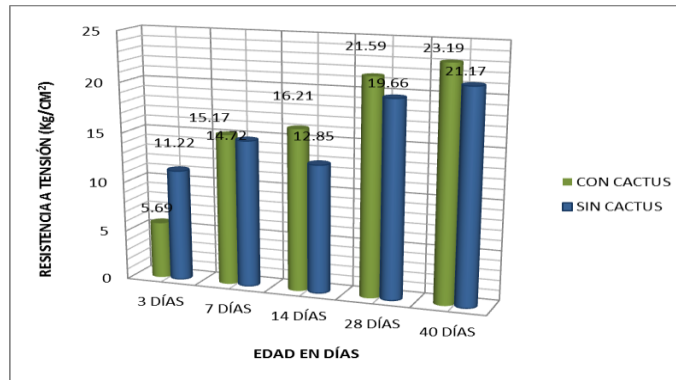


Figura 2. Comparación de resultados a tensión entre ambas mezclas

En la Figura 3 se muestra el resumen del comportamiento mecánico del módulo de ruptura a la flexión, para mezclas de concreto endurecido con y sin fibras de cactus opuntia blanco, a diferentes edades de prueba, según la norma NMX-C-191-ONNCCE-2004.

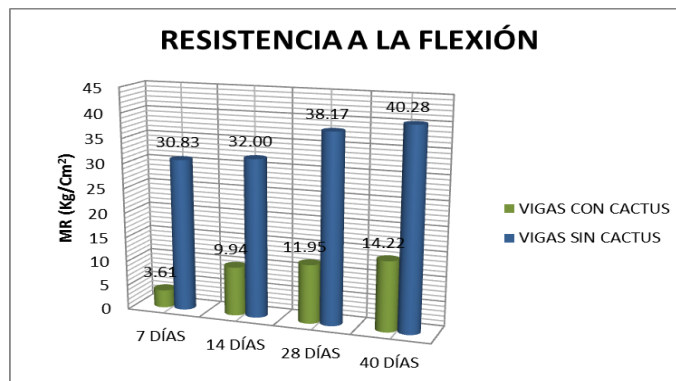


Figura 3. Comparación de resultados a flexión entre ambas mezclas.

En la Figura 4 se muestra el resumen del comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico, para mezclas de concreto endurecido con y sin fibras de cactus opuntia blanco, a diferentes edades de prueba.

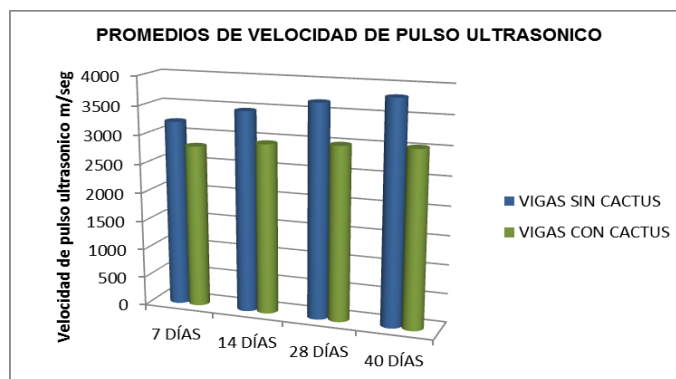


Figura 4. Comparación de resultados en prueba de velocidad de pulso ultrasónico entre ambas mezclas

En la Tabla 3 se muestra la clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica, tabla definida por Malhotra en 1985²⁵.

Velocidad ultrasónica, V (m/s)	Clasificación del concreto
V > 4 575	Excelente
4 575 > V > 3 660	Bueno
3 660 > V > 3 050	Cuestionable
3 050 > V > 2 135	Pobre
V < 2 135	Muy pobre

Tabla 3. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

Según la tabla anterior los resultados se clasifican de la siguiente manera

➤ CILINDROS CON CACTUS

3 DÍAS	Es un concreto pobre
7 DÍAS	Es un concreto pobre
14 DÍAS	Es un concreto cuestionable
28 DÍAS	Es un concreto cuestionable

➤ CILINDROS SIN CACTUS

3 DÍAS	Es un concreto cuestionable
7 DÍAS	Es un concreto cuestionable
14 DÍAS	Es un concreto bueno
28 DÍAS	Es un concreto bueno

En la Figura 5 se muestra el resumen del comportamiento de la Resistividad eléctrica, para mezclas de concreto endurecido con y sin fibras de cactus opuntia blanco, a diferentes edades de prueba.

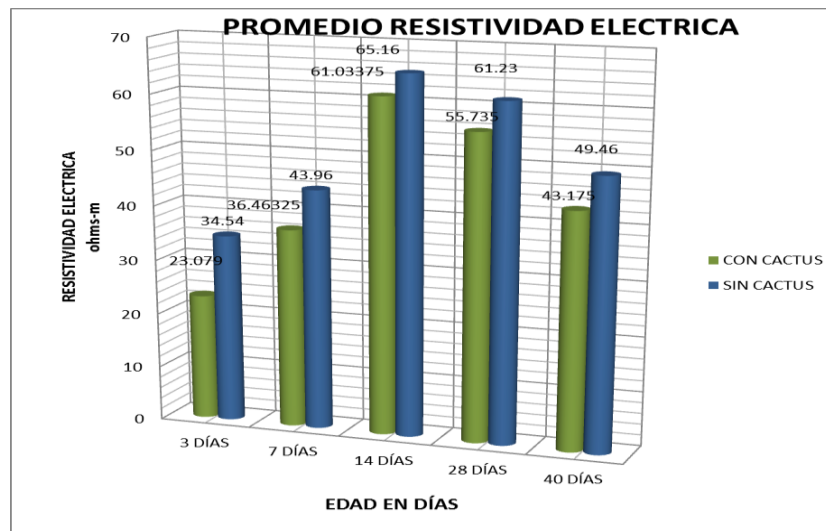


Figura 5. Comparación de resultados en prueba de resistividad eléctrica entre ambas mezclas

CONCLUSIONES

Cuando se comparan los especímenes con la norma NMX-C-083-ONNCE de Resistencia a la Compresión Simple las muestras con cactus están por encima del 100% del fcr con un 6.09% a los 28 días, mientras que los especímenes sin cactus apenas cumplen con el 100% del fcr hasta

los 40 días. Los especímenes con cactus tuvieron una menor resistencia a la tensión hasta el día 3, pero esa situación se invirtió a partir del día 14, obteniéndose una mayor resistencia a la tensión, del 2.02% al final de esta investigación para los especímenes con cactus. Los pétreos gruesos estudiados en esta investigación son cantos rodados, materiales de masa volumétrica $< 2.0 \text{ g/cm}^3$ y con porcentajes de absorción de agua $< 4\%$ para el agregado fino y absorción de agua $> \text{del } 4\%$ para el agregado grueso, valores sugeridos siempre por los reglamentos de construcción vigentes y las normas actuales según la norma ASTM C-128 y ASTM C-127 respectivamente para cada prueba, se observa que la resistencia mecánica a la compresión cumplió con el valor de diseño sin embargo el valor del porcentaje de resistencia a la tensión que menciona la bibliografía como valor teórico de $f_t \approx 10\% f'_c$ es inferior a lo sugerido, no quiere decir que su uso contravenga la normativa o la Ley de Obra Pública sin embargo implicaría necesidad de mayor acero de refuerzo. Otra cosa importante es el hecho de que el valor del módulo de ruptura a la flexión, M_r , es inferior a los valores obtenidos con agregados pétreos volcánicos o triturados, que son del orden del 17-19% f'_c según la norma NMX-C-191-ONNCCE-2004; si se usan los valores obtenidos aquí del M_r para el diseño de pavimentos rígidos se observará que se requerirán espesores muy grandes para soportar estas sollicitaciones. Respecto al efecto de la adición de fibras deshidratadas de cactus opuntia blanco se observa que para las sollicitaciones de compresión y tensión, si mejoró el comportamiento a estas edades tempranas. Para el caso de M_r no se observa mejora en el comportamiento con la adición, tampoco cumple con los estándares sugeridos en los casos de concreto sin adición. Los prismas que contenían cactus presentaron falla fuera del tercio medio del claro, y muy importante también que el comportamiento en las pruebas de flexión fue diferente ya que al parecer el cactus les proporcionaba un poco de ductilidad o elasticidad, las muestras fallaban poco a poco caso contrario de las vigas que no contenían cactus, estas tenían un comportamiento normal en el concreto ya que su falla era frágil. La adición de fibras de cactus también provoca que las mezclas se expandan ligeramente al mezclarse y pierdan manejabilidad por aumentar su cohesión. Los agregados pétreos redondeados cumplen ampliamente con las recomendaciones de pesos volumétricos, densidad aparente y porcentaje de absorción de agua, pero su morfología no provoca mejoras en las sollicitaciones de tensión y flexión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y del Proyecto de Redes SEP-PROMEP, Nombre de la Red: Red Temática Promep para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico, el soporte técnico del personal del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El cemento empleado en esta investigación fue proporcionado por Holcim, APASCO, por medio del Ing. Víctor Manuel Chávez del Valle.

REFERENCIAS

- [1] NMX-C-414-2006-ONNCCE. Industria de la construcción-cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba.
- [2] NMX-C-030-ONNCCE-2004 Industria de la construcción -Agregados - Muestreo.
- [3] NMX-C-170-1997-ONNCCE. Industria de la construcción -Agregados - Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo, al tamaño requerido para las pruebas.

- [4] ASTM C 127-01 Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de los agregados gruesos
- [5] ASTM C 128-01 Método de ensayo para determinar la densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y la absorción de los agregados finos
- [6] NMX-C-166-ONNCCE-2006 Industria de la construcción – Agregados - Contenido total de humedad por secado método de prueba.
- [7] NMX-C-164-ONNCCE-2004 Industria de la construcción – Agregados- determinación de la masa específica y Absorción de agua del agregado grueso.
- [8] NMX-C-073-ONNCCE-2004 Industria de la construcción - agregados - masa volumétrica - método de prueba
- [9] NMX-C-077-1997-ONNCCE Industria de la construcción - agregados para concreto - análisis granulométrico - método de prueba
- [10] ASTM C-40-99 Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto.
- [11] NMX-C-059-1997-ONNCCE Industria de la construcción - determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método de Vicat).
- [12] NMX-C-057-1997-ONNCCE Industria de la construcción- cementantes hidráulicos - determinación de la consistencia normal.
- [13] NMX-C-152-ONNCCE-2010. Industria de la construcción -Cementantes hidráulicos- Método de prueba Para la determinación del masa específico de cementantes hidráulicos.
- [14] Arreola Sánchez, M., 2009, “efecto mecánico del aplanado de mortero de la cal con arena sílica y/o adiciones sobre las sollicitaciones de compresión y cortante en mamposterías de productos cerámicos”, Tesis, FIC, UMSNH, Morelia, México
- [15] Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) Reported by ACI Committee 211.
- [16] NMX-C-156-1997-ONNCCE Industria de la construcción - concreto - determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- [17] NMX-C-159-2004-ONNCCE Industria de la construcción - Concreto -Elaboración y curado, en el laboratorio de especímenes
- [18] NMX-C-191-ONNCCE-2004 Industria de la construcción - Concreto -Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro
- [19] Torres Acosta Andrés Antonio, Martínez Molina Wilfrido, Lomelí González María Guadalupe, Pérez Gallardo Alejandro, 2010, Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto, Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.
- [20] ASTM Test Designation C 597-02, 2003, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA.
- [21] ASTM C 496-96 Método de ensayo para determinar la resistencia a tensión indirecta de cilindros de concreto
- [22] ANÁLISIS DE MATERIALES; Luis Manuel Navarro Sánchez, Wilfrido Martínez Molina y José Antonio Espinoza Mandujano, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Facultad de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales del Departamento de Materiales. Pág. 19
- [23] NMX-C-083-ONNCCE Industria de la construcción -Concreto - Determinación de la resistencia la compresión de cilindros de concreto.
- [24] NMX-C-109-2004-ONNCCE Industria de la construcción -Concreto - Cabeceo de especímenes cilíndricos.

[25] Malhotra V. M. y Carino N. J., "Handbook on nondestructive testing of concrete", CRC Press, Boca Raton, 2004, U.S.A.