EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL EMPEDRADO DE PUEBLOS MÁGICOS CON ADICIONES ORGÁNICAS EN MORTEROS BASE CEMENTO

L. COLÍN¹, H. L. CHÁVEZ², M. C. GARCÍA¹, E. A. NÚÑEZ², O. S. MIRANDA²

¹ Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mújica S/N Ciudad Universitaria, Edificio de posgrado Facultad de Ingeniería Civil, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

² Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mújica S/N Ciudad Universitaria C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

México se caracteriza por tener una gran diversidad en cuanto a cultura nos referimos y para muestra de ello es la gran cantidad de pueblos que aun a pesar del avance tecnológico y la urbanización siguen conservando sus características arquitectónicas, sus usos, costumbres y tradiciones, aspectos que son atractivos para el turismo nacional e internacional, por lo que se les ha dado el nombre de “pueblos mágicos”, algunos de estos pueblos presentan una característica particular: sus calles son empedradas (roca de río con mortero) en especial el Municipio de Tlalpujahua Michoacán, el cual presenta una pendiente muy notable y el clima es extremoso, en donde coinciden lluvia, nieve, granizo y sol, aspectos climatológicos que dañan notablemente el empedrado, logrando que las juntas de mortero entre roca y roca se erosionen originando desprendimiento de rocas lo que posteriormente es un bache. El mortero es básicamente una mezcla de agregado pétreo fino y pasta. La pasta compuesta de cemento Portland y agua. Se adicionó al cemento un 2% de fibras de origen orgánico, con lo que se busca incrementar la adherencia entre rocas y la durabilidad del mortero, utilizando una relación agua/cemento (a/c)=0.77 y un 0.4% de aditivo fluidificante con la finalidad de reducir la relación a/c en peso, se elaboraron muestras cubicas de 5 cm de arista y una muestra de losa diseñada por ACI con un $f'c$ de 250 kg/cm² la cual se revistió con pastas de morteros adicionados. Los resultados de la resistencia mecánica del mortero con adiciones orgánicas mostraron incrementos del orden del 5% con respecto a la muestra testigo y de casi 700% con respecto al Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

Palabras clave: Durabilidad; erosión; adición; empedrado

1. INTRODUCCIÓN

México es uno de los principales productores de maíz y de nopal(), actualmente existe una gran variedad de especies tanto de maíz como de nopal, algunas de ellas no para consumo humano y cumplen algunas funciones específicas, el maíz (**Zea mays**) especie que se encuentra dentro de la categoría de cereal, un almidón de maíz (MZ) es un polisacárido que se encuentra en el maíz en forma de reserva alimenticia, éste se encuentra constituido por amilosa y amilopectina, se obtiene de moler las diferentes variedades del maíz. Suele formar parte de los carbohidratos que se ingieren de manera habitual a través de los alimentos; en estado natural se presenta como partículas complejas que, en presencia de agua, forman suspensiones de poca viscosidad. Su composición es principalmente de glucosa, aunque puede haber otros componentes presentes en menor cantidad. El nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de México. Este país produce 874,000 toneladas al año, con un rendimiento promedio de 67 ton/ha. Además, el uso del nopal en materiales basados en cemento se ha usado en el pasado para estabilizar suelos y puede tener un impacto social, proporcionando un valor agregado a la producción de esta planta y se mejoraría su rentabilidad, mientras un proceso de secado y molienda se obtiene la **fibra de nopal** (FN). Sé podría pensar que estas especies orgánicas no tienen ninguna relación con la industria de la construcción, pero debido a varios estudios y experimentación ya realizados anteriormente se puede determinar los beneficios que aporta el uso de **almidón de Maíz y fibra de nopal**. En base a dichas investigaciones realizadas es que se decidió estudiar el comportamiento de la mezcla con adiciones orgánicas. Es decir, determinar si los beneficios con tal adición son mejores que el mortero convencional.

En México existe gran cantidad de pueblos mágicos, 121 en total, los cuales se identifican por características muy propias de cada pueblo, los cuales pueden ser museos, iglesias, parques, calles, minas, acueductos, tradiciones, gastronomía, artesanías y cultura. Uno de estos pueblos es el municipio de Tlalpujahua, una de sus principales características son sus calles empedradas; sin embargo, debido a sus condiciones topográficas y posición geográfica coinciden lluvia, granizo, nieve y sol, los cuales causan el desgaste de la junta de mortero. Aunado a lo anteriormente mencionado, la carga vehicular que circula por sus principales calles es alta, lo cual agrava el desgaste mencionado y propicia la formación de baches, tal y como es mostrado en la “Figura “. El municipio destina un alto presupuesto a la restauración de sus calles, debido a que presentan una baja durabilidad ya que al lapso de un año de nuevo se vuelven a formar baches y erosionar las juntas.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente es de gran importancia enfocar estudios a este tipo de problemas, por lo cual esta investigación se enfoca en la búsqueda de adiciones al mortero que permitan mejorar sus propiedades químicas, físicas y mecánicas. Las adiciones objeto de estudio son materiales orgánicos con el fin de evitar una mayor contaminación en la producción del cemento portland ordinario y así generar que el costo económico baje considerablemente, incrementado la durabilidad.

2. PROCEDIMIENTO

2.1. Agregados

Los agregados utilizados en la investigación fueron obtenidos de una casa de materiales en el municipio de Tlalpujahua, municipio que se ubica al noroeste del Estado de Michoacán con la finalidad de caracterizar los materiales con los que se construyen las calles empedradas del municipio y entender llegar al problema. El municipio al carecer de un banco de material la única manera de obtener agregados es en otro lugar, esta arena se caracteriza por tener un color muy blanco y demasiados finos. Para conocer las propiedades y características de este agregado se le efectuaron diferentes pruebas como:

- Cuarteo en arenas (NMX-C-170-ONNCCE, 1997)
- Humedad actual (NMX – C – 166 (NMX-C-166-ONNCCE., 2006)
- Humedad superficial y humedad de absorción (NMX-C-165-ONNCCE., 2014)
- Determinación de la masa Volumétrica seca y suelta (NMX-C-073-ONNCCE., 2004)
- Determinación de la masa volumétrica seca y varillada (NMX-C-073-ONNCCE., 2004)
- Granulometría en arenas (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

2.2. Adiciones al mortero

Las adiciones orgánicas al mortero en la mayoría de las ocasiones son de materiales que se puedan conseguir fácilmente, en la presente investigación se utilizó como adiciones al mortero un 2% de fibra de nopal y un 2% de almidón de maíz “Figura 1” con respecto al peso del mortero, materiales orgánicos que se caracterizan por sus propiedades químicas, se busca que mejoren las propiedades del mortero.

Figura 1: a) Fibra de nopal en polvo
b) Almidón de maíz

2.3. Elaboración de especímenes

Se elaboraron especímenes cúbicos en moldes metálicos de 5 cm de arista “Figura 2” con las adiciones correspondientes y especímenes testigos “Figura 3”, los cuales a las 24 horas fueron descimbrados y curados hasta que cumpliera la edad de prueba 14, 28, 45 y 90 días “Figura 4”. Se utilizó una relación agua/cemento=0.77 y 0.4% de fluidificante en polvo para reducir la cantidad de agua en la mezcla. Las adiciones de **almidón de maíz y fibra de nopal** fueron del 2% respecto a la masa del cemento.

Figura 2: Moldes metálicos de 5 cm de arista

Figura 3: Elaboración de especímenes con adiciones

Figura 4: Curado de especímenes (método sumergido)

2.4. Pruebas no destructivas

Una prueba no destructiva es una revisión, prueba, o evaluación realizada en algún tipo de material sin cambiar o alterar sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto, el cual pueda ser dañino.

Al cumplir la edad de prueba de cada espécimen, se realizó velocidad de pulso ultrasónico (VPU), los especímenes se sacan del curado y se coloca gel en las caras de pruebas, mediante los transductores se genera una onda y lo que se mide es la velocidad con la que viaja la onda.

Figura 5: Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico a espécimen prismático

2.4. Pruebas destructivas

Son pruebas donde se altera la muestra física y mecánicamente para conocer sus propiedades y así determinar su calidad. Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado, así como de la integración que se genere entre ellos.

Esfuerzo a compresión: La prueba se realiza a especímenes cúbicos de 5 cm de arista, se determinan las medidas de las caras para calcular el área (A), se elige una cara donde se aplicará la carga (W) “Figura 6” utilizando una prensa hidráulica, para determinar el esfuerzo a compresión.

Figura 6: Prueba de esfuerzo a compresión en prensa hidráulica

El esfuerzo a compresión se determina con la siguiente formula (1)

$$R = \frac{W}{A} \quad (1)$$

Resistencia a la adherencia: La adherencia es una característica propia de los morteros, es una propiedad que genera una fuerza entre dos materiales que están en contacto como piedras, ladrillos, acero, etc..

Se realizó una mezcla por cada adición las cuales se colocaron sobre una losa diseñada por el método de ACI con un $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, a la edad de prueba se pegaron dolis con epoxico y se procedió hacer la prueba.

Al realizarse la prueba puede presentarte 4 fallas “Figura 7”.

Figura 6: Fallas que presenta la prueba de adherencia a) Falla en el sustrato,
b) Falla de enlace en la interfaz de concreto,
c) Falla en material de recubrimiento (falla en el mortero) y
d) Error de enlace entre la interfaz y el epoxico

3. RESULTADOS

Se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en 4 edades. El almidón de maíz es la adición que presenta mejores resultados, superiores a los de la mezcla testigo y de la mezcla con fibra de nopal “Figura 7”. De acuerdo a los criterios de durabilidad para concreto, los resultados se encuentran en una alta calidad del mortero (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000). Los mejores resultados se presentan a la edad de 90 días donde la adición de almidón de maíz tiene 3785.6 m/s, mientras la mezcla testigo registra 3766.26 m/s y la fibra de nopal se encuentra por debajo de las dos mezclas anteriores al registrar un valor de 3668.25 m/s.

Figura 7: Resultados de la prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico a las edades de prueba

De acuerdo a los valores obtenidos en la “Figura 8” el almidón de maíz es la adición en la que se obtienen mejores valores, registrando resultados siempre por arriba del testigo y de la fibra de nopal, aunque en las 4 edades de prueba los valores fueron en incremento.

En la edad de 90 días (Ilustración 89) el resultado de almidón de maíz es de 27.71 MPa, estando por encima de la fibra de nopal (27.23 MPa), lo cual es producto de un mejor acomodo de las partículas del agregado y de las partículas del almidón de maíz, además de una mejor densificación dentro de la matriz cementicia.

Figura 8: Resultados de prueba a esfuerzo a compresión en el testigo y adiciones

Los resultados de la prueba de resistencia a la adherencia “Figura 9” muestran una mejora con la adición de MZ la cual puede ser usada para la unión de las piedras de río para la construcción del empedrado.

4. CONCLUSIONES

Las adiciones orgánicas al mortero densificaron notablemente la matriz cementicia de acuerdo con los resultados de resistividad eléctrica ya que son mejores los resultados de las mezclas con adiciones y trajo consigo un incremento en la resistencia mecánica bajo solicitaciones de compresión, flexión, tensión directa e indirecta.

La adición de almidón de maíz es la que presenta los mejores resultados en la mayoría de las pruebas por lo que sería una muy buena opción como adición para el mejoramiento de las calles empedradas de Tlajupajhua, México.

Se recomienda continuar estudiando estos materiales y realizar pruebas como capilaridad, abrasión entre otras.

Se propone para trabajos posteriores aumentar el contenido de cemento para tratar de cubrir toda el área superficial del agregado.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rueda” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por apoyar la investigación de sus estudiantes y por el apoyo en los insumos utilizados para la obtención de resultados.

6. REFERENCIAS

- AASHTO-T-106. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, 7-38.
- Antigua, E. (2016). *Enciclopedia Antigua*. Retrieved from <http://enciclopedia.escolar.com/EnciclopediaAntigua/clases-y-tipos-de-almidon/>
- ASTM-C270. (2014). *Standard Specification For Mortar for Unit Masonry*. ASTM International, 9-10.
- ASTM-C-348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*. EE.UU.
- ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*.
- ASTM-C-515. (2003). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. EE.UU.
- ASTM-C-597. (2009). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete*. Estados Unidos.
- ASTM-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*.
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*. EE.UU.
- BS-4027:1980. (2000). *Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos*. Inglaterra: British Standards Institution.
- Cámara Nacional del Cemento. (2016). Retrieved from <http://www.canacem.org.mx>
- Castro, E. G. (2016). *Mezcla de concreto hidráulico con ceniza de bagazo de caña como sustituto del cemento: Evaluación de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad*. Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.
- Correa, R. S. (1984). *Diseño de Mezclas de Mortero*. Colombia Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- del Valle Moreno, A. d., Guzmán Torres, J. A., Alonso Guzmán, E. M., Martínez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Terán Guillén, J., . . . Martínez Madrid, M. (2015). *Solicitaciones mecánicas y estáticas*

a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adiciones con fibras deshidratadas de cactus opuntia. Querétaro.

Jacobo, S. J. (2014). Tesis de Licenciatura: *Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón.* Morelia.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto.* Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.

Martínez Molina, W., Navarro Sánchez, L. M., & Espinoza Mandujano, A. (2011). *Tiempos de fraguado utilizando las agujas de Gillmore.* In *Análisis de Materiales.* Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.

Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology.* England: ISBN 978-0-273-73219-8.

NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cemento Hidráulico-Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.

NMX-C-071-ONNCCE. (2004). *Industria De La Construcción-Agregados-Determinación De Terrones De Arcilla Y Partículas Deleznales.* México: Onncce.

NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria De La Construcción-Agregados-Masa Volumétrica-Método De Prueba.* México: ONNCCE.

NMX-C-073-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.

NMX-C-111-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-122-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto- Especificaciones.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.

NMX-C-148-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio.* México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

NMX-C-165-ONNCCE. (2004). *Industria De La Construcción-Agregados-Determinación De La Masa Específica Y Absorción De Agua Del Agregado Fino-Metodo De Prueba.* México: ONNCCE.