

MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO EN ESPECÍMENES DE ADOBE ESTABILIZADOS CON MINERALES

W. Martínez-Molina¹, E. M. Alonso-Guzmán¹, F. A. Velasco-Ávalos¹, A. A. Torres Acosta², F. Méndez Flores³, C. Lara Gómez¹, H. L. Chávez García¹, J. A. Bedolla Arroyo³

1. Cuerpo Académico Consolidado CAC UMSNH-147 de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040
2. Facultad de Ingeniería, División de Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro México, 76010; Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, México, 76000 e Instituto Mexicano del Transporte, SCT, Sanfandila, Querétaro, México, 76700
3. Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, Facultad de Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040
wmmolina@umich.mx, ealonso@umich.mx

Tema 3: Técnicas, Construcción, Investigación y Desarrollo

Palabra-clave: Adobe, estabilización, comportamiento de materiales

RESUMEN

Las construcciones patrimoniales de tierra del Reino Purhépecha en Michoacán, México, fueron construidas con piezas de arcilla sin recocer o adobes. Los adobes son piezas de arcilla adicionados con minerales, solventes y/o material orgánico. Las adiciones tienen como fin aglutinar el suelo, imprimiéndole cohesión, resistencia mecánica y durabilidad, no asociada con inmersión en agua.

La etnia Purhépecha asentada en Michoacán, se distinguió por ser un grupo guerrero y fuerte que defendía el paso entre centro y costa. Esta fortaleza física se observa también en sus construcciones patrimoniales, pero estas construcciones de adobe tienen dos características: están asentadas en casi todos los casos en suelos arcillosos, que son abundantes en la región, y están sujetas a coeficientes sísmicos importantes.

Las construcciones patrimoniales de adobe, sean religiosas o civiles, debido al medio ambiente, a sobrecargas, a solicitaciones sísmicas, a hundimientos diferenciales; presentan daños que deben ser resueltos desde diferentes puntos de vista como la Ciencia de los Materiales y la Ingeniería Estructural.

Para las revisiones en elementos verticales, es necesario conocer tanto la geometría del muro, como las solicitaciones a que estará sometida, estas revisiones tienen como valor fundamental el comportamiento elástico de las piezas de adobe.

El Módulo de Elasticidad dinámico permite conocer el comportamiento físico-mecánico de los materiales de manera no destructiva, pues las piezas tienen resistencias pequeñas. Este trabajo muestra los resultados obtenidos para el Módulo de Elasticidad dinámico en especímenes prismáticos, con diferentes mezclas de arcilla adicionadas con porcentajes de minerales naturales como el yeso.

1. INTRODUCCIÓN

Michoacán es un Estado de la República Mexicana que abarca el 3% de la superficie total del país. Está localizado en la costa pacífica, tiene 113 Municipios y su capital es Morelia, ciudad que es una de las 9 incluidas en la Lista de Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, como ciudad colonial en México. Su centro histórico es el que tiene el mayor número de monumentos histórico-arquitectónicos, más de un millar, todos recubiertos de ignimbritas rosadas. Las ignimbritas provienen de las canteras alledañas a la ciudad, y

muchos monumentos fueron contruidos como muros de tapial, arcilla empacando rocas, recubiertos de láminas de roca.

La abundancia mineral en Michoacán son las rocas ígneas extrusivas e intrusivas, así como los suelos montmorilloníticos. Los eventos volcánicos locales son el resultado de magmas félsicos, ricos en sílice con presencia de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas sódicas, micas como la biotita, y a veces muscovita, y hornblenda.

Las ignimbritas son rocas producto de las eyecciones magmáticas que asolaron a la región: estos magmas tenían temperaturas cercanas a las 1000°C y cuando emergieron bruscamente, sufrieron un choque térmico que las enfrió abruptamente evitando que se cristalizaran dando origen al vidrio volcánico.

El vidrio, como material imperfecto y sometido al meteorismo se metamorfizó en cristales, específicamente en arcillas. El intemperismo comprende procesos mediante los cuales las rocas son alteradas física y químicamente, de modo que se acercan más al equilibrio termodinámico con un nuevo conjunto de condiciones ambientales. Este proceso es la fuente de materias primas para las rocas sedimentarias como para la formación de suelos.

El intemperismo es un proceso que no cesa, su velocidad varía de un espacio a otro, incluso en un mismo material pétreo fluctúa por las diferencias en composición y estructura, resultando en un intemperismo diferencial.

El material más abundante en la corteza terrestre son los silicatos o compuestos de Si con O₂ y substituciones de Al, Ca, Na en las aristas de las moléculas. Estas substituciones dan lugar a los diferentes grupos de arcillas entre los que se encuentran las Esmectitas [Mitchel, 1993] grupo al que pertenecen las arcillas jóvenes que presentan los mayores índices de expansión y contracción volumétrica. Una clasificación general de las arcillas es la de montmorillonitas, illitas, caolinitas, vermiculitas, nontronitas, halloysitas y cloritas [Dana, 1986; Atlas, 2005]. Las arcillas se describen como minerales sílico-alumínicos hidratados. Algunos átomos en los enlaces de los tetrahedros de sílice de las láminas de las montmorillonitas por procesos de hidrotermalismo, metamorfismo, metasomatismo y meteorismo, son substituidos por átomos cuyo número atómico es menor, pero estas substituciones dan por resultado menores índices de cambios volumétricos en presencia de humedad, tal es el caso de las arcillas jóvenes o montmorillonitas cuyos átomos de Fe y/o Al son substituidos por Ca, Na, K, dando lugar a las illitas y posteriormente a las caolinitas. Estas últimas, volumétricamente hablando, presentan mayores índices de estabilidad.

Los depósitos de limo o arcilla son típicamente más porosos, 50 a 70% de porosidad, que los de arena o grava, pero su permeabilidad es baja porque los poros entre las partículas de arcilla son muy pequeñas y la atracción molecular entre éstas y el agua es grande [Wicander, 2000].

La ciudad de Morelia, Michoacán, México está localizada en la intersección del Cinturón Volcánico Mexicano, la Placa de Cocos, la continuación de la Falla de San Andrés, la Dorsal del Pacífico, las montañas de la Sierra Madre Occidental, con condiciones geológicas suficientes para la actividad volcánica que suministrará la materia prima de donde se transformarán los minerales primarios, como vidrio, feldespatos, óxidos, etc., en minerales accesorios como las arcillas.

El mejoramiento de las arcillas tiene como fin mantener o incrementar las propiedades físicas y mecánicas del material, alargar la vida útil, disminuir el mantenimiento de las construcciones de suelo, conservar las construcciones patrimoniales de arcilla y promover la construcción de edificaciones de tierra.

Los suelos son materiales minerales que pasan por la malla ASTM No 200, pueden ser de diferentes orígenes: polvo producto de disminución de tamaño, metamorfismo de roca

madre, disgregación de rocas. El origen será la causa de su comportamiento como material de construcción.

Algunos de los materiales que se han venido utilizando como adiciones para estabilizaciones de suelos son: cal, ácidos orgánicos, resinas, polímeros, cemento Portland, sales, asfaltos [Garnica Anguas, 2002], fibras animales y vegetales, lútics, yeso. La costa del Pacífico en el Continente Americano es la parte joven del planeta. La última en emerger por violentos movimientos telúricos, entonces las arcillas presentes son minerales jóvenes del grupo de las Smectitas, específicamente Montmorillonitas. Aluminio-Silicatos hidratados muy sensibles, higroscópicamente hablando, que presentan grandes cambios volumétricos en presencia de agua. La estructura cristalográfica laminar típica de estos minerales ha sido estudiada con diferentes técnicas entre las que se encuentran la Difracción de Rayos X, y al calcularse la distancia interlaminar entre las hojuelas de arcilla, se comprueba que dichos minerales tienen espacio geométrico para las moléculas de agua, pero al alojarse las moléculas de agua en las arcillas provocan que haya expansiones volumétricas que no pueden ser contenidas por las estructuras de las que forman parte, pero al mismo tiempo cuando esta estructura por cambios ambientales ya no contiene moléculas de agua en su estructura, se colapsará, es decir se contraerá volumétricamente, resultando en agrietamientos en la superficie, que deberán ser restaurados cotidianamente, en el caso del empleo de estos suelos como recubrimientos.

Los constructores trataron de controlar el problema de los agrietamientos con temperatura y horneado; las arcillas amasadas se secaban al sol para eliminar la humedad superficial y disminuir el gasto de combustible y posteriormente se horneaban para convertirlos en materiales cerámicos, estables volumétricamente, pero frágiles.

La producción de materiales de construcción cerámicos implica gasto de energía para el cocimiento, traducida en recolección de residuos orgánicos secos, retardando el avance constructivo: era más fácil y rápida la construcción de material crudo.

Los adobes presentan aislamiento térmico, óptico y acústico, no solo por su densidad sino por las dimensiones de su geometría: los adobes son piezas macizas que presentan espesores de mínimo 30 cm; requieren por tanto terrenos amplios para su empleo, las casas de los Purhépecha presentan una distribución específica, un corredor de entrada, habitaciones a los lados, patio y cocina; zonas donde se desarrollan muchas de sus actividades familiares y sociales. El adobe es un material de arcilla, arena, agua y algún aditivo estabilizador. Difundido y utilizado en todo el mundo desde hace miles de años. Su colado se hace en moldes de madera o de lámina de metal, con un peso promedio de unos 14 kilos. Tales que sean de fácil manejo para la persona que lo va a trabajar.

El adobe es un material de construcción económico, ya que los materiales que se utilizan para su elaboración suelen abundar en los alrededores evitando transporte innecesario de materia prima: a lo largo del tiempo ha demostrado ser buena respuesta ante las condiciones climáticas existentes. Presenta gran inercia térmica, sirviendo como regulador de la temperatura interna; en tiempo caluroso es fresco y es tibio durante el invierno.

El inconveniente que tiene este material es de no ser resistente a la lluvia ni a la humedad; hay que recubrirlo con una capa de barro como protección. También se puede hacer una mezcla de arcilla con cal, creando una mezcla pastosa, para así poderla aplicar sobre la superficie construida con adobe, y si hay agrietamiento, puede aplicársele arena al mortero de tierra para el relleno.



Figura 1 - muro de adobe desplantado sobre mampostería pétrea para impedir humedad capilar y dar pendiente a techumbres ligeras; Ucareo, Michoacán, México, (crédito W. Martínez Molina).

Figura 2 - inyección de lechada de cal en grietas de mampostería, (crédito J. A. Bedolla Arroyo).

Figura 3 - discontinuidad en muro de tierra, (crédito F. Méndez Flores).

Las construcciones de adobe son amigables con el entorno, pues no requieren energía térmica para su consolidación, basta con la radiación solar para el “secado” de las piezas; los consolidantes sí requieren energía, el yeso debe ser llevado a 163 °C y que se produzca disociación; para el caso de la producción de cemento Portland se requieren temperaturas promedio de 1450°C; la caliza requiere de temperaturas promedio de 850°C para producir la cal; la energía calorífica necesaria se piensa en función de los residuos que se vierten a la atmósfera propiciando el problema del calentamiento global por las emisiones antropogénicas. Si algún elemento de tierra debe ser reconstruido, puede usarse la misma materia del que estaba hecho y simplemente remoldearse, hecho que no ocurre con otros materiales cerámicos que requieren de trituración previa, o no pueden reusarse por perder sus propiedades de adherencia.

Parcialmente, Michoacán está localizado en una zona de alta sismicidad, la energía liberada por los movimientos tectónicos debe ser absorbida por los materiales constructivos que conforman las estructuras; entonces, el sentido común de los grupos étnicos que habitaban la zona, les indicó que para elaborar materiales cerámicos se requería mejor “tecnología” como hornos, temperatura y combustible. Muchas piezas se obtenían dañadas, además de presentar comportamiento frágil; la experiencia dictó continuar usando al antecesor de los materiales cerámicos que es el adobe, pero adicionado con diferentes estabilizantes volumétricos o con mezclas de ellos.

Las piezas de adobe son más elásticas que los materiales cerámicos de arcilla recocida. Por su geometría tienen mejor respuesta bajo solicitaciones horizontales; los muros de adobe no suelen ser esbeltos, ni formar parte de estructuras muy altas; pueden ser reparados fácil y económicamente, la materia prima abunda en la región, y el conocimiento empírico de los grupos étnicos que los empleaban, les enseñó a agregar diferentes aditivos orgánicos y minerales para estabilizar las arcillas.

En Michoacán existen construcciones de tierra en climas muy diferentes; las hay en zonas secas como los alrededores de Morelia, Charapan, Paracho; en zonas húmedas como la zona lacustre de Pátzcuaro y Uruapan; en zonas frías como Ciudad Hidalgo, Zitácuaro; en zonas costeras como Lázaro Cárdenas, Maruata y Coahuayana. En cada una de ellas se emplearon aditivos diferentes, regularmente los que abundaban en la región.

En zonas frías y altas, más de 1800 msnm, el aditivo predominante ha sido las ahujas de pino (huinumo); en la rivera de los lagos se ha usado arena fina (cantos rodados o

aluviales), un suelo rojo coloquialmente llamado charanda, residuos de caña de maíz o rastrojo, heces de ganado bovino y caballar, y por supuesto en casi todos los casos tienen residuos de yeso (CaSO_4) y/o cal (CaCO_3), no sólo como constituyente en las piezas, también como recubrimiento o mortero de suelo. El yeso mejora la plasticidad y las propiedades mecánicas en los adobes, estabiliza el volumen. El yeso empleado en este trabajo es de grado industrial, el yeso es un β sulfato de calcio hemihidratado ($\beta\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) [Olguín, 2008] así como la cal, grado industrial, que ha sido ampliamente reportada en la literatura como estabilizante de suelos.

Las arcillas han sido empleadas como materia prima con diferentes fines, en el campo de la ingeniería civil existe un Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) donde pueden clasificarse a los suelos como materiales expansivos o arcillas y materiales “inertes” o limos, y dentro de cada uno hay diferentes grados: de baja y alta compresibilidad.

Las arcillas que nos ocupan provienen de Santiago Undameo, un banco en las inmediaciones de Morelia, Michoacán, esta población se ha distinguido por su producción de adobes y ladrillos. La materia prima aflora en casi toda la superficie del poblado en espesores de hasta 50 m, como se observa en las imágenes.



Figura 4 - Banco de arcilla en la comunidad de Santiago Undameo Michoacán, México.

Figura 5 - muestreo de la arcilla en el banco.

(créditos: M. A. Olguín Domínguez).

Se calcula que un 30% de la población mundial, aún vive en casas hechas de tierra, barro o bajareque. Por lo que en América no hemos sido la excepción de las construcciones en adobe. En Perú existió la ciudad de Chan Chan perteneciente a la cultura chimú (1200-1480 d.C.), considerada como la ciudad más grande de América construida de adobe.

En la actualidad, países como España, México, Argentina Chile y tierras semidesérticas de África, las construcciones se suelen cubrir con una capa del mismo material con el que elaboran los adobes.

2. EXPERIMENTACIÓN

La materia prima, arcilla, se muestreó en el Banco, trasladándose al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil. La muestra se extendió y secó al sol, para desbaratar los terrones. Se cuarteó para disminuir el tamaño y realizar por triplicado las pruebas de caracterización.

Inicialmente se realizaron las pruebas del SUCS para clasificar el suelo. Con el suelo clasificado se enviaron a Difracción de Rx.

La estabilización se realizó en porcentajes de adición en peso. Las adiciones fueron de yeso y de cal, los porcentajes de estabilizante variaron de 2, 4, 6, 8 y 10 por ciento, para cada uno, obteniéndose los Límites de Atterberg para cada adición. Las adiciones que

presentaron el mejor comportamiento cohesivo para la elaboración de especímenes y con mejor presentación estética fueron, para el yeso 4 y 6%, para cal el 2%. Sólo con estas adiciones se elaboraron los especímenes de pruebas mecánicas.

Todos los valores se compararon contra la muestra testigo de arcilla sin estabilizar. Más del 50 % de los especímenes no pudieron utilizarse, la mayoría se fracturaban y desmoronaban. El agua se adicionó en todos los casos hasta lograr un porcentaje de trabajabilidad de alrededor del 90%, cuantificado en la mesa de fluidez.

Los diferentes especímenes para obtener las propiedades físicas y mecánicas se elaboraron según las normas existentes para elaboración y caracterización mecánica de morteros.

Para las pruebas destructivas: se elaboraron briquetas para obtener la resistencia mecánica bajo solicitaciones de tensión simple, f_t , en la Máquina Michaelis, las briquetas no requieren de ninguna preparación posterior al fraguado para colocarse en las abrazaderas del equipo. La resistencia a compresión simple, f'_c , se obtuvo de las pruebas en cubos de 5 cm de arista, el equipo fue la Máquina Universal de Pruebas Tinius Olsen de 50 ton de capacidad y 1 kg de aproximación. La carga se distribuyó uniformemente con arena sílica que pasa malla 16 y se retiene en malla 30. Finalmente en vigas de 4cm x 4cm x 16 cm se realizaron las pruebas de módulo de flexión o módulo de ruptura, M_R , método de carga aplicada en el tercio medio y vigas simplemente apoyadas, la Tabla 1 indica la Norma, dimensión y solicitación a los especímenes.

El Módulo de Elasticidad dinámico, E_d , se obtuvo con el método de vibración ultrasónica, método no destructivo, previo a la solicitación de flexión o módulo de ruptura. El equipo empleado fue un Grindosonic, con el software Emod, del Departamento de Materiales Cerámicos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la propia Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. No fue posible obtenerlo para los especímenes estabilizados con cal, muchos los prismas se fracturaron.

Los resultados incluidos aquí son los de los porcentajes que presentaron el mejor comportamiento físico y mecánico, como se indica en las Tablas 2 y 3.

Se incluyen los resultados de morteros de suelo encontrados en el ExConvento de San Juan Bautista Tiripetío, como guía de los diferentes estabilizantes que se han usado y con los cuales se continuará experimentando.

3. RESULTADOS

Tabla 1 - Solicitaciones Mecánicas, elaboración de especímenes.

Solicitación	Estándar	Dimensión espécimen
Compresión f_c	ASTM C109-63-2000	5 cm x 5 cm x 5 cm
Tensión f_t	ASTM C190-59-2000	$\frac{3}{4}$ " x 1 $\frac{1}{2}$ " x 4"
Flexión f_f	ASTM C78-2000	4 cm x 4 cm x 20 cm

Tabla 2 - Adición de estabilizantes, Yeso ó Cal, su efecto sobre los Límites de Atterberg.

Límites Atterberg	Testigo	Yeso					Cal				
		2%	4%	6%	8%	10%	2%	4%	6%	8%	10%
LL	49.94	52.97	55.2	47.5	54.9	55.7	45.7	44.5	45.71	49.6	50.75
LP	15	15.5	13.3	19.8	18.3	25.8	23.6	3.2	31.1	29	35.8
IP	34.9	37.5	41.9	27.7	36.6	29.9	22.1	41.3	14.7	20.6	14.9
LC	11.99	9.75	14.98	16.05	12.56	14.18	14.1	19.9	22.04	23.55	30.36
CL	13.1	15.3	15.8	15	14.5	16.1	12.9	9.6	7.8	7	6.7

Tabla 3 - Resumen de solicitaciones mecánicas a especímenes.

Estabilizante	Esfuerzo de Compresión (kg/cm ²)		
	Máximo	Mínimo	Media
Testigo	26.14	31.32	29.82
4% Yeso	47.44	39.36	51.39
6% Yeso	81.78	13.02	49.15
2% Cal	5.2	2.26	3.28
	Esfuerzo de Tensión (kg/cm ²)		
Testigo	4.77	4.01	4.22
4% Yeso	15.08	9.13	8.57
6% Yeso	11.74	0.43	8.61
2% Cal	0	0	0
	Esfuerzo de Flexión (kg/cm ²)		
Testigo	36.96	4.57	19.83
4% Yeso	66.92	11.18	41.41
6% Yeso	60.52	3.85	43.87
2% Cal	0.7	0.34	0.5
	Módulo Elasticidad dinámico (kg/cm ²)		
Testigo	5970	2380	3215
4% Yeso	4330	3820	4045.5
6% Yeso	24225	5020	16536.3



Figuras 6 y 7 - Fotomicrografías de Adobes del ExConvento de San Juan Bautista Tiripetío, Michoacán, México, Primera Escuela de Altos Estudios de América. Microscopía de Luz Polarizada Transmitida en Microscopio Petrográfico, Secciones Delgadas elaboradas en la Universidad Autónoma de Barcelona, España, Descripción cortesía del Dr. Aurelio Álvarez y Pérez, Proyectos AECID A/010109/07 y A/016426/08. Fotografía 6, 4x NP Detalle de las fibras vegetales.

Fotografía 7, 4x NC Aspecto de la carga. Pequeños granos de cuarzo, feldespato y augita, todos ellos de tamaño muy fino.



Figura 8 - Campanario Iglesia Santiago de Tupátaro, Michoacán, México; Templo cuyo artesanado de madera se encuentra decorado con pasajes bíblicos.

Figura 9 - Muro en Cuanajo, Michoacán, México, se observan los estratos de las diferentes etapas constructivas y de conservación realizadas (Crédito: W. Martínez Molina).

3. CONCLUSIONES

La adición de cal produjo, en todos los casos, una pérdida en la intensidad del color que desde el punto de vista estético no sugiere su uso en rellenos exteriores, mientras que la adición de yeso no provoca tal cambio en el color, sin embargo la cal es menos propensa al daño en presencia de agua.

En muchos casos las piezas de adobe fueron estabilizadas con yeso y cal, pero los exteriores solo se recubren con mezclas de arcilla-cal. Las adiciones de lútiles finos, como se observa en las Fotografías 8 y 9, quizá aumenten la durabilidad de los adobes; las adiciones de fibras vegetales suelen degradarse en climas húmedos.

Las mezclas de adiciones minerales y orgánicas que emulan las piezas originales deben continuar realizándose para encontrar la mayor vida útil y preservar el incontable patrimonio monumental construido con tierra en Michoacán y México.

Las correlaciones entre los valores de las sollicitaciones mecánicas son mayores que los valores que reporta la bibliografía para materiales rígidos o cerámicos, por ejemplo para el caso del concreto hidráulico se informa que: $f_T = 10\% f_c$, $M_R = 15-20\% f_c$ y $E_d = 10\,000 \sqrt{f_c}$, mientras que para materiales elásticos como las piezas de tierra, los valores encontrados en esta investigación fueron: $f_T = 14$ a $17.5\% f_c$, $M_R = 66$ a $90\% f_c$ y $E_d = 1.2$ a $1.6 \sqrt{f_c}$.

Los materiales elásticos como las piezas de tierra no rigidizados al extremo, permiten mejor comportamiento en situaciones no excesivas de hundimientos diferenciales, sollicitaciones horizontales, sobrecargas, así mismo su restauración, conservación y reparación no implican grandes erogaciones.

Tabla 4 - Resumen Valores aproximados de las relaciones directas en porcentaje de las solicitaciones de Tensión, Flexión y Módulo de Elasticidad Dinámico en función de la Resistencia de Ruptura a la Compresión.

Material	Tensión/Compresión	Flexión/Compresión	Módulo Elasticidad Dinámico/Compresión
Testigo Arcilla sin adiciones	14.12	66.53	$1.9 f_c^{1/2}$
Arcilla con 4% Yeso	16.68	80.56	$1.24 f_c^{1/2}$
Arcilla con 6% Yeso	17.52	89.26	$2.62 f_c^{1/2}$
Concreto Hidráulico	6 a 10	15 a 17	$10\,000 f_c^{1/2}$

Este trabajo continúa experimentando con las mezclas de aditivos a las arcillas. También en la búsqueda de bancos de arcilla cercanos a los sitios de construcciones patrimoniales, como la Ruta de los Templos Hospital, construidos por Don Vasco de Quiroga en la zona lacustre de Pátzcuaro, México.

BIBLIOGRAFÍA.

Atlas Ilustrado de Minerales (2005). Ed. Susaeta, ISBN 84-305-4870-X, España, 34-37

American Society for Testing and Materials (2000b). Section Four, Construction; Cement, Lime and Gypsum, Volume 04.01, EEUU

DANA, E. S. and W. E. Ford, (1986). *Tratado de Mineralogía*. Editorial CECSA, 16ª Impresión, México, pp. 741-745.

DEER, W. A., R. HOWIE A., ZUSSMAN J. (1996). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Ed. Longman Scientific and Technical, Second Edition, ISBN 0-582-30094-0, UK, pp. 352-383

ANGUAS Garnica P., SALAZAR A. Pérez, LÓPEZ J. A. Gómez, BEIZA E. Y. Ovil (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Publicación Técnica 201 Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Querétaro, México, ISSN 0188-7297, p. 25.

LEET, D. L., JUDSON S. (2000). *Fundamentos de Geología Física*. Editorial Limusa, Decimonovena Reimpresión, México, ISBN 968-18-0475-9, pp. 55-84.

MITCHEL, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons Incorporated, EEUU, ISBN 0-471-85640-1, pp. 30-40.

DOMÍNGUEZ Olguín, M. A. (2008). *Efectos mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO₄*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, pp.13-80.

WICANDER, R, MONROE J. S. (2000). *Fundamentos de Geología*. International Thompson Editores, ISBN 970-686-024-X, México, pp. 113-289

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la disponibilidad de los Ingenieros M. A. Olguín Domínguez y M. C. Morales Garibay para la cuantificación de las propiedades de los suelos. También el soporte financiero de la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de

Hidalgo con los proyectos 12.4 y 12.5, el soporte financiero del Proyecto de Ciencia Básica de CONACYT 59999 y los resultados de la Drx y la Petrografía por parte de los Proyectos AECID A/010109/07 y A/016426/08.

Currículos

W. Martínez-Molina, CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería, División de Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro México y Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

E. M. Alonso-Guzmán, CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México y Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

F. Velasco-Ávalos, CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

A. A. Torres Acosta, Facultad de Ingeniería, División de Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro México; Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, México; Instituto Mexicano del Transporte, SCT, Sanfandila, Querétaro, México.

C. Lara Gómez y H. L. Chávez García, CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

F. Méndez Flores y J. A. Bedolla Arroyo, Doctorantes del Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.