

ARCILLAS JÓVENES DE LA REGIÓN DE MORELIA, MÉXICO; SU ESTABILIZACIÓN CON MINERALES

Wilfrido Martínez Molina¹, Amado Flores Rentería¹, Elia Mercedes Alonso Guzmán^{1,2},
Andrés Antonio Torres Acosta⁴, Hugo Luis Chávez García¹, Cindy Lara Gómez¹,
Fernando Augusto Velasco Ávalos¹, Juan Alberto Bedolla Arroyo², José Luis Ruvalcaba
Sil³, Angélica de Lourdes del Valle Moreno⁴.

1. Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio F, Morelia, Michoacán, México, 58040, Teléfono 52 443 3223500 Ext 4325, Fax: 52 443 3273856, Email: wilfridomartinezmolina@gmail.com;
2. PIDA, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040;
3. Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 04510;
4. Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, México, 76000 e Instituto Mexicano del Transporte, SCT, Sanfandila, Querétaro, México, 76700

RESUMEN

Uno de los primeros materiales de construcción fueron los suelos, las arcillas jóvenes del grupo de las Smectitas, específicamente montorillonitas. La relativa facilidad de extracción y moldeado, además de la abundancia de bancos de arcilla fue un factor predominante para su uso. Michoacán, México fue la cuna del imperio Purhépecha, etnia guerrera cuya mano de obra fue utilizada por los españoles que arribaron al lugar para construir edificios de tierra que actualmente forman parte del patrimonio tangible de Michoacán. Las arcillas jóvenes son el material predominante en esta zona del país rica en rocas ígneas extrusivas y minerales arcillosos, lo que indujo a los constructores a emplearlas como materia prima. Los adobes son fáciles de hacer, pero al estar expuestos a la intemperie, se degradan.

La degradación de los adobes es debida en gran parte al hecho de que la morfología de las arcillas, laminar, permite la absorción de agua, incrementando el volumen, pero si el agua se pierde, entonces se provocará una contracción del volumen. Estas expansiones-contracciones pueden ser eliminadas si una parte del volumen de las arcillas es substituido por materiales que impidan la absorción de moléculas de agua.

Este trabajo realizó una investigación acerca de la estabilización volumétrica de arcillas, basándose en la norma ASTM, quien al cuantificar el pH de la solución, indicó cuál es el óptimo; sin embargo la resistencia mecánica de los suelos estabilizados no se incrementó en la misma proporción.

Palabras claves: normativa, suelos, estabilización, adobes, patrimonio

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la construcción de tierra cruda se tienen antecedentes de estructuras y conjuntos de estas sobre todo en la antigüedad, ya que en actualidad no se toma en cuenta como alternativa para la construcción de viviendas debido a la utilización de materiales de mayor vida útil y mayor disponibilidad en el mercado, aunque esto implique un mayor costo de elaboración de proyectos.

Aunque existen hoy en día restos o indicios de la huella de culturas que utilizaron la tierra cruda de hace más de 9000 años, es correcta la apreciación de que el adobe tiene una menor vida útil que el ladrillo, tabique o el tabicón por ejemplo, aunque sea más amigable con el medio ambiente ya que no requiere el consumo de ningún combustible para el secado, por lo cual con esta investigación se busca dar a la tierra cruda una previa adición que mejore las propiedades y pueda ser considerado como un material viable en la construcción de vivienda y más estructuras ya que la materia prima, “la arcilla”, existe gran disponibilidad en la región.

Este trabajo informa sobre las propiedades mecánicas de los suelos, los adobes y los recubrimientos estabilizados volumétricamente con yeso, con cal, hidróxido de sodio, mucílago de nopal, cemento pòrtland y un material testigo sin estabilizante, así como también la percepción estética después de las adiciones estabilizantes. Se estudiaron proporciones diferentes del estabilizante y las arcillas que provienen de la localidad de Santiago Undameo Michoacán, México, son bancos de la región donde actualmente se explotan para su uso como material para elaborar ladrillos de arcilla recocida.

Los minerales arcillosos del tipo montmorillonita, son comunes en suelos y sedimentos, y debido a su abundancia, las arcillas son materiales que se puede disponer de ellos en casi todas las regiones del planeta y debido a su disponibilidad, desde la antigüedad ha sido la materia prima de muchas culturas en la construcción de sus viviendas y centros ceremoniales. El SUCS, Sistema Único de Clasificación de Suelos, clasifica a las arcillas como de alta y de baja compresibilidad; la expansión también es un índice para la clasificación que hacen los mineralogistas: el grupo de las Esmectitas (Zhang, Ding, Boyd, et al, 2010) es al que pertenecen las arcillas jóvenes que presentan los mayores índices de expansión/contracción. Una clasificación general es la que incluye montmorillonitas, illitas, caolinitas, vermiculitas y cloritas (Prakash, and Sridharan, 2010). En las arcillas montmorillonitas, la estructura está compuesta por una capa de alúmina hidratada o una de silicatos de magnesio hidratada, más de dos sílices, es la menos resistente de las arcillas, ya que tiene gran cantidad de vacíos, por lo tanto alta humedad y mucha plasticidad, el enlace entre las distintas capas es débil, por lo que el agua que penetra, se inserta con facilidad entre ellas produciendo hinchamiento o expansión y lo contrario ocurre al secarse, se produce retracción considerable con el consiguiente agrietamiento.

Las arcillas constituyen casi el 70% de la corteza terrestre y la mayor ventaja de estos materiales, aparte de su disponibilidad, es que debido a su estructura laminar, obligan a que una reacción química se produzca en un plano y no en el espacio tridimensional, lo que hace que ésta sea mucho más rápida. Además, la facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas, justifica su utilización. Se define la arcilla como el conjunto de partículas microscópicas en forma de escamas como mica, minerales arcillosos y otros minerales,

las arcillas se caracterizan por ser partículas menores a 0.002 mm. En algunos casos, las partículas de tamaño entre 0.002 y 0.005 mm también se denominan arcillas.

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

Una propiedad importante de los suelos arcillosos es su higroscopía. La absorción de agua provoca cambios volumétricos en el suelo, así como también la pérdida de la misma. Cuando se construyen caminos muchas de las veces debe emplearse el material más abundante, o el que requiere de menor costo de transportación, el más fácilmente extraíble, el que presente menor dureza en la escala de Mohs. El conservar constante el volumen de los suelos que conforman los pavimentos de los caminos es una meta de la estabilización de las arcillas.

Los cambios volumétricos se traducen en depresiones, baches, rodellas, en las superficies de los pavimentos flexibles. Una forma de evitar la absorción de agua por parte de las arcillas consiste en "llenar" los huecos interlaminares del suelo con otros materiales que impidan entonces que se posicionen moléculas de agua en sitios preferenciales.

Este trabajo estudia las posibilidades de estabilización volumétrica de suelos arcillosos conforme lo describe la citada norma de la ASTM. La norma indica que se considera que se llega a la estabilización si se logra que el material se conserve a temperatura específica durante el período de adición del estabilizante en estudio, pero además debe cumplirse que el estabilizante produzca un pH específico en el líquido en el cual está disuelto el estabilizante, antes de ser incorporado al suelo.

Las arcillas se estabilizaron con materiales tradicionales como la cal grado construcción, el yeso, el cemento y el hidróxido de sodio; y con materiales descritos en la literatura histórica, tales como las adiciones de fibras deshidratadas de cactus opuntia índica, que al mezclarse con agua producen geles de calcio, los cuales al solidificar producen minerales de calcio, oxalatos, como la whewellita y la weddellita.

2. EXPERIMENTACIÓN

El material se muestreo en los bancos aledaños a Morelia, México; se transportó al Laboratorio de Materiales, donde se extendió, se secó, se tamizó para eliminar los pétreos e impurezas contenidos en el suelo. Posteriormente la muestra se cuarteó para reducir hasta el tamaño necesario para hacer las pruebas de los Límites de Atterberg para clasificar el suelo. Los límites de Atterberg se realizaron en el suelo que pasó desde la malla 40 ASTM. Las pruebas se realizaron por triplicado, los resultados incluidos en las tablas son el promedio de 3 cuantificaciones en todos los casos.

Los estabilizantes se adicionaron a los suelos arcillosos iniciando con proporciones de adición desde el 1 hasta el 10% en peso del suelo, al observar su comportamiento volumétrico, se constató que los resultados no presentaron variaciones importantes en todos los casos, ésa fue la primera elección: continuar con los porcentajes pares.

Posteriormente con los resultados de la investigación se realizaron de nuevo los límites de Atterberg con adiciones en peso del 2 al 10 % y se cuantificó su estabilización volumétrica.

Se repitieron las pruebas pero ahora manteniendo constante la temperatura de la solución, a 25°C y preparando una solución de estabilizante/agua hasta lograr un pH de 12.4 como indica la norma ASTM. Con este líquido se elaboró la mezcla de arcilla para repetir los límites de Atterberg de clasificación de suelos. Los materiales con las adiciones para estabilización se emplearon para elaborar especímenes cúbicos, prismáticos y briquetas para evaluar también el comportamiento mecánico con pruebas destructivas y no destructivas, así como comparar, visual y subjetivamente, la coloración de los materiales con y sin estabilizante.

Se estudiaron proporciones diferentes del estabilizante y las arcillas que provienen de la localidad de Santiago Undameo, Michoacán México, son bancos de la región donde actualmente se explotan para su uso como material para elaborar ladrillos. Primero, el material traído al laboratorio se analizó para caracterizarlo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS. Se determinó el potencial de hidrógeno tanto para una muestra saturada así como para las diferentes proporciones de 2, 4, 6, 8 y 10 % propuestas de adición de estabilizante para verificar si la mezcla cumplía con la norma ASTM D 6276 que especifica que tiene que presentar un pH de 12.4 como mínimo. De estas pruebas se observó que ninguna de las proporciones de mucílago de nopal cumplía con el mencionado valor, dando lecturas menores a las especificadas en la norma, ocurriendo lo mismo con las proporciones de yeso, de las cuales se obtuvieron lecturas menores a las establecidas por la norma ASTM D 6276, para las demás adiciones como el hidróxido de sodio, cemento y cal los porcentajes de 6% de adición y valores superiores, cumplían con la norma.

Se realizaron los límites de Atterberg a las mezclas de arcilla en las diferentes proporciones con lo cual se observó que las mezclas de arcilla-cal y arcilla-cemento presentaron una mejora considerable controlando prácticamente los cambios volumétricos de la arcilla, para la mezcla de arcilla-hidróxido de sodio en el porcentaje de 6% en adelante, se generaba una capa de cristales en las superficies expuestas de los especímenes, lo que provocaba desmoronamiento de la muestra, para mezclas de arcilla-yeso y arcilla-mucílago de nopal presentaron mejoras a los cambios volumétricos pero siendo muy poco.

No existen pruebas mecánicas universalmente aceptadas para arcillas estabilizadas, la normativa discute acerca de sus porcentajes de estabilización volumétrica, y considera que estando estabilizados los suelos, ya no existirán problemas de expansión/contracción que sean los promotores de daños en los pavimentos de los caminos, sin embargo, esta investigación vá más allá al evaluar para cada estabilizante la resistencia mecánica bajo sollicitaciones de compresión, tensión y flexión, en especímenes elaborados con las arcillas, estabilizadas según se indicó. Los especímenes se elaboraron según lo indicado para monitorear la resistencia mecánica de morteros de cal, es decir en los mismos moldes: cúbicos de 5 cm de arista para pruebas de esfuerzo de compresión simple en la máquina universal Tinius Olsen, con capacidad de hasta 50 toneladas con aproximaciones a 100 gr, las muestras no requieren preparación, sólo se cabecean con arena sílica o arena de Canadá, pasa malla 16 y se retiene en malla 30.

Para cuantificar el esfuerzo de ruptura a la flexión se elaboraron especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16 cm de longitud, esta morfología fue la que presentó las mayores dificultades de elaboración por contener más masa y presentar los mayores cambios volumétricos; los especímenes prismáticos se probaron en la misma máquina universal de pruebas Tinius Olsen, descrita antes. El método de prueba es el método de vigas simplemente apoyadas con carga aplicada en dos apoyos en el tercio medio, con falla súbita también en el tercio medio, los especímenes sólo se marcan indicando la zona de apoyos, los tres tercios y la zona de aplicación de carga.

En el caso de la evaluación mecánica de la tensión simple, se elaboraron briquetas, con forma tradicional de maní, las muestras no requieren preparación alguna, y se colocan en la abrazaderas del equipo mecánico Michaelis.

Los resultados se monitorearon a diferentes edades, algunas edades no pudieron desencofrarse para probarse y por lo tanto no existen datos, otros especímenes se deterioraron totalmente con la formación de pátinas de sales superficiales.

Para las pruebas mecánicas de compresión, tensión y flexión, se decidió utilizar para hacer los especímenes, los porcentajes de 6% de adición en la cal, el cemento, y el yeso, ya que en porcentajes mayores ocurría un cambio muy brusco de coloración, y porcentajes de 2% de hidróxido de sodio y nopal ya que en estos elementos, a mayores proporciones aparecía una especie de cristalización en la superficie del espécimen. En el caso de las pruebas mecánicas a la mezcla arcilla-hidróxido de sodio no fue posible elaborar especímenes, ya que todos se fracturaron en el proceso de secado.

Los moldes se recubrieron con aceite mineral en capas lo más delgadas posibles para evitar que influyeran sobre el color de la cara expuesta. En algunos casos los especímenes no pudieron descimbrarse o desencofrarse a 8 días, por tanto, no existen resultados a edades tempranas. Se realizaron infinidad de especímenes, los especímenes prismáticos tendieron a agrietarse y fracturarse con mayor facilidad y hubo que repetir muchos de ellos, también ocurrió ese problema en todos los especímenes sin adiciones. En promedio sólo pudieron usarse un 50% de los especímenes elaborados, el resto se desechó por presentar problemas como los descritos.

3. RESULTADOS.

3.1. Potencial de hidrógeno.

Esta prueba nos muestra el potencial de hidrógeno de la mezcla de la arcilla con cada una de las adiciones. El pH era un valor obligado de monitoreo pues la norma indica que las estabilizaciones de suelos se logran en los casos que el líquido con el estabilizante volumétrico presentan un pH de 12.4 aproximadamente

Tabla 1- pH obtenido para cada estabilizante en función de su porcentaje de adición en peso al suelo

ESTABILIZANTE %	pH				
	Fibras Nopal	Hidróxido de Sodio	Yeso	Cal	Cemento
2	5.8	12.3	5.6	11.3	10.8
4	5.9	12.5	5.8	12	11.5
6	6.2	12.6	5.9	12.3	11.7
8	6.5	12.9	6.2	12.6	12.1
10	7.8	13.7	6.6	13.2	12.9

Con la prueba practicada en base a la Norma ASTM D 6276 se puede verificar qué porcentaje de adición de estabilizante, cumple con el mínimo requerido que es de pH = 12.4 para garantizar la reacción material-estabilizante.

3.2. Límites de consistencia (Límites de Atterberg).

Tabla 2 - Límites de Atterberg para la mezcla arcilla-cal para cada porcentaje de adición de estabilizante

LÍMITES	Arcilla NATURAL	ESTABILIZANTE CAL				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	51.2	44.8	43.9	43.64	43.2827
LP	24.8	25.8	35.38	39.47	30.18	36.46
IP	41.2	25.4	9.42	4.43	13.46	6.82
LC	14.12	17.43	27.21	27.67	28.56	40.46
CL	17.5	13.1	7.9	6.2	6.01	4.2
SUCS	CH	CH	ML	ML	CL	ML
	0	2	4	6	8	10
$\Delta C.$ agua%	51.88	33.77	17.59	16.23	15.08	2.8227

Tabla 3 - Límites de Atterberg para la mezcla arcilla-yeso.

LÍMITES	Arcilla NATURAL	ESTABILIZANTE YESO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	60.8	57.5	57.5	57.127	49.832
LP	24.8	22.32	17.43	25.44	16.08	19.91
IP	41.2	38.48	40.07	32.06	41.04	29.92
LC	14.12	14.95	15.45	19.53	27.45	16.06
CL	17.5	15.9	15.5	14.55	15.6	20.27
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CL
	0	2	4	6	8	10
$\Delta C.$ agua%	51.88	45.85	42.05	37.97	29.677	33.772

Tabla 4 - Límites de Atterberg para la mezcla arcilla-mucílago de nopal.

LÍMITES	Arcilla NATURAL	ESTABILIZANTE MUCÍLAGO DE NOPAL				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	68	68.8	73.5	82	91.345
LP	24.8	22.31	19.94	15.22	19.26	19.66
IP	41.2	45.69	48.86	58.28	62.89	71.68
LC	14.12	20.61	7.43	14.28	28.82	16.82
CL	17.5	16.1	16.4	16.2	17.9	19.3
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	47.39	61.37	59.22	53.18	74.525

Tabla 5 - Límites de Atterberg para la mezcla de arcilla-cemento.

LÍMITES	Arcilla NATURAL	ESTABILIZANTE CEMENTO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	50.5	49	47.8	47.17	50.16
LP	24.8	29.69	22.82	30.5	30.9	39.57
IP	41.2	20.81	26.18	17.3	10.27	10.59
LC	14.12	15.34	20.67	28.04	35.32	35.77
CL	17.5	13	12.3	7	5.6	4.9
SUCS	CH	MH	CL	CL	ML	ML
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	35.16	28.33	19.76	11.85	14.39

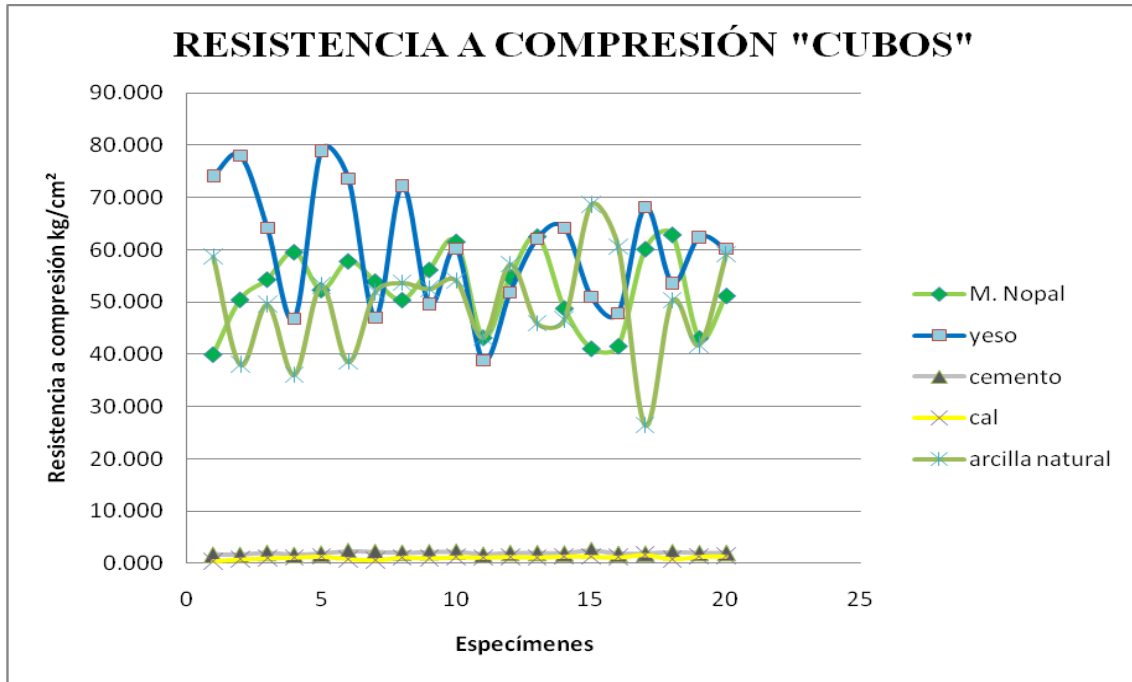
Tabla 6 - Límites de Atterberg para la mezcla de arcilla-hidróxido de sodio.

LÍMITES	Arcilla NATURAL	ESTABILIZANTE HIDRÓXIDO DE SODIO				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL	66	59.2	59	62.9	53.32	53.86
LP	24.8	53.91	30.45	30.27	24.91	28.4
IP	41.2	5.29	28.55	32.63	28.41	25.46
LC	14.12	15.91	19.37	28.94	21.87	33.69
CL	17.5	16.1	13.48	11.1	9	6.8
SUCS	CH	MH	CH	CH	CH	CH
	0	2	4	6	8	10
Δ C. agua%	51.88	43.29	39.63	33.96	31.4519	20.17

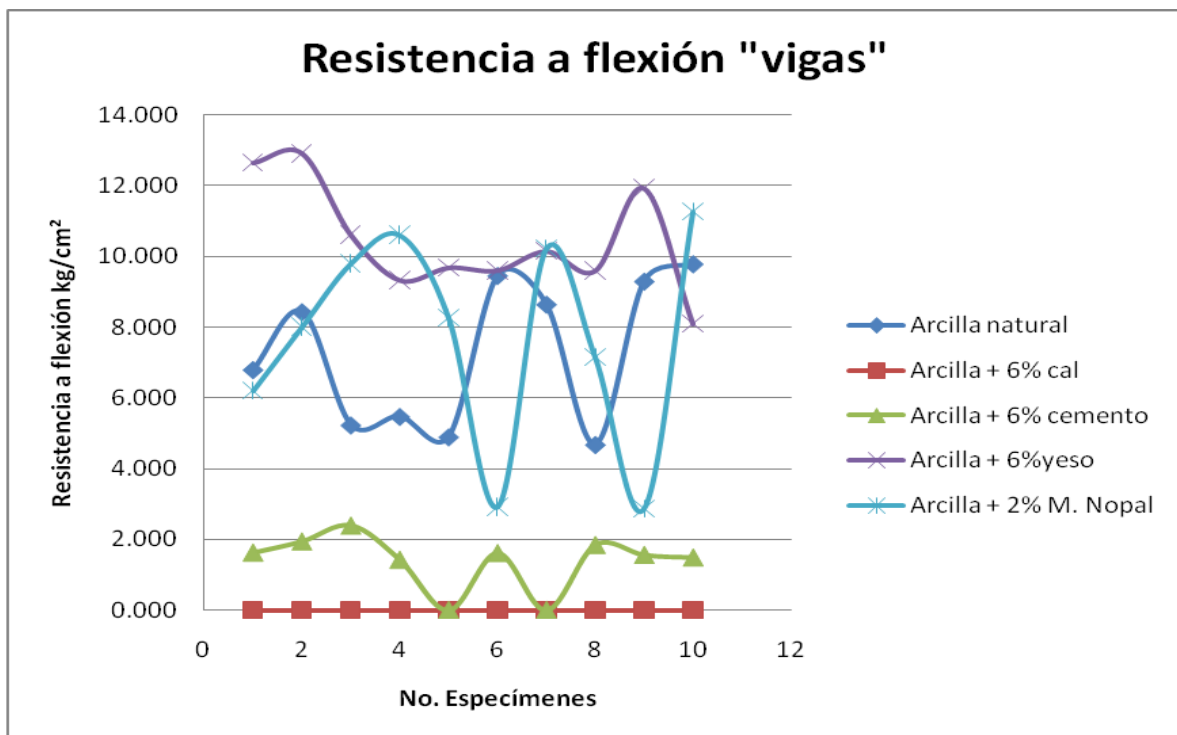
3.3. Pruebas mecánicas.

3.3.1. Pruebas de cubos a compresión.

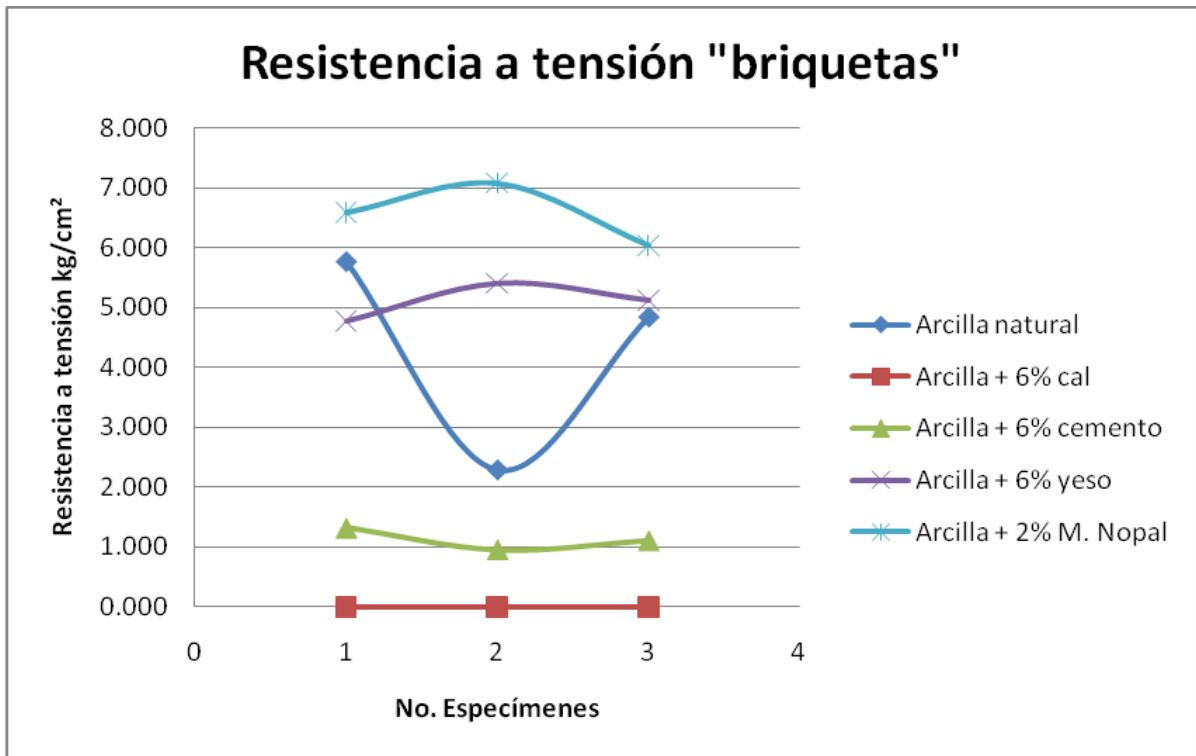
Esta prueba nos permite determinar la resistencia a la compresión simple de especímenes cúbicos de 5 cm de arista.



Gráfica 1 - Resistencia a compresión en cubos.



Gráfica 2 - Resistencia a flexión en vigas. Prismas de 4cm x 4cm x16cm.



Gráfica 3 - Resistencia a la tensión en briquetas.

Tabla 7 - Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión.

MATERIAL	ECUACIÓN
ARCILLA NATURAL	$Y = -0.0334X + 89.569$
ARCILLA + 6% CAL	$Y = -1E-0.5X + 1.1115$
ARCILLA + 6% CEMENTO	$Y = 0.0034X + 0.7225$
ARCILLA + 6% YESO	$Y = 0.0112X + 45.301$
ARCILLA + 2% M. NOPAL	$Y = -0.0118X + 67271$

Tabla 8 - Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión.

MATERIAL	ECUACIÓN
ARCILLA NATURAL	$Y = -0.0274X + 39.089$
ARCILLA + 6% CAL	NO RESISTE
ARCILLA + 6% CEMENTO	$Y = 0.0059X + 3.7952$
ARCILLA + 6% YESO	$Y = -0.0024X + 14.345$
ARCILLA + 2% M. NOPAL	$Y = -0.0099X + 19.878$

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La parte experimental permitió concluir:

- La normativa vigente para estabilización de suelos, habla de que las reacciones ocurren a pH de 12.4, sin embargo en esta experimentación, a pesar de que el pH se llevó a 12.4 y la temperatura se mantuvo a aproximadamente 25°C, el suelo se estabilizó, pero su resistencia mecánica no se incrementó. Es decir la estabilización volumétrica mediante la cuantificación del pH no es consistente con los resultados mecánicos de las sollicitaciones a materiales estabilizados según esta norma. La resistencia mecánica no fue acorde con la consecución de la estabilización en función del pH del líquido en el cual se encontraba disuelto el estabilizante.
- Sobre los resultados de la medición del pH, de los materiales que se utilizaron como estabilizantes, dos no cumplieron con la norma ASTM D 6276, ya que se obtuvieron valores menores de 12.4, estos valores fueron de entre 7 y 8 por ciento de adición, siendo el yeso y el mucílago de nopal respectivamente las adiciones que no cumplieron la norma. Las adiciones de Hidróxido de sodio con 2% de adición; y cemento y cal, cumplían con el pH de 12.4 para los casos de adiciones en las proporciones de 8 y 10 %.
- Se determinaron los límites de consistencia dando como resultado que la mejor adición fue el porcentaje de 10% de cal, controlando prácticamente los cambios volumétricos, los porcentajes de cemento presentaron comportamiento similar a las adiciones de cal.
- En las adiciones mayores de 6 % del hidróxido de sodio, y del mucílago de nopal, generaban recubrimientos sobre las superficies de los especímenes: micro-cristales blanquecinos en el caso del hidróxido de sodio y una especie de lama en el mucílago de nopal.
- Un punto importante a mencionar es que se genera un cambio muy notorio en el color de las mezclas con proporciones mayores a 6 %, en las diferentes adiciones, sólo la mezcla de yeso conserva coloración similar con casi todos los porcentajes de adición.
- Las pruebas mecánicas se realizaron en especímenes con porcentajes de 6% de adición máximo para guardar la similitud en las tonalidades de los especímenes.
- Las adiciones de 6% de cemento y cal fueron las mejores para controlar los cambios volumétricos, sin embargo fueron los de menor capacidad de carga, flexión e incluso tensión nula, mucho menores que las de la muestra testigo.
- En las pruebas mecánicas, la adición que mejores resultados brindó fue la de 6% de yeso, tanto en compresión y flexión, presentando un incremento con respecto a la muestra testigo.
- El mucílago de nopal presentó un comportamiento similar a la muestra testigo con una mejora discreta en compresión y flexión pero siendo la de mejor comportamiento en las pruebas de tensión.
- Para las pruebas de pulso ultrasónico obtuvimos la velocidad, la cual se correlacionó con la resistencia obtenida de la prueba destructiva, ya que no se puede obtener directamente el módulo de elasticidad dinámico con el equipo, puesto que la ecuación está diseñada para determinar el módulo de elasticidad dinámico del concreto, y así obtuvimos una ecuación que nos determina la resistencia de la arcilla, en base a la velocidad de pulso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de CIC-UMSNH, de CONACYT y de UNAM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. W. Martínez Molina, M. C. Morales Garibay, E. M. Alonso Guzmán, J. C. Rubio Avalos, F. A. Velasco Ávalos, C. Lara Gómez y M. A. Mondragón Ornelas. 2007, "Minerales estabilizadores en arcillas; relación entre porcentajes adicionados y efecto estético" México.
2. Olguín Domínguez Mario Alberto, 2008, "Efectos Mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO_4 ", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
3. John Wesley Parker, 2008, Evaluation of laboratory durability tests for stabilized subgrade soils, Thesis of Master of Science, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, E.U., 7-26
4. Rao, Sudhakar M and Shivananda, P., 2005, Compressibility behaviour of lime-stabilized clay, In: Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 23, No. 3, 309-319.
5. Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., 2006, Mecánica de Suelos Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial Noriega Limusa, México, Tercera Edición, 13ª Reimpresión, ISBN 968-18-0069-9, 34-38,123-144,149-163.
6. William H. Matthews III., 1977, "Geology made simple". Editorial Services Company. New York, Tercera edición, 63 - 65.
7. Braja M. Das., 2006, "Fundamentos de ingeniería geotécnica", Editorial THOMSON LEARNING, México
8. Domínguez J. M. y Schiffer I. "Las arcillas el barro noble", México, Editorial Ciencia/169, Fondo de Cultura Económica. 25-39.
9. K.M.A. Hossain, M. Lachemi and S. Easa, 2007, Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 51, No. 4, 715-725.
10. - García Romero, E. y Suárez barrios, M., 2002, LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS: Universidad Complutense (Madrid) y Universidad de Salamanca.
11. Işık Yilmaz and Berrin Civelekoglu, 2009, Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils, Applied Clay Science, Vol. 44, No. 1-2, 166-172.
12. Yesim Gurtug, 2011, Prediction of the compressibility behavior of highly plastic clays under high stresses, Applied Clay Science, Vol. 51, No. 3, 295-299.
- 13 Raymond N. Yong and Vahid R. Ouhadi, 2007, Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, Applied Clay Science, Vol. 35, No. 3-4, 245-247
- 14 Suksun Horpibulsuk, Runglawan rachan, Avirut Chinkulkijniwat, Yuttana Raksachon and Apichat Suddeepong, 2010, Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 10, 2012-2020.
15. Morales Garibay, M. C., 2009, "Desempeño mecánico de morteros de cal adicionados con fibras deshidratadas en polvo de cactus opuntia", tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, México.
16. A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz and B. Garcia, 2011, Stabilization of expansive soils for use in construction, Applied Clay Science, Vol. 51, No. 3, 345-350.
- 17.-Villaseñor F. V., Tesis Profesional "Estudio de Mecánica de Suelos y Cálculo Estructural de los Cinemas Gemelos Plaza Hidalgo en León Gto." Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, México.
18. "Manual de prácticas de mecánica de suelos", 2010, Séptimo Semestre, Laboratorio de Materiales "Ing. Luís Silva Rúelas", Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán, México.

19. Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno y William R. Castillo Pak, 2004 "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán, Volumen 8, Mérida, Yucatán, México, pp 41-52
20. - Ostle Bernard, 1996, Estadística aplicada, Ed. Limusa, México, Primera edición, pág. 47-49.
- 21.- Méndez Miranda, B. A., 2007, Tesis Profesional "Módulo de Elasticidad Dinámico en Morteros de Cal y su Correlación con el Módulo de Ruptura". Facultad de Ingeniería Civil, U.M.S.H., México, pp 65-69,70-74
- 22.- Márquez Alonso C., 1999, "Plantas Medicinales de México II, Composición, Usos y Actividad Biológica", Universidad Nacional Autónoma de México, 1ra. Ed., México, ISBN 968-36-6996-4
23. Mohamed El-Sadek Abdel Rahman Ouf, 2001, Stabilisation of clay subgrade soils using ground granulated blastfurnace slag, Thesis of Doctor of Philosophy, School of Civil Engineering University of Leeds, England, 65-80.
- 24.- Camacho Sánchez C. S., 2001, "Caracterización de Morteros Antiguos de base orgánica vegetal", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp 4-7, 43-44