

PROPIEDADES MECÁNICAS, ESTÉTICAS Y DINÁMICAS DE ARCILLAS ESTABILIZADAS

Elia Mercedes Alonso-Guzman¹, Wilfrido Martinez-Molina², Adrià Sanchez-Calvillo³, Hugo Luis Chavez-Garcia⁴, José Luis Ruvalcaba-Sil⁴

¹Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo; Michoacán, México,
¹elia.alonso@umich.mx; ³adria.sanchez@umich.mx

²Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo; Michoacán, México,
²wilfrido.martinez@umich.mx; ⁴luis.chavez@umich.mx

⁴Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
jose-luis.ruvalcaba@gmail.com

Palabras clave: suelos, propiedades de materiales, estabilización volumétrica, SUCS, VPU.

Resumen

En el ámbito de la construcción de tierra, se tienen como antecedentes estructuras y conjuntos de gran antigüedad, que forman parte del patrimonio cultural; también se encuentra todos los tipos vernáculos, para la edificación de viviendas con materiales tradicionales y disponibles en el contexto local. Hoy en día se tiene por correcta la apreciación de que el adobe en zonas de gran precipitación pluvial tiene una menor vida útil que otros materiales cerámicos, aun sí es más amigable con el medio ambiente, ya que no requiere el consumo de algún combustible para el secado, por lo cual, con esta investigación, se busca dar a la tierra una previa adición que mejore las propiedades ante la humedad y pueda ser considerado como un material durable en la construcción de vivienda y más estructuras. Los suelos como materia prima presentan gran disponibilidad en la región de Michoacán, México. Este trabajo analiza las propiedades mecánicas, dinámicas y apreciación estética de varias muestras de suelo arcilloso estabilizado con cemento, cal, hidróxido de sodio, yeso, y mucílago de nopal, respecto a una muestra natural sin estabilizante que funcionó como testigo. Se estudiaron proporciones diferentes de los estabilizantes y la tierra arcillosa, que proviene de bancos de la localidad de Santiago Undameo, donde actualmente se explota para su uso como material para elaborar ladrillos cerámicos. Además, las propiedades dinámicas como la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), que es una prueba no destructiva, se correlacionaron con otras pruebas mecánicas destructivas.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción con tierra es un fenómeno extendido a lo largo del planeta, con regiones que cuentan con una fuerte presencia de construcciones a base de técnicas tan reconocidas como el adobe, la tapia o el bajareque. Sin embargo, no es posible entender todos estos sistemas tradicionales sin la función aglutinante de las arcillas, las partículas más pequeñas que se puede encontrar en los suelos naturales.

Las arcillas se definen como partículas microscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. 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.

Respecto al tamaño de partícula y en relación con la clasificación de los suelos, las arcillas también se definen como partículas menores a 0.002 mm.

Las arcillas constituyen casi el 70% de la corteza terrestre y la mayor ventaja que ofrecen, aparte de su disponibilidad, es que debido a su estructura laminar, obligan a que una reacción química se produzca en un único plano y no en el espacio tridimensional. Además, la facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a las necesidades concretas de la aplicación a la que son destinadas, justifica su utilización.

Los minerales arcillosos del tipo montmorillonita son comunes en suelos y sedimentos, y debido a su abundancia, son materiales de los que se puede disponer en casi todas las regiones del planeta. Desde la antigüedad, ha sido la materia prima de muchas culturas en la construcción de sus viviendas y centros ceremoniales. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos de granos finos (arcillas y limos)¹ como de alta, media y de baja compresibilidad; la expansión también es un índice para la clasificación que hacen los mineralogistas: el grupo de las esmectitas² es al que pertenecen las arcillas jóvenes que presentan los mayores índices de expansión y contracción (Juárez; Rico, 2006). Estas por lo tanto presentan mayores dificultades y retos a la hora de usarse en la construcción y edificación, razón por la cual es tan importante y común la estabilización de suelos.

Una clasificación general es la que incluye montmorillonita, illita, caolinita, vermiculita y clorita (Klein y otros, 2003). La montmorillonita está compuesta estructuralmente por una capa de aluminio hidratado o una de magnesio hidratada, más capas sílices; es la menos resistente de las arcillas, ya que tiene gran cantidad de vacíos, por lo tanto alta humedad y mucha plasticidad, la liga entre las distintas capas es débil, por lo que el agua que entra se inserta con facilidad entre ellas produciendo expansión y al secarse, se produce retracción considerable con el consiguiente agrietamiento. Este tipo de arcilla presenta muchas más complicaciones en los usos para construcción, como por ejemplo la elaboración de adobes, motivo por el cual es muy común el uso de estabilizantes que mejoren sus propiedades.

Siendo la arquitectura y construcción con tierra un tema pertinente en la sociedad actual debido a los problemas medioambientales y la elevada emisión de gases de efecto invernadero, es una obviedad explorar alternativas de edificación que empleen los materiales locales y las técnicas tradicionales de cada región (Aranda-Jiménez; Suarez-Dominguez, 2019).

Pese a que en los últimos años se ha puesto la mira en la tierra como material de construcción sostenible todavía es necesario un grado mayor de análisis en estos sistemas, que no cuentan con reglamentación en muchos países de América Latina pese a su importante presencia histórica y cultural.

2. OBJETIVO

Los objetivos del presente trabajo pasaron por caracterizar y estudiar la combinación de suelos arcillosos de uso común con estabilizantes de fácil acceso y disponibilidad en el contexto estudiado. Estas adiciones permiten mejorar varias propiedades de los materiales, y mediante esta investigación puede determinarse cuál es el porcentaje óptimo que logre obtener las mejores condiciones.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la presente investigación se estudiaron las propiedades de distintas mezclas de suelos arcillosos con diferentes proporciones de estabilizantes. Para el estudio de estas mezclas se aplicaron ensayos no destructivos, como la medición del potencial de hidrógeno, la colorimetría, o la velocidad de pulso ultrasónico; ensayos de resistencia mecánica, incluyendo pruebas a compresión, flexión y tensión; así como ensayos de mecánica de suelos, con la obtención de los límites de Atterberg y la clasificación de suelos SUCS.

La tierra estudiada proviene de bancos del estado de Michoacán, México; concretamente de la localidad de Santiago Undameo, donde actualmente se explota para su uso como material para elaborar ladrillos cerámicos. Primeramente, se analizaron los distintos materiales en el laboratorio para caracterizarlo mediante el SUCS. Para las mezclas, se utilizaron combinaciones de suelos naturales con cemento, cal, yeso, hidróxido de sodio (NaOH) y

¹ Suelos que contienen por lo menos 50% de limo + arcilla.

² Grupo de minerales arcillosos y micáceos que incluyen a la montmorillonita, beidelita y nontronita, entre otros.

mucílago de nopal (cactus) como estabilizantes, con proporciones de 2, 4, 6, 8 y 10% respectivamente. También se determinaron los límites de Atterberg: el límite líquido (LL), límite plástico (LP), índice de plasticidad (IP), límite de consistencia (LC) y la clasificación de los suelos (CL), de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma.

En cuanto a las pruebas no destructivas, se determinó el potencial de hidrógeno (pH), tanto para una muestra saturada del suelo natural (fungiendo como testigo), así como para las muestras preparadas con la adición de los estabilizantes en sus distintas proporciones para verificar si las mezclas cumplen con el valor de 12.4 especificado como mínimo aceptable por la norma ASTM D 6276 (2019). Son conocidos y especificados los valores para el uso de la cal, siendo uno de los estabilizantes más antiguos y comunes en el territorio mexicano, con una presencia prehispánica muy importante en el sur del país (Navarro y otros, 2019), y un uso tradicional discontinuado en la construcción, ya que en los últimos años ha sufrido un relevo por parte del cemento (Guerrero, 2013).

Otro de los ensayos aplicados a las mezclas fue el de colorimetría. La prueba de colorimetría permite medir objetivamente el color de un objeto a partir de la reflectancia, para ello, el equipo arroja tres parámetros: a^* , b^* y L^* (Sánchez-Calvillo y otros, 2020)³. Como es lógico, cada una de las adiciones y sus porcentajes provocaron cambios en el color de los suelos, siendo este un aspecto muy importante en la restauración patrimonial a fin de preservar el aspecto original de las edificaciones (Martínez y otros, 2018).

Respecto al resto de los ensayos, se elaboraron especímenes cúbicos de 5 cm de arista para las pruebas de compresión simple, para las pruebas de flexión y velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se elaboraron prismas de 4cm x 4cm x 16 cm; mientras que para las pruebas de tensión simple se elaboraron briquetas de 7.5cm x 1.91 cm x 3.81cm. Para las pruebas mecánicas de compresión, tensión y flexión se decidió utilizar para hacer los especímenes, los porcentajes de 6% en la cal, el cemento, y el yeso, ya que en porcentajes mayores ocurría un cambio muy brusco de coloración y con los porcentajes de 2% de hidróxido de sodio y nopal ya que en estos elementos a mayores proporciones aparecía una especie de cristales en la superficie del espécimen. En las pruebas mecánicas, para la mezcla suelo-hidróxido de sodio no se pudieron elaborar especímenes ya que todos se fracturaban durante el proceso de secado.

Tabla 1. Preparación y dimensiones de especímenes para los ensayos

Propiedad	Probeta	Estabilizante (%)				
		Cemento	Cal	Yeso	NaOH	Nopal
Resistencia a compresión	Cubo (5x5x5) cm	6	6	6	2	2
Resistencia a flexión Velocidad de pulso ultrasónico	Prisma (4x4x16) cm	6	6	6	2	2
Resistencia a tensión	Briqueta (7.5x1.9x3.8) cm	6	6	6	2	2

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 a 8 días, por lo 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.

Por último, los resultados del ensayo de VPU fueron correlacionados con la resistencia a compresión mediante una ecuación de correlación simple. La ecuación está diseñada para

³ El parámetro a^* corresponde al eje rojo-verde del color, el parámetro b^* al eje amarillo-azul, mientras que el parámetro L^* o luminosidad corresponde al eje blanco-negro.

determinar el módulo de elasticidad dinámico del concreto, buscando aplicarse en este caso a materiales en tierra, puesto que no existe un parámetro o fórmula establecido para calcular este módulo en elementos como los adobes, pese a algunos ejemplos en investigaciones patrimoniales (Aguilar y otros, 2015).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las distintas pruebas efectuadas en las mezclas de suelo-estabilizante, desglosando entre los análisis de mecánica de suelos, pruebas no destructivas y ensayos de resistencia mecánica.

4.1. Límites de consistencia (límites de Atterberg) y clasificación SUCS

Los límites de consistencia, comúnmente referidos en la literatura como límites de Atterberg, son presentados a continuación en las tablas 2 a 6 en función del estabilizante empleado para la mezcla con suelos. En las tablas también se incluye la clasificación de los suelos mediante el sistema SUCS, dando una idea de la reducción de plasticidad en las mezclas según los distintos estabilizantes.

Tabla 2. Límites de Atterberg y clasificación para la mezcla de suelo-cemento

Límites	Testigo	Adicción de cemento				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL (%)	66.00	50.50	49.00	47.80	47.17	50.16
LP (%)	24.80	29.69	22.82	30.50	30.90	39.57
IP (%)	41.20	20.81	26.18	17.30	10.27	10.59
LC (%)	14.12	15.34	20.67	28.04	35.32	35.77
CL (%)	17.50	13.00	12.30	7.00	5.60	4.90
SUCS	CH	MH	CL	CL	ML	ML
Δ C. agua%	51.88	35.16	28.33	19.76	11.85	14.39

Tabla 3. Límites de Atterberg y clasificación para la mezcla suelo-cal

Límites	Testigo	Adicción de cal				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL (%)	66.00	51.20	44.8	43.9	43.64	43.28
LP (%)	24.80	25.80	35.38	39.47	30.18	36.46
IP (%)	41.20	25.40	9.42	4.43	13.46	6.82
LC (%)	14.12	17.43	27.21	27.67	28.56	40.46
CL (%)	17.50	13.10	7.90	6.20	6.01	4.20
SUCS	CH	CH	ML	ML	CL	ML
Δ C. agua%	51.88	33.77	17.59	16.23	15.08	2.82

Tabla 4. Límites de Atterberg y clasificación para la mezcla suelo-yeso

Límites	Testigo	Adicción de yeso				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL (%)	66.00	60.80	57.50	57.50	57.12	49.83
LP (%)	24.80	22.32	17.43	25.44	16.08	19.91
IP (%)	41.20	38.48	40.07	32.06	41.04	29.92
LC (%)	14.12	14.95	15.45	19.53	27.45	16.06
CL (%)	17.50	15.90	15.50	14.55	15.60	20.27
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CL
Δ C. agua%	51.88	45.85	42.05	37.97	29.67	33.77

Tabla 5. Límites de Atterberg y clasificación para la mezcla de suelo-hidróxido de sodio

Límites	Testigo	Adicción con hidróxido de sodio				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL (%)	66.00	59.20	59.00	62.90	53.32	53.86
LP (%)	24.80	53.91	30.45	30.27	24.91	28.40
IP (%)	41.20	5.29	28.55	32.63	28.41	25.46
LC (%)	14.12	15.91	19.37	28.94	21.87	33.69
CL (%)	17.50	16.10	13.48	11.10	9.00	6.80
SUCS	CH	MH	CH	CH	CH	CH
Δ C. agua%	51.88	43.29	39.63	33.96	31.45	20.17

Tabla 6. Límites de Atterberg y clasificación para la mezcla suelo-nopal

Límites	Testigo	Adicción con nopal				
		2%	4%	6%	8%	10%
LL (%)	66.00	68.00	68.80	73.50	82.00	91.34
LP (%)	24.80	22.31	19.94	15.22	19.26	19.66
IP (%)	41.20	45.69	48.86	58.28	62.89	71.68
LC (%)	14.12	20.61	7.43	14.28	28.82	16.82
CL (%)	17.50	16.10	16.40	16.20	17.9	19.30
SUCS	CH	CH	CH	CH	CH	CH
Δ C. agua%	51.88	47.39	61.37	59.22	53.18	74.52

Se observó que las mezclas de suelo-cemento (tabla 2) y suelo-cal (tabla 3) presentaron mejora considerable en controlar los cambios volumétricos de la arcilla, como puede observarse con los valores SUCS de clasificación de suelos. Se puede observar como las estabilizaciones con cal y cemento reducen la plasticidad de las muestras, pasando de arcillas de alta plasticidad (CH), a arcillas y limos de baja plasticidad (CL y ML)⁴. El resto de estabilizantes no presentaron cambios volumétricos significativos, como se ve en las tablas 4, 5 y 6; excepto por el uso de yeso en proporción del 10%.

Cabe destacar que, a partir de la experimentación, se observó que la mezcla de arcilla-hidróxido de sodio en el porcentaje de 6% en adelante, se generaba una capa de cristales que provocaba desmoronamiento de la muestra. También es notoria la reducción del contenido de humedad, con decrementos tan significativos como el de la estabilización con cal, propiedad que ya ha sido empleada históricamente para el secado de suelos (Navarro y otros, 2019).

4.2. Ensayos no destructivos

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 siendo el yeso y el mucílago de nopal respectivamente las adiciones que no cumplieron la norma. Las adiciones de hidróxido de sodio, cemento y cal mínimo cumplían en los casos de las proporciones de 8 y 10 %. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la norma referida aconseja estos valores únicamente para la estabilización mediante cal, sin tomar en cuenta el empleo de otros materiales como los presentes en esta investigación.

⁴ El sistema de clasificación de suelos SUCS presenta símbolos de dos letras para denominar los suelos a partir de la granulometría: CH corresponde a high plasticity clay, mientras que CL y ML a low plasticity clay y low plasticity silt.

Tabla 7. Potencial de hidrógeno (pH) de los estabilizantes

Estabilizante (%)	Potencial de hidrógeno (pH)				
	Cemento	Cal	Yeso	NaOH	Nopal
2.0	10.8	11.3	5.6	12.3	5.8
4.0	11.5	12.0	5.8	12.5	5.9
6.0	11.7	12.3	5.9	12.6	6.2
8.0	12.1	12.6	6.2	12.9	6.5
10.0	12.9	13.2	6.6	13.7	7.8

Según se reportó en Martínez y otros (2018), las variaciones de color medidas con el equipo colorímetro fueron mínimas, obteniendo los mejores resultados con la mezcla suelo-yeso, puesto que apenas presentó variaciones significativas en los cinco porcentajes empleados. Esta técnica también puede ser empleada para identificar el cambio de color de suelos naturales y elementos constructivos como la mampostería de adobe, permitiendo relacionar los estabilizantes encontrados mediante otros análisis con la variación según la escala CIE⁵, además de la posibilidad de poder implementar el ensayo in situ.

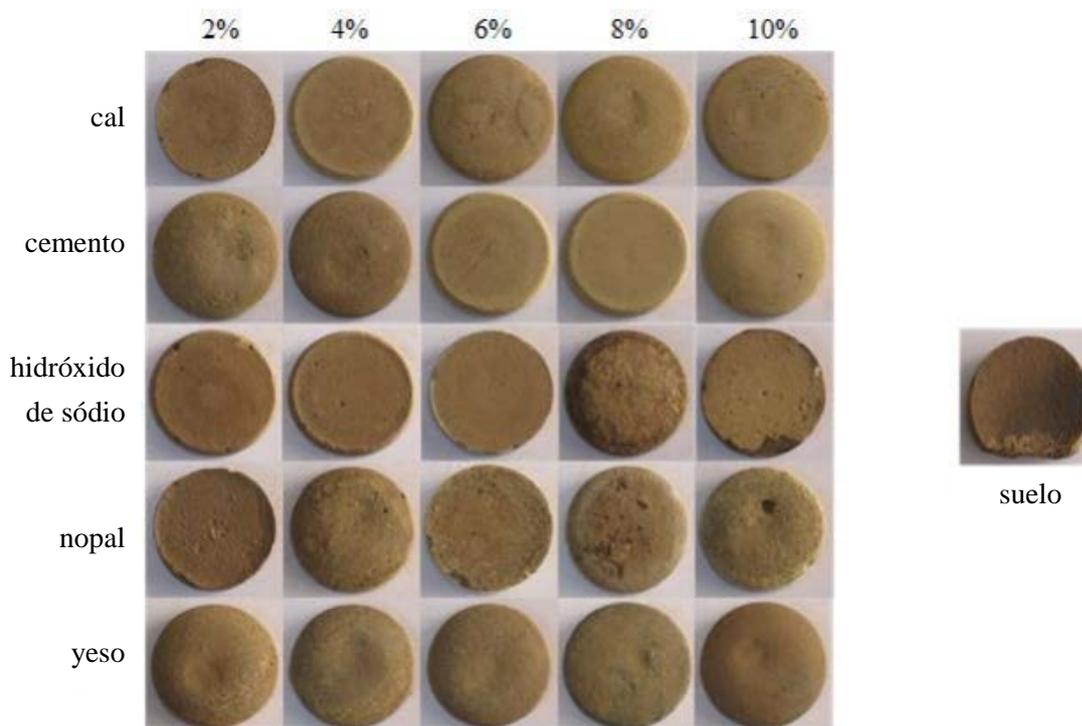


Figura 1. Comparativa de la variación colorimétrica entre la muestra testigo de suelo natural y las distintas mezclas con proporciones de estabilizantes. Fuente: Martínez y otros, 2018

4.3. Propiedades mecánicas

En las figuras 2, 3 y 4 pueden observarse respectivamente los valores de resistencia a compresión, flexión y tensión de las muestras suelo-estabilizante, permitiéndole identificar la afectación de cada adición a las propiedades mecánicas del material, siendo esto fundamental para los usos de edificación y construcción.

⁵ Acrónimo de Commission Internationale de l'Éclairage

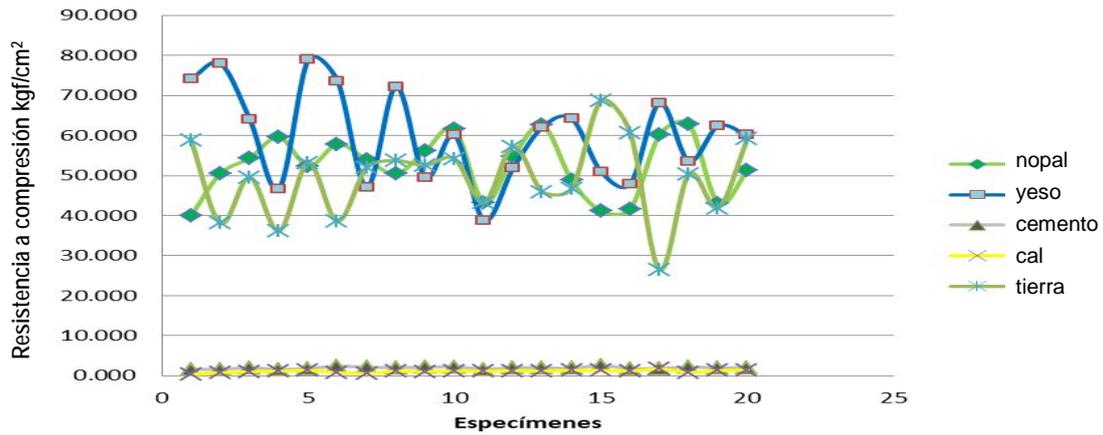


Figura 2. Resistencia a compresión en cubos

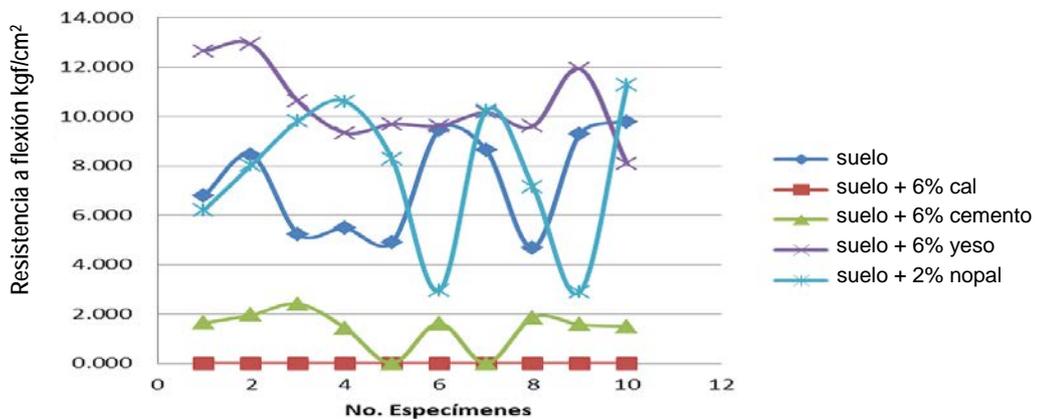


Figura 3. Resistencia a flexión en prismas

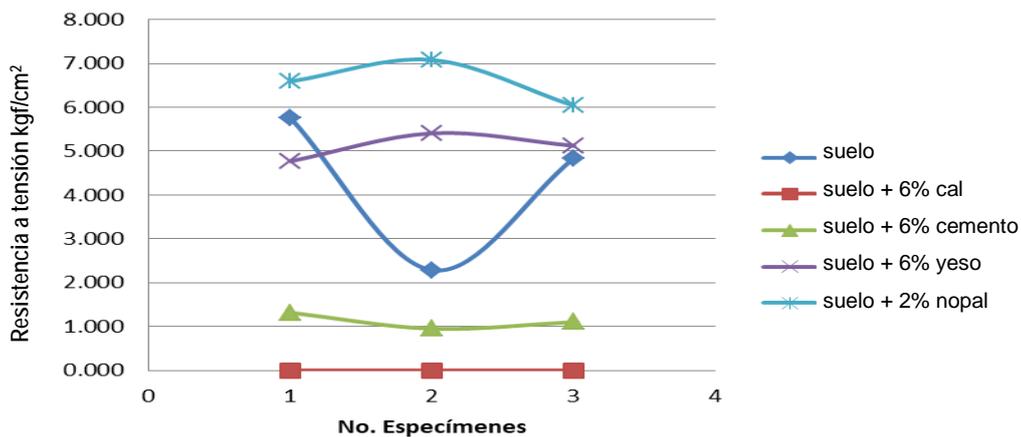


Figura 4. Resistencia a la tensión en briquetas

Los valores de compresión fueron comparados mediante una ecuación de correlación simple con los valores de VPU, para de este modo poder estimar el módulo de elasticidad dinámico de las mezclas, siendo este difícil de obtener para materiales de tierra.

Tabla 8. Ecuaciones de correlación simple entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión

Material	Ecuación
Suelo natural	$Y = -0.0334x + 89.5690$
Suelo + 6% cal	$Y = -1E-0.5x + 1.1115$
Suelo + 6% cemento	$Y = 0.0034x + 0.7225$
Suelo + 6% yeso	$Y = 0.0112x + 45.3010$
Suelo + 2% m. nopal	$Y = -0.0118x + 67.2710$

Tabla 9. Ecuaciones de correlación simple entre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a flexión

Material	Ecuación
Suelo natural	$Y = -0.0274x + 39.0890$
Suelo + 6% cal	No resiste
Suelo + 6% cemento	$Y = 0.0059x + 3.7952$
Suelo + 6% yeso	$Y = -0.0024x + 14.3450$
Suelo + 2% m. nopal	$Y = -0.0099x + 19.8780$

5. CONCLUSIONES

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 de la arcilla; los porcentajes de cemento presentaron un comportamiento similar a las adiciones de cal, ya que ambos materiales fueron los que propiciaron mayor disminución de la plasticidad. En las adiciones mayores de 6 % del hidróxido de sodio y del mucílago de nopal se generaba una cubierta de cristales, en el caso del hidróxido de sodio, y una especie de lama en el mucílago de nopal.

Sobre los resultados del valor del pH de las mezclas, se observó que con la adición del yeso y del nopal no es posible cumplir con la norma ASTM D 6276, ya que los valores son menores a 12.4. Por otro lado, las adiciones de hidróxido de sodio (4, 6, 8 y 10%), y cemento y cal (8 y 10%) si cumplen los requisitos. No obstante, debe tomarse en cuenta que la norma únicamente ha sido diseñada para el uso de la cal como estabilizante, por lo que es necesario expandir la investigación con otros materiales y probar su viabilidad.

Un punto importante a mencionar es que se genera un cambio notorio en el color de las mezclas con proporciones mayores a 6 %. Para las diferentes adiciones, sólo en la mezcla de yeso conserva coloración similar con todos los porcentajes. Este aspecto puede ser importante para los trabajos de restauración y conservación de arquitectura patrimonial con acabados visibles en tierra, ya que siempre se busca preservar el aspecto original de estas edificaciones sin aplicar grandes cambios estéticos. Sin embargo, si se busca desarrollar un material de construcción con condiciones de durabilidad sin tener en cuenta estos requerimientos, puede obviarse el factor de la colorimetría.

Las pruebas mecánicas se realizaron en especímenes con porcentajes de 6% de adición máximo para guardar la similitud en las tonalidades de los especímenes. Respecto a las propiedades mecánicas, mientras que las adiciones de 6% de cemento y cal fueron las mejores para controlar los cambios volumétricos; sin embargo, obtuvieron valores bajos en su capacidad de carga a compresión, flexión e incluso nula para la tensión, 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 dando un mejoramiento respecto a la muestra testigo. El mucílago de nopal presentó 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 se obtuvo el valor de la velocidad VPU (m/s), el cual se correlacionó directamente con la resistencia mecánica obtenida de la prueba destructiva ya que no se puede obtener directamente el módulo de elasticidad dinámico con el equipo ya que la ecuación está diseñada para determinar el módulo de elasticidad dinámico del concreto, y así se obtuvo una ecuación que determina la resistencia del suelo arcilloso estudiado, en base a la velocidad de pulso.

El presente estudio cuenta con el valor de tomar en cuenta varias propiedades de los materiales: tanto la capacidad mecánica, como los cambios volumétricos, la percepción estética, o la densidad y estructura interna de las muestras entre otros. Es importante discernir en qué propiedades de los materiales se quiere actuar en función del uso constructivo y las características requeridas. Resulta muy interesante ver como ciertos estabilizantes mejoran algunas propiedades mientras que afectan negativamente en otras; por ello, es importante lograr un balance entre el porcentaje y el tipo de adición. En general, es de suma importancia continuar con el estudio de los materiales de construcción con tierra, por sus excelentes cualidades y el bajo impacto ambiental que presentan.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, R.; Saucedo C.; Montesinos, M.; Ramírez, E.; Morales, R.; Uceda, S. (2015). Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 15. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca/PROTERRA. p.28-39
- Aranda-Jiménez, Y.; Suarez-Domínguez, E. (2019). La huella de carbono en elementos de arquitectura con tierra. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 19. San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA. p. 119-126
- ASTM D6276-19 (2019). Standard test method for using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilization, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. En: L. Barba Pingarrón; I. Villaseñor Alonso, La cal: historia, propiedades y usos. Distrito Federal: UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas; ANFACAL. p.49-72
- Juárez Badillo, E.; Rico Rodríguez, A. (2006), Mecánica de Suelos Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, 3ª edición, 13ª reimpresión. México: Editorial Noriega Limusa.
- Klein, Cornelis; Dana, J. D.; Hurlbut Jr., Cornelius S. (2003), Manual mineralogía: basado en la obra de J. D. Dana. España; Editorial Reverté.
- Martínez, W.; Torres-Acosta, A. A.; Alonso-Guzmán, E. M.; Chávez, H. L.; Lara, C.; Bedolla, A.; López, H. Z.; Ruvalcaba J. L. (2018). Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives. *Revista ALCONPAT*, 8 (2), p. 163 – 177
- Navarro Mendoza, E. G.; Sánchez Calvillo, A.; Alonso Guzmán, E. M. (2019). Estabilización de suelos arcillosos con cal para firmes y blocks. En C. Neves, Z. Salcedo Gutiérrez, O. Borges Faria (ed.), Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 19. San Salvador, El Salvador: FUNDASAL / PROTERRA. p.284-201
- Sánchez-Calvillo, A.; Alonso-Guzmán, E. M.; Ruvalcaba-Sil, J. L.; Martínez-Molina, W.; Chávez-García, H. L.; Bedolla-Arroyo, J. A.; Velázquez-Pérez, J. A. (2020). Colorimetry of clays as a tool to identify soil materials for earthen buildings restoration. *Key Engineering Materials*, 862, 56-60. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.862.56>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de Investigación Científica de la UMSNH, del CONACYT con las 315660 y 315680, y del Programa SEP-PRODEP. Además, los autores agradecen el apoyo del proyecto ganador del premio del 1r Concurso Internacional de Proyectos de Cooperación y Desarrollo del 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020), Barcelona, España. También fue invaluable el soporte técnico de los Ingenieros Civiles Amado Flores Rentería y Mario Alberto Olguín Domínguez, y del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

AUTORES

Elia Mercedes Alonso-Guzmán, doctora en química por la Universidad Nacional Autónoma de México y profesora investigadora en la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Trabaja en la caracterización de materiales de construcción patrimoniales, históricos, vernáculos, artísticos, tradicionales, nano y sustentables. Publicaciones completas en: <https://www.researchgate.net/profile/E-Alonso-Guzman>

Wilfrido Martínez-Molina, doctor en ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro y profesor investigador en la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Trabaja en la durabilidad y mecanismos de daño de los distintos materiales de construcción: patrimoniales, históricos, vernáculos, artísticos, tradicionales, nano y sustentables. Publicaciones completas en: <https://www.researchgate.net/profile/Wilfrido-Martinez-Molina>

Adrià Sánchez-Calvillo, doctorante en arquitectura, máster en construcción avanzada en la edificación, especialista en restauración de monumentos, graduado en arquitectura técnica y edificación. Investigador de doctorado y profesor en la Universidad Michoacana San Nicolás Hidalgo. Director del proyecto DBMC 2020 para el estudio del patrimonio vernáculo del estado de Michoacán, México. Publicaciones completas en: <https://www.researchgate.net/profile/Adria-Sanchez-Calvillo>

Hugo Luis Chávez-García, profesor investigador en la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Trabaja con pruebas no destructivas con los distintos materiales de construcción: patrimoniales, históricos, vernáculos, artísticos, tradicionales, nano y sustentables. Publicaciones completas en: <https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Garcia-2>

José Luis Ruvalcaba Sil, doctor en ciencias, jefe del departamento de física experimental en la Universidad Nacional Autónoma de México y coordinador del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural (LANCIC). Sus líneas de investigación incluyen la física atómica y molecular y el estudio y preservación del patrimonio cultural. Publicaciones completas en: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Luis-Ruvalcaba-2>