

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD POR MEDIO DE LA DIMENSIÓN FRACTAL

Yolanda G. Aranda-Jiménez¹; Edgardo J Suarez- Domínguez²; Victor Garcia Izaguirre³

¹ Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Campus Tampico-Madero, Circuito interior S/N. Tampico, Tamaulipas. México. ¹yoli212@yahoo.com.mx; ³vgarcia@uat.edu.mx

² Mexican Institute of Complex Systems. Calle Tlaxcala 111, Col. Unidad Nacional. Ciudad Madero, Tamaulipas, México. jsd@mics.edu.mx

Palabras clave: tierra vertida, arcillas expansivas, estabilizantes, dimensión fractal.

Resumen

En los diferentes sistemas constructivos que involucra la arquitectura con tierra se busca trabajar con el suelo idóneo compuesto por arcillas de tipo caolinitas o de baja plasticidad, arena y limo; sin embargo, la realidad es muy diferente encontrándose en el área a construir arcillas expansivas, o suelos ricos en limo y todos los elementos adversos, por lo que es fundamental investigar acerca de aquellos elementos que se han denominado no aptos para la construcción con tierra. El análisis fractal de las superficies permite conocer la complejidad que puede tener un sistema y evaluarlo; se ha utilizado para análisis de rugosidad y porosidad, en este caso se correlaciona la uniformidad de una superficie sólida con la imagen analizada según el programa Image J la cual proporciona dicha dimensión. En el presente trabajo se realizó un análisis de estabilidad de cuatro tipos de arena mezclada con arcilla del tipo montmorilonita adicionadas o estabilizadas con cal y cemento, a partir de las uniformidades producidas en la superficie y cuantificadas con la dimensión fractal. Se encontró que el tamaño de partícula de arena interviene en los resultados y que la cal en un 3% y el cemento en un 6% no hay diferencia significativa de evolución temporal sino hasta los 28 días.

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura de tierra es cada vez más aceptada a nivel mundial para construir sustentablemente hoy en día, sin embargo requiere de investigación, tanto de los suelos a utilizar como de los sistemas constructivos, así mismo es fundamental investigar sobre las arcillas, componente principal de este tipo de arquitectura. Encontrar suelos expansivos en el área de trabajo, llevó a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto, en cuanto a la estabilidad, respecto al análisis fractal de superficie, de una arcilla del tipo montmorilonita con cal y cemento y así utilizarlas en la arquitectura de tierra?

2. DESARROLLO

Partiendo de los numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla (Juarez-Badillo; Rico-Rodrigues, 2000). Sin embargo, ésta puede encontrarse naturalmente como parte del suelo.

En México, los suelos expansivos ocupan el 8% del territorio, concentrándose la mayor parte al centro de la República; las arcillas se clasifican en arcillas de alta plasticidad y baja plasticidad. También pueden clasificarse como: caolinitas, liltas y montmorilonitas.

Se han documentado investigaciones experimentales donde se estabilizan las montmorilonitas solo con cal (Houghua; Chunji; Bi-Wei, 2013), empleando métodos que se describen en los fundamentos teóricos para la identificación de arcillas como: rayos X, microscopio electrónico y el método químico, sin que a la fecha se haya documentado una investigación con cal y cemento a la vez potencializando las ventajas de ambos.

En un estudio, Hossain y Mol (2011) analizan las propiedades de durabilidad de 14 mezclas de suelo arcilloso expansivo, adicionado con puzolanas o bien utilizando cenizas volantes

con alto contenido en calcio y cemento, otro estudio, realizado por Kolia, Kasselouri-Rigopoulou y Karahalios (2005) se demuestra la eficacia de la utilización de estas cenizas reduciendo el cemento, en pavimentos. Dos años después se prueba la estabilidad de las arcillas en pavimentos estabilizándolo con cemento en el estudio de Giannattasio y Gustavo (2006) para viviendas de interés social, sin embargo solo se analizan las propiedades físicas, dejando a un lado el aspecto económico.

Por otro lado Jommi (2011) reporta resultados exitosos tras estabilizar suelos expansivos con hidróxido de calcio, menciona que se comporta como un limo. Otros han utilizado la lechada de cal para estabilizar las arcillas tales como Rao y Thyagaraj (2003).

Se ha utilizado la dimensión fractal para medir la porosidad de muestras de tierra vertida, encontrando una mayor uniformidad (Suárez-Dominguez; Aranda-Jiménez, 2013).

2.1 Objetivo

Objetivo general

Determinar la dimensión fractal a las superficies de mezclas arena-arcillas expansivas adicionadas con cal y cemento y mostrar las diferencias con respecto a una muestra sin cemento.

Objetivos específicos

- Encontrar proporciones de agua adecuadas para la elaboración de mezclas.
- Analizar con la dimensión fractal las superficies de las muestras
- A partir de los resultados obtenidos mencionar los posibles usos en la arquitectura con tierra.

2.2 Hipótesis

Las mezclas estabilizadas con cal y cemento presentan menor dimensión fractal, que indica menor número de fisuras que aquellas estabilizadas con un solo estabilizante mineral.

2.3 Metodología

La presente investigación es experimental debido a que consiste en manipular de forma intencional una o más variables independientes (las cuales se consideran la causa en una relación de variables) y el efecto provocado por dicha causa se le llama variable dependiente (consecuente o efecto). Para este caso la variable independiente será la cantidad de bentonita empleada y la variable dependiente será las fisuras o rugosidad presentada.

El alcance del trabajo es exploratorio pues se pretende examinar una problemática poco estudiada desde la perspectiva fractal se ha abordado sucintamente en tierra vertida. También es correlacional pues se desea conocer la relación entre dos o más variables en un determinado contexto y explicativo debido a que se tratará de explicar por qué ocurre un fenómeno, en qué condiciones se manifiesta o la razón por la que se relacionan dos o más variables que en este caso.

2.4 Procedimiento

Para el desarrollo de las pruebas se obtuvieron diferentes muestras de arena a utilizarse en la elaboración de mezclas: arena de río lavada, arena de mar y arena de Otawa. A la arena de río se le retiraron todos los carbonatos presentes con lavado de ácido clorhídrico al 15% dejando reposar durante 24 horas. Posteriormente se retiró el exceso de ácido a partir de enjuagues con agua destilada y se escurrió durante 1 hora. La arena de Otawa fue adquirida en grado industrial. La arena de mar se enjuagó completamente con agua desionizada. Todas las muestras se secaron a 110°C de temperatura durante un periodo de 3 horas.

Se realizaron mezclas de acuerdo a las proporciones señaladas en la Tabla 1.

Tabla 1.- Proporciones en peso para la elaboración de mezclas estabilizadas con cemento y cal

Componente	Proporciones (%)			
	Mezcla 1 arena de Ottawa	Mezcla 2 arena de río ¹	Mezcla 3 arena de mar ²	Mezcla 4 ³ arena de río
Cemento	6	6	6	0
Arena	87	87	87	87
Cal	3	3	3	3
Bentonita	4	4	4	4

¹ sin carbonatos;

² lavada

³ muestra control

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla se buscó un revenimiento de 6,5 mediante el uso de conos invertidos. Esta varió en función a la arena utilizada, de tal manera que para la mezcla 1 se utilizaron 12,5%; en la mezcla 2, 16%, y en la mezcla 3, 15,5%.

En todos los casos, se añadió el agua en volumen posterior al mezclado de todos los componentes sólidos de las muestras.

Una vez realizadas las mezclas, se vertieron las cantidades indicadas en la tabla en un recipiente cilíndrico de 2,5 cm de diámetro x 1 cm de altura, vibrando manualmente en recipiente durante 2 minutos. El procedimiento se realizó por triplicado. Las muestras se dejaron secar a condiciones normales de presión y temperatura.

Para conocer el efecto de una atmósfera de CO₂ se repitió lo anterior pero introduciendo las muestras en un reactor cilíndrico donde se inyectó dióxido de carbono en cápsulas a 3 psi. En este caso, primero se desplazó por vacío el aire presente para posteriormente permitir el ingreso del CO₂ grado reactivo marca infra contenidos en cápsulas de alta presión.

Se tomaron fotografías a las muestras de sólido obtenidas, después de 1, 7 y 28 días. A dichas muestras se les determinó la porosidad y se caracterizó la superficie por el método de la dimensión fractal. Las superficies se observaron con un microscopio *Konus College #5302*, ocular *WF 15x*, con aumento 10X. Los patrones fueron fotografiados con una cámara Sony DSC-W530 Cyber Shot 14.1 megapíxeles, lente Carl Zeiss y zoom óptico 4X con una resolución de 7 megapíxeles.

A los patrones tomados se les determinó la dimensión fractal por conteo de caja mediante el programa Image J v 1,40 g en el cual cada imagen a color se convirtió en una imagen de 8 bits, a partir de la cual se obtiene una imagen binaria del patrón a la cual se le determinó la dimensión fractal vertical y horizontal de las imágenes, así como su rugosidad.

- Dimensión fractal

Los patrones que forman los sólidos, como los aquí estudiados, se caracterizaron a través de la dimensión fractal de capacidad (Γ_c), definida como:

$$\Gamma_c = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_0(r)}{\ln(1/r)}$$

Donde r es el tamaño de los N sitios en los cuales se divide la imagen en 2D y N_0 es el número de sitios en los cuales se detecta la presencia de sustancia.

El valor de la dimensión fractal en un sistema que puede variar en dependencia de los procesos dinámicos que tienen lugar y de su naturaleza aleatoria por lo que puede describir un sistema a partir de su morfología. En este trabajo, las morfologías correspondieron a las imágenes obtenidas de acuerdo a la parte experimental anteriormente descrita, los procesos dinámicos son referidos a las interacciones entre las partículas que conforman a la tierra vertida así como las características de las mismas, principalmente su tamaño.

En este sentido se correlacionarán los resultados experimentales observados a partir de la rugosidad y fisuras con respecto a la dimensión fractal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados de la dimensión fractal por conteo de caja

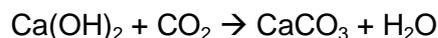
Tabla 2 – Dimensión fractal por conteo de caja

Tipo de arena	Promedio			Error de la medición		
	1 día	7 días	28 días	1 día	7 días	28 días
Arena de Ottawa	1,9450	1,9450	1,9489	0,0089	0,0089	0,0094
Arena de río sin carbonatos	1,9272	1,9272	1,9304	0,0211	0,0211	0,0170
Arena de mar lavada	1,9456	1,9456	1,9346	0,0072	0,0072	0,0140
Arena con cal y bentonita sin cemento	1,9385	1,9385	1,9409	0,0149	0,0149	0,0099
CO₂						
Arena de Ottawa	1,9461	1,9461	1,9266	0,0162	0,0162	0,0307
Arena de río	1,9299	1,9299	1,9372	0,0088	0,0088	0,0087
Arena de mar	1,8955	1,8955	1,8453	0,0044	0,0044	0,0069

Puede notarse que el resultado promedio aproximado para la arena de Ottawa fue de 1,95, que fue estadísticamente similar que la de arena de mar lavada. Sin embargo, la arena de río sin carbonatos presentó una menor dimensión fractal al igual que la arena con cal, bentonita y cemento.

Estos resultados están en concordancia con la hipótesis de una menor complejidad para la de río sin carbonatos, probablemente por la ausencia de partículas no uniformes carbonatadas y por tanto homogeneidad de las partículas de arena. Para ello se hizo pasar la muestra de arena por un conjunto de tamices encontrando más del 95% de su contenido en la malla 80. En el caso de la arena de Ottawa se encontró el principal contenido (más del 90%) en malla 40.

Para los resultados con respecto a las muestras sometidas a un curado en ambiente de dióxido de carbono se encontró una mayor homogeneidad en la superficie de sólido estudiada, a excepción de la arena de Ottawa que no tuvo diferencias significativas. Es posible que se haya potencializado la reacción:



Experimentando entonces una homogenización temporal. En cuanto a los perfiles de rugosidad no se detectan diferencias a lo largo del tiempo, sin embargo si se visualizan en los procesos de curado con y sin CO₂. Por último es necesario mencionar que aquellas muestras sometidas al ambiente de CO₂, se detectaron un mínimo de fisuras

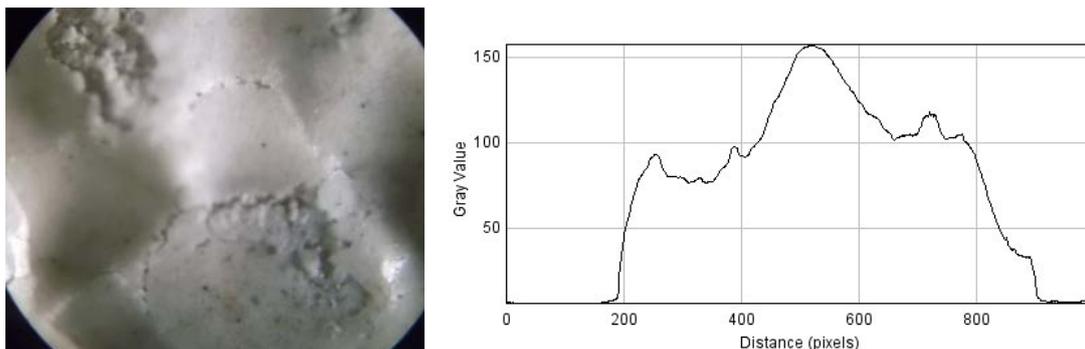


Figura 1 - Arena de Ottawa y corte de la superficie sin CO₂

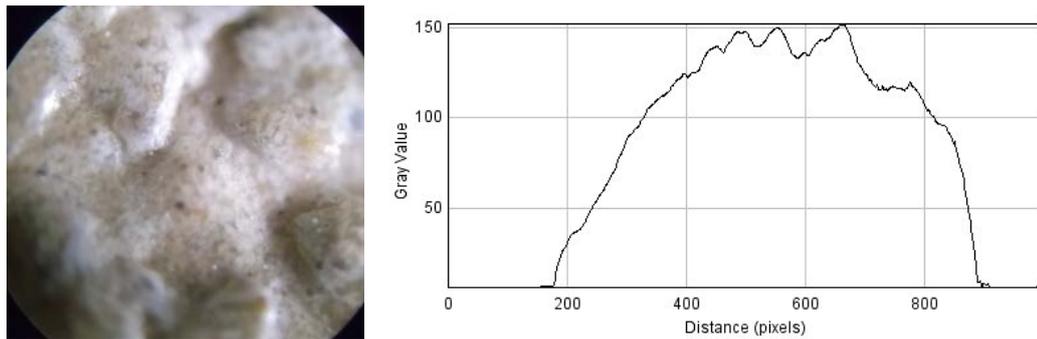


Figura 2 – Arena de río sin carbonatos y corte de la superficie sin CO₂

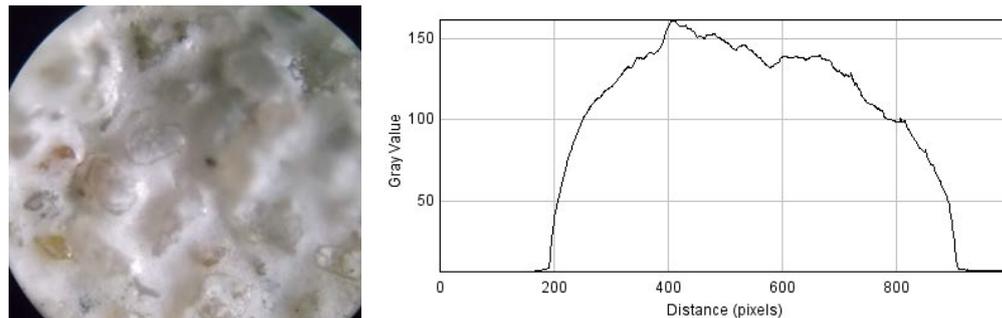


Figura 3 - Arena de mar lavada y corte de la superficie sin CO₂

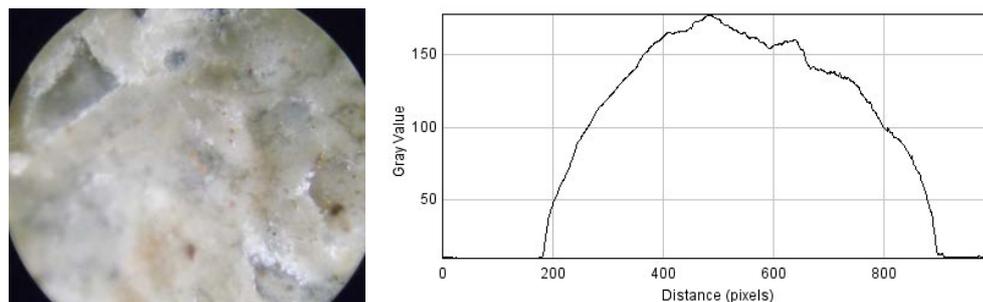


Figura 4 – Arena con cal y bentonita sin cemento y corte de la superficie sin CO₂

La dimensión fractal sirve para determinar la uniformidad de las superficies por lo que su uso dependerá de los estudios que la correlacionan con las fisuras encontradas en las superficies. Estos estudios a futuro permitirán hacer evaluaciones preliminares de las mezclas.

4. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se determinó la dimensión fractal por conteo de caja de diferentes mezclas encontrando valores de 1,9272 hasta 1,9489; no se encontró diferencia significativa de evolución temporal en la dimensión fractal si no hasta los 28 días.

Parece existir una modificación superficial al añadir cemento a las muestras. Se encontró que el porcentaje adecuado de agua añadido fue de 12,5% al 16% sobre la mezcla. Es necesario profundizar en el análisis de las variaciones de cemento.

Por último se hace necesario ampliar los estudios realizados para así poder determinar los usos de estas arcillas estabilizadas en la arquitectura de tierra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Giannattasio, R.; Gustavo, V. (2006). Estabilización química de las arcillas expansivas mediante el uso de cemento a fin de emplearlo como base de pavimento rígido en el desarrollo de proyectos de viviendas de interés social. Universidad Nueva Esparta. p.1-3

Hossain, K; Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*

Houghua, Z. Jun, L. Chunji, Z. Bi-Wei, G. (2013). Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27(1). 1-34pp.

Juarez-Badillo, Rico-Rodriguez (2000). *Mecánica de suelos*. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. Editorial LIMUSA. México ISBN 968-18-0069-9.

Kolias, S.; Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios, A. (2005), Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005), p301–313

Jommi, C. (2011). Reducción de la expansión de las arcillas con el uso de cal. *Facoltà di Ingegneria Civile, Ambiente e Territoriale*. p.1-126

Rao, S.M.; Thyagaraj, T. (2003). Lime slurry stabilization of an expansive soil. *Geotechnical Engineering*. 156(3). p.139-146

Suárez-Dominguez; Aranda-Jimenez (2013). Diferencia fractal en superficies de tierra vertida con suelo de Tamaulipas. *Revista Contexto: Universidad Autónoma de Nuevo León*
<http://contexto.uanl.mx/num7.html>

AUTORES

Yolanda Aranda-Jimenez, Doutora en Arquitectura por la UAT. 2010, miembro de Proterra desde el 2005. Catedrática TC. Perfil Promep. Premio Tesis de Calidad 2010.

Edgardo Suarez-Dominguez, Arquitecto por la UAT. Master en Ingeniería. Lic. en Química. Director del Instituto MICS. Estudiante del Doctorado en Mecánica de Fluidos UNAM.

Victor Garcia Izaguirre, doutor en Arquitectura por la Universidad de Sevilla, miembro del CA perfil Promep