



“ABATIMIENTO DE EXPANSIÓN EN SUELO APLICANDO CONCRETO PERMEABLE”

“EXPANSION ABATEMENT IN SOIL BY APPLYING PERMEABLE CONCRETE”

Verdín-Reyes Blanca Angélica ^{1*}, López- Lara Teresa ¹, Hernández- Zaragoza Juan Bosco ¹, Horta-Rangel Jaime Moisés ¹

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas, S/N, Santiago de Querétaro, Qro., 76000, México

* Autor de correspondencia, correo: blanca-angelica.verdin@outlook.com

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar si la aplicación de estructuras fabricadas con concreto permeable ayuda a disminuir el potencial de expansión de un suelo. Para ello, se extrajo una muestra de suelo en Querétaro, Querétaro y se sometió a ensayos geotécnicos para caracterizarlo. Posteriormente se estudiaron 3 dosificaciones distintas de concreto permeable de baja resistencia a la compresión, para determinar la mezcla óptima para la elaboración de las estructuras de concreto. Las dimensiones de las estructuras investigadas se establecieron en 8 cm de diámetro y alturas de 5 y 7 mm aproximadamente. Se realizaron pruebas de expansión al suelo natural y posteriormente al suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable. Los resultados mostraron que el suelo en estudio corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH) y la estructura de concreto permeable más favorable fue la de 7 mm de altura, al abatir el 85% de la expansión.

Palabras clave: Arcilla, cimentación, concreto permeable, expansión, suelo expansivo.

Abstract

The objective of this research was to analyze if the application of structures made with permeable concrete helps to decrease the expansion potential of a soil. To do this, a soil sample was extracted in Querétaro, Querétaro, and subjected to geotechnical tests to characterize it.

Subsequently, 3 different dosages of permeable concrete of low compressive strength were studied to determine the optimal mixture for the elaboration of the concrete structures. The dimensions of the structures investigated were established in 8 cm of diameter and heights of 5 and 7 mm approximately. Expansion tests were carried out on the natural soil and subsequently on the soil with the incorporation of permeable concrete structures. The results showed that the soil under study corresponded to an inorganic silt of high compressibility or high plasticity (MH) and the most favorable permeable concrete structure was the 7 mm in height, by lowering 85% of the expansion.

Keywords: Clay, expansion, expansive soil, foundation, permeable concrete.

1. Introducción

Los suelos expansivos existen desde hace millones de años, sin embargo, los problemas que ocasionan este tipo de suelos no habían sido identificados y reconocidos hasta hace apenas unas décadas por varios especialistas. Si bien, aunque ya se han realizado varios tipos de remediaciones, estabilizaciones y diseño de cimentaciones especiales para este tipo de suelo, la problemática aún continúa sin resolverse satisfactoriamente.

En los problemas atribuidos a los suelos expansivos intervienen varios factores, como las características físicas y químicas de las arcillas, las condiciones ambientales donde se ejecutan las obras civiles, la topografía del terreno, las remediaciones o estabilizaciones previas a la construcción y las cimentaciones que se emplean en este tipo de suelo, pues es común que casi no se realicen este tipo de correcciones ni se empleen las cimentaciones adecuadas debido al alto costo que representan.

La distribución geográfica de los suelos expansivos a nivel mundial corresponde aproximadamente a 335 millones de hectáreas, encontrándose en países como Angola, Argelia, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Colombia, Cuba, Ecuador, España, Etiopía, Estados Unidos de América, Ghana, India, Irak, Irán, Kenia, México, Marruecos, Mozambique, Myanmar, Perú, Rusia, Sudáfrica, Turquía, Venezuela, entre otros [16].

En la República Mexicana se ha documentado la presencia de 16.5 millones de hectáreas de suelo expansivo (8.6% de su superficie), particularmente en Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Sonora, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas, Campeche, entre otros.

Las pérdidas económicas debidas a problemas de suelos expansivos superan los 2000 millones de dólares al año, lo que supera el promedio anual de los daños causados por inundaciones, huracanes, sismos y tornados [18].

A nivel mundial se han desarrollado varias investigaciones para reducir la expansión de los suelos,

así como para su estabilización, como la de Abu-Zreig, et al, Flórez et al., Viswanadham et al. y Abd El Halim, A.A. y El Baroudy, A.A. [2,17,25,1].

Abu-Zreig, et al. realizaron un estudio para observar el efecto de exposición a altas temperaturas, en tres suelos arcillosos obtenidos del norte de Jordán [2]. Flórez et al. realizaron la estabilización química con cenizas volantes en los suelos expansivos de una zona de San José de Cúcuta, Colombia [17]. Viswanadham et al. estudiaron los suelos remodelados expansivos, los cuales estaban reforzados con geofibras [25].

Abd El Halim, A.A. y El Baroudy, A.A. evaluaron como el aserrín fino puede modificar las propiedades hidrofísicas de la expansión de suelos obtenidos del delta medio del Nilo, Egipto [1].

En México se han realizado diversas investigaciones, a cargo de López-Lara et al. [2010], López-Lara et al. [2014], Rodríguez, N.A. y Rodríguez, J. C. para disminuir el potencial de expansión de los suelos [20, 21,24,23].

López-Lara et al. [2010], realizaron una investigación para medir el efecto del poliuretano [polímero] en la disminución del potencial de expansión de suelos [20]. López-Lara et al. [2014], presentaron una propuesta para disminuir la expansión de suelos, la cual consiste en estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos [21].

Rodríguez, N.P. presentó una metodología para abatir la expansión del suelo mediante la introducción de estructuras tubulares porosas [24].

Rodríguez, J. C. analizó la disminución de la expansión de un suelo mediante la combinación de un tratamiento químico con cal y la aplicación de sobrecarga [23].

En la presente investigación se ha propuesto un modelo de cimentación basado en la colocación de estructuras elaboradas con concreto permeable, sobre la superficie del suelo, con la finalidad de abatir la expansión de una manera económica y sobre todo fácil de construir e implementar.

A continuación, se expondrá la metodología empleada, los resultados obtenidos, la discusión de dichos resultados, las conclusiones pertinentes y las referencias utilizadas en todo el desarrollo de la investigación.

2. Metodología

El proyecto se efectuó en 5 etapas:

- Determinación de los parámetros del suelo natural
- Modelo suelo-estructura
- Análisis experimental
- Experimentación final
- Análisis de resultados

2.1. Determinación de los parámetros del suelo

a) Muestreo de suelo.

Las muestras de suelo que se emplearon en la presente investigación fueron extraídas en el espacio 60, en la calle Loma de Sangremal, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. Las coordenadas de dicho terreno son 20°35'49.6" latitud norte y 100°27'47.1" longitud oeste. El suelo se obtuvo mediante el método de Pozo a Cielo Abierto (PCA), empleando la retroexcavadora, a una profundidad de 2.2 metros. La exploración y muestreo se realizó bajo los lineamientos de la norma ASTM-D420 [1993] [7].

b) Caracterización geotécnica.

El presente proyecto precisa de un suelo expansivo, por lo que es indispensable analizar sus propiedades a través de una caracterización geotécnica para corroborar que cumpla con los requerimientos solicitados. Para la caracterización geotécnica se requiere realizar diferentes pruebas, tales como análisis granulométrico, límites de consistencia, contenido de agua, determinación del peso específico de la masa del suelo y peso específico relativo de los sólidos del suelo.

• *Análisis granulométrico.* De acuerdo al tamaño predominante de partículas que componen un suelo, se pueden diferenciar gravas, arenas, limos o arcillas. Por lo general se emplean dos métodos para determinar la distribución de tamaño de partículas de un suelo: [1] análisis de tamiz para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro, y [2] análisis de hidrómetro para tamaños de partículas inferiores a 0.075 mm de diámetro [18]. El análisis del tamiz y el análisis del hidrómetro se realizaron acatando la norma ASTM-D422 [8].

• *Límites de Atterberg.* Mediante el límite líquido, el límite plástico, el índice de plasticidad y la contracción lineal se pueden conocer las características de la parte fina del suelo. Las pruebas se sujetan a la norma ASTM-D4318 [12]. Dependiendo del contenido de

humedad, el suelo se divide en cinco estados: líquido, semilíquido, plástico, semisólido y sólido [23].

• *Contenido de agua.* Es indispensable conocer la humedad natural del suelo extraído, mediante la norma ASTM-D2216 [1992] [10]. Se obtiene una muestra representativa del suelo muestreado de forma alterada y se registra su peso. Posteriormente se seca al horno durante 24 horas a una temperatura constante de 105° a 110° C. Al término de las 24 horas, la muestra se pesa nuevamente.

• *Peso específico por inmersión en agua.* Mide la relación entre el peso del suelo y su volumen (peso volumétrico), de acuerdo a la norma ASTM-D4531 [13]. Se empleó el método B o método de cera de parafina.

• *Peso específico relativo de sólidos.* “El peso específico relativo se define como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua, a 4°C, destilada y sujeta a una atmósfera de presión” [18]. La prueba se ejecutó bajo la norma ASTM-D854 [9].

c) Clasificación del suelo.

Es necesario clasificar el suelo muestreado siguiendo los requerimientos de la norma ASTM-D2487 con base a los datos recabados en la caracterización geotécnica y sobre todo que el suelo extraído cumpla con la clasificación CH (arcilla de alta compresibilidad) u MH (limo inorgánico de alta compresibilidad) para la correcta ejecución de esta investigación [11].

d) Prueba de expansión.

Se requiere realizar la prueba de expansión a la muestra inalterada del suelo para determinar el porcentaje de expansión y la presión de expansión del suelo, para tener un parámetro de referencia a contrastar al implementar las estructuras de concreto permeable en el suelo y medir su efectividad. Dicha prueba se basará en la norma ASTM-D4546 [14]. Se eligió el método B, porque se analizará el suelo bajo la carga de sitio y una sobrecarga.

2.2. Modelo suelo-estructura

a) Dosificación de concreto.

Para la elaboración del concreto, primero se analizará la calidad del agregado pétreo, por lo que se determinará su granulometría (N.CMT.2.02.002/02) [27], peso volumétrico seco compacto (ASTM C 29/C 29M-97)[5], densidad y absorción (ASTM C 127 - 01)[4]. Se elaborarán

dosificaciones con relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 para observar cual es la mezcla que posee el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido [ASTM C642-06][6] y emplearla en la preparación de las estructuras de concreto permeable. La dosificación se realizará de acuerdo al apéndice 6, de la guía ACI 211.3R-02 [3].

b) Determinación de las dimensiones de las estructuras de concreto permeable.

Las dimensiones de las estructuras de concreto permeable estarán restringidas por el tamaño del anillo del consolidómetro, el cual posee 2 cm de alto por 8 cm de diámetro aproximadamente. La dimensión fija será el diámetro del anillo, de 8 cm de diámetro y la altura de las estructuras podrá variar dentro de los 2 cm de altura.

Figura 1
Simulación de las estructuras de concreto permeable.



c) Selección de la dosificación de concreto y las dimensiones de las estructuras de concreto permeable.

La dosificación a elegir en esta investigación corresponderá a la mezcla que posea el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido y las dimensiones de las estructuras de concreto permeable serán de 8 cm de diámetro y 5 y 7 mm de altura aproximadamente. Las alturas de las estructuras se seleccionaron de acuerdo a varios ensayos en laboratorio, donde se elaboraron con diferentes tamaño de agregado, donde se tomó en cuenta que dichas estructuras tuvieran el mínimo espesor posible, con el tamaño de agregado más grande y que mantuvieran adherencia entre agregados.

2.3. Análisis experimental

a) Descripción de variables.

Se pretende averiguar que estructura de concreto permeable puede disminuir más el porcentaje de expansión del suelo, donde el porcentaje de vacíos de la estructura es la variable independiente. Las estructuras de concreto se elaboraron con la dosificación que tuvo el mayor porcentaje de vacíos en estado endurecido y se utilizaron espesores de 5 y 7 mm aproximadamente. Cada prueba se repitió al menos 3 veces para cada espesor.

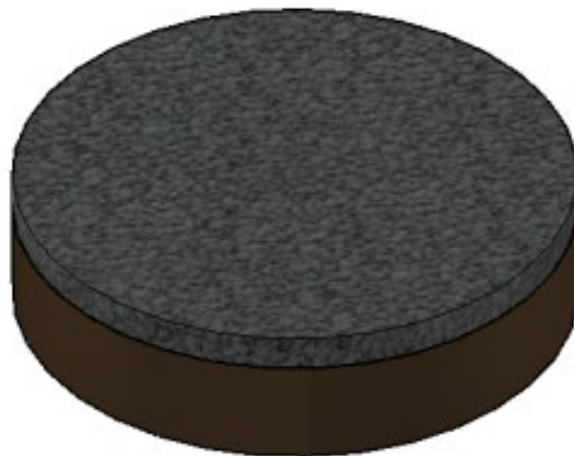
b) Elaboración de estructuras con concreto permeable.

Se elaborarán especímenes cilíndricos con concreto permeable de baja resistencia a la compresión, con la dosificación y dimensiones anteriormente descritas. Dichas dosificaciones se escalarán al volumen requerido para las dimensiones deseadas. El tamaño máximo de agregado será el retenido de la malla N°8

c) Aplicación de las estructuras de concreto permeable.

Una vez elaborados los especímenes, se labrará una muestra de suelo en el anillo del consolidómetro, a las alturas correspondientes, para que en la parte superior sea colocada la estructura de concreto permeable.

Figura 2
Simulación de la pastilla de suelo, con la aplicación de la estructura de concreto permeable en su superficie



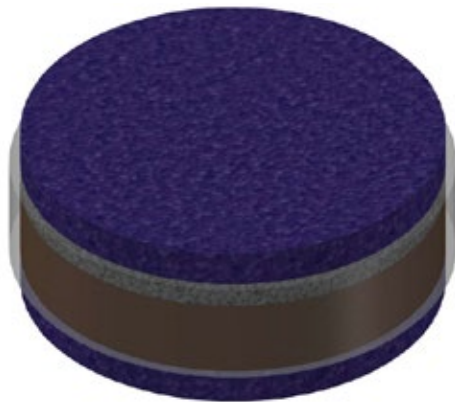
2.4. Experimentación final

a) Pruebas de expansión al suelo con la inclusión de las estructuras de concreto permeable.

Los especímenes de suelo junto con la estructura de concreto permeable colocada en su superficie, se llevarán al consolidómetro, para realizar las pruebas de expansión correspondientes.

Figura 3

Anillo de consolidación con extensiones, muestra de suelo, estructura de concreto permeable y piedras porosas



b) Determinación del comportamiento de disminución de la expansión.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede determinar qué porcentaje de expansión decreció al implementar las estructuras de concreto permeable.

2.5. Análisis de resultados

Se efectuará la comparación de los datos obtenidos en las pruebas iniciales de determinación de los parámetros del suelo y las pruebas de la experimentación final para verificar si se cumplió el objetivo de disminuir la expansión del suelo con la implementación de las estructuras de concreto permeable en su superficie.

3. Resultados y discusión

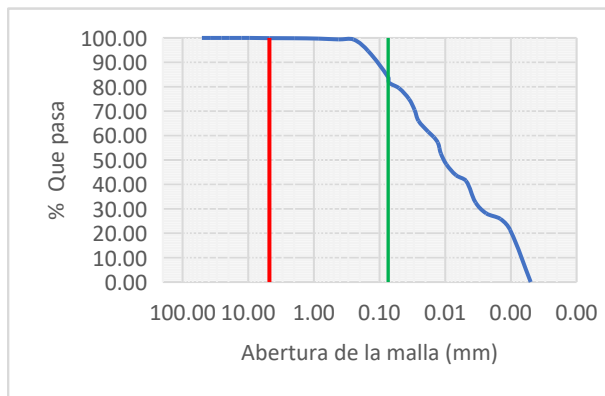
A continuación, se presentan los resultados de la granulometría vía seca y húmeda del suelo en estado

natural. En la tabla 1 se muestra el porcentaje de suelo que pasa a través de cada malla y en la figura 4 se presenta la curva granulométrica con los datos obtenidos.

Tabla 1
Granulometría vía seca y húmeda

Malla		Porcentaje que pasa
Denominación	Abertura (mm)	
2"	50.80	100.00
1 1/2 "	38.10	100.00
1 "	25.40	100.00
3/4"	19.10	100.00
1/2"	12.70	100.00
3/8"	9.52	100.00
N° 4	4.76	99.92
N°10	2.00	99.88
N°20	0.84	99.72
N°40	0.42	99.40
N°60	0.25	99.38
N°100	0.149	94.60
N°200	0.074	83.91
	0.0715	81.68
	0.0507	79.45
	0.0357	74.98
	0.0293	70.52
	0.0256	66.06
	0.0182	61.59
	0.0149	59.36
Hidrómetro	0.0130	57.13
	0.0123	54.90
	0.0117	52.67
	0.0096	48.20
	0.0068	43.74
	0.0048	41.51
	0.0034	32.58
	0.0024	28.12
	0.0015	25.89
	0.0010	21.42

Figura 4
Curva granulométrica vía seca y húmeda del suelo



En la tabla 2 se exponen los resultados de las propiedades medidas en la caracterización geotécnica del suelo, como límites de plasticidad por el método de la copa de Casagrande, humedad natural del suelo, peso específico relativo de sólidos y peso específico por inmersión en agua.

Tabla 2
Propiedades geotécnicas del suelo

Límite líquido [%]	76.39
Límite plástico [%]	38.50
Índice plástico [%]	37.89
Límite de contracción volumétrica [%]	22.7
Límite de contracción lineal [%]	19.97
Humedad natural del suelo [%]	34.46
Peso específico relativo de los sólidos	2.48
Peso específico [g/cm³]	1.50

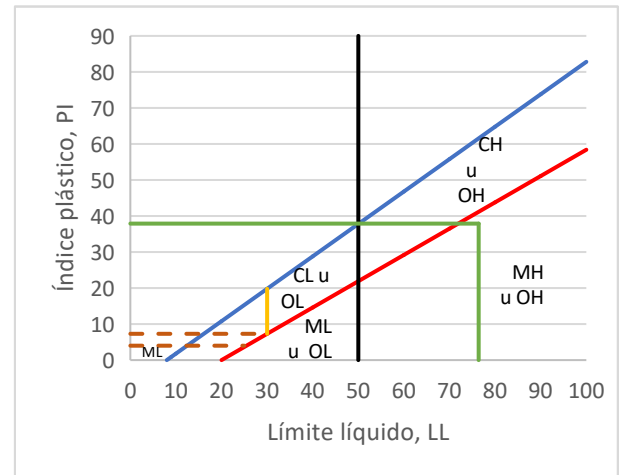
Tabla 3
Granulometría del agregado pétreo

Denominación	Abertura (mm)	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
1/2"	12.7	0.07%	99.93%
3/8"	9.5	1.16%	98.84%
1/4"	6.35	67.07%	32.93%
N° 4	4.75	95.25%	4.75%
N° 8	2.36	98.34%	1.66%
N° 16	1.18	98.77%	1.23%
N° 30	0.6	98.94%	1.06%
N° 50	0.3	99.00%	1.00%
N° 100	0.15	99.11%	0.89%
Pasa N°100	0.074	100.00%	0.00%

3.1. Clasificación del suelo

De acuerdo a la carta de plasticidad, la clasificación del suelo corresponde a un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH), como se observa en la figura 5.

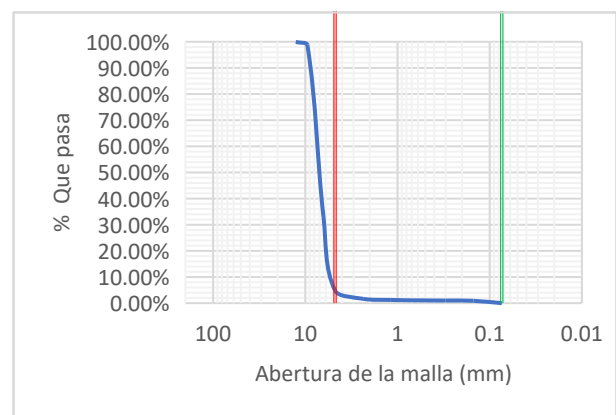
Figura 5
Carta de plasticidad



3.2. Resultados del agregado pétreo

A continuación, se exponen los resultados del agregado pétreo que se empleará en la fabricación del concreto permeable. En la tabla 3 se muestran los resultados de la granulometría vía seca del agregado y en la figura 6 se presenta la curva granulométrica con los datos obtenidos.

Figura 6
Curva granulométrica del agregado pétreo



En la tabla 4 se exponen los resultados de la caracterización del agregado pétreo.

Tabla 4
Propiedades geotécnicas del agregado pétreo

Parámetro	Valor
Peso volumétrico seco compacto (PVSC) (kg/m ³)	1588.11
Densidad aparente (g/cm ³)	2.65
Densidad aparente (saturada y superficialmente seca) (g/cm ³)	2.71
Densidad nominal (g/cm ³)	2.81
Absorción (%)	2.09
D ₁₀	5.4
D ₃₀	6.2
D ₆₀	7.5
Coefficiente de uniformidad (C _u)	1.389
Coefficiente de curvatura (C _c)	0.949
Clasificación del agregado pétreo	Grava mal graduada (GP)

En la tabla 5 se presentan las dosificaciones de concreto permeable que se utilizaron, donde se especifica la cantidad de cemento, agua y agregado pétreo que se emplearon, de acuerdo a la relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente, para producir 1 m³ de concreto.

Tabla 5
Dosificaciones de concreto

A/C	Cemento (kg)	Agua (L)	Agregado (kg)
0.3	407.99	122.40	1604.80
0.4	351.13	140.45	1604.80
0.5	308.17	154.09	1604.80

En la figuras 7, 8 y 9 se pueden apreciar las diferentes mezclas de concreto permeable en estado fresco, acorde a las dosificaciones correspondientes, con las diferentes relaciones agua/cemento empleadas.

Fig. 7
Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.3)



Fig. 8
Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.4)



Fig. 9
Mezcla de concreto en estado fresco (A/C=0.5)



En la figura 10 se muestran los cilindros elaborados con las dosificaciones de concreto permeable, con las relaciones agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Fig. 10
Cilindros de concreto, A/C= 0.3, 0.4 y 0.5 [de izquierda a derecha]



En la tabla 6 se presentan los datos de la absorción, la densidad, los porcentajes de vacíos o el volumen de poros huecos y la resistencia a la compresión de los cilindros elaborados con las relaciones agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Tabla 6
Absorción, densidad, porcentaje de vacíos y resistencia a la compresión de las estructuras de concreto permeable

Parámetro	Relación A/C = 0.3	Relación A/C = 0.4	Relación A/C = 0.5
Absorción después de inmersión [%]	7.41	7.66	7.80
Absorción después de inmersión y hervido [%]	8.00	8.37	8.80
Densidad seca	2.27	2.23	2.20
Densidad después de inmersión	2.44	2.40	2.37
Densidad después de inmersión y hervido	2.45	2.42	2.39
Densidad aparente	2.77	2.74	2.72
Volumen de poros permeables [vacíos] [%]	18.14	18.66	19.33
f' c [kgf/cm ²]	87.37	105.46	72.49

En las figuras 11 y 12, se muestran las estructuras de concreto permeable, elaboradas con la relación agua/cemento de 0.4. La figura 11 corresponde a la estructura de concreto permeable 1 y la figura 12 a la estructura de concreto permeable 2.

Fig. 11
Estructura de concreto permeable 1



Fig. 12
Estructura de concreto permeable 2



Las pruebas de expansión se realizaron con suelo en estado remoldeado, a una humedad promedio de 23.85%, recreando el peso específico natural del suelo (1.50 g/cm³), aplicando una carga de sitio de 3.3 T/m² y una sobrecarga de 1.5 T/m² (carga que simula el peso de una construcción).

En la tabla 7 se presenta el porcentaje de expansión del suelo natural y del suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable de 5 y 7 mm de altura.

Tabla 7
Porcentaje de expansión

Ensaye	Expansión (%)
Suelo natural	3.44
Suelo con estructura de concreto permeable de 5 mm de altura	0.78
Suelo con estructura de concreto permeable de 7 mm de altura	0.53

En la tabla 8 se muestra la presión de expansión del suelo natural y del suelo con la incorporación de las estructuras de concreto permeable de 5 y 7 mm de altura.

Tabla 8
Presión de expansión

Ensaye	Presión de expansión (T/m ²)
Suelo natural	14.23
Suelo con estructura de concreto permeable de 5 mm de altura	11.53
Suelo con estructura de concreto permeable de 7 mm de altura	12.79

En las figuras 13, 14 y 15 se presentan las curvas de compresibilidad del suelo natural, del suelo con la estructura de concreto permeable de 5 mm de altura y del suelo con la estructura de concreto permeable de 7 mm altura, respectivamente. La línea roja representa la presión de expansión.

Fig. 13
Curva de compresibilidad del suelo natural remoldeado con carga de sitio y sobrecarga

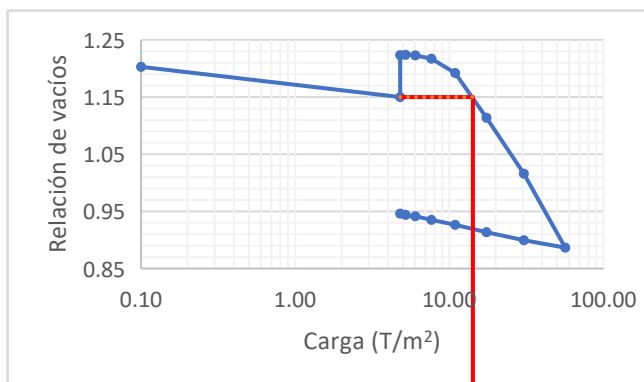


Fig. 14
Curva de compresibilidad del suelo remoldeado con la inclusión de la estructura de concreto permeable de 5 mm de altura, con carga de sitio y sobrecarga

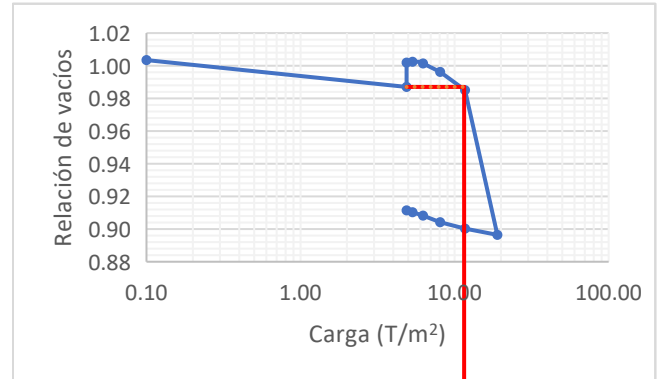
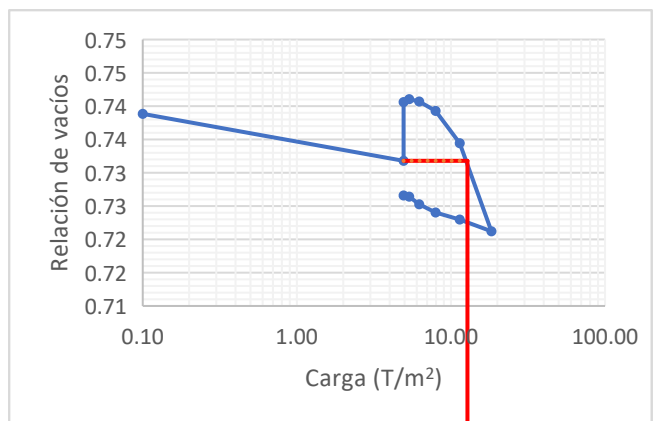


Fig. 15
Curva de compresibilidad del suelo remoldeado con la inclusión de la estructura de concreto permeable de 7 mm de altura, con carga de sitio y sobrecarga



De acuerdo a la granulometría del suelo, el 83.91% de la muestra pasa a través de la malla N°200, por lo que se considera que el suelo es fino. El límite líquido fue de 76.39%, el límite plástico de 38.50% y el índice plástico de 37.89%, y su clasificación, de acuerdo a la carta de plasticidad, fue como un limo inorgánico de alta compresibilidad o alta plasticidad (MH).

El contenido de agua del suelo natural fue de 34.46%, el peso específico de la muestra fue de 1.50 g/cm³, el peso específico seco fue de 1.11 g/cm³ y el peso relativo de los sólidos fue de 2.48.

El agregado pétreo tuvo una clasificación como grava mal graduada, con un peso volumétrico seco

compacto de 1588.11 kg/m^3 , una densidad aparente de 2.71 kg/m^3 , una densidad nominal de 2.81 kg/m^3 y una absorción de 2.07. Con dichos datos se dosificaron 3 mezclas de concreto, con relación agua/cemento de 0.3, 0.4 y 0.5 respectivamente.

Dichas mezclas se emplearon en la fabricación de cilindros de concreto de 7.25 cm de diámetro por 14.5 cm de altura aproximadamente.

Se evaluó el porcentaje de vacíos en estado endurecido de dichos cilindros.

La mezcla con relación agua/cemento de 0.3 arrojó un volumen de vacíos de 18.14%, la mezcla A/C= 0.4, 18.66% y la mezcla A/C= 0.5, 19.33%. Sin embargo, aunque la mezcla A/C= 0.5 obtuvo el mayor porcentaje de vacíos, se presentó segregación del concreto al fondo del cilindro, por lo que se optó por emplear la mezcla A/C= 0.4.

Con la mezcla A/C= 0.4 se elaboraron las estructuras de concreto permeable, con diámetro promedio de 7.373 cm y altura de 0.488 cm y otra con diámetro promedio de 7.603 cm y altura de 0.726 cm.

La prueba del porcentaje de expansión se realizó con una humedad promedio de 23.85%, con suelo remoldeado. La muestra de suelo se obtuvo en el mes de noviembre de 2020. Dicha humedad conduce a un grado de saturación (Gw) de aproximadamente el 75%, representando un valor alto. Sin embargo, según el Reporte del clima en México (CONAGUA, 2020), el valor más bajo de precipitación se obtuvo en el mes de diciembre, con una lámina de 1.3 mm, seguida del mes de noviembre, con una lámina de 6.6 mm. Considerando lo anterior, se puede asumir que el suelo en el mes de noviembre se encontraba en sus niveles de humedad más bajos, pero aún podría disminuir más en diciembre, por lo que se optó por reproducir especímenes a una humedad de 23.85% aproximadamente, que corresponde al contenido de agua 5% menor que la humedad óptima del suelo, pues analizando la curva de compactación Proctor, se observó que dicha humedad posee un peso volumétrico seco similar al que se obtuvo con la humedad de campo.

Conclusión

Las estructuras de concreto permeable aplicadas sobre el suelo expansivo ensayado abaten la expansión debido a que el suelo se aloja dentro de los huecos de dicha estructura.

La estructura de concreto permeable de 5 mm de altura puede abatir el 77.33% de la expansión del suelo utilizando solo el 79.11% de los huecos disponibles en la estructura, mientras que la estructura de 7 mm de altura, puede abatir hasta el 84.59% de la expansión del suelo utilizando solo el 52% de los huecos disponibles. Lo anterior concluye que probablemente algunos huecos no se conectan por lo que se restringe el acceso del suelo. Se puede suponer que, si la estructura estuviera conectada en la totalidad de los huecos, el abatimiento de expansión sería total.

Se puede concluir que la aplicación de dichas estructuras reduce la expansión del suelo, dependiendo del volumen de huecos que tengan disponibles y conectados.

Además, las estructuras de concreto permeable tienen la capacidad de absorber agua, debido a las características del agregado pétreo y el cemento que se utilice en su fabricación, lo que contribuye a la disminución de expansión también.

Las estructuras de concreto permeable se diseñaron con un porcentaje de vacíos del 20%, sin embargo, es posible emplear dosificaciones hasta del 30% o superiores (ACI-211.3R-02, 2002), lo que permitiría reducir aún más el valor de la expansión del suelo.

Trasladando estos resultados a campo, se pueden elaborar placas de agregados pétreos prefabricados, de distintas dimensiones y volumen de huecos. Dichas placas se diseñarían con diferentes dosificaciones, dependiendo de las características del suelo sobre el que se van a colocar.

Por lo anterior esta nueva propuesta puede resolver el problema de la expansión del suelo sin tener que extraer el suelo y sin tener que colocar cimentaciones especiales, lo que contribuye a la sustentabilidad de este

tipo de materiales y a la disminución de costos para el tratamiento de dichos suelos.

Agradecimientos

Se efectúa un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber provisto los fondos para llevar a cabo esta investigación. Se reconoce también a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo en la realización de este artículo.

Referencias bibliográficas

- [1] Abd El Halim, A.A. and El Baroudy A.A. 2014. Influence addition of Fine Sawdust on the Physical Properties of Expansive Soil in the Middle Nile Delta, Egypt. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 483-490
- [2] Abu-Zreig M.M., Al-Akhras, N.M. y Attom M.F. 2001. Influence of heat treatment on the behavior of clayey soils, *Applied Clay Science* 20: 129-135.
- [3] ACI 211.3R-02 Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI Committee 211. Michael J. Boyle. January 11, 2002
- [4] American Society for Testing and Materials, Norma C 127, Volumen 04.02, 2003.
- [5] ASTM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.
- [6] ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Avoirds in Hardened Concrete. ASTM Interntaional, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [7] ASTM-D420. 1993. Standard Guide to Site Characterization for Engineering, Design, and Construction Purpose. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 1-7. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [8] ASTM-D422. 1990. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 10-16. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [9] ASTM-D854. 1992. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 80-83. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [10] ASTM-D2216. 1992. Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 177-180. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [11] ASTM-D2487. 1993. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 206-216. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [12] ASTM-D4318. 1993. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 551-561. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [13] ASTM-D4531. 1992. Standard Test Method for Bulk Density of Peat and Peat Products. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 676-677. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [14] ASTM-D4546. 1990. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 693-699. ASTM International, Philadelphia, EUA.
- [15] Das, Braja M, 2015, Fundamentos de ingeniería geotécnica, Cengage Learning, cuarta edición
- [16] FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación] 2008. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos 103.
- [17] Flórez, C.H., Zarate, R., Caicedo, Z.K. y Contreras, B.A. 2008. Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes.
- [18] Jones, D. E., and Holtz, W. G. 1973. Expansive soils-the hidden disaster. *Civil Eng., ASCE* 43(8):49-51.
- [19] Juárez, E., & Rico, A. 2005. “Mecánica de suelos Tomo 1”, [3ª ed.]. México, México: Limusa.
- [20] López-Lara T., Hernández-Zaragoza J.B., Horta-Rangel J., Coronado-Márquez A. Castaño-

- Meneses V.M. 2010. Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas, Revista Iberoamericana de Polímeros.
- [21] López-Lara, T., J. Hernández-Zaragoza, J. Horta-Rangel, N.P. Rodríguez-Morales, y C.A. Bimbela-Osuna. 2014. Análisis de estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- [22] N.CMT.2.02.002/02, Calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico. Libro: CMT.Características de los materiales. Parte: 2. Materiales para estructuras. Título: 02. Materiales para concreto hidráulico
- [23] Rodríguez, J.C. 2018. Abatimiento de la expansión mediante la modificación de suelos y aplicación de carga. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- [24] Rodríguez, N.P. 2015. Uso de estructuras porosas para abatir la expansión de arcillas. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.
- [25] Viswanadham B.V.S., Phanikumar B.R. y Mukherjee R.V. 2009. Swelling behavior of a geofiber-reinforced expansive soil, Geotextiles and Geomembranes. Vol. 27 (2009).

