

# Comportamiento del contenido de agua en arcillas modificadas

**T. López-Lara<sup>1</sup>, ML. Pérez-Rea<sup>1</sup>, JA. Zepeda Garrido<sup>1</sup> y JA. Aragón Mtz<sup>1</sup>** Profesores-Investigadores, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro; México, e-mail: [lolte@uaq.mx](mailto:lolte@uaq.mx), [perea@uaq.mx](mailto:perea@uaq.mx), [zepeda@uaq.mx](mailto:zepeda@uaq.mx), respectivamente. <sup>2</sup>Estudiante de la Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos), División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro; México.

**Resumen.** Los suelos expansivos siguen siendo un problema en la industria de la construcción a nivel nacional e internacional debido a los continuos daños causados por éstas al aumentar o contraer su volumen con las variaciones de humedad durante el año. Ante esta situación, ya se han propuesto diferentes soluciones al problema, las cuales consisten en algunos tipos de cimentación y tratamiento de suelos con diferentes materiales, y la combinación de ambas. Respecto al tratamiento de suelos, la cal ha sido un material muy eficaz en la estabilización volumétrica del suelo a largo plazo (Castaño y López-Lara, 2001); sin embargo, algunos aspectos en el procedimiento constructivo aún no están muy definidos, tal es el caso de la humedad requerida para dicha estabilización, ya que la cal absorbe mucho agua. Por lo anterior, este trabajo consiste en investigar cuál es la influencia que tiene la variación del contenido de agua en la resistencia final de la mezcla, parámetro que nos puede auxiliar en determinar la humedad ideal de la mezcla para garantizar la mejor resistencia y por ende, la menor deformabilidad.

## 1. Introducción

La influencia de variables ambientales (geoquímica) en el comportamiento mecánico e hidráulico de las arcillas es un hecho ya conocido en la Ingeniería Geotécnica. En la actualidad se presenta un considerable interés en el estudio de las interacciones físico-químicas que tienen lugar en las arcillas sometidas a acciones térmicas, mecánicas, hidráulicas y químicas.

En un trabajo pionero, Salas & Serratos (1953) encontraron grandes diferencias en la compresibilidad de una misma arcilla homoionizada con diferentes cationes en su complejo de cambio, evidenciando la necesidad de una teoría físico-química para explicar el comportamiento mecánico de estos materiales, Bolt demostró (1956) experimental y teóricamente a través de la teoría de la capa doble difusa que la compresibilidad de suspensiones de arcillas puras depende no sólo del tipo de catión intercambiable, sino también de la concentración de la sal disuelta en el agua de los poros.

A estos dos siguieron una serie de trabajos que mostraban que la compresibilidad y la resistencia al corte de las arcillas dependían de manera muy acentuada de la composición del agua de los poros.

El efecto de los cationes divalentes en la disminución del hinchamiento de las montmorillonitas ha llamado la atención de algunos investigadores, cuando el catión absorbido es el calcio, las partículas de montmorillonita se unen formando unidades elementales llamadas casicristales (Mitchell 1993). Parte de la disminución del hinchamiento de las

montmorillonitas cálcicas es irreversible posiblemente porque la disminución de la concentración no da la energía suficiente para separar los casicristales (Yong et al., 1992).

Los modelos más ampliamente utilizados en la interpretación del comportamiento mecánico de las arcillas expansivas a nivel interparticular son los modelos basados en la teoría de la capa doble difusa. Gouy y Chapman en 1910 desarrollaron este modelo de manera independiente. El modelo supone que en las proximidades de la superficie de las partículas de arcilla hay un exceso de cationes necesario para neutralizar su carga eléctrica negativa. Los aniones, a su vez, son excluidos por el campo de fuerzas negativo de las partículas. Al sistema formado por la superficie negativamente cargada de las partículas y la distribución de las cargas adyacentes de los iones disueltos se le llama capa doble difusa.

Desde el punto de vista matemático, los modelos fundamentales en la teoría de la capa doble difusa se basan en la determinación del potencial eléctrico en el punto central de dos partículas de arcilla paralelas bajo determinadas condiciones físico-químicas. A partir del potencial eléctrico, se calcula la fuerza de repulsión entre las partículas. Conocida la distancia entre las partículas, también se puede obtener la fuerza de atracción (fuerza de van der Waals). La fuerza de atracción aumenta con la proximidad de las partículas. En un proceso de expansión, la repulsión entre partículas disminuye mientras el volumen sigue aumentando hasta que haya equilibrio entre atracción y repulsión (Yong et al., 1992)

La cal es de los pocos productos que ha resistido con éxito la prueba del tiempo, ya que por siglos no sólo se sigue usando en la construcción, la agricultura, la alimentación, etc., sino que conforme ha ido avanzando la ciencia y la tecnología, se han descubierto nuevas aplicaciones químicas y físicas.

La Cal en virtud de su reacción química y física, con suelos arcillosos, produce bases estables para la construcción de carreteras, calles, avenidas, boulevares, áreas de estacionamiento, patios, centros comerciales, aeropuertos, etc., con un substancial ahorro en consumo de agregados y acarreo de materiales. (Yoder, 1975)

Químicamente hablando, la cal se relaciona solamente con el óxido de calcio (CaO); sin embargo, en el uso común, el término incluye los productos de la calcinación de calizas calcílicas o dolomíticas. Las cales calcílicas (alto contenido de calcio) se obtienen mediante la calcinación de rocas calcáreas (calcitas, calizas calcílicas, conchuelas, etc.) las cuales contienen del 95 al 99 % de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Las cales dolomíticas que contengan de 30 a 40 % de carbonato de magnesio (MgCO<sub>3</sub>), siendo el resto, carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>).

Al reaccionar la cal con el agua se produce su hidratación, lo que se acompaña por un incremento en volumen. La reacción, que se presenta es exotérmica, mayor en el óxido de calcio, que en el de magnesio; ésta es tal vez la causa de que la hidratación del MgO sea más lenta. Existe la probabilidad de que también tenga una importancia decisiva el sobrecalentamiento del óxido de magnesio durante la calcinación.

La estabilización del suelo expansivo con cal tiene el objetivo de incrementar su resistencia y disminuir su sensibilidad a cambios volumétricos debidos a cambios en el contenido de agua. Ya se ha demostrado que la estabilización del suelo expansivo con la cal es eficiente y que no es reversible con el tiempo (Castaño y López-Lara, 2001).

El tratamiento de suelos arcillosos mediante la cal puede lograr varios de los efectos siguientes:

- Se reduce el índice plástico.
- El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcillas durante la operación de pulverización.
- Se reducen los efectos de aglomerantes.
- Las contracciones y expansiones debidas a cambios de humedad se reducen considerablemente.
- La resistencia del suelo a la compresión se incrementa.

La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de un camino (Ingles O. G., Metcalf, 1972) (Fernández Loaiza, 1982).

## 2. Desarrollo experimental.

Materiales utilizados.

La cal es de marca comercial y el suelo natural expansivo se extrajo de un pozo a cielo abierto de la Colonia Los Cedros de la ciudad de Querétaro, Querétaro, México. Dicha exploración se realizó a una profundidad de 1.50 m, en la cual se encontraron dos estratos de suelo. El primer estrato superficial es una arcilla negra de alta plasticidad (CH) con un espesor de 0.60 m y el segundo estrato es una arcilla café de baja plasticidad (CL) con un espesor hasta la excavación de 0.90 m.

Ensayes empleados.

Para la arcilla natural se determinó su granulometría y sus límites de consistencia para su clasificación según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

Para la arcilla con cal al 8% (con respecto a su peso seco), se determinó la compactación, con el método Proctor estándar para encontrar el peso específico seco máximo y humedad óptima y el parámetro de resistencia se obtuvo con ensayos de compresión simple del suelo compactado.

## 3. Resultados

Los resultados de los límites de consistencia de la arcilla natural y su clasificación de acuerdo al Sistema de Unificación de Clasificación de Suelos fueron: Límite líquido de 74.41%, Límite plástico de 21.26%, Índice plástico de 53.15% y Contracción Lineal.

La granulometría del suelo natural fue de 8.6% de arena y 91.4% de finos. Por lo anterior, la clasificación del suelo es un CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad).

La tabla 1 y figura 1 presenta los resultados obtenidos del peso específico seco máximo  $\gamma_d$  y humedad óptima  $\omega_o$  de la arcilla-cal 8 %.

Tabla 1. Resultados de la prueba de compactación para diferentes ensayos

$\omega, \%$	Peso específico seco máximo, gr/cm <sup>3</sup>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
18.5	1.05	1.02	1.01	1.00	0.98	1.04	1.02	0.96
25.2	1.21	1.22	1.26	1.26	1.19	1.20	1.21	1.19
30.7	1.27	1.31	1.26	1.24	1.28	1.28	1.27	1.27
35.2	1.23	1.22	1.21	1.20	1.23	1.21	1.22	1.20
39.4	1.18	1.18	1.16	1.16	1.18	1.17	1.19	1.18
44.5	1.11	1.11	1.11	1.12	1.11	1.11	1.11	1.12
48.5	1.04	1.07	1.07	1.06	1.05	1.06	1.07	1.06
55.2	1.00	0.92	0.90	0.92	0.99	0.92	0.94	0.91

$\omega$  es humedad

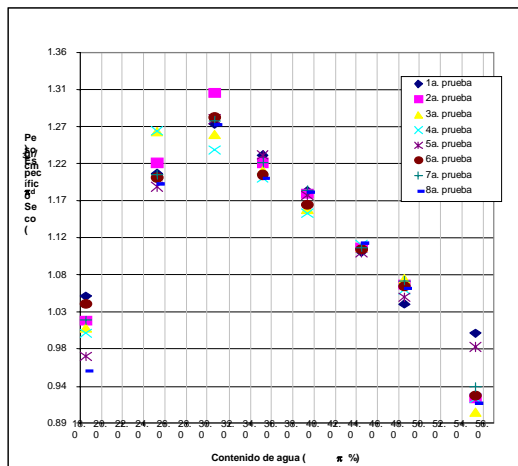


Figura 1. Compactación Proctor estándar en ocho ensayos.

A continuación se muestra la tabla 2 y la figura 2 que presentan los resultados de la resistencia a la compresión simple de la mezcla suelo-cal al 8% (respecto al peso seco).

Tabla 2. Compresión simple en mezclas suelo-cal al 8% a diferentes humedades en varios ensayos.

$\omega$	Ensayes							
	1	2	3	4	5	6	7	8
18.5	16.67	16.11	17.79	15.54	18.91	17.39	17.00	15.22
25.2	16.75	16.75	15.41	16.19	16.19	16.91	16.67	14.10
30.7	13.00	16.83	17.64	17.94	16.49	15.98	15.59	16.93
35.2	15.81	16.10	13.38	16.30	17.31	16.95	13.54	14.21
39.4	11.47	12.10	13.16	15.02	13.24	12.74	9.96	11.83
44.5	10.70	11.22	9.01	10.82	12.62	9.95	13.44	9.24
48.5	4.78	4.10	4.98	5.23	5.72	4.51	5.62	4.36
55.2	6.23	3.22	4.56	2.75	7.55	3.01	2.29	2.01

$\omega$  Humedad en %.

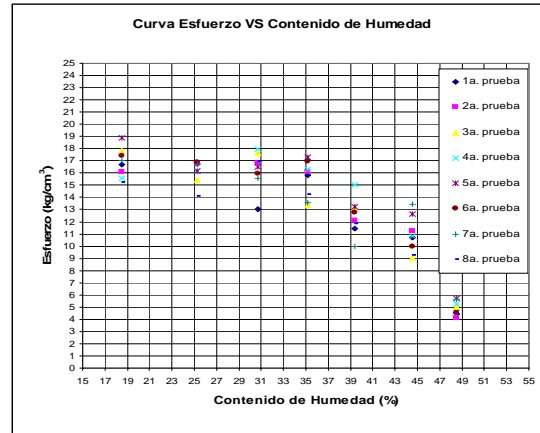


Figura 2. Representación gráfica de la resistencia a la compresión simple en ocho ensayos.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la compactación Proctor estándar de la mezcla suelo-cal 8%, el peso específico seco máximo fue de 1.27 g/cm<sup>3</sup> con una humedad óptima del 30.7 %. Por otro lado, la resistencia a la compresión simple se mantiene aproximadamente constante en un rango amplio de humedades que van desde 18.5-35.2%.

La figura 3 y 4 muestra la diferencia en la consistencia de la mezcla suelo-cal con diferentes humedades.



Figura 3. Consistencia de la mezcla suelo-cal 8% con la adición del primer contenido de humedad (18.5 %).



Figura 4. Consistencia de la mezcla suelo-cal 8% con la adición de un contenido de humedad del 55.2 %.

#### 4. Conclusiones.

Se concluye que, aunque se define un peso específico máximo seco y una humedad óptima en la mezcla suelo-cal al 8%, estos valores no son los únicos que garantizan propiamente la mejor resistencia y la menor deformabilidad de la mezcla ya que los resultados mostraron que la resistencia se mantiene aproximadamente constante en un rango amplio de humedades. Por lo anterior, se concluye también que para el caso de suelos estabilizados con cal, tal parece que la humedad óptima no es un valor único sino un amplio rango de valores, situación que se agrega como ventaja adicional a este tipo de tratamiento.

#### 5. Referencias.

Castaño M.V., López-Lara T. (2001). “Time Dependency of CaO-Treated Expansive Soils”. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 6, <http://geotech.civen.okstate.edu/ejge/>, USA.

Fernández Loaiza, Carlos (1982) “Mejoramiento y Estabilización de Suelos” , Ed. Limusa, México, 1982.

López Lara T. (1998) “Reflexión y análisis sobre el tratamiento de suelos con diferentes materiales” Curso: Técnicas modernas de caracterización en la Ciencia y la Tecnología de suelos arcillosos, UAQ, México.

López Lara T., Zepeda Garrido J.A. (1995) Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica, Querétaro, tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Lambe T W. Whitman R. V., (1995) “Mecánica de Suelos, Ed. Limusa.