



Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante

Variability of mechanical properties for compressible clayey soils stabilized with cementing materials

Luis Eduardo Gómez Pérez¹, William Ferney Guillin Acosta², Romel Jesús Gallardo Amaya³

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 23 de agosto de 2016

Cómo citar: Gómez Pérez, L. E., Guillin Acosta, W. F., & Gallardo Amaya, R. J. (2016). Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante. *Revista Tecnura*, 20(Edición especial), 95-107. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.SE1.a07

RESUMEN

Contexto: Algunos materiales que constituyen los suelos de sub-rasante, presentan alta deformabilidad y baja resistencia, asociadas a su alta plasticidad. Una alternativa para mejorar el comportamiento de este tipo de suelos es mediante la estabilización con material cementante.

Método: Se prepararon mezclas de suelo con adición de material cementante (cal y cemento) en dosificaciones en peso de 2% a 6% para la cal y de 2% a 16% para el cemento. Posteriormente se preparon especímenes que se ensayaron con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Realizando pruebas de límites de plasticidad, corte directo, compresión inconfiada y CBR, para posteriormente comparar con las mismas pruebas realizadas a especímenes obtenidos del suelo en estado natural.

Resultados: Con relación a los resultados de ensayo obtenidos para el suelo en condición natural, en comparación a los obtenidos para las mezclas de suelo-cementante se obtuvo una reducción en el índice de plasticidad entre 20 y 24%, un aumento

significativo en el índice de capacidad de soporte CBR entre 500 y 1300%, aumento en el ángulo de fricción hasta un 160%, y aumento la resistencia a la compresión inconfiada hasta un 1400%.

Conclusiones: Según lo observado experimentalmente la adición de materiales cementantes como la cal y el cemento, para el caso de suelo analizado, resulta un método efectivo para la estabilización de suelos arcillosos compresibles, lo cual permite que éstos reduzcan su plasticidad y mejoren su comportamiento para ser utilizados como material de soporte. Se evidenció que aunque en general las propiedades físicas de resistencia y deformación mejoran, el tiempo curado de la mezcla influye de manera diferente para el caso de la cal y del cemento.

Palabras Clave: Cementante, Compresible Estabilización, Plasticidad, Resistencia.

ABSTRACT

Context: Some materials that constitute subgrade soils show high deformability and low resistance, and these characteristics are associated with high

1 Ingeniero civil, investigador grupo GIGMA. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: eduardo170045@gmail.com

2 Ingeniero civil, investigador grupo GIGMA. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: wiferney_13@hotmail.com

3 Ingeniero civil, especialista en Ingeniería Ambiental, magíster en Geotecnia. Docente del Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Contacto: rjgallardo@ufpso.edu.co

levels of plasticity. However, there is an alternative to improve the behavior of this soils that is through stabilization with cementing material.

Method: We prepared soil along with cementing material (lime and cement) mixtures with weight proportions of 2% to 6% for lime and 2% to 16% for cement. Subsequently we prepared specimens that were tested with curing times of 7, 14 and 28 days. We performed limits of plasticity, direct cut, unconfined compression, and CBR; and later we compared the results with the same tests performed on specimens obtained from natural soil.

Results: The test results obtained for the soil in natural condition, compared to those obtained for soil-cement mixtures, show a reduction in the plasticity index between 20 and 24%; a significant

increase in the CBR support capacity index between 500 and 1300%; an increase in friction angle up to 160%; and an increase in the unconfined compression resistance up to 1400%.

Conclusion: According to what we experimentally observed, addition of cementing materials like lime and cement, in the case of the soil under analysis, results as an effective method to stabilize compressible clay soils, allowing them to reduce their plasticity and to improve their behavior to be used as supporting material. Additionally, it is evident that although the physical properties of resistance and deformation improve, the curing time of the mixture influences differently for the case of lime and cement.

Keywords: Cementing, Compressible, Plasticity, Stabilization, Strength.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, según el Departamento Nacional de Planeación (DPN), menos de 7% de la red vial del país se encuentra pavimentada (Construdata, 2014). Esta situación, en el caso de vías terciarias es mucho más crítica, más aún teniendo en cuenta que en muchos sectores de estas vías se tienen materiales que en época de invierno limitan la transibilidad dificultando el acceso de los habitantes y perjudicando su economía.

Teniendo en cuenta que los presupuestos con que cuentan los gobiernos locales para labores de construcción de nuevas estructuras de pavimento o para su mantenimiento y rehabilitación son escasos y que alrededor de 20% de los pavimentos fallan debido a una deficiente capacidad de carga (Duarte y Sierra, 2011), se requiere una opción sostenible para superar esta problemática, la cual puede ser la implementación de técnicas de estabilización del suelo como alternativa para mejorar su índice de resistencia y, por ende, de la estructura global del pavimento.

Los suelos que constituyen la subrasante pueden ser cohesivos, granulares o una mezcla de

ambos; en el primer caso no se cuenta con una adecuada estructura que permita desarrollar una buena resistencia y una baja deformación, pues se componen de partículas finas y muy pocas partículas gruesas, que no alcanzan a estar en contacto entre sí. Cuando estos suelos incorporan agua en su estructura y son sometidos a la acción de cargas, tendrán un comportamiento inadecuado, representado en poca capacidad portante y apreciables cambios de volumen (Higuera *et al.*, 2012). Las subrasantes de poca resistencia son un problema común en las vías (Tensor, 2015), debido a que presentan fallas que van provocando un deterioro rápido en la estructura del pavimento o cuando este no existe tienen un comportamiento inadecuado por sus condiciones de alta plasticidad y deformabilidad.

Un comportamiento adecuado de un suelo con las características expuestas anteriormente requiere la aplicación de diversas metodologías de mejoramiento, entre las que se tienen la compactación, la mezcla con materiales de tipo granular, la incorporación de aditivos químicos, de modo que el suelo adquiera una mejor resistencia al corte y una menor deformabilidad. En el caso de los aditivos químicos,

estos pueden corresponder a materiales que tengan reacción con el agua incorporada al suelo, como es el caso del cemento y la cal (Raj, 2005). La estabilización permite reducir la plasticidad del suelo de subrasante y mejorar sus condiciones de resistencia y deformabilidad a largo plazo; en el caso de la cal y el cemento este tipo de estabilización le proporciona una resistencia adicional por la acción cementante (Beltrán, 2015), incrementando la funcionalidad de la superficie existente y su aptitud para recibir cargas transmitidas por una estructura de pavimento (Sosa *et al.*, 2010).

En esta investigación se implementó la adición de dos tipos de cementantes (cal y cemento) a un suelo de alta plasticidad con el fin de evaluar cuál era el grado de variación de propiedades físicas como la plasticidad y la densidad, además de sus propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia y deformación. La adición de cementantes se efectuó preparando mezclas suelo-cementante en diferentes dosificaciones por peso seco del suelo, lo cual permitió evidenciar la eficacia de esta metodología de estabilización al poder reducir el índice de plasticidad y aumentar la capacidad de soporte, verificando así que la implementación de esta forma de estabilización es una alternativa viable dadas la facilidad para su implementación en campo y la mejora considerable obtenida en el comportamiento del suelo, constituyéndose además en un sistema de construcción sostenible de bajo impacto para el medio ambiente (Castaño, Robayo y Sánchez, 2013).

METODOLOGÍA

El desarrollo del estudio requirió la selección de materiales para la fabricación de los especímenes de ensayo, la definición de dosificaciones para las mezclas suelo-cementantes y un programa de ensayos de laboratorio, como se describe a continuación.

Suelo: El suelo está constituido por partículas de diferentes minerales, que pueden haberse conformado por procesos de meteorización o

deposición. Su estructura incluye además de las partículas, agua y aire (Angelone, 2007).

El suelo en estudio es un material limo-arcilloso con arenas de color marrón naranja de alta plasticidad (MH) según el S.U.C.S, A-7-5(20) según la AASHTO.

Cal: Esta corresponde a un hidróxido de calcio (Quiminet, 2007); en este caso se utilizó cal hidratada Nare.

Cemento: En Colombia se distinguen seis tipos de cemento, cuyo comportamiento físico-mecánico se asocia a la composición química con que se fabrica (Valbuena, Mena y García, 2016). En la investigación se utilizó cemento Portland Tipo I, el cual es un cemento hidráulico para uso general, resultante de la pulverización y mezcla de clinker, yeso y otros aditivos (Holcim, 2015) y cuya función en la mezcla es como un aditivo químico para la estabilización del suelo.

Dosificación de mezclas: Se utilizó dos tipos de mezclas, la mezcla suelo-cal y suelo-cemento con dosificaciones de 2%, 3%, 4%, 5% y 6% para ambas y de 8%, 10%, 12%, 14% y 16% para la mezcla suelo-cemento, ya que se buscó verificar que con este cementante se optimizan propiedades de plasticidad para las dosificaciones bajas y de resistencia para las dosificaciones altas.

Programa de ensayos de laboratorio y preparación de muestras: Los ensayos se realizaron para el suelo en estado natural y estabilizado con cementantes, tal como se muestra en la tabla 1.

Pruebas de propiedades índice

Límites de Atterberg de suelo en estado natural, la mezcla suelo-cal y suelo-cemento: Se realizaron los ensayos según las normas de la tabla 1 al suelo en condición natural y mezclado con los cementantes (cal-cemento) en diferentes porcentajes por peso seco del suelo.

Proctor estándar para suelo en estado natural, la mezcla suelo-cal y suelo-cemento: Mediante este ensayo se determinó la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo objeto de estudio.

Tabla 1. Relación de ensayos efectuados.

Ensayo	Norma
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.	I.N.V. E-122
Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	I.N.V. E-123
Determinación del límite líquido de los suelos.	I.N.V. E-125
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.	I.N.V. E-126
Relaciones de humedad-peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación).	I.N.V. E-141
CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.	I.N.V. E-148
Compresión confinada en muestras de suelos.	I.N.V. E-152
Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)	I.N.V. E-154

Fuente: elaboración propia.

Pruebas de resistencia y compresibilidad

Ensayo de CBR de laboratorio: El ensayo se llevó a cabo para la muestra de suelo en estado natural y para la mezcla suelo-cal y suelo-cemento en diferentes dosificaciones. En la figura 1 se aprecia la muestra ensayada para la mezcla suelo-cal con una dosificación de 3%.

Ensayo de corte directo: Este ensayo se realizó para el suelo en estado natural y estabilizado con cementantes con una velocidad de corte promedio de 0.042 milímetros por minuto. Las muestras fueron talladas de las probetas de 7, 14 y 28 días

de curado preparadas para las mezclas suelo-cal y suelo-cemento. En la figura 2 se aprecia una probeta luego de ocurrida la falla.

Ensayo de compresión confinada: Este ensayo se efectuó bajo los parámetros de la norma I.N.V.E-152, se ensayaron muestras inalteradas del suelo en condición natural y muestras talladas de las probetas preparadas con las mezclas suelo-cal y suelo-cemento con tiempos de 7, 14 y 28 días de curado. En la figura 3 se aprecian las fallas de las 3 probetas talladas de muestras inalteradas y en la figura 4 se aprecian los ensayos realizados a probetas de mezcla suelo-cal y suelo-cemento.



Figura 1. Probeta de mezcla suelo-cal después del ensayo CBR.

Fuente: elaboración propia.



Figura 2. Falla en el ensayo de corte directo de la muestra de mezcla suelo-cal para un curado de 28 días.

Fuente: elaboración propia.

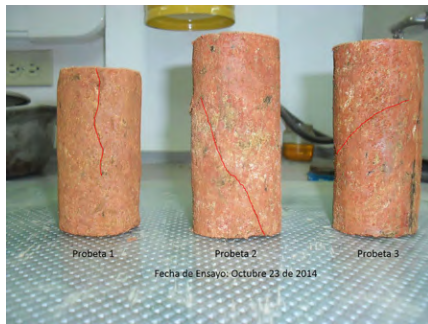


Figura 3. Probetas de suelo sin adición de cementantes luego del ensayo a compresión confinada.

Fuente: elaboración propia.



Figura 4. Ensayo de compresión confinada para probetas de mezcla suelo-cal (izq.) y suelo-cemento (der.)

Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Muestras de suelo en estado natural

Propiedades índice

En la tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre muestras de suelo en condición natural.

Propiedades de resistencia

En la tabla 3 se indican los resultados obtenidos para los ensayos efectuados sobre muestras de suelo en condición natural.

Tabla 2. Resultados de las propiedades físicas para el suelo en condición natural.

Prueba No.	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
1	61.30	46.30	15.00	1.447	31.03
2	61.30	46.70	15.00	1.406	31.03
3	61.20	46.59	15.00	1.428	31.03

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de pruebas de resistencia en condición natural.

Ensayo No.	CBR (%)		CORTE DIRECTO		Compresión confinada (kPa)
	0.1	0.2	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	
1	6.25	7.37	14.67	3.89	128.33
2	6.79	7.24	17.05	1.58	132.03
3	5.34	6.14	27.26	1.30	146.46

Fuente: elaboración propia.

Muestras de mezclas suelo-cal

Propiedades índice

En la tabla 4 y la figura 5 se aprecian los resultados para los ensayos realizados sobre muestras de suelo en condición estabilizada para mezcla suelo-cal.

Propiedades de resistencia

En la figura 6 y la figura 7 se muestran los resultados de ensayos CBR y compresión inconfiada efectuados para mezcla suelo-cal. En la tabla 5 y la figura 8 se muestran los resultados para ensayos de corte directo.

Tabla 4. Resultados de las propiedades físicas para mezclas suelo-cal.

% de cal	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
2%	59.53	43.50	16.04	1.439	32.04
3%	60.04	45.08	14.95	1.429	32.3
4%	60.06	45.45	14.61	1.396	32.4
5%	59.66	45.60	14.06	1.382	32.8
6%	59.48	46.02	13.46	1.367	32.9

Fuente: elaboración propia.

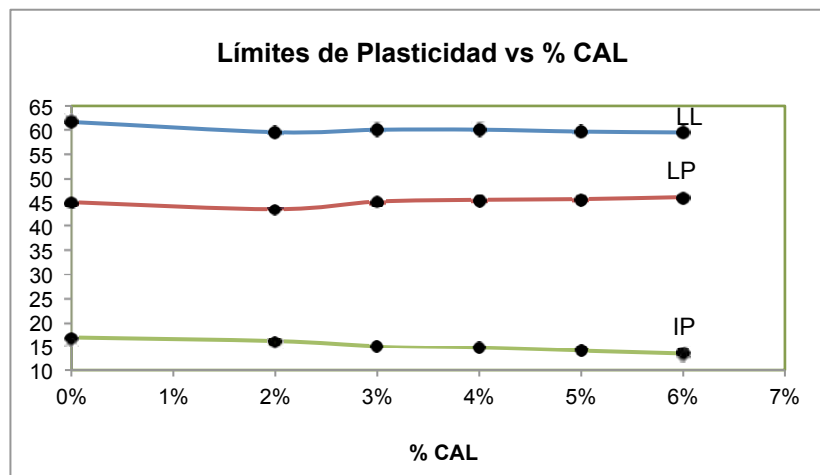


Figura 5. Variación de los límites de plasticidad para las mezclas suelo-cal.

Fuente: elaboración propia.

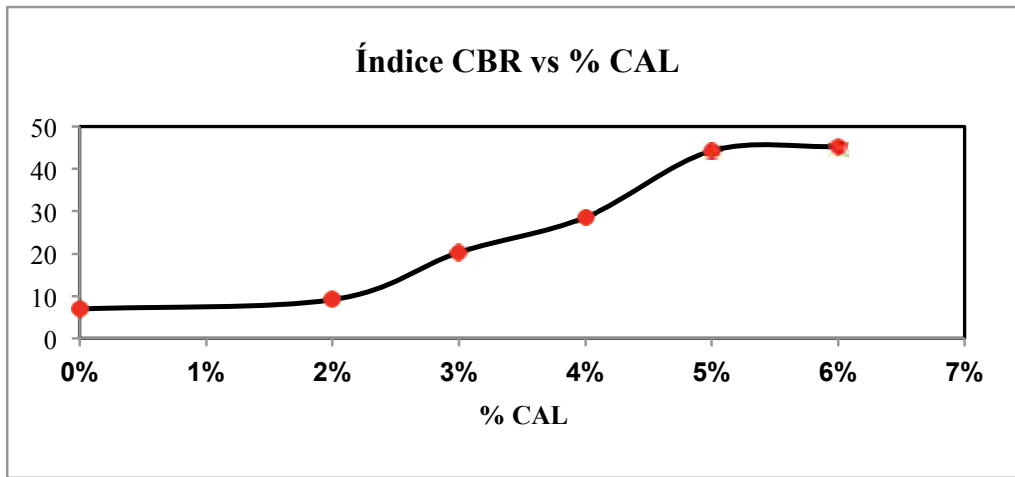


Figura 6. Variación índice CBR en muestras suelo-cal.

Fuente: elaboración propia.

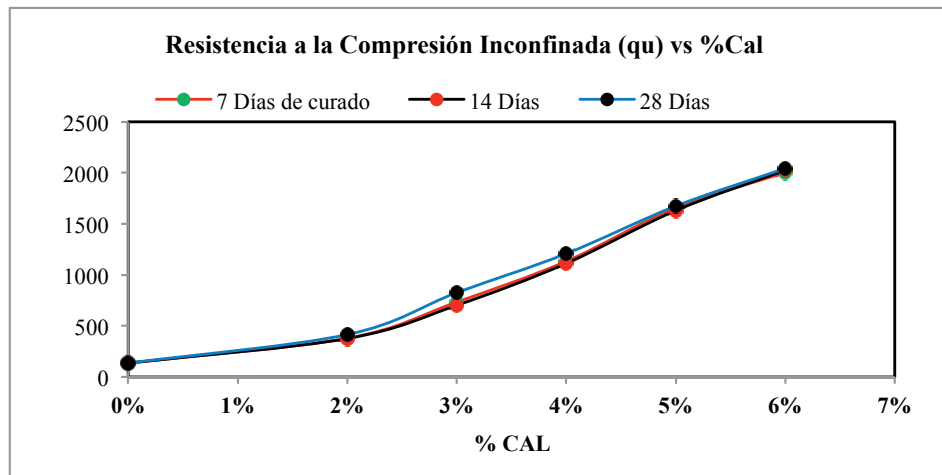


Figura 7. Variación de la resistencia a la compresión inconfinada en muestras suelo-cal.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados del ensayo de corte directo a las mezclas suelo-cal.

% Cal	Angulo de fricción (°)			Cohesión (kPa)		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
2	36.97	31.46	29.66	2.91	11.36	11.88
3	39.96	32.72	31.15	6.71	12.17	13.54
4	42.31	38.46	34.89	12.43	14.08	14.76
5	48.88	45.52	40.90	14.08	15.13	15.31
6	56.53	54.64	51.35	17.73	17.02	16.68

Fuente: elaboración propia.

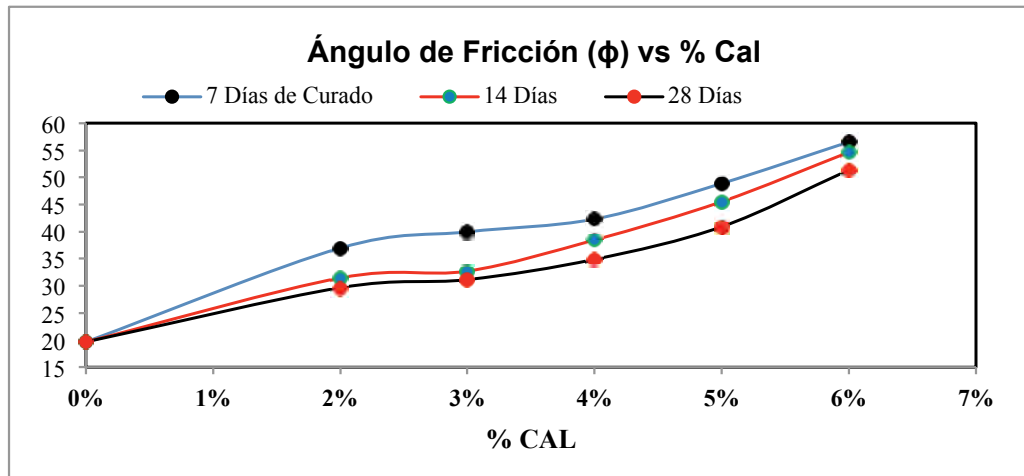


Figura 8. Variación del ángulo de fricción en las muestras suelo-cal.

Fuente: elaboración propia.

Muestras de mezclas suelo-cemento

Propiedades índice

En la tabla 6 y la figura 9 se indican los resultados de los ensayos de límites de plasticidad y proctor normal.

Propiedades de resistencia

En la figura 10 y la figura 11 se muestran los resultados de ensayos CBR y compresión confinada efectuados para probetas de la mezcla suelo-cal. En la tabla 7 y la figura 12 se muestran los resultados para ensayos de corte directo.

Tabla 6. Resultados de las propiedades físicas para mezclas suelo-cemento.

% de cemento	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
2%	58.58	41.56	17.02	1.425	31.70
3%	59.41	44.25	15.16	1.424	31.30
4%	58.53	43.37	15.16	1.424	30.70
5%	58.63	42.38	16.25	1.425	30.85
6%	58.60	42.59	16.02	1.426	30.60
8%	57.84	42.57	15.27	1.434	30.70
10%	53.29	38.94	14.35	1.426	29.80
12%	50.54	37.78	12.76	1.425	30.90
14%	49.82	37.58	12.25	1.428	30.90
16%	49.55	36.70	12.85	1.429	30.80

Fuente: elaboración propia.

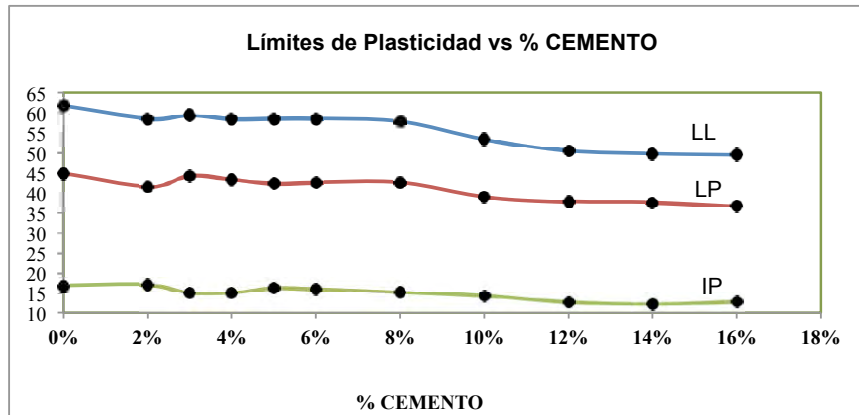


Figura 9. Variación de los límites de plasticidad para las mezclas suelo-cemento.

Fuente: elaboración propia.

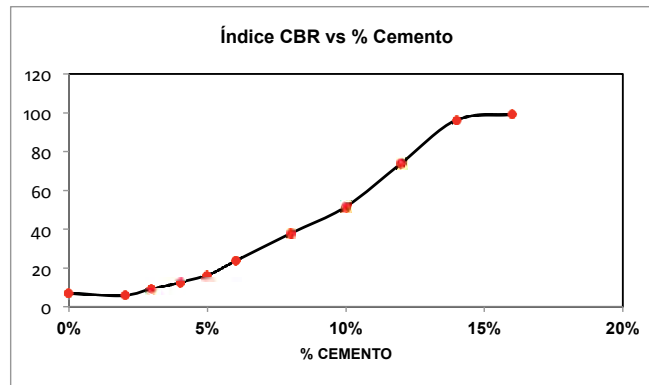


Figura 10. Variación índice CBR en las mezclas suelo-cemento.

Fuente: elaboración propia.

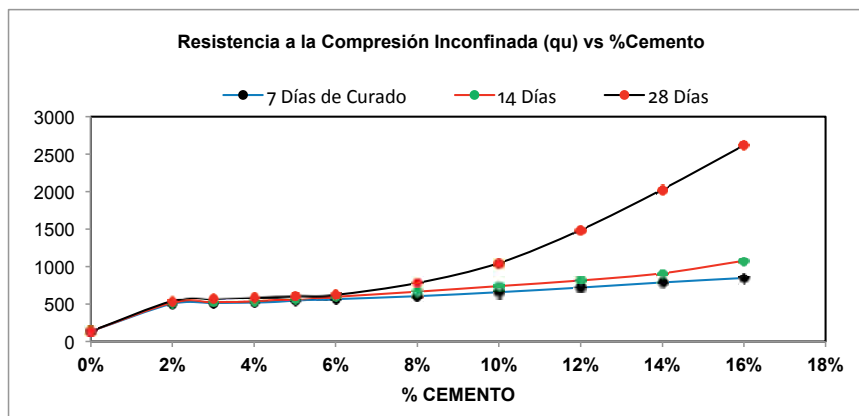


Figura 11. Variación de la resistencia a la compresión inconfinada en mezclas suelo-cemento.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de corte directo en las mezclas suelo-cemento.

% Cemento	Ángulo de fricción (°)			Cohesión (kPa)		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
2	32.61	33.30	34.60	7.21	7.67	8.04
3	33.63	34.63	35.19	7.34	7.78	8.39
4	33.67	34.78	35.68	7.55	7.93	8.81
5	33.68	34.92	36.02	7.60	7.96	9.40
6	33.73	35.26	37.21	7.61	8.22	10.00
8	34.24	37.82	38.83	7.69	8.68	10.83
10	34.25	38.09	40.85	10.52	10.86	11.83
12	39.83	40.82	41.79	12.28	14.59	14.62
14	43.29	43.36	43.46	13.09	14.98	15.18
16	44.56	48.95	50.88	13.47	15.18	15.51

Fuente: elaboración propia.

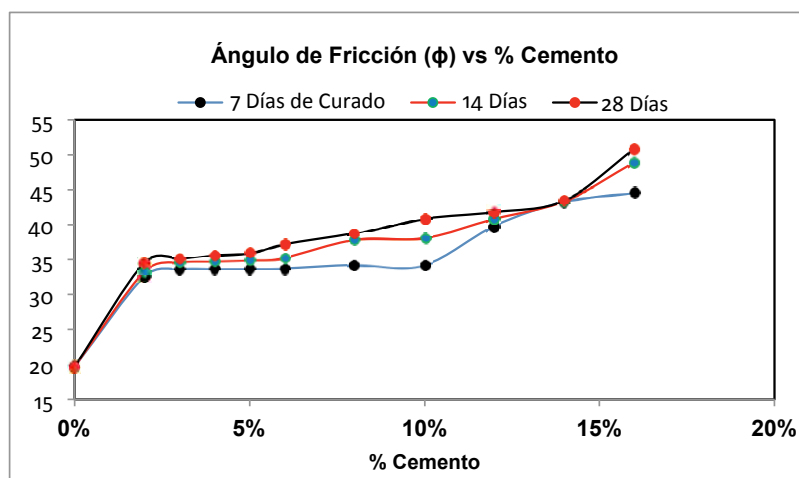


Figura 12. Variación del ángulo de fricción en las mezclas suelo-cemento.

Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Propiedades físicas

Una vez efectuados los ensayos de límites de plasticidad para el suelo en condición natural y las mezclas suelo-cal y suelo-cemento (ver las tablas 2, 4 y 6), se aprecia que el límite líquido disminuye levemente en la medida en que se aumenta la

dosificación de cementante, que el límite plástico aumenta para todas las dosificaciones de la mezcla suelo-cal y en el caso de la mezcla suelo-cemento disminuye, el índice de plasticidad disminuye en 19.8% respecto a la condición natural en las mezclas suelo-cal y en 23.40% para las mezclas suelo-cemento.

En cuanto a la densidad máxima seca en el ensayo Proctor normal se encontró que esta disminuye

hasta en 4.1% respecto al valor en estado natural para dosificación de 6% de cal. En el caso de la humedad óptima esta aumenta hasta en 5.7% respecto al valor para suelo en estado natural.

Índice CBR de laboratorio

En las figuras 6 y 10 se observa la variación de los valores del CBR para las mezclas suelo-cal y suelo-cemento; se encontró que dicha variación es de hasta 550% y 1337%, respectivamente.

Resistencia al corte

Como se observa en las tablas 3, 5 y 7 y en las figuras 8 y 12, los resultados de los ensayos de corte directo en muestras de suelo en condición natural y estabilizado con cal y cemento, se aprecia que a medida que incrementa la dosificación de los cementantes aumenta el ángulo de fricción y de forma proporcional aumenta el valor de la cohesión en comparación con el valor en estado natural. Con relación al tiempo de curado (7, 14 y 28 días) aumenta la cohesión en las mezclas pero se aprecia una disminución en su ángulo de fricción, con una variación media entre 7 y 28 días de 17% en las mezclas suelo-cal, para el caso de las mezclas suelo-cemento el ángulo de fricción no disminuyó con el tiempo de curado sino que aumentó con una variación media entre 7 y 28 días de 8.6%.

Resistencia a la compresión inconfiada

Los datos obtenidos para las mezclas suelo-cementante muestran que se obtiene un aumento de hasta 1370% en aumento de la resistencia a la compresión inconfiada en mezclas suelo-cal con 6% de dosificación y de hasta 1830% en mezclas suelo-cemento con 16% de dosificación. En el caso de las mezclas suelo-cemento el aumento de resistencia es más pronunciado para un tiempo de curado de 28 días con relación a 7 y 14 días, tal como se muestra en la figura 11, mientras que para

el caso de la mezcla suelo-cal el aumento de resistencia es similar tanto a los 7, 14 y 28 días, como se aprecia en la figura 7.

CONCLUSIONES

La descripción y caracterización física del suelo en estado natural lo identificó como un limo arcilloso inorgánico con arenas de color marrón naranja de alta plasticidad y clasificación según el S.U.C.S como MH, el cual posee baja densidad debido a la alta porosidad que presenta este suelo.

Una vez estabilizado el suelo con las diferentes dosificaciones establecidas tanto para la cal como para el cemento se observó que a medida que incrementaban los diferentes porcentajes de cementante, la textura del suelo cambiaba junto con su trabajabilidad, su límite líquido disminuyó, su límite plástico subió en el caso de la cal y disminuyó para el caso del cemento, el índice de plasticidad (IP) disminuyó encontrándose que en el caso de la cal bajó hasta en 20% respecto al valor en condición natural del suelo para una dosificación de 6% de cal. En el caso de la mezcla suelo-cemento la disminución del IP fue de hasta 24% pero para una dosificación de 16% de cemento; en dosificación de 6% la mezcla suelo-cemento disminuye su IP solo hasta 5%. Siendo en este caso más efectiva la mezcla suelo-cal.

En lo que respecta al índice de resistencia CBR el suelo en estado natural presentaba un valor bajo de 7% y para las mezclas suelo-cementante se obtuvo un valor de hasta 45.3% para 6% de adición de cal y de hasta 99.4% para 16% de adición de cemento, para adición de 6% de cemento el valor fue de hasta 23.6%; siendo en este caso la cal la que mostró mejor resultado. En general, se tiene un incremento en la capacidad de soporte del suelo al adicionar los cementantes.

Al realizar la compactación (Proctor normal) a la mezcla suelo-cal se obtiene una disminución en la densidad seca máxima de hasta 4.2% y un aumento de la humedad óptima de hasta 6% para

adición de 6% de cal; en el caso de la mezcla suelo-cemento no se aprecia una variación importante en la densidad seca máxima, manteniéndose en valores que varían entre -0.25% y 0.5% respecto al valor para el suelo en condición natural.

Los resultados experimentales para las mezclas suelo-cal y suelo-cemento muestran que se obtiene un aumento en el ángulo de fricción interna del suelo, lo cual lo lleva de tener características de suelo cohesivo a las de un suelo de tipo granular. El ángulo de fricción aumentó hasta en 160% para un tiempo de curado de 28 días y adición de 6% de cal o 16% de cemento.

La resistencia a la compresión inconfiada del suelo es mejorada notablemente con la adición de cementantes, pasando de 135 kPa en condición natural hasta 2040 kPa con adición de 6% de cal y con adición de cemento hasta 620 kPa para 6% y hasta 2600 kPa para 16%.

Según lo observado experimentalmente, tanto la adición de cal como de cemento resulta un método efectivo para la estabilización de suelos arcillosos compresibles, mejorando su comportamiento y haciéndolo así un suelo apto para su uso como base de estructuras de pavimento o de pequeñas edificaciones.

FINANCIAMIENTO

El desarrollo de este trabajo de investigación se derivó del proyecto de investigación titulado Mejoramiento de Suelos de Baja Capacidad Portante Utilizando Cementantes, el cual fue financiado por la División de Investigación y Extensión de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al grupo de investigación GIGMA de la UFPS Ocaña por el apoyo recibido durante el desarrollo de las diferentes etapas del proyecto. Además agradecen la asesoría del doctor Oscar Andrés Cuanalo Campos, investigador del Instituto Copernicus de Ciencias e Investigación

con sede en la ciudad de Villahermosa, estado Tabasco, México.

REFERENCIAS

- Angelone, S. (2007). Geología y geotecnia. Tipos de suelos: Arcillas. Recuperado de: http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Tipos%20de%20suelos%202_2007.pdf
- Beltrán Moreno, L. (1997). Expansión de los Suelos Arcillosos Parcialmente Saturados. *Revista Ingeniería e Investigación*, 31, 36-45. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/view/24806>
- Castaño Tabares, J.O.; Robayo Nuñez, E., y Sánchez Cotte, E.H. (2013). Materiales de construcción sostenibles. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros con cenizas volantes activadas alcalinamente. *Revista Tecnura*, 17, 79-89.
- Construdata (2014). Informe Especial Carreteras y Vías. Recuperado de: http://www.construdata.com/BancoMedios/Archivos/construdata_news_carreteras_y_vias_feb_2014/construdata_news_carreteras_feb_2014.html
- Corporación Andina de Fomento, CAF (ed.) (2010). *Soluciones e Innovaciones Tecnológicas de Mejoramiento de Vías de Bajo Tránsito*. Bogotá: Caf publicaciones.
- Duarte Duarte, M., y Sierra Parra, V. (2011). Estudio del comportamiento de un material de subrasante típico de Bogotá estabilizado con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga mediante pruebas de laboratorio. (tesis de pregrado, Universidad Javeriana). Recuperado de: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/7505/1/tesis601.pdf>
- Higuera Sandoval, C.; Gómez Cristancho, J., y Pardo Naranjo, O. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 21(32), 21-40. Recuperado de: <http://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/1431/1426>

- Holcim (2015). Cemento. Recuperado de: <http://www.holcim.com.co/productos-y-servicios/cemento.html> Consultado el 30 de septiembre de 2015.
- IECA (2013). Estabilización de Suelos con Cemento. Recuperado de: https://www.ieca.es/Uploads/docs/Estabilizaci%C3%B3n_de_suelos_con_cemento.pdf
- Quiminet (2007). La cal hidratada y su uso en diferentes industrias. Recuperado de: <http://www.quiminet.com/articulos/la-cal-hidratada-y-su-uso-en-diferentes-industrias-17637.htm>
- RAJ Purushothama, P. (2005). *Ground improvement techniques*. New Delhi: Laxmi Publications Ltd.
- Tensar Eearth Technologies (1999). Sistemas para Pavimentos, Mejoramiento de Subrasantes: Construcción Sobre Suelos Blandos. Recuperado de: https://www.academia.edu/9652538/Sistemas_para_Pavimentos_Mejoramiento_de_Subrasantes_Construcci%C3%B3n_sobre_suelos_blandos
- Valbuena Porras, S. G.; Mena Serna, M., y García Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de la resistencia a la compresión en morteros de pega de acuerdo con la dosificación establecida por el código Sismo Resistente Colombiano. *Revista Tecnura*, 20(48), 115-121. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a08.

