

Estabilización química de suelos expansivos de San José de Cúcuta (Colombia) usando cenizas volantes

C. H. Flórez G¹ | R. Zarate C.² | Z. K. Caicedo O.³ | B. A. Contreras.⁴

Recibido:
4 de noviembre
de 2008

Aceptado:
6 de diciembre de 2008

Resumen

Se presentan los resultados de la estabilización química de los suelos expansivos de una zona representativa de San José de Cúcuta, donde se han observado daños en construcciones livianas como consecuencia de la expansión-retracción del suelo por la variación constante de la humedad. Para lograr la estabilización del suelo arcilloso, se propone como aditivo químico cenizas volantes, analizando sus posibles ventajas y desventajas. Las cenizas, fueron suministradas por la empresa Termotasajero S.A, de la ciudad. Los límites de consistencia se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM D 4318-95 [1], la humedad (ASTM D 2216), las relaciones de contracción (ASTM D 427-93/4943-95), granulometría (ASTM D 422-63), gravedad específica ASTM D 854-92 y el ensayo estándar de Proctor (ASTM D-698). De los datos de humedad de los estratos, se puede observar su comportamiento descendente. Se muestran datos de área superficial específica según el procedimiento de azul de metileno descrito por Santamarina [2]. Se encontró que las arcillas de la zona estudiada están clasificadas como de alta plasticidad (CH) con capacidad de intercambio catiónico de hasta de 37 (meq/100 g) y en el que uno de los estratos posee alto contenido de magnesio (Mg). Según la norma NSR 98 Título H [3], el potencial de expansión de las arcillas, es de alto a muy alto. El comportamiento del índice de plasticidad es decreciente en un valores que oscilan de treinta a cuarenta por ciento, para un porcentaje de mezcla de 30% en volumen de cenizas, lo anterior nos confirma la formación de hidratos por medio de reacciones puzolánicas con el suelo arcilloso. Se concluye la necesidad de implementar análisis de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica para determinar composición mineralógica exacta y estructura microscópica, lo cual ayudaría a confirmar o descartar la naturaleza de alta expansividad.

Palabras clave: arcillas expansivas, estabilización química, cenizas volantes.

Abstract

It presents the results of the chemical stabilization of a zone of San Jose de Cucuta, where it have been observed some damages in light buildings as a consequence of the expansion-shrinkage of the soil because of the change in

¹ Ingeniero Civil. MSc. Director Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental, GIGA. Departamento de Geotecnia y Minería. Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta.

chlflorez@bari.ufps.edu.co

² Ingeniero Civil. MSc. Co-Director Grupo de investigación GIGA. Departamento de Geotecnia y Minería. UFPS; San José de Cúcuta.

rzarate@bari.ufps.edu.co

³ Ingeniera Química. Co-Investigadora Grupo de Investigación GIGA. Departamento de Geotecnia y Minería. UFPS; San José de Cúcuta. / zuly.caicedo@yahoo.es

⁴ Tesista Ingeniería Civil, 2008. Grupo de Investigación GIGA. UFPS. / betsyconor@hotmail.com

moisture. To achieve soil stabilization, it will be used as chemical additive: fly ashes, analyzing possible advantages and drawbacks. The ashes were given by Termotasajero S.A, a company of the city. The Atterberg limits carried out in agreement to the standard ASTM D 4318-95 [1], moisture measurement (ASTM D 2216), shrinkage factors of soil (ASTM D 427-93/4943-95), particle size analysis of soils (ASTM D 422-63), specific gravity ASTM D 854-92 and Proctor standard test (ASTM D-698). From de moisture data, it is possible to observe its descending behaviour. The document shows information of specific surface area according to the procedure of blue of methylene described by Santamarina [2]. It was found that the clays, in this study case, has high plasticity (CH) with a cation exchange capacity until 37 meq/100 g and high magnesium (Mg) content. According to the norm NSR 98 (Title H) [3], the swelling potential of the clays, is from high to very high. The behavior of the plasticity index is diminishing in values that range from thirty to forty per cent, for a percentage of mixing of 30 % in volume of ashes. This behavior confirms to us the formation of hydrates by means of pozzolanic reactions with the clayey soil. It was concluded the necessity to implement analysis of X-rays diffraction (XRD) and electronic microscopy to determine mineralogical exact composition and microscopic structure, which would help to confirm or to reject the nature of high expansivity

Keywords: expansive clays, stabilization chemistry, fly ash.

Introducción

La ciudad de San José de Cúcuta presenta un régimen de lluvias bimodal, es decir, está sometida a periodos cíclicos de lluvia y clima seco. Las viviendas construidas en ciertas zonas de la ciudad, presentan daños producidos principalmente por levantamientos o asentamientos diferenciales (ver figura 1), inducidos por la interacción suelo-estructura al cambiar las condiciones de humedad del suelo de apoyo. Existen diversos factores influyentes en el cambio volumétrico del suelo, entre los cuales se pueden mencionar: variaciones climáticas, infiltraciones, presencia de vegetación, modificación del nivel freático, condiciones de esfuerzo en el suelo, permeabilidad, composición mineralógica, entre otros [4].

Las arcillas, denominadas “expansivas” poseen ciertos minerales que le confieren esta propiedad debido a ciertas capas de agua adsorbidas por interacciones intermoleculares propias de las partículas.

Al realizar una estabilización se pretende mejorar las propiedades del suelo hasta que sea apto para su uso en la construcción, es decir, posea

resistencia suficiente, no se expanda ni se contraiga en exceso, tenga la permeabilidad adecuada, no se deforme a tal nivel que afecte la estructura y sea estable [5, 6, 7, 4, 8, 9, 10].

La naturaleza del agua adsorbida en la estructura microscópica de las arcillas forma un sistema complejo de difícil entendimiento [11-13]. También se asocia al ambiente de formación-depositación (salobre, marino o de agua dulce) y toda su historia geológica [14].

La organización microestructural de las partículas, afecta la forma en que el agua es absorbida [15, 11, 16, 12, 13], teniendo en cuenta la succión presente, además de la presencia de múltiples cationes de cambio en la arcilla natural. Esto representa una desventaja a la hora de medir e interpretar resultados ya que se requieren técnicas destructivas para cuantificar los cambios en las propiedades del suelo arcilloso. Por lo tanto, se debe inferir acerca de los fenómenos asociados que ocurren al interior de la red cristalina.

Según la referencia [17] (Do Nascimento), en su tesis doctoral, basado en el modelo inicial de Alonso [18], propone un modelo elasto-plástico fundamentado en elementos finitos, en el cual expone una organización acoplada entre las estructuras microscópicas y macroscópicas, donde existen las tres fases, interdependientes de un modelo químico presentando algunas simplificaciones, ya que el problema se vuelve demasiado complejo.

Se propone realizar experimentos con mezclas de aditivos químicos, ya sea, cenizas volantes o aceite sulfonado, basados en casos anteriores [19-32].

Los aditivos, por medio de una reacción química o electroquímica producen una reorganización de la estructura interna en el suelo [22, 23] que se ve reflejada en el cambio de las propiedades físicas y mecánicas, logrando la estabilización deseada.

Los minerales arcillosos son silicatos de aluminio y de magnesio hidratados

estructurados en capas. Éstas son el resultado de combinar tetraedros de silicio (SiO_4) y otra capa resultado de combinar octaedros de Aluminio unido a seis oxígenos o a seis grupos hidroxilo (-OH). Ambas capas se unen entre sí compartiendo oxígenos [33-37]. Según su organización pueden formar filosilicatos bilaminares o trilaminares en familias o grupos. Entre ellos se encuentran las esmectitas, las micas y los minerales fibrosos. Entre los minerales expandibles (grupo de las esmectitas) hacen parte la Montmorillonita, la Nontronita y la Beidelita (dioctaédricas), la Saponita, la Sauconita y la Hectorita (trioctaédricas) [33].

Cuando el suelo arcilloso tiene un porcentaje de esta clase de minerales, así éste sea de pequeña magnitud (10%), le confiere inestabilidad, por su capacidad de expansión-contracción al adsorber agua entre sus capas cristalográficas, debido al intercambio de iones que se presenta por su propiedad de sustitución isomórfica, es decir, de intercambiar iones de Si^{+4} por Al^{+3} generalmente. Así, se adhieren cationes para compensar la carga negativa generada.

Los tamaños de los cationes varían, y así mismo lo hará el espesor de la capa adsorbida que influye en la consistencia y plasticidad del suelo.

Los suelos arcillosos se pueden tratar de diversas maneras, cambiando su granulometría, con geotextiles de forma esférica, con polímeros, con hidróxidos de doble capa (DLHs), por medios eléctricos o aplicando aditivos de diferente índole. De hecho se ha realizado desde hace muchos años atrás [4-7, 10, 38-41]. Este estudio se enfoca en el uso de aditivos, que si bien se ha usado generalmente cal [42], se pretende buscar una solución de mayor economía o innovación.

Las cenizas son granos muy finos, oscilando entre 0.5 y 300 μm , a veces hasta 500 μm , formados por silicatos, óxido de aluminio, óxidos variados y cal libre. Esta última le confiere propiedades puzolánicas, reduciendo

así, el índice de expansión del suelo. El uso de puzolanas se ha venido estudiando [43, 44], especialmente las cenizas [10, 25, 26, 30, 32, 41, 45] y su uso en forma 'cruda' o mezcladas con cal [24, 32]. En realidad, se ha encontrado [46] que la fracción que reacciona con la cal libre (CaO) es la más fina (<25 micras) e intermedia (<40 micras); las reacciones más frecuentes que se desarrollan son la formación de hidratos cálcicos de aluminio (C_3AH_6 y/o C_3ASH_6) e hidratos de silicatos cálcicos (CSH). Estos hidratos hacen que la resistencia mecánica del suelo mejore. En ciertas condiciones y dependiendo del material, en su fracción más fina puede aparecer el mineral katoita ($Ca_3Al_2(OH)_{12}$).

La empresa termoeléctrica Termotasajero S.A. suple la necesidad de energía eléctrica de la región, por ende, genera grandes toneladas de cenizas/día, originando un problema ambiental. Las cenizas utilizadas en este estudio son provistas por esta empresa de la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander, las cuales son recolectadas por medio de un filtro electrostático. Se componen en su mayoría de óxido de silicio (SiO_2) (57,23 %), seguido de óxidos de aluminio Al_2O_3 (26,76 %) e incluso óxidos de hierro Fe_2O_3 (10,35 %), datos hallados por medio de la norma ASTM D-1857-04 por SGS Colombia S.A. (provistos por Termotasajero S.A.). En general, posee un bajo contenido de óxidos de calcio, CaO, (0,73 %). Su principal ventaja radica en su economía, su fácil adquisición, además de ser la solución a un problema ambiental [47].

Una de las desventajas de las cenizas es la posible formación de minerales de etringita y/o taumasita que se forman cuando existen compuestos de sulfato junto con minerales que contienen aluminio y que a la vez reaccionan con los compuestos cálcicos como ha sido demostrado en estudios detallados [48, 49], donde expresan las reacciones llevadas a cabo en el suelo y su cinética, por lo cual, los suelos que posean sulfatos solubles deben tener consideraciones especiales. Cuando existen hierro, sodio o sulfitos puede verse retardado

el efecto del químico aplicado.

En aplicaciones de campo, se debe hacer seguimiento en un tiempo largo, ya que las reacciones desfavorables quizá no sean obvias en periodos cortos como los analizados en el laboratorio (1, 7 ó 28 días).

Procedimientos y discusión

La zona de estudio geológicamente pertenece a la denominada formación león (Tol).

Según Flórez y Pedroza en su trabajo "Desarrollo de estudios preliminares para la microzonificación sísmica de San José de Cúcuta, Colombia", presentado en el Simposio Latinoamericano y del Caribe en Geofísica (Santa Fe de Bogota, 2006), los sedimentos de esta formación son de edad Terciaria y período Oligoceno, constituida por un conjunto de arcillolitas abigarradas, microlaminadas de media a alta plasticidad, con láminas delgadas de yeso y trazas carbonáceas, ínter estratificadas; estos materiales son untuosos en estado húmedo y friables en estado seco; en su condición "in situ", el macizo registra alta fracturación y diaclasamiento y registra lentes de arenisca muy fina, en la parte superior de la formación. Las arcillas de estos grupos, son sedimentos altamente erosionables y susceptibles a experimentar cambios volumétricos por modificaciones en su contenido de humedad.

Clasificación y descripción de los estratos de la zona (ensayos físicos)

La zona de estudio, se localiza en la urbanización "Colinas de Vista Hermosa", al norte-oeste de la ciudad de San José de Cúcuta, vía al municipio de Villa del Rosario, donde se han presentando daños en un conjunto de mas de cien viviendas, las cuales, se encuentran en alto grado de deterioro físico en elementos de cubierta, muros divisorios,

fachadas y pisos por efecto comprobado del fenómeno de expansión del suelo de apoyo (figura 1 (a) y (b)).

Figura 1. Fotografías digitales de fractura de elementos no estructural por fatiga de material en suelo expansivo; (a) y (b) Colinas de Vista Hermosa y (c) Centro de salud Antonia Santos, Cúcuta.



(a)



(b)



(c)

La notación A1-M1 se refiere al primer apique (apique1) correspondiente a la muestra 1; en lo subsiguiente del artículo, se nombrarán de la misma manera las demás muestras de los diferentes estratos.

El segundo punto (A2), correspondiente a muestras de la zona de pendiente; se distinguieron dos estratos distintos (A2-M1, A2-M2) y de espesores variables entre 0.4 y 0.8 m. ubicado en la parte central de la urbanización.

Para el tercer punto de estudio (A3) se realizó un sondeo a cielo abierto, de 2.10 m, de profundidad aproximadamente. Se encontraron dos estratos distintos (A3-M1, A3-M2) y de espesores variables entre 0.4 y 1.0 m.

La profundidad del sondeo sirve como primera aproximación para la obtención de datos físicos del suelo y propiedades mecánicas y químicas del mismo. Es de notable importancia establecer la zona activa por medio de una excavación o sondeo de mayor profundidad, hasta el punto donde el perfil litológico no presente variación del contenido de humedad, permitiendo la identificación de la zona de expansión.

El estrato A1-M1, es un material clasificado (según USC y AASTHO) como, una arcilla de muy alta compresibilidad y alta expansibilidad, contiene 5.49% de arena y 94.51% de finos, su límite líquido (LL) igual a 62.50% e índice de plasticidad (IP) de 39.01%. En su estado natural presento un contenido de agua igual a $w = 5.26\%$.

El estrato A2-M2, es un material clasificado (según USC y AASTHO) como, una arcilla de muy alta compresibilidad y alta expansibilidad, contiene 4.72% de arena y 95.28% de finos, su límite líquido $LL = 65.60\%$ e índice de plasticidad $IP = 40.16\%$. En su estado natural presento un contenido de agua igual a $w = 5.28\%$.

El estrato A2-M1, es un material clasificado (según USC y AASTHO) como, una arcilla de muy alta compresibilidad y alta expansibilidad, contiene 2.27% de arena y 97.73% de finos, su límite líquido LL= 64.40% e índice de plasticidad IP= 40.24%. En su estado natural presento un contenido de agua igual a $w = 4.86\%$. El primer estrato del punto A3, es un material de relleno, por lo cual no es necesario realizarle ensayos, ya que este no hace parte de la estructura natural del suelo y no aporta resistencia a la misma.

El segundo estrato del punto A3 (A3-M2), es un material claramente fino, clasificado (según sistema USC y AASHTO) como, una arcilla con alta compresibilidad y alta plasticidad, contiene 3.63% de arena y 96.37% de finos, su límite líquido es de 54.70% e

índice de plasticidad igual a 37.73%. Este material se encontraba prácticamente entre el límite del estrato de relleno y la matriz de cantos rodados. En su estado natural presentó una humedad natural (w) igual a 17.07%.

Los resultados de clasificación, propiedades físicas y químicas de los estratos de la zona se presentan resumidos en la tabla 1.

Ensayos químicos

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se ha identificado como una variable de suma importancia para determinar la estabilidad geotécnica de un suelo. A mayor magnitud, se presenta mayor expansividad. Para la determinación de la CIC se utilizó el

Tabla 1. Resumen propiedades físico-químicas de la zona.

No	Propiedad del suelo	Valores				
		A1-M1	A2-M2	A2-M1	A3-M2	A3-M1
1	Aspectos básicos					
	Color	Rojo	Marrón	Verde-azul	Rojo	Verde-azul
2	Gravedad específica	2.72	2.70	2.71	2.73	2.74
3	Análisis granulométrico (%)					
	Grava	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Arena	5.49	4.72	2.27	3.63	7.94
	Arcilla	94.51	95.28	97.73	96.37	92.06
4	Límites de consistencia (%) [1]					
	Humedad Natural	5.26	5.28	4.86	17.07	9.58
	Límite Líquido	62.50	65.60	64.40	54.70	67.50
	Límite Plástico	23.39	25.44	24.16	21.97	22.45
	Índice de plasticidad	39.01	40.16	40.24	37.73	45.05
5	Límite de contracción (%)	12.66	12.09	11.40	15.87	12.55
6	Clasificación					
	Clasificación AASHTO	A-7-6 (17)	A-7-6 (20)	A-7-6 (20)	A-7-6 (17)	A-7-6 (18)
	Clasificación unificada	CH	CH	CH	CH	CH
7	Estudio de compactación					
	Contenido óptimo de humedad	19.30	20.60	16.00	23.00	22.00
	Densidad máxima seca (g/cm^3)	1.79	1.74	1.86	1.70	1.69
8	Cambio Potencial de Volumen					
	Límite Plástico	Marginal (3.4)	Marginal (3.8)	Critico (4.4)	Critico (5.3)	Critico (4.4)
9	Índice de Expansión (%)	1.63	4.10	6.60	1.04	1.63
10	Grado de expansión					
	Potencial de expansión según NSR 98 [3]	Alto	Alto a muy alto	Alto	Alto	Muy alto
11	Propiedades químicas					
	Ph	6.1	6.0	6.3	5.61	6.17
	Capacidad de intercambio catiónico, CIC (meq/100 g)	30.0	32.7	31.3	29.6	33.84
12	Bases intercambiables (meq/100g)					
	Calcio	7.34	5.20	3.06	0.59	0.01
	Magnesio	18.5	24.37	25.58	12.23	0.10
	Potasio	0.46	0.46	0.46	-	-
	Conductividad eléctrica ($\mu s/cm$)	196.5	203	575	-	-

método del acetato de amonio, que hoy en día es el más aceptado, sin embargo, existen otros métodos para medir la CIC, como el método conocido del cloruro de bario (BaCl_2), azul de metileno (AM) [50], o nuevos métodos como el propuesto por Dohrmann [51], o usando otros químicos (solución de trietilen-tetramina de cobre (II) (Cu-Trien)); aunque cada método lleva consigo un porcentaje de error asociado. CZimerovack, et al. [52] ha comparado resultados obtenidos con cada método para su caso de estudio, además de carga superficial.

Las arcillas son evidentemente ácidas, con una capacidad de intercambio catiónico no tan alta como se esperaba, pueden compararse con arcillas que contengan porcentajes de minerales de illita y caolinita, y/o pueden existir minerales interestratificados Illita/esmectita. Se debe complementar este estudio con posteriores estudios en la misma zona.

La alta magnitud de la conductividad eléctrica es indicadora de la existencia de un alto contenido de sales, probablemente sodio.

Las bases intercambiables (Ca, K, Mg), se hallaron por medio de un procedimiento químico con ayuda de un espectrofotómetro Perkin Elmer 3100. De la tabla 1, se observa el contenido significativo de magnesio en el punto de estudio A2, puede ser debido a la presencia de minerales tales como sepiolita y/o pertenecientes a esta familia (paligorskita), aunque realmente es difícil saberlo sin realizar más estudios, ya que puede haber presencia de micas u otros minerales.

El área superficial específica es una propiedad que sirve como referencia para un análisis primario. Se llevaron a cabo ensayos con el método de azul de metileno llamado en inglés "spot test", por su economía, sencillez y relativa rapidez.

El azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) es un tinte que en solución acuosa se ioniza ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}^+$) y así es absorbido en las superficies cargadas negativamente de

las arcillas. Siguiendo el procedimiento descrito por Santamarina [2] se obtuvieron los resultados de la tabla 2. Tomando como criterio de comparación los valores dados por Santamarina [2] en una de sus tablas proyectadas en su trabajo, podemos suponer que el suelo es en su mayoría compuesto por minerales del grupo illítico ($80\text{-}100\text{ m}^2/\text{g}$).

Tabla 2. Superficie específica de los diferentes estratos.

Estrato	S_e (m^2/g) Sin cenizas	S_e (m^2/g) con 30% cenizas
A1-M1	85.17	64.84
A2-M1	101.23	67.28
A2-M2	95.42	57.50

La superficie específica (S_e) de las arcillas disminuye en todos los estratos para la adición del 30% de cenizas.

Ensayos de expansibilidad

En los ensayos realizados para evaluar la expansibilidad del terreno, se encuentran, el ensayo de Cambio Potencial de Volumen (CPV) [53], que puede ser realizado según el estado de la muestra, en seco, húmedo y en límite plástico. Este ensayo está particularmente relacionado con los esfuerzos que este pueda experimentar como consecuencia de la variación en su humedad.

El aparato desarrollado por William Lambe, se obtiene por medio de un ensayo rápido un índice de expansión o hinchamiento, el cual es relacionado por medio de una gráfica con el estado inicial de compactación de la muestra, encontrando así el CPV, el cual nos indica el grado de peligrosidad que puede tener el suelo desde el punto de vista de la expansión o retracción. Se trata de un ensayo de identificación y, por tanto, no podrá sustituir en casos importantes a ensayos realizados en muestras inalteradas o compactadas en las mismas condiciones que en obra.

El ensayo es uno de los utilizados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), para

la determinación de suelos expansivos, en sus Normas de Ensayos de Materiales para carreteras E-132.

El objetivo de este ensayo, es determinar la presión de expansión desarrollada por el espécimen de suelo después de 2 horas de inmersión para predecir en forma preliminar su CPV. El ensayo se realiza con una muestra de suelo alterada, debe estar en estado seco, quiere decir expuesto a un ambiente con humedad relativa del 50% hasta humedad constante (en general bastará secarlo al aire); en estado de límite plástico, se recomienda hacer un curado previo de la muestra de suelo por un periodo mínimo de 6 horas.

Los resultados obtenidos mediante este ensayo, realizados con la muestra en estado de límite líquido, demuestran que la zona en estudio presenta un CPV crítico, lo cual nos indica que este suelo es altamente expansivo (ver tabla 1).

La expansibilidad del suelo es medible, también, a través del ensayo denominado índice de expansión (IE). El aparato de prueba para índice de expansión, es usado para determinar el IE de suelos compactados parcialmente saturados bajo la acción de una carga, sumergido en agua destilada por un periodo determinado de tiempo.

El índice de expansión es expresado en porcentaje y representa la expansión sufrida por el suelo con respecto al espesor inicial de la muestra.

El procedimiento utilizado satisface las especificaciones de diseño descritos en el Código Standard de Construcciones Uniformes, UBCS N° 29-2.

Otra forma de evaluar la expansibilidad del suelo, es mediante los criterios de identificación de arcillas expansivas, o tablas sobre expansibilidad de suelos. Jiménez Salas [54], propone una tabla comparativa basada en el límite líquido, índice de plasticidad, índice

CPV de Lambe que nos permite afirmar si el suelo presenta una condición de peligrosidad nula, marginal, crítica o muy crítica.

Mezclas de cenizas

Se realizaron mezclas en volumen al 20, 25 y 30%. Se agregaron 50 a 100 ml de agua destilada hasta lograr mezcla completa de los dos materiales (ceniza volante y arcilla en estudio); se almacenaron en bolsas plásticas selladas y se mantuvieron a temperatura ambiente.

En la tabla 3, se muestran los resultados al pasar 3.5 días de curado. Se nota la disminución de los límites, al aumento de la proporción de cenizas agregadas, en la mayoría de los casos.

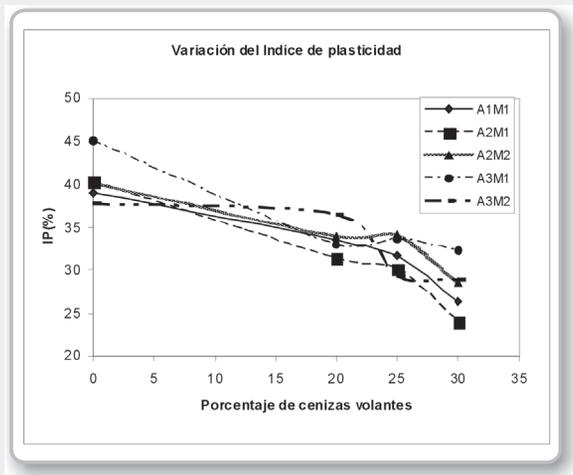
La mezcla hecha al 30% en volumen provocó la mayor disminución del índice de plasticidad y del límite líquido como se puede ver en la figura 2. Así, queda demostrada la efectividad de las cenizas en ensayos llevados a cabo en el laboratorio, se aclara que en experimentos de campo se deben tener en cuenta variables adicionales y se debe realizar el seguimiento adecuado.

Por ejemplo, en la tabla 3, se muestran los resultados de las mezclas realizadas para cada estrato y se puede apreciar la disminución del límite líquido cuyo valor inicial promedio 62.94% para los diferentes estratos, con un contenido del 30% en volumen de cenizas, el límite líquido se reduce a un valor final promedio de 52.56%, es decir, se redujo en un 16.50% aproximadamente. También podría hacerse la relación de disminución, teniendo en cuenta como parámetro el IP, cuyo valor inicial promedio sería de 40.44%, con un contenido del 30% en volumen de cenizas, este IP se reduce a un valor final promedio de 28%, es decir, se redujo un 30.74% aproximadamente. Lo cual nos indica que es una reducción importante y significativa para los propósitos estudiados en este proyecto.

Tabla 3. Cambio de las propiedades índices a diferentes porcentajes de cenizas

ESTRATO	Sin Mezcla	Mezcla 20% volumen	Mezcla 25% volumen	Mezcla 30% volumen
A1-M1				
Limite Liquido	62.50	55.00	53.40	52.60
Limite Plástico	23.39	21.46	21.75	26.29
Índice Plasticidad	39.01	33.54	31.65	26.31
Limite Contracción	12.66	14.46	13.87	15.09
% Reducción del IP	----	14.02	18.87	32.56
A2-M1				
Limite Liquido	64.40	49.00	48.00	48.10
Limite Plástico	24.16	17.60	17.85	24.16
Índice Plasticidad	40.24	31.40	30.15	23.94
Limite Contracción	11.40	12.31	17.85	11.98
% Reducción del IP	----	21.97	25.07	40.51
A2-M2				
Limite Liquido	65.60	58.10	59.00	55.50
Limite Plástico	25.44	24.19	24.93	26.87
Índice Plasticidad	40.16	33.91	34.07	28.63
Limite Contracción	12.09	16.25	18.45	15.78
% Reducción del IP	----	15.56	15.16	28.71
A3-M1				
Limite Liquido	67.50	54.70	58.00	54.40
Limite Plástico	22.45	21.81	24.37	22.10
Índice Plasticidad	45.05	32.89	33.63	32.30
Limite Contracción	12.55	20.17	16.68	18.29
% Reducción del IP	----	26.99	25.35	28.30
A3-M2				
Limite Liquido	59.70	60.60	51.70	52.20
Limite Plástico	21.97	24.06	22.41	23.39
Índice Plasticidad	37.73	36.54	29.29	28.81
Limite Contracción	15.87	14.48	15.84	14.72
% Reducción del IP	----	3.15	22.37	23.64

Figura 2. Variación del índice de plasticidad frente a los diferentes porcentajes de cenizas.



Conclusiones

Se encontró una alta concentración del ion magnesio en el estrato A2-M1, que debe estudiarse con mayor profundidad.

El efecto de la adición de las cenizas sobre el suelo arcilloso, en un tiempo corto de curado, es beneficioso, ya que reduce considerablemente el límite líquido (16.50%) y el índice de plasticidad (30.74%), así como la superficie específica, aumentando la estabilidad del suelo para los fines requeridos.

El porcentaje de cenizas que arrojó los mejores resultados sobre el suelo en estudio fue el de 30%.

Las arcillas de las dos zonas se han clasificado como CH, es decir, de alta plasticidad, sin embargo, la magnitud de la capacidad de intercambio catiónico no es tan alta como se esperaba, siendo el suelo desde este punto de vista de mediana a baja expansividad.

La fracción fina de las arcillas, al ser de gran magnitud, se mezcla fácilmente con las cenizas, formando hidratos cálcicos (de aluminio o silicio) por medio de reacciones puzolánicas.

A pesar de que el método del "spot test" de azul de metileno es un poco subjetivo, da una buena aproximación para un análisis preliminar del suelo.

La composición mineralógica juega un papel importante en la estabilidad de suelo, ya que al haber cierto porcentaje de cuarzo, feldespato y micas habrían mayor o menor cantidad de diferentes tipos de hidratos como producto de la reacción con las cenizas.

Además, si existe cierta cantidad de esmectitas, sería esto el mayor causante de los problemas de expansión en el suelo.

Las cenizas son un material con un gran poder en la industria del reciclaje, ya que puede tener múltiples usos. En nuestro caso, son de fácil adquisición, económicas y pueden ser útiles para lograr la estabilización de los suelos expansivos, si el ingeniero al hacer el análisis previo del suelo así lo juzgue (bajo contenido de sulfatos); también ayudaría a mitigar un problema ambiental de la región generado por el volumen acumulado de cenizas como desecho de la producción térmica de energía.

Recomendaciones

Las arcillas expansivas deben ser bien caracterizadas previamente al planteamiento de la propuesta de estabilización. Poco se ha

documentado acerca de las características de las arcillas presentes en las formaciones de la ciudad de San José de Cúcuta [55, 56] y de su mineralogía [57].

Las cenizas, además de ser clasificadas, deben cumplir con especificaciones según la norma estándar ASTM C 618 [1]. Las cenizas de la empresa Termotasajero no cumplen con dichas especificaciones por lo cual habría que mezclarlas con cierto porcentaje de cal para mejorar su utilidad en lo relacionado a estabilización de suelos (norma ASTM C 593) [1].

Se debe tener en cuenta la realización de un sondeo a mayor profundidad, para el establecimiento de la zona activa.

Es necesario plantear ensayos de microscopia electrónica (MEB) además de difracción de rayos X (DRX) para identificar la composición mineralógica del suelo arcilloso.

Se debe analizar el efecto de las cenizas en un tiempo largo de curado, para asegurar que no ocurran reacciones secundarias sin controlar, así como analizar cambios en algunas otras variables importantes en el comportamiento geotécnico del suelo.

Bibliografía

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM, 1992. Annual Book of ASTM Standards.
- [2] Santamarina, J.C., Klein, K.A., Wang, Y.H. and Prencke, E. Specific surface: determination and relevance. Canadian Geotechnical Journal 39 (2002) p. 233–241. DOI: 10.1139/T01-077.
- [3] Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente. NSR-98. Título H. Capítulo H.6.
- [4] Higuera, C. Estabilización de suelos con el aditivo químico Dynasolo DS-328 en Colombia. 1987.

- [5] David Rogers J., Rog Robert. Damage to foundations from expansive soils. Ed. Pearson. Prentice Hall. . Madrid 2002.
- [6] DEPARTMENT OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE AFJMAN 32-1019. Soil stabilization for pavements. ARMY TM 5-822-14. October 1994.
- [7] DEPARTMENT OF THE ARMY. US. Technical manual foundations in expansive soils. TM 5-818-7. September 1983.
- [8] MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL. Estabilización y modificación con cal. Publicación de la Nacional Lime Asociación. Enero 2004. Boletín 326. (La traducción fue finalmente publicada Noviembre de 2006)
- [9] Rico, A., Del Castillo, H. La ingeniería de suelos en las Vías Terrestres. Editorial Limusa. México. 1978.
- [10] White, D. J., Harrington, D. S. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. Fly ash soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils, Volume I: Engineering Properties and Construction Guidelines. Sponsored by the Iowa Highway Research Board (Project TR-461), Federal Highway Administration (Project 4) and Iowa Department of Transportation (CTRE Project 01-90). Final Report April 2005.
- [11] Puscha, R., Yong, R., Water saturation and retention of hydrophilic clay buffer microstructural aspects. Applied Clay Science 23 (2003) p. 61– 68
- [12] Yong, R. N. Overview of modeling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance. Engineering Geology 54 (1999) p. 83–91.
- [13] Yong, R. N. Influence of microstructural features on water, ion diffusion and transport in clay soils. Applied Clay Science 23 (2003) p. 3– 13
- [14] González de Vallejo, L.I., Ferrere, M., Ortuño, I. Oteo, C. Ingeniería geológica.
- [15] Adnan A. Basma, Azm S., Homoud, Abdallah I. Husein Malkawi, Mohamed A. Bashabsheh. Swelling shrinkage behavior of natural expansive clays. Applied Clay Science 11(1996) p. 211-227.
- [16] Yong, R. N. Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. Engineering Geology 54 (1999) p. 3–13
- [17] Do Nascimento G., Leonardo J., Análisis multi-componente no isotermo en medio poroso deformable no saturado. Tesis doctoral. Barcelona. . Universidad Politécnica de Catalunya. Enero 2002.
- [18] Alonso, E.E., Vaunat, J., Gens, J. A. Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. Engineering Geology 54 (1999) p. 173–183
- [19] Alvarez Lugo, A. E., Barrios Murillo, J. L. Influencia de la incorporación de sales de aluminio sobre la susceptibilidad de cambio volumétrico y la dispersividad de las arcillas. VII CCG 1998 Sociedad Colombiana de Geotecnia. p 1147-1157.
- [20] Arellana, J. Efecto de la cal y el geostab en la estabilización de suelos arcillosos en Juan Mina. Tesis (Ingeniería Civil). (2004). Facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Norte.
- [21] Camacho, J. F., Reyes, O. J., Mayorga, C., Méndez, D. F. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina., 16 (2006) No 002, p. 45-53.
- [22] Escobar, Ricardo. Estabilización electroquímica de suelos. Octavo simposio colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Popayán, 1991.
- [23] Escobar, R. Paredes, J. Espinal, R. Estabilización electroquímica de suelos. VIII Congreso Panamericano de Mecánica de suelos e Ingeniería de Fundaciones. Cartagena, Colombia, 1987.

- [24] Koliaş, S. Kasselouri-Rigopoulou, V. Karahalios, A. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) p. 301–313.
- [25] Nalbantoglu, Z. Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials* 18 (2004) p. 377–381
- [26] Nalbantoglu, Z. & Guchilmez E., Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid Environments. *Journal of Arid Environments* (2001) 47: 453–463. doi:10.1006/jare.2000.0726, disponible en <http://www.idealibrary.com>
- [27] Páez M, Diego F. Efectos de la Estabilización Electroquímica de Suelos Finos. Memorias del XV SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERIA DE PAVIMENTOS, “Pavimentos estables camino para un desarrollo sostenible”. Melgar – Colombia Marzo 09 al 13 de 2005.
- [28] Páez M, Diego F. Estabilización de Suelos Finos con Aceite Sulfonado en la Ciudad de Tunja Memorias de las IV JORNADAS INTERNACIONALES DEL ASFALTO. Cartagena de Indias – Colombia Agosto 18 al 20 de 2004.
- [29] Páez M, D. F. Estabilización suelos Finos. Memorias de la 1a. SEMANA INTERNACIONAL DE LA INGENIERIA CIVIL. Medellín – Colombia Mayo 16 al 21 de 2005.
- [30] Prabakar, J. Dendokar, N. Morchhale, R.K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials* 18 (2004) p. 263-267.
- [31] Romero, C. Montoya, E. Estabilización de suelos con aceite sulfonado. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. 1986.
- [32] Sezer, A. Ramyar, K. Recep Yilmaz, G.H. Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and Environmental* 41 (2006) p. 150-155.
- [33] Bernal, I., Cabezas, H., Espitia, C., Mojica, J. & Quintero, J., Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 27 (105): 569-578, 2003. ISSN 0370-3908.
- [34] Bowles, J. E. *Foundation Analysis and design*. Ed. Mc Graw-Hill. 1968. 750 p.
- [35] Lambe, T.W., Whitman, R. V. *Mecánica de suelos*. Ed. Limusa. México (1981).
- [36] Luckham, P.F., Rossi, S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interfaces Science* 82 (1999) 43-92.
- [37] Márquez C., G. *Propiedades Ingenieriles de los Suelos*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 1982.
- [38] Hoyos Patiño, F. Ramiro Sánchez, J. *Posología del tratamiento de suelos expansivos*. VII CCG 1998. Sociedad Colombiana de Geotecnia. p 1159-1163.
- [39] Mateos Manuel. Davidson. *Revista de obras públicas*. Agosto 1963.
- [40] Mateos Manuel. *Estudios sobre suelo cal*. *Revista de obras públicas*. 1966.
- [41] Medina Parra, S. D. Mariño R., H. I. Utilización de los residuos del carbón (cenizas), como elemento estabilizador de la estructura Vial Belén-Carmen de Tonchalá. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Francisco de Paula Santander. 1982.
- [42] Tonoş M.C., Gokceoglu A. C., Ulusay, A. R. A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay. *Bull Eng Geol Env* (2003) 62:91–106. DOI 10.1007/s10064-002-0176-z
- [43] Al-Rawasa, A. Hagoa, A.W. Al-Sarmib, H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment* 40 (2005) p.

- 681–687.
- [44] Delvasto, Silvio. Estudio de las propiedades de cemento Pórtland puzolánicos producidos por cenizas volantes. Tesis Universidad del Valle (1981).
- [45] Temimi M., Ben Amor K, Camps J.P. Making building products by extrusion and cement stabilization: limits of the process with montmorillonite clay. *Applied Clay Science*, 13, 245. (1998).
- [46] Adamiec, P, Benezet, J., Benhassaine, A. Pozzolanic reactivity of silico-aluminous fly ash. *Particuology* 6 (2008) p. 93–98.
- [47] Asokan, P. Mohini, S., Asolekar, S. R. Coal combustion residues—environmental implications and recycling potentials. *Resources, Conservation and Recycling* 43 (2005) p. 239–262.
- [48] Mohamed, A.M.O. The role of clay minerals in marly soils on its stability. *Engineering Geology* 57 (2000) p. 193–203
- [49] Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Ettringite formation and behaviour in clayey soils, *Applied Clay Science* (2008), doi:10.1016/j. clay.2008.01.009
- [50] Yukselen, Y., Kaya, A., Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soil. *Engineering Geology* (2008), doi:10.1016/j. enggeo.2008.07.002
- [51] Dohrmann, R. Cation exchange capacity methodology III: Correct exchangeable calcium determination of calcareous clays using a new silver–thiourea method. *Applied Clay Science* 34 (2006) 47–57
- [52] Czímerová, A., Bujdák, J., Dohrmann, R. Traditional and novel methods for estimating the layer charge of smectites. *Applied Clay Science* 34 (2006) p. 2–13.
- [53] Amaya M., J. Z. Diseño de manuales de procedimientos para los ensayos de laboratorio “cambio potencial de volumen, índice de expansión y Presión de expansión” en la Universidad Francisco de Paula Santander. Tesis para optar por el título de ingeniero civil. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta. (2000)
- [54] Jiménez Salas, J.A., Justo A., J.L. Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. Segunda Edición. 1975. Editorial Rueda Madrid p. 85-109.
- [55] Pedroza, A. Características geológica-mineralógica y geotécnicas de los suelos arcillosos que afloran en el área metropolitana de Cúcuta. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta. 1998.
- [56] Pedroza, A. Patología de la arcilla: Enfoque geotécnico. Camacol 051 Vol. 15. Bogotá. 1992.
- [57] Macías López, M. Estudio de las transformaciones en estado sólido de las arcillas de San José de Cúcuta utilizadas en la fabricación de baldosas mediante caracterización mineralógica por difracción de rayos x de muestras policristalinas. Trabajo para optar por el título de Químico Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2006.