

Caracterización de un suelo plástico para estabilización con cementantes

Characterization of a plastic floor for stabilization with cementing

Romel Jesús Gallardo Amaya¹, Ciro Andrey Martínez Ovallos², Angie Alejandra Muñoz Quintero³.

¹Magister en Geotecnia, rjgallardo@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Docente Departamento de Ingeniería Civil, orcid.org/0000-0002-4740-4841, Ocaña, Colombia.

²Ingeniero Civil, camartinez@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Investigador grupo GIGMA, orcid.org/0000-0002-9760-1528, Ocaña, Colombia.

³Ingeniero Civil, aamunozq@ufpso.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Investigadora grupo GIGMA, orcid.org/0000-0002-1548-7443, Ocaña, Colombia.

How to cite: R.J. Gallardo, Amaya, C.A. Martínez, Ovallos, A.A. Muñoz-Quintero “Caracterización de un suelo plástico para estabilización con cementantes”. *Respuestas*, vol. 25, no. S2, pp. 6-13, 2020.

Received on September 27, 2019; Approved on December 03, 2019

ABSTRACT

Soils with a significant content of clay material and high plasticity are related to a particular behavior that presents with problems of low resistance to cutting, excessive volumetric changes, and high deformability. As regards the previous studies conducted for any infrastructure project, the typology of the soils present should be identified and characterized. With the development of research it seeks to carry out the characterization of a typical plastic soil, the territorial roads, the municipality of Ocaña, and the possibility of improving the potential of the cement, identifying their physical, mechanical and chemical characteristics. For this purpose, a composition composed of 3 stages is proposed: Recognition of the sampling site, laboratory tests and analysis of results. The results are related to the soil according to the unified system as an MH (clay loam of high plasticity), with LL = 61.7%, LP = 44.9% and IP = 16.78%, with a specific gravity of 2.78 and unit weight of 1.382 g / cm³, optimum humidity of 31.07% and maximum dry density of 1.43 g / cm³. As for the mechanical characteristics, it has an average friction angle of 20.25 °, the cohesion of 18.11 kPa, unconfined compression resistance of 135.61 kPa and an index of CBR = 5.37. The relationship with the chemical characteristics, the soil has a cationic exchange capacity of 46.1 meq / 100g soil and a pH = 6.9. With the EDS analysis, the main element present in the soil is oxygen, followed by silicon and aluminum. There is also a noticeable presence of iron oxide. In conclusion, the study floor meets the characteristics of a soil that can present deformation problems for moisture values, which is susceptible, in addition to its physical and chemical characteristics, to stabilize with cement.

RESUMEN

Los suelos con contenido significativo de material arcilloso y alta plasticidad poseen un comportamiento particular que los hace susceptibles de presentar problemas asociados a baja resistencia al corte, excesivos cambios volumétricos y alta deformabilidad. Por lo anterior dentro los estudios previos realizados para cualquier proyecto de infraestructura, se deben identificar y caracterizar la tipología de suelos presente, a fin de identificar los posibles problemas que pueden presentarse. Con el desarrollo de investigación se busca llevar a cabo la caracterización de un suelo plástico típico de las vías terciarias del municipio de Ocaña, para verificar su potencialidad a mejorarse con el uso de cementantes, identificando sus características físicas, mecánicas y químicas. Para ello se propone una metodología compuesta por 3 etapas: Reconocimiento del sitio de muestreo, ensayos de laboratorio y análisis de resultados. Los resultados obtenidos permiten clasificar el suelo según el sistema unificado como un MH (Limo arcilloso de alta plasticidad), con un LL=61.7%, LP=44.9% e IP=16.78%, con una gravedad específica de 2.78 y peso unitario de 1.382 g/cm³, humedad óptima de 31.07% y densidad seca máxima de 1.43 g/cm³. En cuanto a las características mecánicas, posee un ángulo de fricción promedio de 20.25°, cohesión de 18.11 kPa, resistencia a la compresión inconfiada de 135.61 kPa y un índice de CBR=5.37. Con relación a las características químicas, el suelo posee una capacidad de intercambio catiónico de 46.1 meq/100g suelo y un pH=6.9. Con el análisis EDS se identificó que el principal elemento presente en el suelo es el oxígeno, seguido del silicio y el aluminio, además existe una notoria presencia de óxido de hierro. En conclusión, el suelo de estudio reúne las características de un suelo que puede presentar problemas de deformabilidad para valores elevados de humedad, que lo hace susceptible, además de sus características físicas y químicas, a estabilizarse con cementantes.

Keywords:

Characterization,
Cementing, Deformability,
Stabilization, High
plasticity floors.

Palabras clave:

Caracterización;
Cementante;
Deformabilidad;
Estabilización; Suelos de
alta plasticidad

*Corresponding author:
E-mail: ad-rjgallardo@ufpso.edu.co (Romel Jesús Gallardo Amaya)



Introducción

Los suelos con un alto contenido de material arcilloso tienden a presentar problemas asociados a la baja resistencia al corte y alta deformabilidad [1]. Así mismo suelen presentar cambios volumétricos cuando varía su contenido de agua [2]. Dado que es común encontrar estos suelos en las subrasantes de proyectos viales, se hace necesario intervenirlos para mejorar su comportamiento bajo cargas [3].

En general, los minerales presentes en los suelos arcillosos se caracterizan por tener un tamaño de partícula muy pequeño, una gran superficie específica y una alta capacidad de intercambio de cationes [4] [5]. Estas características determinan que sean suelos en los que no se tiene una fracción granular representativa por lo que predomina la fracción fina, los que los hace suelos cohesivos, adicionalmente las partículas finas rodean a las más gruesas y en presencia de agua actúan como lubricante reduciendo la capacidad de soporte y resistencia del suelo [3].

Los cambios volumétricos en estos suelos están asociados principalmente a tres factores: la geología, las propiedades ingenieriles y las condiciones ambientales locales. Dentro de las condiciones ambientales se debe tener en cuenta el porcentaje y tipo de mineral de arcilla presente en la masa de suelo, sus condiciones iniciales de humedad y la presión de confinamiento [1]. En todo caso estos cambios volumétricos que se presentan en el suelo son la principal causa de los daños a la estructura e infraestructura a las que sirven de soporte [6] [7] [8] [9], esto ha llevado a que diferentes autores se refieran a estos tipos de suelos como “calamitous soils” (Suelos calamitosos) [10].

Debido al comportamiento inadecuado que exhiben los materiales con las características anteriormente mencionadas, en ocasiones se suele intervenir el suelo mediante la implementación de un proceso de mejoramiento. Este mejoramiento consiste en la implementación de soluciones ingenieriles que tienen por objetivo incrementar el desempeño de la capa superficial existente y, en el caso de las subrasantes, incrementar su capacidad para soportar la estructura del pavimento [11]. Esto es de gran relevancia considerando que una quinta parte de las fallas del pavimento ocurren debido a una baja resistencia estructural y que para el caso de subrasantes no pavimentadas, estas son particularmente susceptibles a la erosión

y deformación [12].

Dentro de los procesos de mejoramiento del suelo, la estabilización es una alternativa para mejorar sus propiedades físicas y su comportamiento mecánico, permitiendo obtener un mejor comportamiento ante la acción de cargas debido a la mejora en los parámetros de resistencia del suelo [13] [14]. Las mejoras más comunes logradas a través de la estabilización incluyen una mejor gradación del suelo, reducción del índice de plasticidad o potencial de hinchamiento, y un aumento de la durabilidad y la resistencia [15].

La estabilización de suelos con alta plasticidad se realiza comúnmente con la incorporación de compuestos cementantes entre los que se tienen la cal, cenizas volantes o cemento [5] [16] [17], y se fundamenta principalmente en reducir el índice de plasticidad y eventualmente el potencial de expansión del suelo, mediante la adición de óxido de calcio que produce la floculación del material arcilloso mediante la sustitución de los iones monovalente por iones Ca^{2+} , esto logra equilibrar las cargas electrostáticas de dicho material y reduce las fuerzas electroquímicas de repulsión entre ellas [18]. Luego se produce una “adhesión de las partículas de arcilla” a los flóculos, esto logra una mejor estructura granular del suelo, una reducción de la plasticidad, mayor permeabilidad y principalmente una menor expansividad [19] [20] [21].

El aporte de los cementantes implica un aumento del pH, que puede alcanzar valores de aproximadamente 12.4, en estas situaciones, se generan reacciones cementantes cuando el Si y el Al, que forman parte de las láminas de arcilla, se disuelven y combinan con el Ca^{2+} disponible, esto permite que se formen compuestos como los hidratos de silicato de calcio (CSH) y los hidratos de aluminato de calcio (CAH), los cuales tienen propiedades cementantes [22] [23]. Estos compuestos son responsables de mejorar determinadas propiedades mecánicas del suelo, así como de ayudar a reducir su expansividad por acción de la cementación.

Este artículo discute los resultados experimentales de la caracterización de un suelo de tipo plástico que reúne las condiciones necesarias para ser estabilizado con cementantes, identificando las características físicas básicas y propiedades mecánicas del mismo, complementando el estudio con un análisis micrográfico mediante ensayos SEM y EDS.

Materiales y Métodos:

Para realizar la caracterización del suelo para estabilización se ha planteado una estructura de trabajo como se muestra en la Figura 1, que permitirá establecer los procedimientos a emplear en el desarrollo de la investigación para determinar algunas características físicas básicas y mecánicas.

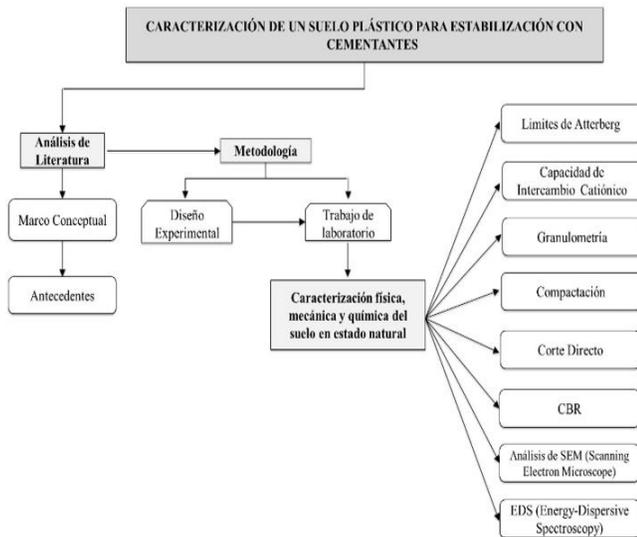


Figura 1 Metodología de investigación. Fuente: Autores

El diseño del experimento se realiza teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de la investigación es la caracterización de un suelo plástico para ser estabilizado con cementantes, identificando propiedades mecánicas y físicas tales como cohesión, fricción, capacidad de soporte, plasticidad y resistencia a la compresión simple.

Para el desarrollo de cualquier programa de ensayos de laboratorio se requiere obtener una cantidad representativa de muestra, para ello se procede a identificar el sector donde se encuentran los materiales que serán objeto de estudio mediante visitas de campo e identificando por inspección visual lugares donde se encuentren suelos arcillosos. Se ha identificado que en la ciudad de Ocaña suelos con importante contenido de materiales finos, que presentan altos valores de plasticidad se encuentran en las zonas donde se tienen perfiles residuales evolucionados de la alteración de rocas de tipo Ígneo y Metamórfico. En este caso el sector seleccionado para el muestreo corresponde a un tramo del carretable que comunica el perímetro urbano de Ocaña con el sector de Pueblo nuevo, en el que se encontraron materiales residuales de tipo cohesivo provenientes de la meteorización

de la roca de la unidad geológica presente en el sector, el Ortoneis (pDo).

Los ensayos se realizaron en un ambiente controlado en el laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos que tiene la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, evitando que factores externos como el operador, el equipo, la temperatura, o la evaporación pudieran afectar la medición. Para la realización de los ensayos, lo anterior basado en la normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y las del Instituto Nacional de Vías – INVIAS.

Tipo de investigación

La investigación implementada para el desarrollo del proyecto es de tipo experimental, considera el trabajo de campo para la recolección de las muestras necesarias para ejecutar el programa de ensayos de laboratorio y realizar posteriormente el análisis del comportamiento del suelo en su condición natural que permita su caracterización. La población de estudio está integrada por los suelos de tipo cohesivo de alta plasticidad y la muestra consiste en los suelos de un tramo de la subrasante del carretable que comunica a Ocaña con el sector de Pueblo nuevo, en la parte suroriental del municipio.

Ensayos de laboratorio

El programa de ensayos de laboratorio desarrollado tiene como fin determinar aspectos del suelo plástico en estudio, entre ellos sus características físicas básicas de contenido de humedad, límites de plasticidad, peso unitario y relaciones humedad-densidad, así como también de su comportamiento esfuerzo-deformación mediante pruebas de corte directo, compresión simple y CBR., para la realización de estas se seleccionaron las Normas INVIAS versión 2013. En la Tabla I se muestran las pruebas realizadas y la correspondiente norma INV aplicada.

Norma	Descripción
INV. E-103	Conservación y transporte de muestras de suelo.
INV. E-104	Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie.
INV. E-105	Obtención de muestras de suelo mediante tubos de pared delgada.
INV. E-122	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.
INV. E-123	Determinación de los tamaños de partículas de los suelos.
INV. E-125	Determinación del límite líquido de los suelos.
INV. E-126	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
INV. E-128	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.
INV. E-141	Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación).
INV. E-148	CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.
INV. E-152	Compresión inconfiada en muestras de suelos.
INV. E-154	Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD).
INV. E-180	Clasificación de suelos y de mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (sistema AASHTO).
INV. E-181	Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.
ASMTD-6276	Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

Fuente: Autores

Tabla I. NORMAS APLICADAS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Resultados y análisis

Una vez realizados las pruebas de laboratorio programados para el material en su condición natural se procedió a tabular la información obtenida. Los principales resultados obtenidos se detallan a continuación:

Capacidad de intercambio catiónico

Con el fin de establecer un punto de muestreo que permitiera obtener el material con las mejores características para estabilización, se realizaron sondeos en diferentes lugares de la zona de estudio, a partir de los cuales se obtuvieron 10 muestras a lo largo del tramo de vía seleccionado, tal como se muestra la Figura 2. La Tabla II muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar la capacidad de intercambio catiónico.



Figura 2 Muestras para ensayo de Capacidad de intercambio catiónico, obtenidas a lo largo del sector para muestreo. Fuente: Autores

NÚMERO DE MUESTRA	CIC [meq/100g suelo]
1	10,4
2	10,3
3	23,4
4	23,3
5	29,2
6	41,7
7	27,1
8	35,9
9	31,4
10	46,1

Fuente: Autores

Tabla II. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

A partir de estos valores es posible afirmar que las muestras número 6 y 10 poseen la mayor capacidad de intercambio catiónico y por consiguiente mayor cantidad de minerales arcillosos. La relevancia de este valor, para el proceso de estabilización, está asociada al intercambio de cationes que se desarrolla entre los iones metálicos asociados con la superficie de las partículas de arcilla y los iones de calcio de la cal, esta interacción logra modificar las características del suelo y, en lo que respecta a la cal, reduce significativamente la plasticidad, entonces, entre mayor sea la capacidad de intercambio de suelo, más efectivo resulta ser el proceso de estabilización, por lo cual, se ha seleccionado la muestra 10 para el desarrollo de los demás ensayos.

Caracterización física

Estos resultados permitieron realizar la clasificación del suelo y su curva normal de compactación. Los resultados para los diferentes ensayos fueron los siguientes: La clasificación del suelo según el sistema unificado es MH (limo arcilloso de alta plasticidad) y según el sistema AASHTO es un A-7-5 (25), en la Figura 3 y la Tabla III muestra los datos obtenidos.

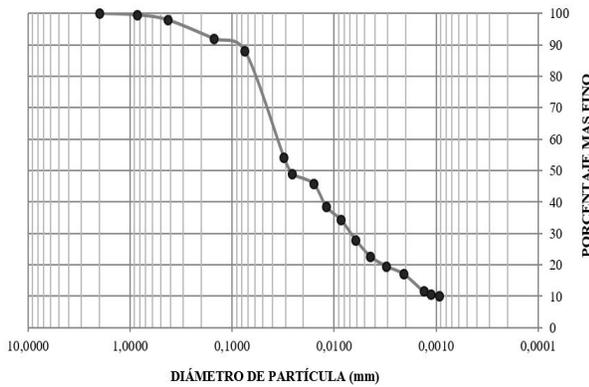


Figura 3 Distribución de tamaños de grano del suelo. Fuente: Autores

Descripción	% Arenas	% Finos	% Arcillas	% Limos	L.L. (%)	L.P. (%)	L.P. (%)	L.C. (%)	Clasificación	
									S.U.C.S.	AASTHO
Suelo Limo-Arcilloso color marrón naranja	11,95	88,05	16,48	71,57	61,70	44,90	16,78	33,62	MH	A-7-5(25)

Fuente: Autores

Tabla III. Datos Obtenidos De Los Ensayos De Clasificación

Con respecto a la gravedad específica se obtuvo un valor promedio de 2.784, en general los valores comunes de gravedad específica para minerales de arcilla como lo mencionan Lambe y Whitman en su libro Mecánica de Suelos son de 2.75 a 2.78 para montmorillonitas, 2.60 a 2.86 para Illita y 2.62 a 2.66 para caolinita [24]. Los resultados obtenidos pueden indicar que los minerales de arcilla presentes en el suelo corresponden a la montmorillonita.

De los diferentes ensayos realizados de peso específico se obtuvo un valor promedio de 1.382 g/cm³ (13.56 kN/m³). Este es un valor relativamente bajo y generalmente corresponde a suelos con contenido de materia orgánica, sin embargo las muestras no indican ser un material con estas características, por lo cual se puede asumir que el bajo valor es debido a su alta porosidad.

De los ensayos de compactación mediante Proctor estándar se obtuvo el valor máximo promedio de peso específico seco de 1.427 g/cm³ con contenido óptimo de humedad de 31.03%, la Figura 4 representa las tres curvas de compactación para cada uno de los ensayos realizados.

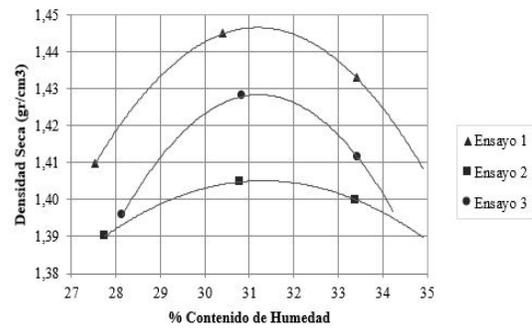


Figura 4 Curva de compactación del suelo en estado natural Fuente: Autores

Caracterización mecánica

De los ensayos realizados de corte directo (UU) se obtuvieron valores promedio de ángulo de fricción interna de 20.53° y una cohesión de 18.11 kPa.

Para el caso del ensayo de compresión inconfiada, los resultados obtenidos se indican en la Tabla IV, la tipología de falla de las diferentes probetas fue de tipo frágil.

Ensayo	RCU (kPa)
1	128.330
2	132.034
3	146.456

Fuente: Autores

Tabla IV. Resultados Del Ensayo De Compresión Inconfiada

Las pruebas de CBR mostraron los resultados indicados en la Tabla V. De acuerdo a los resultados se tendría un CBR promedio para 95% de γ_{dmax} de 5.4 y CBR de 4.0 para 90% de γ_{dmax} .

Prueba No.	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	CHO (%)	CBR (%) γ_{dmax}	CBR (%) 0.95 γ_{dmax}	CBR (%) 0.90 γ_{dmax}
1	1.401	31.03	7.2	5.7	4.2
2	1.403	31.03	7.0	5.6	4.3
3	1.414	31.03	6.1	4.8	3.6

Fuente: Autores

Tabla V. Resultados De Los Ensayos De CBR Realizados

Análisis de Microscopía electrónica de barrido

El análisis de microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy) se realizó con un microscopio de barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650, las muestras se tomaron con alto vacío, un voltaje de aceleración de 25 kV. En la detección de imágenes se usaron electrones secundarios (SE), Everhart Thornley detector ETD para observar morfología y electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electron detector (BSED) tipo SSD para observar variaciones de composición. Para el análisis químico el voltaje de aceleración fue 25 Kv a 200X con un detector EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) para el análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) utilizando el software EDX Genesis.

A partir de las imágenes obtenidas del suelo en condición natural como se muestra en la Figura 5, se puede apreciar un material heterogéneo de superficie irregular, con fragmentos de cuarzo y minerales de arcilla. A esta escala es apreciable el grado de porosidad que posee el material además de la falta de cohesión entre partículas.

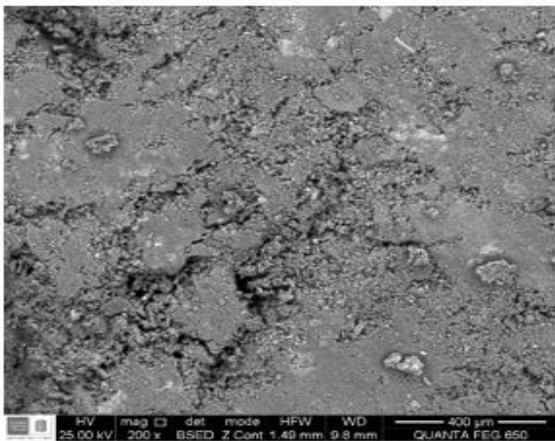


Figura 5 Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 400 µm
Fuente: Autores

Una ampliación a 1000 aumentos de la Figura 5, permite ver con mayor detalle la morfología y composición de la muestra como se aprecia en la Figura 6; el material mantiene las características heterogéneas y la superficie irregular, con considerable espacios porosos y una escasa matriz con tendencia a ser grano-soportada además de la baja cohesión. En esta imagen de retrodispersados es notoria la variación de la composición, que se evidencia en las diferentes texturas y escalas de grises de la imagen, así mismo hay distribución homogénea de materiales de

alta densidad representados por los puntos o zonas más brillantes, indicando el contenido de óxido.

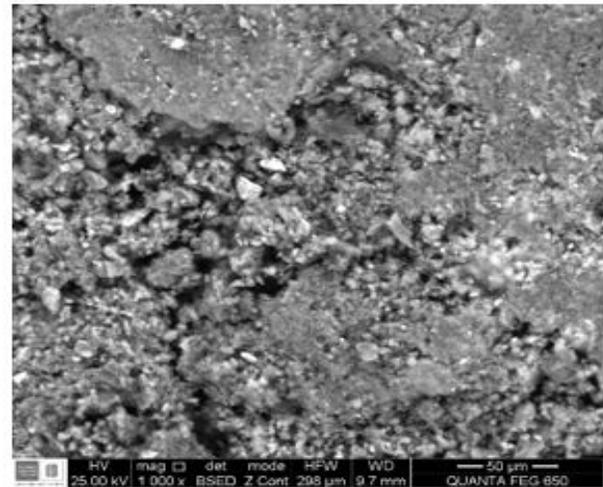


Figura 6 Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 50 µm
Fuente: Autores

Los resultados del análisis elemental EDS se muestran en la Figura 7, es evidente que el principal elemento es el oxígeno, seguido del silicio y el aluminio, además existe una notoria presencia de óxido de hierro, los altos niveles de oxígeno pueden deberse a la porosidad del material, que se denota en su particular bajo peso unitario.

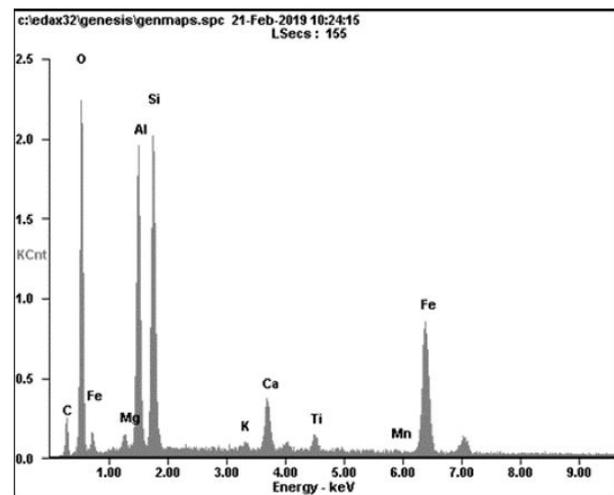


Figura 7 Análisis EDS de la muestra en estado natural
Fuente: Autores

Conclusiones

Cuando los suelos para fines de ingeniería presentan un deficiente comportamiento, este puede ser optimizado a través de mejoras mejoras significativas de sus

propiedades que se pueden lograr con la incorporación de material cementante. Estas mejoras varían dependiendo de las características del suelo y el material cementante, en este sentido, una etapa previa para cualquier tipo de estabilización con cementantes consiste en identificar las condiciones iniciales del suelo en los aspectos químico, físico, y mecánico de modo que se pueda establecer la aplicabilidad del cementante.

El suelo de estudio es un suelo de origen residual, de tipo cohesivo, que corresponde a un limo arcilloso de alta plasticidad, clasificado como un MH de acuerdo al SUCS y un A-7-5 (25) con el sistema AASHTO, con un límite líquido de 61.7 % y un contenido de humedad natural del 39%, características que hacen que su comportamiento en temporadas de lluvias lo convierta en un material inadecuado para el tránsito vehicular. Adicionalmente es un suelo de baja capacidad de soporte y alta compresibilidad presentando un desempeño de pobre a regular como subrasante. Presenta una alta porosidad que le atribuye un peso específico muy bajo de 13.56 kN/m³.

La CIC (capacidad de Intercambio Catiónico) como un indicador de la aplicabilidad de la estabilización con cementante, para el caso del suelo estudiado tiene un valor de 46.1 meq/100g suelo, permite establecer para la estabilización con cementante tipo cal se tendrán un importante intercambio de cationes entre los iones metálicos en las superficies de las partículas de arcilla y los iones de calcio de la cal, lo cual permitirá una modificación importante de las propiedades como resistencia y plasticidad.

De acuerdo a los resultados del análisis de microscopía electrónica de barrido y EDS se corroboró que para el caso del suelo de estudio, su bajo peso específico está asociado a una estructura con alta porosidad y composición heterogénea de baja cohesión.

La metodología de análisis planteada es una guía que se puede aplicar en proyectos viales en los que se identifiquen subrasantes conformadas por suelos cohesivos de alta plasticidad, permitiendo definir la viabilidad de aplicación de estabilización con cementantes hidráulicos específicamente los tipos cal.

Rreferencias

- [1] A. Sabtan, “Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia”, *Journal of Asian Earth Sciences* Vol. 25, no. 5, pp.747–757, 2005.
- [2] R. Huang y L. Wu, “Stability analysis of unsaturated expansive soil slope”, *Earth Science Frontiers*, vol. 14, no. 6, pp. 129–133, 2007.
- [3] C. Higuera, J. Gómez y O. Pardo, “Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio”. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, vol. 21, no. 32, pp. 21-40, 2012. [Online]. Disponible en: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1431/1426> (2012).
- [4] S. Fityus, O. Buzzi, “The place of expansive clays in the framework of unsaturated soil mechanics”. *Applied Clay Science*, vol. 43, no.2, pp 150–155. 2009
- [5] Z. Nalbantoglu, “Effectiveness of Class C fly ash as an expansive soil stabilizer”, *Construction and Building Materials*, vol. 18, no. 6, pp. 377–381, 2004.
- [6] A. Assadi, S. Shahaboddin, “A micro-mechanical approach to swelling behavior of unsaturated expansive clays under controlled drainage conditions”, *Applied Clay Science*, vol. 45, no.2, pp. 8–19, 2009
- [7] E. Avsar, R. Ulusay, y H. Sonmez, “Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay”, *Engineering Geology*, vol. 105, no. 1–2, pp. 24–31, 2009
- [8] V. Ferber, J. C. Auriol, Y. J. Cui, y J. P. Magnan, “On the swelling potential of compacted high plasticity clays”, *Engineering Geology*, vol. 104, no. 3, pp. 200–210, 2009.

- [9] E. S. Seif, “Efficiency of quicklime in reducing the swelling potential of pulverized expansive shale, Northern Jeddah, Saudi Arabia”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 74, no. 2, pp. 637-650, 2015.
- [10] L. Chen, Z. Yin, P. Zhang, “Relationship of resistivity with water content and fissures of unsaturated expansive soils”, *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 17, no.4, pp. 537–540, 2007.
- [11] Corporación Andina de Fomento – CAF, “Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías de bajo tránsito”, Serie informes sectoriales. Infraestructura, (Caracas), 2010. [Online]. Disponible en <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/401>
- [12] D. K. Kuttah, *Improving low-volume road construction and performance: Validity of using the heavy vehicle simulator in evaluating the reinforcement of low-volume roads*. Linköping: VTI, Statens väg och transportforskningsinstitut, 2013.
- [13] A. Eisazadeh, K. A. Kassim, y H. Nur, “Molecular characteristics of phosphoric acid treated soils”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 56-58, 2010.
- [14] A. Marto, N. Latifi, y H. Sohaei, “Stabilization of laterite soil using GKS soil stabilizer”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 521-532, 2013.
- [15] A. E. Ramaji, “A review on the soil stabilization using low-cost methods”. *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 8, no. 4, pp. 2193-2196, 2012.
- [16] B. V. Rao, V. Reddy, y M. Muttharam, “The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils”. *Engineering Geology*, vol. 60, no.1–4, pp. 223–233, 2001.
- [17] R. N. Yong, V. R. Ouhadi. “Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils”, *Applied Clay Science*, vol. 35, no. 3–4, pp. 238–249, 2007.
- [18] A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, y B. García, “Stabilization of expansive soils for use in construction”. *Applied Clay Science*, vol. 51, no. 3, pp. 348-352, 2011.
- [19] Y. Du, S. Li, S. Hayashi, “Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China”. *Engineering Geology*, vol. 53, no. 3–4, pp. 351–358, 1999.
- [20] F. Yazdandoust, S. Yasrobi, “Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays”, *Applied Clay Science*, vol. 50, no. 4, pp. 461- 468, 2010.
- [21] D. Lin, K. Lin, M. Hung, y H. Luo, “Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 145, no. 1–2, pp. 58–64, 2007.
- [22] L. Chen, D. Lin, “Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement”. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 162, no. 1, pp. 321–327, 2009.
- [23] Y. Guney, D. Sari, M. Cetin, y M. Tuncan, “Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil”. *Building and Environment*. Vol. 42, no. 2, pp. 681–688, 2007.
- [24] J. Monzón, “Influencia del comportamiento viscoso de arcillas sobre el módulo resiliente y la deformación permanente de subrasantes”, Trabajo fin de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2012.