XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

Efecto de la cantidad de finos y la temperatura en el comportamiento expansivo de suelos sulfatados estabilizados con cal

Eduardo José Bittar
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, ebittar@ing.una.py

Alexander Hiebert
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, alexanderhiebert@gmail.com

Rafael Antonio Moral
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rafaeljuan_moralayala@hotmail.com

Rubén Alejandro Quiñónez
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Rubén Alcides López
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rlopez@ing.una.py

RESUMEN: Es bien sabido que, en la estabilización de suelos con cal, este necesita de arcillominerales para reaccionar y formar componentes puzolánicos. Sin embargo, en suelos sulfatados, las reacciones cal-agua-sulfatos-arcillominerales forman minerales expansivos identificados como etringita y taumasita que son responsables del deterioro de estructuras construidas con suelos estabilizados. Las reacciones químicas que envuelven tanto la formación de compuestos puzolánicos como la formación de minerales expansivos son afectadas ciertamente por la cantidad de los componentes que forman parte de las reacciones y los parámetros ambientales como la temperatura y el pH del sistema. Este trabajo busca conocer la influencia de la cantidad finos contenido en el suelo y el efecto de la temperatura de curado sobre el comportamiento mecánico de suelos sulfatados estabilizados con cal. Para eso, parámetros como el porcentaje de cal hidratada, el peso específico de la mezcla suelo-cal, el tiempo de curado y la temperatura de curado fueron evaluados en dos muestras de suelo, con alto y bajo contenido de material pasante tamiz #200. Se observó nula resistencia e importantes expansiones en el suelo con mayor cantidad de finos estabilizado con cal a 23°C, mientras que bajas resistencias y menores expansiones se observaron en el suelo estabilizado con menor cantidad de finos. Sin embargo, cuando estos son curados a 40°C, las resistencias aumentan significativamente en ambos suelos, mayormente en el suelo con mayor cantidad de finos después de 28 días de curado, mostrándose más resistente que el suelo con menor cantidad de finos. A pesar de que la temperatura de 40°C disminuye notablemente la expansión en el suelo estabilizado con mayor cantidad de finos, el suelo con menor cantidad de finos registró mayor estabilidad volumétrica en todos los casos y resistencias razonables.

PALABRAS-CLAVE: Suelos sulfatados, estabilización de suelos, resistencia, expansión, etringita.

ABSTRACT: It is well acknowledged that in lime soil stabilization, the soil needs clay minerals in order to react and generate pozzolanic components. However, in sulfated soils, the reactions lime-water-sulfates-clay generate high expansive minerals identified as ettringite and thaumasite. These minerals are responsible for the deterioration of soil structures built through soil stabilization. Chemical reactions involving both the formation of pozzolanic components and the generation of high expansive minerals, are affected by the quantity of chemical elements responsible for those reactions and environmental features such as temperature and pH. This work seeks to assess the influence of soil clay fraction and the effect of temperature on the behaviour of rich sulfate soils stabilized whit lime. To achieve that, parameters such as lime content, dry unit weight, curing time and temperature were evaluated over to soil samples having low and high material passing sieve #200. No strength and significant expansion were observed on high-fines

https://proceedings.science/p/149976?lang=pt-br

stabilized soil subjected to the standard laboratory temperature of 23°C whereas some strength and lower swelling were registered on low-fines stabilized soil. Nevertheless, when specimens are subjected to 40°C, a significant strength improvement is observed especially on the high-fines stabilized soil after 28 days of curing, which showed to be stiffer than the low-fines stabilized soil. Despite the fact that subjecting the stabilized soils to higher temperatures (40°C) decrease significantly the swelling potential of the high-fines stabilized soil, the low-fine stabilized soil registered higher volumetric stability and reasonable strengths in all the cases.

KEYWORDS: Sulfated soils, soil stabilization, strength, swell, ettringite.

1 Introducción

La utilización de cal para el mejoramiento de suelos es una práctica ampliamente reconocida. Sin embargo, en suelos que contienen sulfatos la adición de cal genera un nuevo problema en vez de mitigarlo (Mitchell 1986, Hunter 1988, Puppala et al. 2010 entre otros). Este parece ser el caso del Chaco Paraguayo, donde el mal estado de los caminos continúa afectado gravemente el desarrollo de la región. La baja capacidad portante de los suelos y la falta de material pétreo en la zona, llevó a los ingenieros a optar por técnicas de estabilización de suelos para construir las estructuras de los pavimentos existentes, los cuales hasta el día de hoy muestran severos daños que obligan a costosas y continuas reparaciones.

Con el fin de investigar las posibles causas de estos daños, Consoli et al. (2019) realizaron un amplio programa experimental con suelos de esta zona conteniendo 14.000 ppm de sulfatos y utilizando cal hidratada para estabilizarlos. Los autores observaron expansión del geo-material además de baja resistencia y limitada durabilidad. Bittar et al. (2019) observaron las mismas características con respecto al comportamiento mecánico de otro suelo sulfatado de la región estabilizado con cal.

Según (Dermatas 1995) cuando el suelo y/o aguas subterráneas contienen sulfatos en solución, bajo la presencia de cal que puede combinarse con la alúmina liberada por la arcilla, una serie de compuestos de hidratos de calcio-aluminato-sulfato son generados que terminan en la formación de etringita. A temperaturas por debajo de 15°C y asumiendo la presencia de carbonatos solubles en el sistema, otro mineral de nombre taumasita puede ser formado. Tanto etringita como taumasita son altamente expansivos y su formación afecta negativamente las reacciones puzolanicas, ya que absorbe los compuestos necesarios (alumina/silica-cal-agua) para que estas reacciones ocurran. Las alteraciones en la temperatura y pH del sistema pueden alterar las solubilidades y estabilidad general de los componentes del sistema afectando tanto las reacciones puzolanicas como las de formación de minerales etringita y taumasita.

Este trabajo pretende evaluar el efecto tanto de la cantidad de finos (pasante tamiz #200) del sistema como del aumento de la temperatura de curado en el comportamiento mecánico de suelos con alto contenido de sulfatos, considerando dos tipos de suelos que abundan en la zona y dos temperaturas de curado (23°C y 40°C), teniendo en cuenta las altas temperaturas de la región. Para eso, un programa experimental fue realizado cuantificando la influencia del peso específico aparente seco (γd) y el contenido de cal en la resistencia y estabilidad volumétrica de mezclas suelo-cal sometidas a diferentes temperaturas y periodos de curado..

2 Programa Experimental

2.1 Materiales

Dos muestras de suelo fueron colectadas de la región occidental del Paraguay, específicamente de las ciudades de Filadelfia (Suelo 1) y Loma Plata (Suelo 2). Una completa caracterización de ambos suelos fueron realizadas incluyendo ensayos químicos y ensayos de dispersión del suelo. La Tabla 2.1 resume las características de ambos suelos.

En la Tabla 2.1 se puede observar la diferencia en el contenido de pasante tamiz #200 de ambos materiales lo cual también afecta el comportamiento plástico de los mismos. Ambos suelos mostraron ser ligeramente dispersivos además de sulfatados.

Tabla 2.1.1 Propiedades de los suelos estudiados

Propiedades	Suelo 1	Suelo 2	Unidad	Procedimiento
Sulfatos Solubles	9.400	6.100	ppm	ASTM C1580
Clasificación SUCS	SC	CL		ASTM D2487
Clasificación AASHTO	A-6	A-7-5		ASTM D3282
%pasante tamiz #200	36,1	92	%	ASTM D6913
Gravedad específica	2.69	2.61	g/cm³	ASTM D854
Límite plástico	10	21.1	%	ASTM D4318
Límite líquido	21	42.4	%	ASTM D4318
Índice de plasticidad	11	21.3	%	ASTM D4318
Ensayo de dispersión (Pinhole)	ND4*	ND3*		ASTM D4647

*ND3 y ND4 Suelos ligeramente dispersivos

Considerando que en la región se han encontrado suelos con cantidades de sulfatos de hasta 40.000 ppm y que estas sales son fácilmente transportadas por corrientes de agua, sulfatos de sodio y calcio en proporciones de acuerdo con Consoli et al. (2019) fueron agregados hasta obtener 20.000 ppm en ambos suelos. La adición de sulfatos tiene como fin estudiar suelos con altos contenidos de sulfatos, y se basa en experiencias previas como las de Mitchell and Dermatas (1992) y Talluri et al. (2013).

La cal utilizada durante la investigación fue una cal hidratada calcítica, comercialmente llamada "Concretcal" producida en la ciudad de Concepción - Paraguay. Los ensayos para la determinación de la masa específica real de los granos de la cal siguen las recomendaciones de la ASTM D854 obteniéndose un valor medio de 24,13 kN/m3.

El agua utilizada para el moldeo de los cuerpos de prueba y procesos de inmersión fue agua destilada.

2.2 Dosificación de los Cuerpos de Prueba

Ensayos de compactación Proctor normal y modificado fueron realizados en ambos suelos con contenidos de cal de 8% siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM D698 y ASTM D1557, para determinar los puntos de dosificación de las mezclas suelo-cal. Los resultados son ilustrados en la Figura 2.2.1.

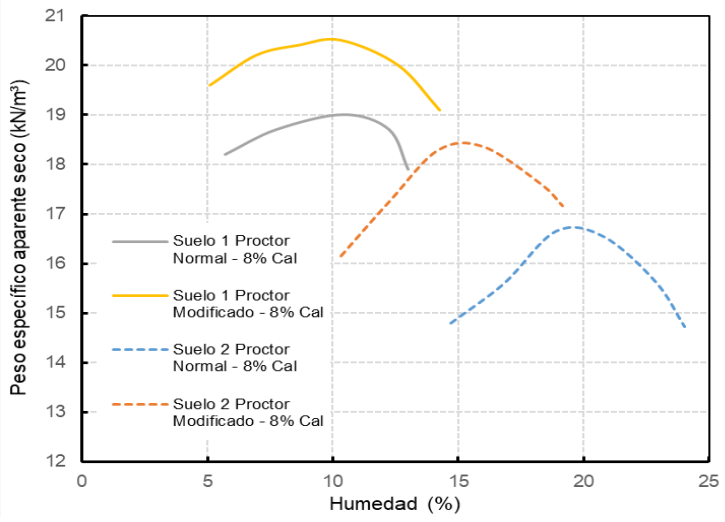


Figura 2.2.1 Ensayos de compactación Proctor estándar y modificado para suelo 1 y suelo 2.

Para evaluar la influencia del γd del material se establecieron tres diferentes γd en un contenido de humedad (ω) para cada suelo en función de sus respectivas curvas ω vs. γd (Figura 2.2.1). Para las dosificaciones que utilizan el Suelo 1 se tomó ω = 10% y valores de γd de 18 kN/m³, 19 kN/m³ y 20 kN/m³ y para las que utilizan el Suelo 2 ω = 15% y valores de γd de 16 kN/m³, 17 kN/m³ y 18 kN/m³ considerando sus curvas ω vs. γd Proctor modificado.

Para evaluar la influencia de la cantidad de cal, tres diferentes contenidos de cal fueron evaluados (5%, 8% y 11%).

2.3 Moldeo y Curado de los Cuerpos de Prueba

El moldeo de los cuerpos de prueba para los ensayos de resistencia a compresión simple fue realizado en un molde cilíndrico partido en tres partes, con dimensiones suficientes para la confección de las muestras con 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Para los ensayos de expansión unidimensional, se utilizaron moldes cilíndricos de 50 mm de diámetro y 40 mm de altura no partidos. La cantidad de cal y la cantidad de sulfatos para conseguir 20.000 ppm en cada mezcla fue calculada en relación a la masa del suelo seco utilizada. La cantidad de agua (porcentaje de humedad) en relación a la suma de las masas de suelo seco y cal. La compactación fue realizada estáticamente en tres camadas en los moldes respectivos para los ensayos RCS mientras que para los ensayos de expansión en una sola camada. Las probetas para ensayos RCS fueron curados a a 23±2°C y a 40±2°C por 7 y 28 días mientras que las probetas para ensayos de expansión no fueron curadas antes del ensayo (se colocaron directamente en inmersion para ensayos de expansión).

2.4 Ensayos de Resistencia a la Compressión Simple

Para los ensayos RCS se utilizó una prensa automática con velocidad de aplicación de carga 10 mm/min en conjunto con un aro de capacidad de 1tf y otro de 3,5 tf siguiendo los procesos establecidos en la norma ASTM D5102. Tres especímenes fueron preparados para cada dosificación tomándose el valor medio como el valor final de RCS. Los especímenes se sumergieron en agua al menos 24 horas antes del ensayo, con el fin de aproximar a la condición de saturación y evitar fuerzas internas de succión.

2.5 Ensayos de Expansión Unidimensional

Este ensayo fue configurado para medir la cantidad de expansión en el eje axial (dirección vertical) de especímenes confinados. Se utilizaron las recomendaciones de la norma ASTM D4546 y se evitó la aplicación de cargas sobre la muestra. Los especímenes mezclados y compactados fueron directamente sumergidos en agua destilada a temperaturas de 23±2°C y a 40±2°C por 20 días o hasta observar la estabilización volumétrica de estos. Las deformaciones fueron medidas con relojes deflectómetros como se muestran en la Figura 2.2.2.

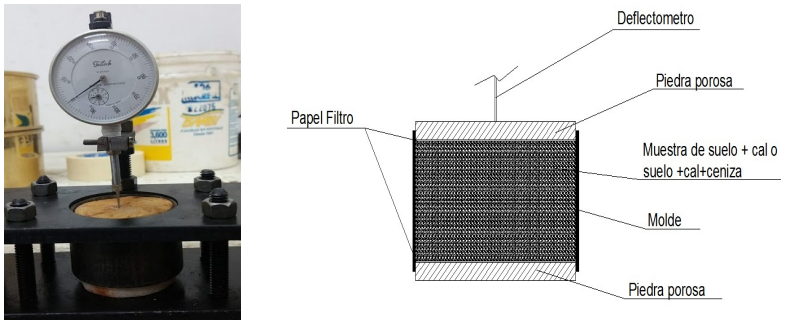


Figura 2.2.2 Configuración de ensayo de expansión unidimensional

3 Resultados

3.1 Efecto de la Cantidad de Finos y la Temperatura de Curado en la Resistencia del Material

La Figura 4.1.1 ilustra los resultados de RCS de los dos suelos estudiados después de 7 días de curado a 23°C y 40°C. En las mezclas suelo1-cal curadas a 23°C, solo aquellos con 11% de cal con γ_d de 19 kN/m³ y 20 kN/m³ mostraron cierta RCS, mientras que los demás no soportaron la inmersión previa al ensayo. Valores de RCS de aproximadamente 1000 kPa a 2000 kPa fueron registrados a 40°C.

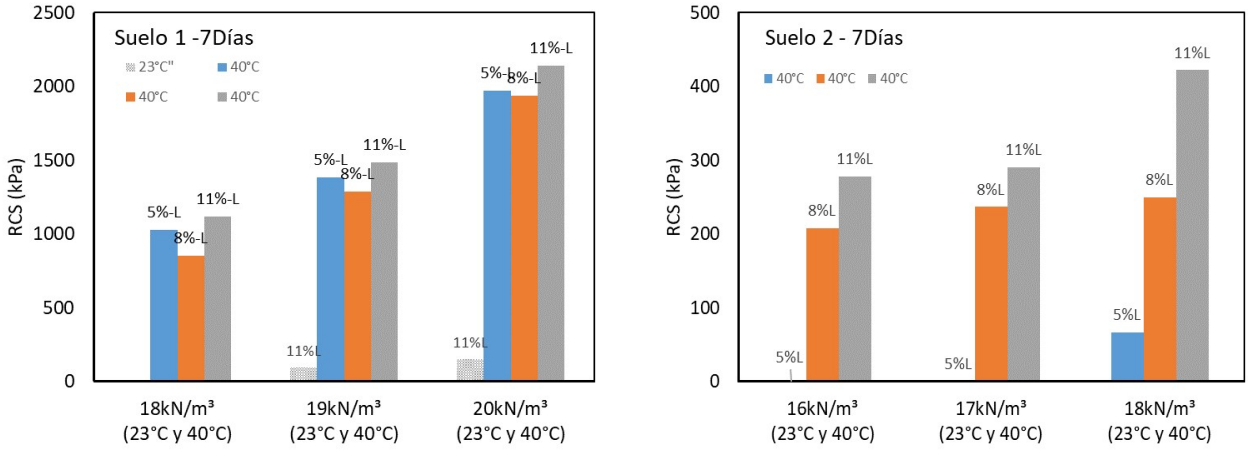


Figura 4.1.1 Resultados de RCS para el suelo 1 (36% pasante #200) y suelo 2 (92% pasante #200) estabilizado con cal y curado a 23°C y 40°C durante 7 días.

En el caso de mezclas suelo2-cal curadas a 23°C, ningún cuerpo de prueba soporto el periodo de inmersión de 24 h. en agua destilada antes del ensayo. Sin embargo, al ser curados a 40°C solo aquellos con 5% de cal y γ_d de 16 kN/m³ y 17 kN/m³ no soportaron el periodo de inmersión. El resto de los cuerpos de prueba registraron RCS de 200 kPa a 400 kPa aproximadamente.

Por otra parte, a los 28 días de curado a 23°C, las mezclas suelo1-cal registraron valores de RCS de 200 kPa a 500 kPa aproximadamente y a 40°C valores de 2000 a 3200 kPa.

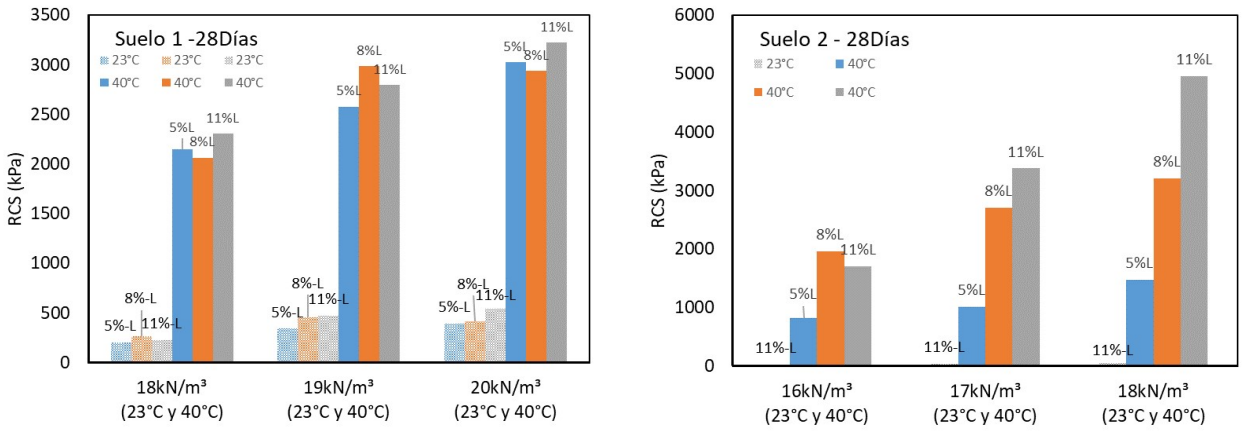


Figura 4.1.2 Resultados de RCS para el suelo 1 (36% pasante #200)) y suelo 2 (92% pasante #200) estabilizado con cal y curado a 23°C y 40°C durante 28 días.

Mientras tanto, en mezclas suelo2-cal curadas durante 28 días a 23°C solo los especímenes con 11% de cal resistieron el proceso de inmersión antes del ensayo con valores de RCS de 25 a 45 kPa. En el caso de las mezclas curadas a 40°C resistencias significativas de 1000 kPa hasta aproximadamente 5000 kPa fueron

registradas.

3.2 Efecto de la Cantidad de Finos y la Temperatura de Curado en el Potencial Expansivo del Material

En la Figura 4.2.1 se pueden observar los resultados de los ensayos de expansión unidimensional a 23°C en los dos suelos estudiados estabilizados con cal. Los cuerpos de prueba suelo1-cal registraron expansiones del orden del 4% al 12% para los γ_d y contenidos de cal estudiados. Por otra parte, los cuerpos de prueba suelo2-cal registraron expansiones significativamente mayores, en el orden de 40% a 50%.

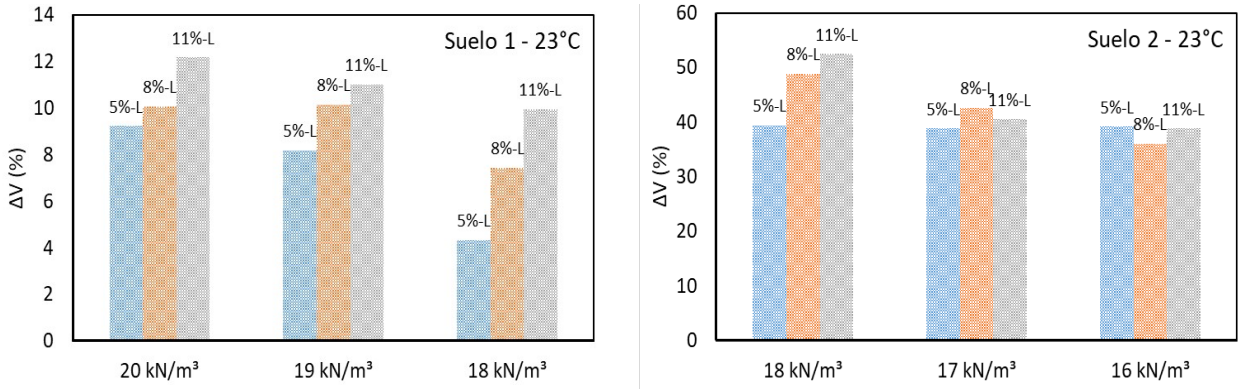


Figura 4.2.1 Resultados de expansión para el suelo 1 (36% pasante #200) y suelo 2 (92% pasante #200) estabilizado con cal después de 20 días de inmersión a 23°C.

En el caso de ensayos de expansión a 40°C, la Figura 4.2.3 muestra una leve disminución de la expansión de las mezclas suelo1-cal. Sin embargo, el efecto de la temperatura mostró un efecto notable en la disminución de la expansión en mezclas suelo2-cal registrado valores del 20% a 30% (aproximadamente la mitad con respecto a las de 23°C).

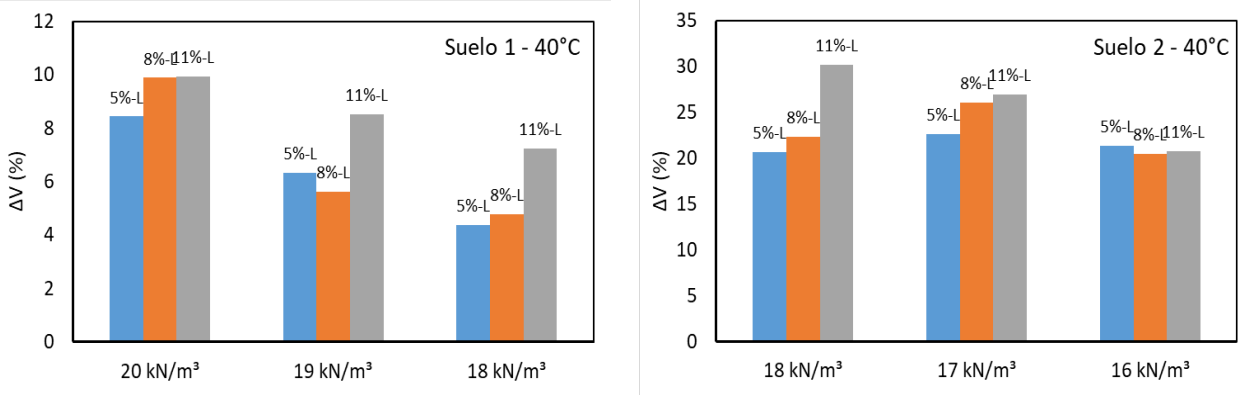


Figura 4.2.2 Resultados de expansión para el suelo 1 (36% pasante #200) estabilizado con cal después de 20 días de inmersión a 40°C.

4 Conclusiones

Dos suelos sulfatados con diferentes fracciones de material arcilloso fueron evaluados en términos de resistencia y estabilidad volumétrica, considerando varias dosificaciones y dos tiempos y temperaturas de curado. Dos reacciones químicas juegan un papel preponderante en la estabilización de suelos sulfatados con cal, estas son las reacciones puzolánicas y la formación de minerales expansivos. Es bien sabido que mayores temperaturas actúan como catalizadores y aceleran las reacciones puzolánicas (George et al. 1992,

Consoli et al. 2018, 2019b). Además, según (Howard and Cost 2014) la solubilidad de los sulfatos es inversamente proporcional a la temperatura a las que las reacciones están sometidas. Por lo tanto, mayores temperaturas de curado dificultarían la formación de minerales expansivos (cal-agua-sulfatos-arcillominerales) mientras acelerarían las reacciones puzolánicas (cal-agua-arcillominerales).

De los resultados descritos en la sección anterior, se pueden remarcar las siguientes conclusiones:

- Mayor cantidad de finos significa mayor cantidad de arcillominerales, estos necesarios tanto para las reacciones puzolánicas como las de formación de etringita. A temperatura estándar de laboratorio (23°C) se puede concluir que las reacciones cal-agua-sulfatos-arcillominerales son predominantes formando etringita, inhibiendo las reacciones puzolánicas que generarían resistencia y expandiendo el material en ambos casos, pero mayormente en las mezclas que contienen el suelo con mayor cantidad de finos.

- Al someter las muestras a mayores temperaturas (40°C), se hace evidente el efecto catalizador de la temperatura, así como la disminución de la solubilidad de los sulfatos, mejorando las reacciones cal-agua-arcillominerales, especialmente a largo plazo (28 días). Las resistencias aumentaron significativamente en ambos suelos, con mayor proporción en el suelo que contiene mayor cantidad de finos. Además, las expansiones disminuyeron en ambos suelos estabilizados, levemente en las mezclas que contienen menor cantidad de finos mientras que en las mezclas que contienen mayor cantidad de finos, la disminución es notable en comparación con aquellas sometidas a 23°C. Sin embargo, en todo momento las mezclas que contienen menor cantidad de finos registraron mejor estabilidad volumétrica.

- Se observó en general, mayor RCS a mayor cantidad de cal y mayor γ_d, esto se debe a que mayores cantidades de cal posibilitan mayores reacciones puzolánicas y mayores γ_d generan mayores resistencias al disminuir los vacíos de la mezcla.

- Así también, mayores expansiones en general se registraron a mayores contenidos de cal y mayores γ_d. Esto se debe a que mayores contenidos de cal posibilitan mayores reacciones que forman etringita y mayores γ_d disminuyen los vacíos donde estos minerales se generan resultando en mayores expansiones del material.

- No se recomienda la estabilización de suelos con 20.000 ppm de sulfatos mediante adición de cal como estructura de bases o sub-bases de pavimentos. Sin embargo, este trabajo plantea la posibilidad de aprovechar altas temperaturas, analizar periodos eficientes de curado y optimizar la cantidad de finos que puede tener un suelo sulfatado (mediante mezcla de diferentes suelos) a la hora de estabilizarlo con cal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud con el CONACYT, por su aporte y contribución a la Investigación, al profesor Nilo Consoli por su apoyo al LMC y a la FIUNA por el uso de las infraestructuras.

REFERENCIAS

ASTM D2487. Standard classification of soils for engineering purposes. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM D5102-09. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

ASTM D698-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, PA, 2012.

ASTM D1557-12, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM D4647, Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test, ASTM International, PA, 2013.

ASTM D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM C1580-15, Standard Test Method for Water-Soluble Sulfate in Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

Bittar, E., Mencia, F., Aguero, E., and López, R. 2019. Comportamiento Mecánico de Suelos Sulfatados Estabilizados con Cenizas de Cáscara de Arroz y Cal Bajo Diferentes Temperaturas de Curado. *In* Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Consoli, N.C., Bittar Marin, E.J., Quiñónez Samaniego, R.A., Scheuermann Filho, H.C., Miranda, T., and Cristelo, N. 2019a. Effect of Mellowing and Coal Fly Ash Addition on Behavior of Sulfate-Rich Dispersive Clay after Lime Stabilization. Journal of Materials in Civil Engineering, **31**(6): 1–10.

Consoli, N.C., Leon, H.B., da Silva Carretta, M., Daronco, J.V.L., and Lourenço, D.E. 2019b. The effects of curing time and temperature on stiffness, strength and durability of sand-environment friendly binder blends. Soils and Foundations.

Consoli, N.C., Quiñónez Samaniego, R.A., González, L.E., Bittar, E.J., and Cuisinier, O. 2018. Impact of severe climate conditions on loss of mass, strength, and stiffness of compacted fine-grained soils-portland cement blends. Journal of Materials in Civil Engineering, **30**(8).

Dermatas, D. 1995. Ettringite-Induced Swelling in Soils: State-of-the-Art. Applied Mechanics Reviews, **48**(10): 659–673.

George, S.Z., Ponniah, D.A., and Little, J.A. 1992. Effect of temperature on lime-soil stabilization. Construction and Building Materials, **6**(4): 247–252.

Howard, I.L., and Cost, T. 2014. Curing Temperature Effects on Soils Stabilized with Portland Cement Having Different Sulfate Contents. American Society of Civil Engineers (ASCE). pp. 2159–2168.

Hunter, D. 1988. Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. Journal of Geotechnical Engineering, **114**(2): 150–167.

Mitchell, J.K. 1986. Presented at the American Society of Civil Engineers. **112**(3).

Mitchell, J.K., and Dermatas, D. 1992. Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. *In* Innovations and uses for lime.

Puppala, A.J., Saride, S., Dermatas, D., Al-Shamrani, M., and Chikyala, V. 2010. Forensic Investigations to Evaluate Sulfate-Induced Heave Attack on a Tunnel Shotcrete Liner. Journal of Materials in Civil Engineering, **22**(9): 914–922.

Talluri, N., Puppala, A., Chittoori, B., Gaily, A., and Harris, P. 2013. Stabilization of High-Sulfate Soils by Extended Mellowing. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, **2363**: 96–104.