

# Mejoramiento de Suelos Sulfatados Estabilizados con Cal Mediante Adición de Cenizas de Cáscara de Arroz y Fibras de Polipropileno

Eduardo José Bittar

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

Mateo Irrazabal

Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, mateoirrazabal@hotmail.es

Maria Galeano

Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, milagros\_galeano@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:** En el presente trabajo se evaluó el comportamiento mecánico de suelos finos sulfatados después de ser estabilizados tanto con cal como con cal y adiciones de cenizas de cáscara de arroz (CCA) y fibras de polipropileno. Para lograr esto, ensayos de resistencia a la compresión simple (RCS) y de expansión fueron realizados en mezclas suelo-cal, suelo-CCA-cal y suelo-CCA-cal reforzado con fibras bajo diferentes dosificaciones. Además, dos diferentes temperaturas (23°C y 40°C) y dos tiempos de curado (7 y 28 días) fueron evaluados. Los resultados mostraron que mayores temperaturas al estándar de laboratorio (40°C) y la adición de CCA mejoraron notablemente el comportamiento mecánico de estos materiales, aumentando su resistencia y disminuyendo su expansión. Además, la adición de fibras de polipropileno como refuerzo demostró ser efectiva a la hora de disminuir las expansiones de estos materiales, pero no influyó significativamente en su resistencia.

**PALABRAS-CLAVE:** Suelos sulfatados, suelos reforzados, cenizas de cáscara de arroz, suelos expansivos, ettringita.

**ABSTRACT:** In this work, the mechanical behaviour of fine-grain sulfated lime stabilized soils after risk husk ash (RHA) and polypropylene fibre additions were evaluated. To achieve this, unconfined compression test and swell tests were performed in lime-soil, lime-RHA-soils and lime-RHA-soils reinforced with fibres. Different curing temperatures (23°C and 40°C) and periods (7 days and 28 days) under various dosages were analysed. The results showed that higher temperatures to the standard laboratory temperature (40°C) and risk husk ash addition improved noticeably the mechanical behaviour of these materials, increasing its strength and reducing swelling. Moreover, polypropylene fibre addiction as reinforcement of these materials demonstrated to be effective in reducing swelling but did not affect its strength significantly.

**KEYWORDS:** Sulfated soils, reinforced soils, rice husk ash, expansive soils, ettringite.

## 1 Introducción

La incorporación de fibras de polipropileno como refuerzo de suelo demostró mejorar el comportamiento mecánico del mismo capturando las cargas recibidas por el material y redistribuyéndola a través de su resistencia a la tensión (Consoli et al. 2012a, Chen et al. 2015, Bittar et al. 2019). Este fenómeno es capaz de disminuir la fragilidad del geo-material y mejorar su resistencia (Cai et al. 2006). Además,

autores como Viswanadham et al. (2009) demostraron que la inclusión de fibras es una alternativa para disminuir el potencial de expansión en suelos expansivos.

Por otro lado, el uso de residuos industriales (cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, etc.) o agrícolas (cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de azúcar, entre otros) en suelos estabilizados con cal, demostraron ser aditivos puzolánicos eficientes y sustentables a la hora de mejorar la resistencia y durabilidad de suelos mejorados con cal (Consoli et al. 2019c, 2019b, He et al. 2020).

En el caso de suelos que contienen sulfatos, minerales expansivos son generados cuando son estabilizados con cal y/o cemento deformando y destruyendo las estructuras de caminos pavimentados (Mitchell 1986, Dermatas 1995, Puppala et al. 2010). Este parece ser el caso del Chaco Paraguayo, en donde la baja capacidad portante de los suelos de la zona y la falta de material pétreo, llevó a los ingenieros a optar por técnicas de estabilización de suelos con cal o cemento para utilizarlos como material de base y sub-base de pavimentos (Consoli et al. 2019a). Según los mismos autores, las condiciones de estos pavimentos se ven gravemente afectados y costosos trabajos de reparación tienen que ser realizados constantemente. Minerales expansivos llamados etringita y taumasita son formados como resultado de las reacciones arcilla-cal-agua-sulfato, y su formación es responsable de la degradación de varios casos de suelos estabilizados (Hunter et al. 1988, Mitchell and Dermatas 1992, Petry and Little 1992, Puppala et al. 2019). Consoli et al. (2019a) registraron formación de etringita en suelos del Chaco Paraguayo estabilizados con cal.

Autores como Wild et al. (1999), Puppala et al. (2003), Consoli et al. (2019a) entre otros, demostraron la efectividad de adicionar residuos como cenizas volantes y escorias granuladas en el mejoramiento del comportamiento mecánico de suelos sulfatados estabilizados con cal, mejorando su resistencia, durabilidad y disminuyendo su expansión. Así también, el uso de fibras de polipropileno es capaz de mejorar la resistencia y disminuir la expansión de suelos sulfatados estabilizados químicamente (Puppala and Musenda 2000, Puppala et al. 2001, Punthutaecha et al. 2006).

Por lo tanto, este trabajo pretende evaluar el comportamiento mecánico de suelos sulfatados estabilizados con cal y cenizas de cáscara de arroz reforzado con fibras de polipropileno. Para lograr esto, un programa experimental fue elaborado el cual comprende ensayos de RCS y expansión en especímenes de suelos sulfatados mezclados con cal y con cal-CCA-fibras. Tres diferentes pesos específicos aparentes secos ( $\gamma_d$ ), tres contenidos de cal (L), 20% de CCA y 0.4% de fibras fueron considerados a la hora de dosificar los cuerpos de prueba. Además, dos tiempos (7 y 28 días) y dos temperaturas de curado (23°C y 40°C) fueron analizados.

## 2 Programa Experimental

### 2.1 Materiales

El suelo en estudio fue extraído de la región occidental del Paraguay (Chaco Paraguayo), específicamente de ciudad de Filadelfia, departamento de Boquerón. La Figura 2.1.1 muestra el análisis granulométrico del mismo y la Tabla 2.1.1 registra los resultados de su caracterización física y química.

Sulfatos de sodio y calcio en proporciones de acuerdo con los valores registrados en Consoli et al. (2019a) fueron agregados hasta obtener 20.000 ppm 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. 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 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/m<sup>3</sup>.

Tabla 2.1.1 Caracterización del suelo estudiado

Propiedades	Valores	Unidad	Procedimiento
Sulfatos Solubles	6100	ppm	ASTM C1580
Clasificación SUCS	CL		ASTM D2487
Clasificación AASHTO	A-7-5		ASTM D3282
%pasante tamiz #200	92	%	ASTM D6913
Gravedad específica	2.61	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D854
Límite plástico	21.1	%	ASTM D4318
Límite líquido	42.4	%	ASTM D4318
Índice de plasticidad	21.3	%	ASTM D4318
Ensayo de dispersión (Pinhole)	ND3		ASTM D4647

\*ND3 Suelos ligeramente dispersivos

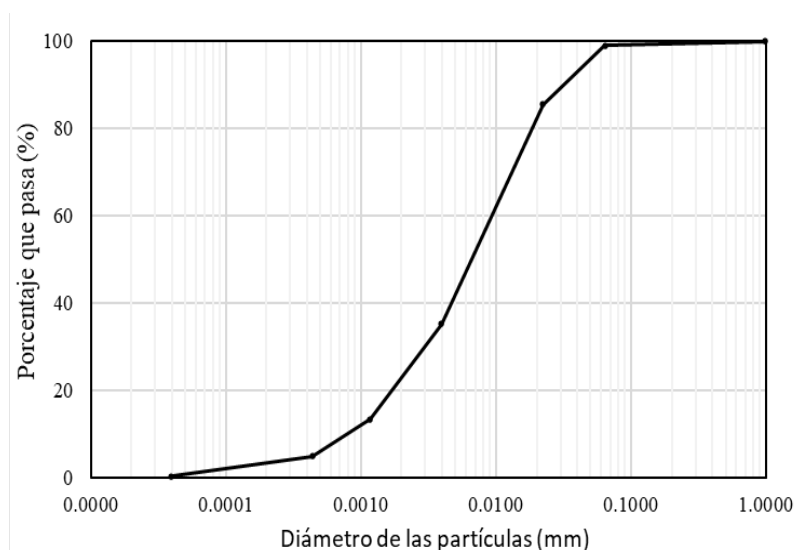


Figura 2.1.1 Análisis granulométrico del suelo estudiado.

Se realizaron ensayos químicos sobre muestras de CCA para conocer los óxidos principales contenidos en las mismas (Tabla 2.1.2)

Tabla 2.1.2 Análisis químico de las CCA

Determinaciones	Método	Resultados (%)
Óxido de calcio, expresado en CaO		0.83
Óxido de Sílice, expresado en SiO <sub>2</sub>	ASTM D4326	84
Óxido de Aluminio, expresado en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.13
Óxido de Hierro, expresado en Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.027

Las fibras utilizadas fueron fibras de polipropileno conocidas comercialmente como FibroMac© 12 y sus propiedades son presentadas en la Tabla 2.1.3.

Tabla 2.1.3 Propiedades de las fibras

Parámetros	Valores	Unidad
Peso específico	0.91	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	300	Mpa
Módulo de Young	3	Gpa
Diámetro	18	μm
Longitud	12	mm
Elongación	80	%

El agua utilizada para el moldeo de los cuerpos de prueba e inmersiones fue agua destilada.

## 2.2 Dosificación de los Cuerpos de Prueba

Ensayos de compactación Proctor normal y modificado fueron realizados en suelos con contenidos de cal de 8% para y suelos con 8% de cal y 20% de CCA siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM D698 y ASTM D1557. Con estos resultados fue posible determinar los puntos de dosificación de las mezclas suelo-cal y suelo-CCA-cal. Los resultados son ilustrados en la Figura 2.2.1.

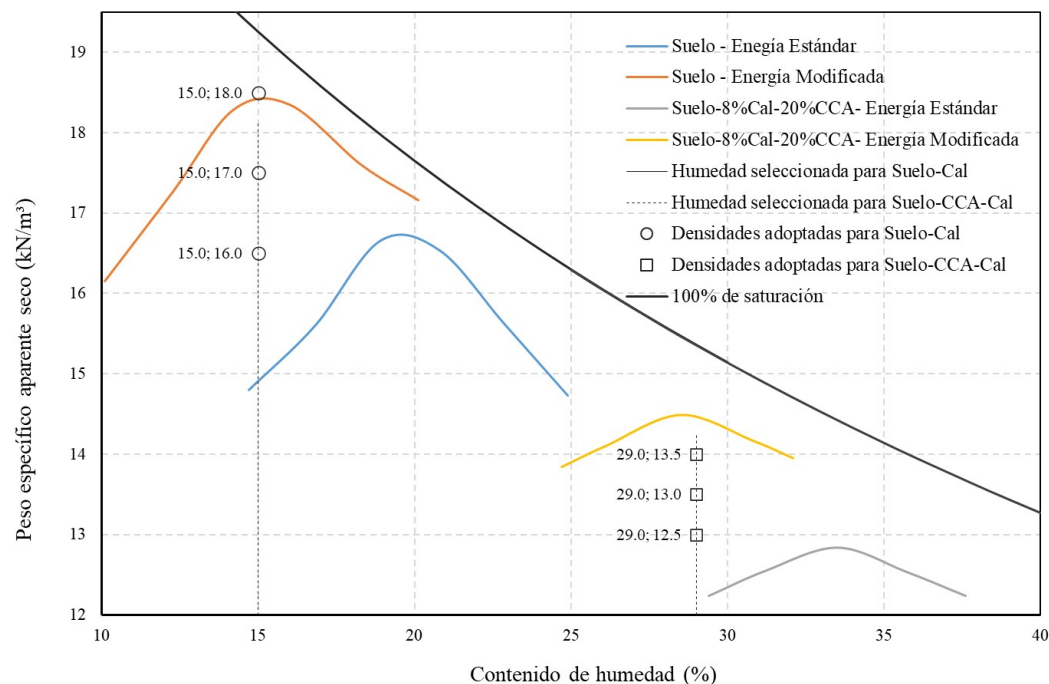


Figura 2.2.1 Ensayos de compactación Proctor normal y modificado suelo-8%L y suelo-8%L-20%CCA.

Tres diferentes  $\gamma_d$  y tres diferentes contenidos de cal fueron tomados en cuenta con el fin de evaluar el efecto tanto de  $\gamma_d$  como del contenido de cal en el comportamiento mecánico de los nuevos geo-materiales. Solo una cantidad de CCA y un porcentaje de fibras fueron evaluados en este trabajo.

La cantidad de CCA fue determinado basado en las experiencias de autores como Puppala et al. (2001), McCarthy et al. (2009) y Consoli et al. (2019c). La cantidad de fibras seleccionada se basó en trabajos como el de Consoli et al. (2012b), Bittar et al. (2019) entre otros. La tabla 2.2.1 resume los puntos de dosificación tomados en cuenta.

Tabla 2.2.1 Dosificaciones de las probetas

	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	L (%)	Tiempo de curado (días)	Temperatura de curado (°C)
Suelo Cal	16.0	5, 8, 11	7, 28	23, 40
	17.0	5, 8, 11	7, 28	23, 40
	18.0	5, 8, 11	7, 28	23, 40
Suelo - CCA - Cal	12.5	5, 8, 11	7, 28	23, 40
	13.0	5, 8, 11	7, 28	23, 40
	13.5	5, 8, 11	7, 33	23, 40

### 2.3 Moldeo y Curado de los Cuerpos de Prueba

Los cuerpos de prueba para los ensayos de resistencia a compresión simple fueron realizados en un molde de acero cilíndrico tri-partido 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 de acero 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 mezclas suelo-cal fue calculada en relación a la masa del suelo seco utilizada. En mezclas suelo-CCA-cal, la cantidad de CCA fue calculada en relación a la masa del suelo seco mientras que las cantidades de sulfatos y cal fueron determinadas en relación a la masa de la mezcla suelo y CCA (suelo + CCA). La cantidad de agua (porcentaje de humedad) se calculó en relación masa de los sólidos sea cual fuere la mezcla. La compactación fue realizada estáticamente en tres camadas dentro de 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 inmersión para ensayos de expansión).

### 2.4 Ensayos de Resistencia a la Compresión Simple

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. Luego, 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 para registrar los valores de RCS siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D5102. Tres especímenes fueron preparados para cada dosificación tomándose el promedio como el valor representativo de RCS.

### 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 lateralmente. Las recomendaciones de la norma ASTM D4546 fueron utilizadas durante el procedimiento y se evitó la aplicación de cargas sobre la muestra. Después de mezclados y compactados se coloraron papeles filtro en la base y en el tope de los especímenes seguido de piedras porosas. Finalmente, fueron 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 las muestras. Las deformaciones fueron medidas con relojes deflectómetros como se muestran en la Figura 2.5.1



Figura 2.5.1 Configuración de ensayo de expansión unidimensional

### 3 Resultados

#### 3.1 Efecto de la temperatura de curado en la resistencia de mezclas suelo-cal

La Figura 3.1.1 muestra los resultados de ensayos RCS realizados en cuerpos de prueba de suelos sulfatados estabilizados con cal. Los especímenes curados a 23°C no mostraron resistencia alguna después de 7 días de curado (no soportaron las 24 h de inmersión previa al ensayo) y después de 28 días, solamente aquellos con 11% de cal presentaron resistencias en el orden de 30 kPa a 50 kPa. Sin embargo, al ser curados a mayor temperatura (40°C), a los 7 días se notaron resistencias desde 30 kPa hasta 400 kPa aproximadamente. A los 28 días, estas resistencias aumentan aproximadamente 10 veces más, demostrando el efecto positivo de altas temperaturas de curado en la RCS de suelos estabilizados con cal.

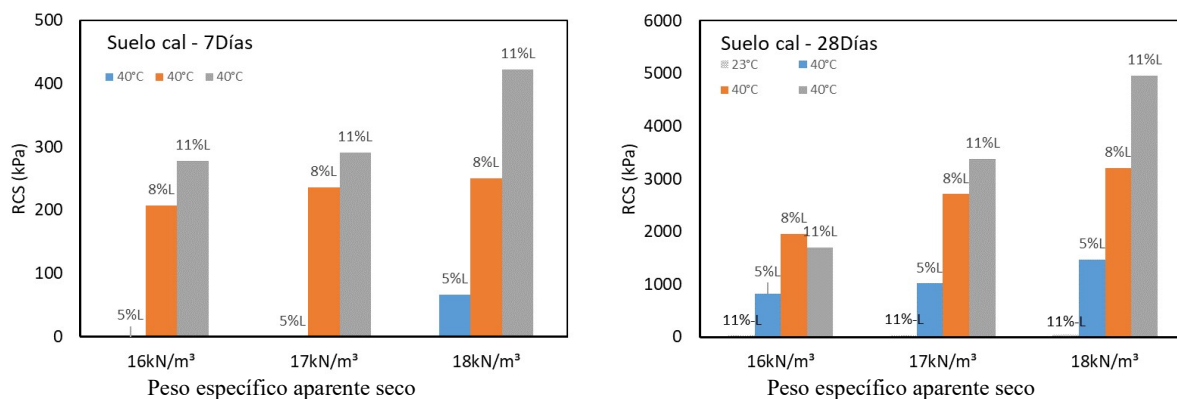


Figura 3.1.1 Resultados de RCS de muestras de suelo-cal curado a 23°C y 40°C durante 7 y 28 días.

#### 3.2 Efecto de la adición de CCA-fibras y la temperatura de curado en la resistencia del material

Las Figuras 3.2.1 y 3.2.2 ilustran los resultados de ensayos RCS sobre cuerpos de prueba de suelo-CCA-cal y suelo-CCA-cal reforzado con fibras sometidos a periodos de curado de 7 días y 28 días a temperaturas de 23°C y 40°C. Se puede notar primeramente la mejora significativa en la resistencia de estos suelos estabilizados con cal luego de la adición de 20% de CCA en los dos periodos y temperaturas de curado. Los cuerpos de prueba de suelo-cal pasaron de no presentar resistencia alguna a los 7 días a registrar resistencias del orden de 120 kPa a 300 kPa cuando fueron curados a 23°C. Al curar a 40°C, las resistencias



pasaron de registrar 30 kPa a 400 kPa en suelo-cal a resistencias del orden de 500 a 2200 kPa después de la aplicación de CCA. La adición de 0.4% de fibras demostró mejorar la RCS del material solo a los 7 días de curado a 23°C, en los demás casos, el aporte de las fibras a la RCS no demostró ser significativo. Después de 28 días de cura a 23°C, la adición de CCA a las mezclas suelo-cal mejoraron notablemente la resistencia del material, pasando de resistencias de suelo-cal de 30kPa a 400 kPa a resistencias de suelo-CCA-cal de 500 kPa a 1700 kPa. Sin embargo, es importante notar que cuando las muestras de suelo-CCA-cal fueron curadas a 40°C por 28 días, estas registraron menores resistencias que las muestras suelo-cal en las mismas condiciones de curado. Esto podría atribuirse a la cantidad de CCA utilizada, que quizás fue mayor a la óptima y no generaron reacciones puzolanicas necesarias disminuyendo notablemente los  $\gamma_d$  de este (Figura 2.2.1).

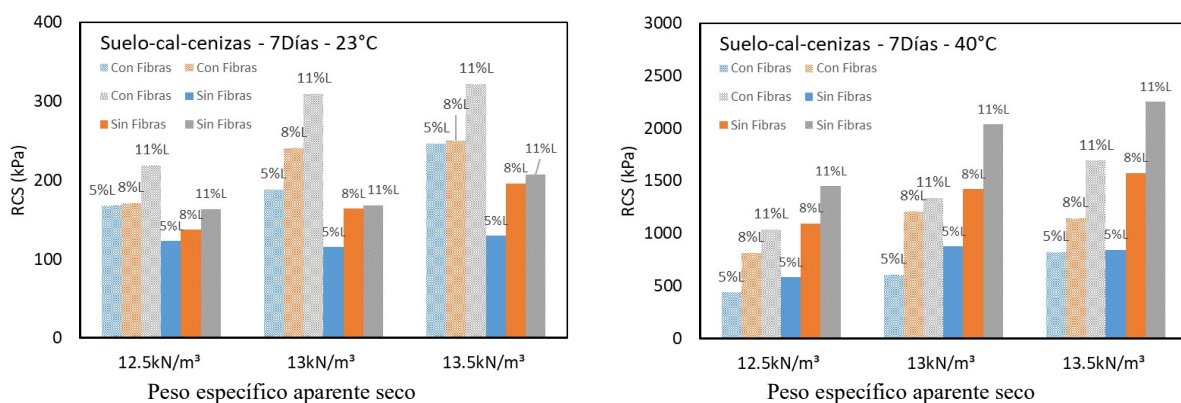


Figura 3.2.1 Resultados de RCS de muestras de suelo-CCA-cal y suelo-CCA-cal reforzado con 0.4% de fibras curado a 23°C y 40°C durante 7 días.

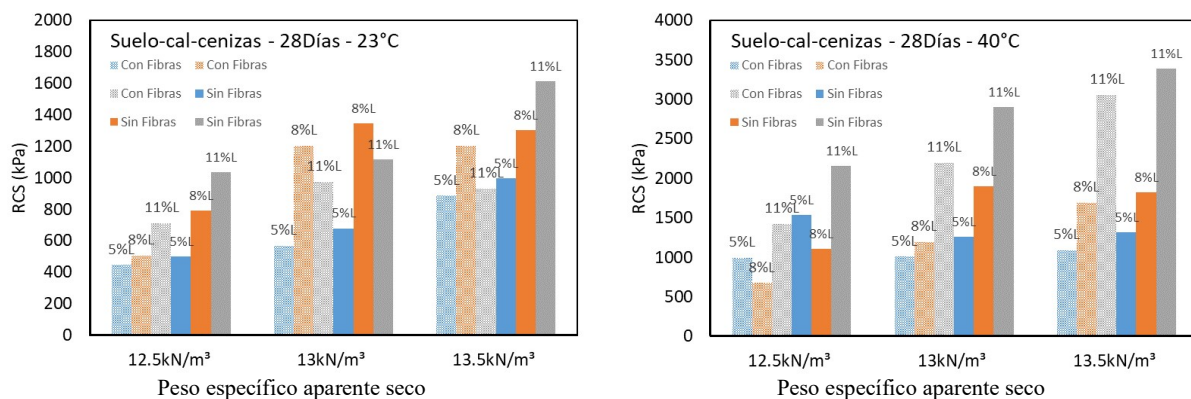


Figura 3.2.2 Resultados de RCS de muestras de suelo-CCA-cal y suelo-CCA-cal reforzado con 0.4% de fibras curado a 23°C y 40°C durante 28 días.

### 3.3 Efecto de la temperatura en el potencial expansivo del material

En la Figura 3.3.1 se pueden observar los resultados de ensayos de expansión en muestras de suelo-cal realizadas a diferentes temperaturas. Las muestras de suelo-cal sometidas a mayor temperatura que la estándar de laboratorio (40°C), mostraron una importante reducción de la expansión. Expansiones del 40% a 55% fueron reducidas al 20-30% por medio del aumento de la temperatura del ensayo (de 23°C a 40°C).

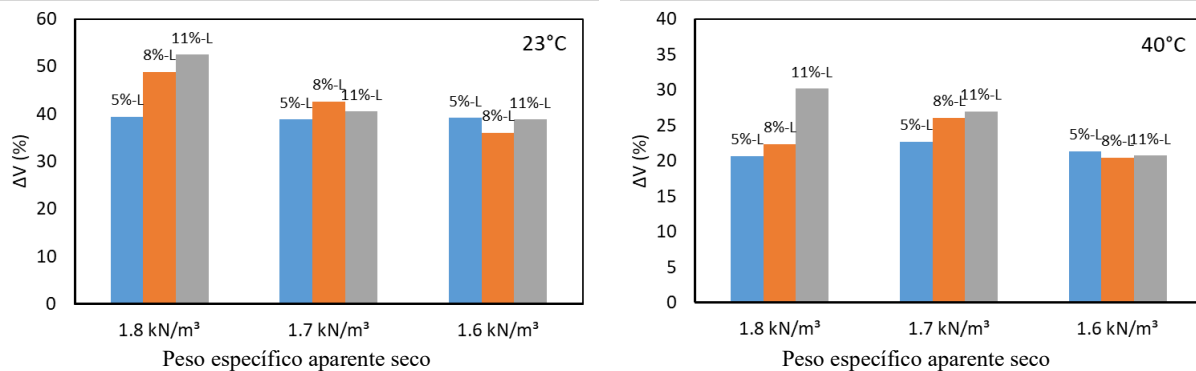


Figura 3.3.1 Resultados de ensayos de expansión en muestras de suelo-cal en inmersión a 23°C y 40°C.

### 3.4 Efecto de la adición de CCA, fibras y la temperatura de curado en el potencial expansivo del material

La Figura 3.4.1 muestra los resultados de ensayos de expansión a 23°C y 40°C de muestras de suelo-cal con adición de 20% de CCA y suelo-cal con adición de 20% de CCA reforzados con 0.4% de fibras. Se puede observar el efecto positivo de la adición de 20% de CCA disminuyendo la expansión de 40%-55% a 12%-24% cuando las mezclas son sometidas a 23°C. Además, la adición de fibras mostró tener un impacto positivo en la estabilidad volumétrica del material disminuyendo las expansiones en más del 50%. Por otro lado, cuando las muestras se sometieron a temperaturas de 40°C, las expansiones del suelo-CCA-cal se redujeron más o menos al 40% comparadas con aquellas sometidas a 23°C. Sin embargo, el efecto de aumentar la temperatura de 23°C a 40°C no tuvo impacto significativo en la reducción de la expansión de suelos-CCA-cal reforzados con fibras.

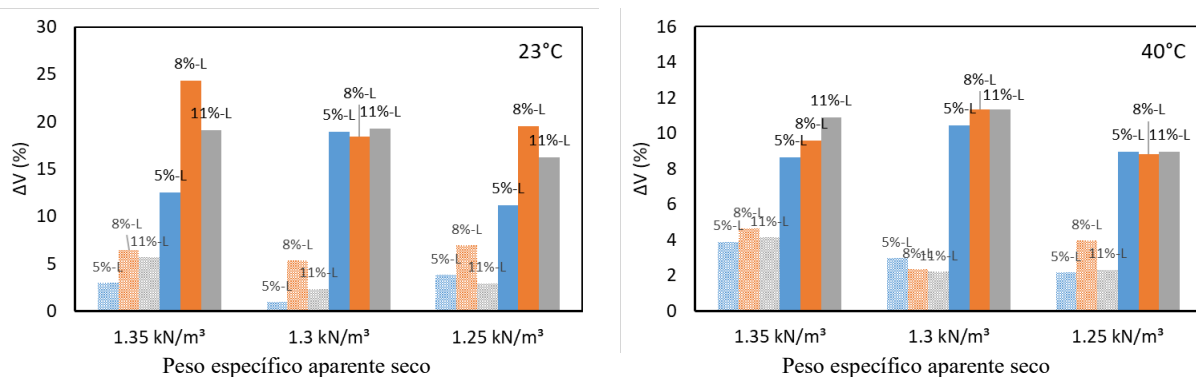


Figura 3.4.1 Resultados de ensayos de expansión en muestras de suelo-CCA-cal y suelo-CCA-cal reforzado con 0.4% de fibras en inmersión a 23°C y 40°C.

## 4 Conclusiones

Cuando suelos sulfatados son estabilizados químicamente mediante adiciones a base de calcio, la formación de componentes puzolánicos son afectados por la formación de minerales como etringita y taumasita. Sin embargo, según Ismail et al. (2012) mezclas activadas con escorias o cenizas volantes generalmente muestran mejores resistencias al ataque por sulfatos que el cemento Portland por ejemplo, pero los mecanismos que controlan estas mejoras en un nivel microestructural no son aun bien entendidos. Parece ser este el caso de adicionar cenizas de cáscara de arroz al suelo estabilizado con cal.

Con respecto a la temperatura, es bien sabido que mayores temperaturas actúan como catalizadores y



aceleran las reacciones puzolánicas (George et al. 1992, Consoli et al. 2018, 2019a). 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:

- Mayores temperaturas de curado juegan a favor de las reacciones puzolánicas y en contra de las reacciones que generan etringita resultado así beneficioso para la estabilización de suelos sulfatados estabilizados. Mezclas tanto de suelo-cal como de suelo-CCA-cal mostraron importantes incrementos de resistencia y disminución de expansión cuando fueron sometidos a temperaturas de 40°C.
- La adición de cenizas de cáscara de arroz mejoró la resistencia y la estabilidad volumétrica del material sometido a temperaturas de 23°C y 40°C. La utilización de este residuo puede ser una alternativa económica y sustentable a la hora de estabilizar suelos que contienen sulfatos.
- La adición de fibras de polipropileno no mostró tener gran impacto sobre la resistencia del material. Sin embargo, redujo significativamente las expansiones de suelos sulfatados estabilizados con cenizas de cáscara de arroz y cal.
- Se observó en general, mayor RCS a mayor cantidad de cal y mayor  $\gamma_d$ , esto se debe a que mayores cantidades de cal posibilitan mayores reacciones puzolánicas y mayores  $\gamma_d$  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  $\gamma_d$ . Esto se debe a que mayores contenidos de cal posibilitan mayores reacciones que forman etringita y mayores  $\gamma_d$  disminuyen los vacíos donde estos minerales se generan resultando en mayores expansiones del material.
- En suelos que contienen sulfatos es fundamental realizar un análisis que abarque nos solo la resistencia del material si no también el potencial expansivo de este y buscar la combinación optima entre el peso específico aparente seco y la cantidad de aditivos que produzcan el mejor desempeño del geo-material, dependiendo este de las exigencias en términos de resistencia y durabilidad, así como de las restricciones en cuanto a la variación volumétrica a la hora de dimensionar estructuras con suelos sulfatados estabilizados.
- Se recomienda aprovechar periodos de altas temperaturas a la hora de mezclar y compactar suelos estabilizados que contienen sulfatos en campo. Además, la utilización industrializada de cenizas de cáscara de arroz para estabilizar estos suelos sería una propuesta sustentable, útil y económicamente factible, considerando que es un residuo, hasta ahora sin mucho valor en la región.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud con el CONACYT, por su aporte y contribución a la Investigación, al profesor Nilo Consoli por su apoyo y al LMC-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., Iberbuden, C., Ruiz, A., and López, R.A. 2019. Análisis del comportamiento elastoplástico con daño continuo de un suelo granular cementado artificialmente y reforzado con fibras de polipropileno. In Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IOS press, Cancún. p. 347.

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

Consoli, N.C., Marin, E.J.B., Samaniego, R.A.Q., Heineck, K.S., and Johann, A.D.R. 2019b. Use of sustainable binders in soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2): 1–7.

Consoli, N.C., Moraes, R.R. de, and Festugato, L. 2012. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Fiber-Reinforced Cemented Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(October): 1568–1573. American Society of Civil Engineers.

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).

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

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.

Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Hamdan, S., and Deventer, J.S.J. 2012. Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46(3): 361–373.

McCarthy, M.J., Csetenyi, L.J., Sachdeva, A., and Jones, M.R. 2009. Role of Fly Ash in the Mitigation of Swelling in Lime Stabilised Sulfate-Bearing Soils. In *World of Coal Ash Conference*. pp. 1–18.

Puppala, A., Hoyos, L., Viyanant, C., and Musenda, C. 2001. Fiber and Fly Ash Stabilization Methods to Treat Soft Expansive Soils. In *Soft Ground Technology*. pp. 136–145. doi:10.1061/40552(301)11.