

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Comportamiento Mecánico de Suelos Sulfatados Estabilizados con Cenizas de Cáscara de Arroz y Cal Bajo Diferentes Temperaturas de Curado

Eduardo BITTAR<sup>a1</sup>, Fernando MENCIA<sup>a</sup>, Enrique AGUERO<sup>a</sup>, Rubén LÓPEZ<sup>a</sup>  
y Alejandro QUIÑONEZ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

**Resumen.** En la región occidental del Paraguay el mal estado de los caminos ha afectado negativamente el desarrollo de la región, donde la falta de material pétreo ha llevado a los ingenieros a optar por la estabilización de suelos con cal o cemento como estructura principal para bases y subbases de estos caminos. En varias zonas de esta región se han encontrado altos contenidos de sulfatos tanto en aguas subterráneas como en los suelos, que, al reaccionar con cal o cemento, generan un nuevo problema en vez de solucionarlo. Por otro lado, la utilización de residuos industriales como escorias granuladas y cenizas volantes demostró ser una práctica sustentable ampliamente utilizada en la fabricación de cementos y ahora también en la estabilización de suelos a nivel mundial. Algunos trabajos demostraron que suelos que contienen sulfatos estabilizados con escorias granuladas o cenizas volantes y cal tienen un buen desempeño. Esta investigación busca evaluar el comportamiento de suelos con altos contenidos de sulfatos estabilizados con cal curándolos tanto a la temperatura normalizada ( $23\pm 2^\circ\text{C}$ ) como a  $40\pm 2^\circ\text{C}$  y si la adición de cenizas de cáscara de arroz influye positivamente en el nuevo geomaterial. Varios ensayos a la compresión simple y expansión fueron llevados a cabo considerando diferentes pesos específicos aparentes secos, cantidades de cal y la adición de 20% de cenizas de cáscara de arroz. Los resultados mostraron que la adición de cenizas de cáscara de arroz aumenta la resistencia a compresión simple del material a los 7 días y disminuye la expansión de este, así también, los cuerpos de prueba curados a una temperatura de  $40\pm 2^\circ\text{C}$  mostraron mayor resistencia y menor expansión en comparación con aquellos curados a la temperatura normalizada de  $23\pm 2^\circ\text{C}$ .

**Palabras Clave.** Suelos sulfatados, suelo-cal, cenizas de cáscara de arroz.

## 1. Introducción

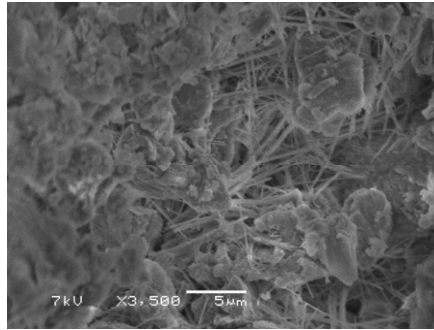
Los típicos estabilizadores a base de calcio como la cal y el cemento Portland son utilizados desde hace mucho tiempo en una gran variedad de suelos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Sin embargo, varias investigaciones han demostrado que el uso de estos estabilizadores en suelos que contienen sulfatos puede conducir a un nuevo problema en lugar de mitigarlo ([1], [2], [3], [4], [5]).

---

<sup>1</sup> Eduardo Bittar, Docente Investigador, Laboratorio de Mecánica Computacional, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay. e-mail: ebittar@ing.una.py

En [6], se estableció que un mineral de nombre etringita se formó como resultado de las reacciones de arcilla-cal-agua-sulfato, y que su formación fue responsable de la degradación de un suelo estabilizado, este resultado fue posteriormente confirmado de forma independiente por [7].

Cuando el suelo y/o aguas subterráneas contienen sulfatos en solución, en presencia de cal que puede combinarse con la alúmina liberada a partir de la arcilla, se forma etringita. Por debajo de aproximadamente 15°C y asumiendo la presencia de carbonatos solubles en el sistema, la etringita puede transformarse en taumasita. Ambos minerales son altamente expansivos al ser expuestos al agua [8]. Según [9], este es el caso de algunos suelos de la región occidental o chaco paraguayo donde la formación de etringita fue verificada mediante imágenes de microscopía electrónica (Figura 1).



**Figura 1.** Observación microestructural de etringita en un suelo sulfatado del chaco paraguayo estabilizado con cal [9].

La utilización de subproductos industriales (cenizas volantes, escorias granuladas, cenizas de cascara de arroz entre otros) como adiciones o agregados en materiales de construcción es una práctica sustentable cada vez más utilizada [10]. La incorporación de puzolanas como cenizas volantes con cal en el mejoramiento de geomateriales fue estudiado por varios autores como [10], [11] y [12]. En [9] se estabilizaron suelos del chaco paraguayo con 14.000 ppm de sulfatos solubles utilizando cenizas volantes y cal.

Este trabajo busca demostrar los problemas de estabilizar suelos sulfatados del chaco paraguayo con cal, considerando que esta práctica sigue aún vigente en la región, así como la búsqueda de nuevas alternativas que sean viables para la construcción bases y subbases estabilizadas en la región.

## 2. Programa Experimental

Primeramente, se determinaron las propiedades del suelo y las cenizas de cascara de arroz (CCA). Luego se definieron las cantidades de ensayos a compresión simple y expansión tanto del geomaterial sin CCA y con 20% de CCA. Fueron estudiados tres porcentajes de cal (5%, 8% y 11% del peso seco del material) y tres pesos específicos aparentes secos (PE). Los PE variaron de 16 kN/m<sup>3</sup> a 18 kN/m<sup>3</sup> con contenido de humedad  $\omega=15\%$  en mezclas suelo-cal y de 12,5 kN/m<sup>3</sup> a 13,5 kN/m<sup>3</sup> con contenido de humedad  $\omega=29\%$  en mezclas suelo-CCA-cal (Figura 2). Los cuerpos de prueba fueron curados durante 7 y 28 días a 23±2°C y a 40±2°C con el fin de simular las elevadas temperaturas que habitualmente se encuentran en la región.

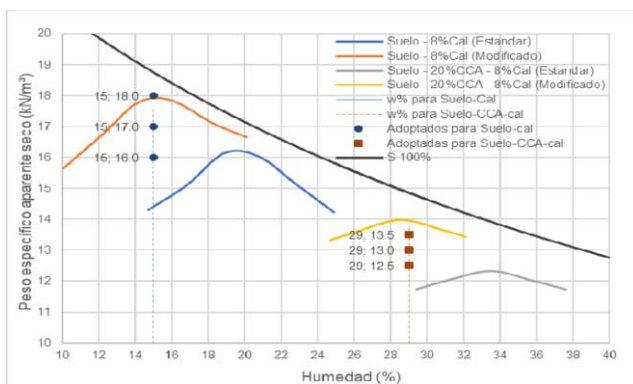
## 2.1. Materiales y métodos

La caracterización física y química del suelo se muestra en la Tabla 1. El suelo utilizado en los ensayos fue extraído de la región occidental del Paraguay (Chaco Paraguayo), específicamente de ciudad de Filadelfia, departamento de Boquerón.

**Tabla 1.** Caracterización física del suelo en estudio.

Propiedades	Valores	Procedimiento
Limite Líquido (LL)	42,40	ASTM D4318
Limite Plástico (LP)	21,10	ASTM D4318
Índice de Plasticidad (IP)	21,30	ASTM D4318
Peso Específico Real de los Granos (G)	26,10 kN/m <sup>3</sup>	ASTM D854
% Pasante del Tamiz #200	92%	ASTM D6913
Dispersión (Pinhole)	ND3 (Ligera Dispersión)	ASTM D4647
Dispersión (SAR)	Área no Dispersiva	Sherard [13]
Sulfatos Solubles	6100 ppm	ASTM C1580/ SMEWW
Clasificación SUCS	CL	ASTM D2487
Clasificación AASHTO	A-7-5	ASTM D3282

Se realizaron ensayos de compactación Proctor bajo energías estándar y modificada tanto para mezclas suelo-cal y suelo-CCA-cal según la norma ASTM D698 y ASTM D1557 (Figura 2).



**Figura 2.** Ensayos de compactación Proctor para mezclas de suelo-cal y suelo-CCA-cal.

Se tomaron las humedades óptimas para la energía modificada tanto de mezclas suelo-cal como suelo-CCA-cal y se estudiaron tres PE a partir del máximo con el fin de evaluar el efecto de su variación.

Se realizaron ensayos químicos sobre muestras de CCA para conocer los óxidos principales contenidos en las mismas (Tabla 2). La adición de 20% de CCA fue determinado basado en la experiencia de otros trabajos ([10], [14] y [15]) y fue calculado en relación al peso seco del material (Suelo más cal). Las CCA adicionadas fueron previamente molidas hasta pasar el tamiz #200.

**Tabla 2.** Análisis químico de la CCA.

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

La cal utilizada fue cal hidratada calcítica y los contenidos de cal adicionados fueron seleccionados considerando que un mínimo de 4% fue obtenido por el método del “consumo inicial de cal” y la experiencia de otros trabajos ([16], [9]).

Para la confección de cuerpos de prueba se utilizó agua destilada mezclada con cantidades de sulfatos de sodio y calcio en forma de polvo tal que los cuerpos de prueba finalmente contengan 20.000 ppm (2%) de sulfatos solubles. La adición de sulfatos se basó en experiencias previas como la de [17] considerando que la cantidad de estos son variables en el tiempo (por transporte de aguas o absorción de la vegetación) y que en la región se han encontrado suelos con hasta 40.000 ppm de sulfatos solubles. Además, debido a la falta de recursos hídricos superficiales en la región, en la construcción de carreteras se recurre al uso de aguas subterráneas las cuales poseen un alto contenido de sulfatos solubles. Las proporciones de sulfatos utilizados se basaron en las cantidades halladas por [9] en suelos de la misma zona.

### 2.2. Preparación y curado de cuerpos de prueba.

Para los ensayos de resistencia a la compresión simple cuerpos de prueba cilíndricos de 50mm de diámetro y 100mm de altura fueron utilizados. Se mezclaron el suelo las CCA y la cal hasta constatar una consistencia uniforme. La solución agua-sulfatos fue agregada continuando el proceso de mezclado hasta crear una pasta homogénea. La mezcla fue compactada en tres capas dentro de un molde metálico de 50mm de diámetro. Los cuerpos de prueba fueron sellados en bolsas plásticas de forma a evitar posibles pérdidas de humedad y fueron colocadas en cámaras de curado a 23±2°C y a 40±2°C durante 7 y 28 días.

Para los ensayos de expansión se utilizaron moldes metálicos que permitieron la confección de cuerpos de prueba de 54mm de diámetro y 28mm de altura. La mezcla de los materiales siguió el mismo procedimiento antes mencionado y fue compactada en una sola capa para luego inmediatamente sumergir el cuerpo de prueba en agua destilada a 23±2°C y a 40±2°C durante 20 días.

### 2.3. Ensayos de resistencia a la compresión simple.

Antes de realizar los ensayos, los cuerpos de prueba fueron sumergidos en agua por un periodo de 24 horas para garantizar su saturación y minimizar efectos de succión [8]. La temperatura del tanque de agua es controlada en 23±2°C. Inmediatamente antes del ensayo, los cuerpos de prueba son removidos del tanque de agua y secados superficialmente. Los ensayos de compresión simple fueron llevados a cabo siguiendo la norma ASTM D5102.

## 2.4. Ensayos de expansión unidimensional

Los ensayos de expansión fueron realizados en moldes metálicos siguiendo un esquema similar al ensayo edométrico (Figura 3), pero evitando la aplicación de cargas. Se utilizaron las recomendaciones de la norma ASTM D4546. El equipo mantiene al material confinado permitiendo su expansión únicamente de forma axial donde un deflectómetro es capaz de medir las deformaciones. El equipo completo es sumergido en agua a  $23\pm 2^\circ\text{C}$  y a  $40\pm 2^\circ\text{C}$  hasta cubrir el tope durante 20 días.

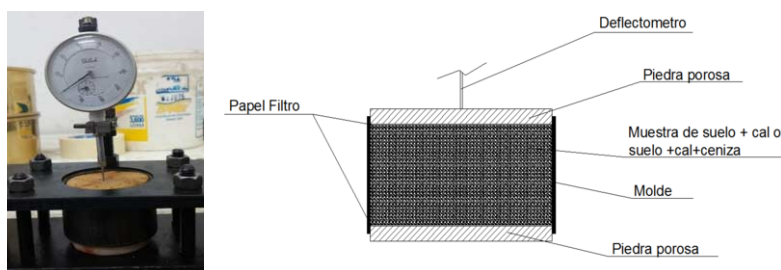


Figura 3. Esquema de ensayo de expansión unidimensional.

## 3. Resultados

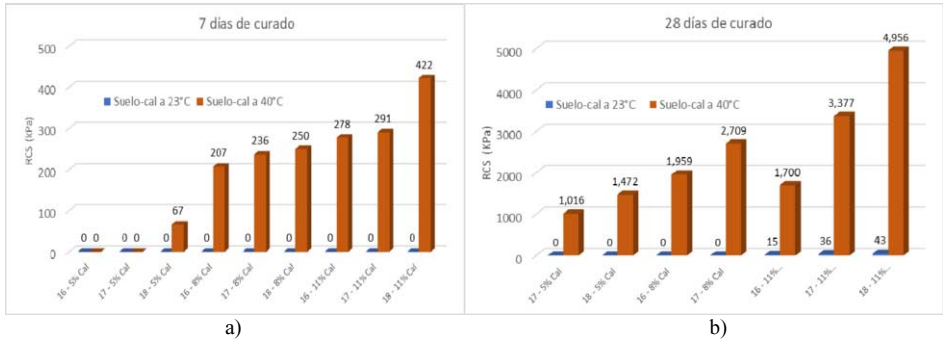
### 3.1. Efecto de la temperatura de cura en la resistencia a compresión simple y en la variación volumétrica de mezclas suelo-cal

En la Figura 4a se muestran las resistencias después de 7 días de curado a  $23^\circ\text{C}$  y a  $40^\circ\text{C}$ . Como puede observarse, todos los cuerpos de prueba que fueron curados a  $23^\circ\text{C}$  durante 7 días no presentaron resistencia alguna ya que no soportaron las 24 horas en inmersión para eliminar efectos de succión. En el caso de los cuerpos de prueba curados a  $40^\circ\text{C}$  aquellos con 5% de cal y 16 y 17  $\text{kN/m}^3$  tampoco presentaron resistencia. Los demás cuerpos de prueba curados a  $40^\circ\text{C}$  mostraron un aumento de la resistencia a la compresión simple con el aumento de la cantidad de cal y de los PE.

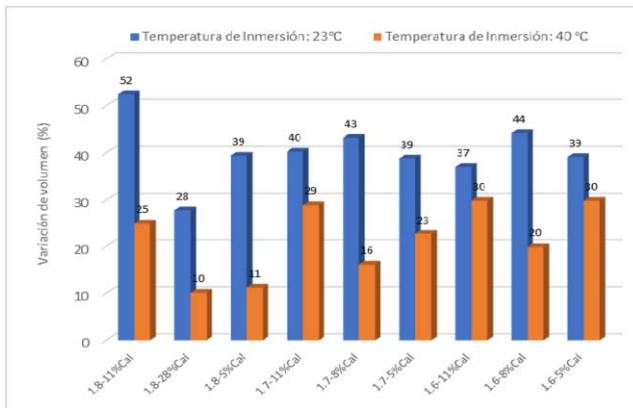
En la Figura 4b se observan las resistencias después de 28 días de curado a  $23^\circ\text{C}$  y a  $40^\circ\text{C}$ . En este caso, puede observarse también que a  $23^\circ\text{C}$  de curado las resistencias se presentan nulas o muy reducidas mientras que las curadas a  $40^\circ\text{C}$  mostraron altas resistencias desde 1.000 hasta aproximadamente 5000 kPa.

En la Figura 5 se observan las expansiones sufridas por los cuerpos de prueba de suelo-cal tanto a  $23^\circ\text{C}$  como a  $40^\circ\text{C}$ . A  $23^\circ\text{C}$  las muestras de suelo cal presentaron importantes expansiones desde aproximadamente 30% a 50% mientras que a  $40^\circ\text{C}$  las expansiones disminuyeron observándose valores del 10% al 30%.

Es notable el efecto positivo a mayor temperatura de curado en las muestras de suelo-cal aumentando la resistencia y disminuyendo la expansión del geomaterial. Este efecto puede atribuirse a que altas temperaturas actúan como catalizadores de reacciones puzolánicas cal-agua-arcillominerales [18] mientras que disminuyen la solubilidad de los sulfatos del sistema [19] evitando en cierta cantidad las reacciones cal-agua-sulfatos-arcillominerales que son responsables de la formación de etringita.



**Figura 4.** Valores de resistencia a compresión simple a 7 y 28 días con temperaturas de curado de 23°C y 40°C. PE de 16 kN/m³ a 18 kN/m³ y 5% a 8% de cal con 20.000ppm de sulfatos.



**Figura 5.** Valores de expansión final después de 20 días de inmersión a 23°C y 40°C. PE de 16 kN/m³ a 18 kN/m³ y 5% a 8% de cal con 20.000ppm de sulfatos.

3.2. Efecto de la adición de cenizas de cáscara de arroz en la resistencia a compresión simple y expansión de mezclas suelo-CCA-cal

En la Figura 6a puede observarse que con la adición de 20% de CCA todos los cuerpos de prueba presentaron resistencias después de 7 días de curado a 23°C a diferencia de aquellos sin CCA que no tuvieron resistencia alguna (Figura 4). A los 7 días de curado a 40°C las mezclas suelo-CCA-cenizas también mostraron mejores resistencias (aprox 4 veces mayor) con respecto a las mezclas suelo-cal. Así también a los 28 días de curado a 23°C la adición de CCA presentó mejores resistencias en comparación con las mezclas suelo-cal. No obstante, a los 28 días de curado a 40°C no se notaron diferencias significativas entre las resistencias de mezclas suelo-cal y suelo-CCA-cal, es más, pareciera que las mezclas suelo-cal en las mismas condiciones mostraron un mejor comportamiento. Esto puede ocurrir porque la cantidad de CCA utilizada fue mayor a la óptima y quedaron residuos de CCA que no generaron reacciones puzzolánicas con la cal y solo debilitaron el geomaterial, pues, es importante recalcar que la adición de CCA disminuye notablemente los PE de este (Figura 2).

En cuanto a la estabilidad volumétrica del material, en la Figura 7 puede observarse una importante disminución de las expansiones con la adición de CCA, a

23°C se redujo de expansiones del 30% al 50% a expansiones del 11% al 24% mientras que a 40°C hubo una reducción de expansiones del 10% al 30% a expansiones del 9% al 10% con la adición de CCA.

Según [20] mezclas alcali 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.

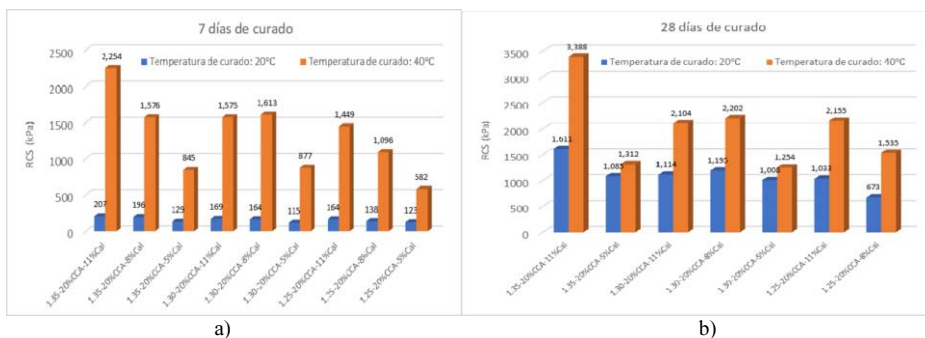


Figura 6. Valores de resistencia a compresión simple a 7 días con temperaturas de curado de 23°C y 40°C de mezclas suelo-CCA-cal. PE de 16 kN/m<sup>3</sup> a 18 kN/m<sup>3</sup> y 5% a 8% de cal con 20.000ppm de sulfatos.

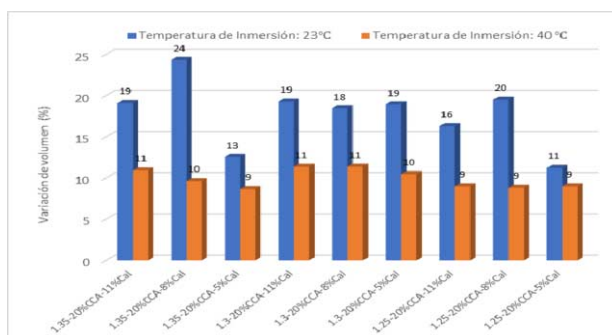


Figura 7. Valores de expansión final después de 20 días de inmersión a 23°C y 40°C. PE de 16 kN/m<sup>3</sup> a 18 kN/m<sup>3</sup> y 5% a 8% de cal con 20.000ppm de sulfatos.

#### 4. Conclusiones

La aceleración de reacciones puzolánicas junto con la disminución de la solubilidad de los sulfatos a altas temperaturas de curado demostró tener un efecto importante tanto en la resistencia como en la estabilidad volumétrica de mezclas suelo-cal y mezclas suelo-CCA-cal.

Así también, la adición de cenizas de cáscara de arroz influyó en el mejor desempeño del geomaterial, tanto en su resistencia como en su estabilidad volumétrica.

Es importante tener en cuenta los efectos positivos de altas temperaturas a la hora de mezclar y compactar en campo suelos estabilizados que contienen sulfatos. 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 y desechado en la mayoría de los casos.

## Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud con el proyecto 14-INV-086 (CONACYT – FIUNA) por los fondos para esta investigación.

## Referencias

- [1] Hunter, D. (1988) Lime-induced heave in sulfate-bearing clay soils. *Journal of geotechnical engineering*.
- [2] Mitchell, J. K.; Dermatas, D. (1992) Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. *Innovations and uses for lime*. ASTM International.
- [3] Kota, P. B. V. S.; Hazlett, D.; Perrin, L. (1996b) Sulfate-bearing soils: Problems with calcium-based stabilizers. *Transportation research record*.
- [4] Puppala, A. J.; Saride, S.; Dermatas, D. (2010) Forensic Investigations to Evaluate Sulfate-Induced Heave Attack on a Tunnel Shotcrete Liner. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 22, n. 9, p. 914–922.
- [5] Petry, T. M.; Little, D. N. (1962) Update on Sulfate-Induced Heave in Treated Clays: Problematic Sulfate Levels. *Transportation Research Record*, v. 1362, p. 51, 1992.
- [6] Sherwood, P. T. Effect of sulfates on cement- and lime-stabilized soils. *Highway Research Board Bulletin*, n. 353, p. 98–107.
- [7] Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972) *Soil stabilization: principles and practice*. Butterworths.
- [8] Dermatas, D. (1995) Ettringite-Induced Swelling in Soils: State-of-the-Art. *Applied Mechanics Reviews*, v. 48, n. 10, p. 659–673, 1995.
- [9] Consoli, N.; Bittar, E.; Quiñonez Samaniego, A.; et al. (2018) The Effect of Mellowing and Coal Fly Ash Addition on the Behavior of Sulfate-Rich Dispersive Clay after Lime Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- [10] Consoli, N. C., Bittar Marin, E. J., Quiñonez Samaniego, R. A., Heineck, K. S., & Johann, A. D. R. (2018). Use of Sustainable Binders in Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- [11] Phetchuay, C.; Horpibulsuk, S.; Arulrajah, A.; Suksiripattanapong, C.; and Udomchai, A. (2016). Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer". *Applied Clay Science*, 127-128(July), 134-142.
- [12] Consoli, N. C.; Koltermann da Silva, J.; Scheuermann Filho, H. C.; and Rivoire, A. B. (2017). Compacted clay-industrial wastes blends: Long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. *Applied Clay Science*, 146(September), 404-410.
- [13] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Decker, R. S., & Steele, E. F. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(1), 69–85.
- [14] McCarthy, M. J., Csetenyi, L. J., Sachdeva, A., & 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).
- [15] Puppala, A., Hoyos, L., Viyanant, C., & Musenda, C. (2001). Fiber and fly ash stabilization methods to treat soft expansive soils. In *Soft Ground Technology* (pp. 136-145).
- [16] Consoli, N. C., & Alejandro, R. (2016). Durability, Strength, and Stiffness of Dispersive Clay–Lime Blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- [17] Talluri, N., Puppala, A., Chittoori, B., Gaily, A., & Harris, P. (2013). Stabilization of High-Sulfate Soils by Extended Mellowing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2363, 96–104.
- [18] Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., Carraro, J. A. H., & Heineck, K. S. (2001). Behavior of compacted soil-fly ash-carbide lime mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9), 774-782.
- [19] Howard, I. L., & Cost, T. (2014). Curing Temperature Effects on Soils Stabilized with Portland Cement Having Different Sulfate Contents. In *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* (pp. 2159-2168).
- [20] Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and structures*, 46(3), 361.