

Physical, chemical, and mineralogical characteristics of the cemented sands of Asunción and the collapse risk

Características físicas, químicas y mineralógicas de las arenas cementadas de Asunción y el riesgo de colapso

Norma Cantero, Félix Carvallo & Nicolás Zabrodiec

*Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Investigador, Paraguay
ncantero@uc.edu.py*

Miguel Leguizamón & Tadeo Rojas

Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Estudiante, Paraguay

RESUMEN: Las arenas cementadas de Asunción constituyen la base para las cimentaciones de obras de gran envergadura para las del área metropolitana. Estas arenas, por sus características, se asemejan a un macizo rocoso y presentan alta resistencia al ser excavadas, a menudo consideradas como rocas consolidadas. Sin embargo, hay evidencias acerca de su susceptibilidad al colapso en presencia de agua y a la pérdida de confinamiento. Además, en muchos casos, el lavado de finos dentro del material se produce cuando se expone al agua a través de tubificaciones internas. Comprender las características y la zonificación de este tipo de suelo es relevante para la ingeniería geotécnica local. En este trabajo se presentan los resultados de ensayos físicos, químicos y mineralógicos realizados en muestras obtenidas de una excavación durante obra en ejecución de manera a evaluar las características de las mismas y su susceptibilidad al colapso.

PALABRAS CLAVE: caracterización; arenas cementadas, colapsabilidad

ABSTRACT: The cemented sands in Asunción serve as the foundational support for the large constructions in the metropolitan area. These sands, due to their characteristics, resemble a rocky massif and exhibit high resistance when excavated, often considered as consolidated rocks. Nevertheless, there is compelling evidence of their susceptibility to weakening in the presence of water and a loss of confinement. Additionally, in many cases, the washing of fines within the material occurs when exposed to water through internal tubes. Understanding the characteristics and zoning of this soil type is paramount for construction professionals. This paper presents the results of physical, chemical, and mineralogical tests conducted in the laboratory on samples obtained from a large-scale excavation. It also endeavors to elucidate the key factors contributing to the observed collapse phenomenon.

KEYWORDS: characterization; cemented sands, collapse risk

1 INTRODUCCIÓN

Las arenas cementadas de la ciudad de Asunción constituyen una parte fundamental del subsuelo sobre la que están cimentadas las obras más emblemáticas y relevantes de la capital de Paraguay.

Muchas veces, estas arenas cementadas por sus características aparentan ser una roca y al excavarlas presentan una alta resistencia, por lo que se las consideran rocas consolidadas. Están compuestas principalmente por granos de arena que se encuentran unidos por un cementante, principalmente arcillas.

En muchos casos, en excavaciones profundas al alcanzar el nivel freático se produce un arrastre de los materiales cementantes que posee la arena cementada, debido al agua que fluye a través de los poros de la misma saturándola, esto ocasiona una disminución de la relación de vacío entre partículas, afectando rápidamente a la resistencia al corte y disminuyendo su capacidad portante, debido a la pérdida de adherencia que generan los minerales que hacen de cementante entrelazando las partículas que conforman el suelo.

Las características particulares de los suelos colapsables hacen que se produzca la pérdida de resistencia al corte y la reducción de volumen ante la presencia de agua que es debido a pérdidas de registros o cañerías, las lluvias intensas, aumento de agua subterránea u otros factores.

El colapso de las arenas cementadas se da principalmente por dos motivos, por el arrastre del material cementante a causa del agua o por la pérdida del confinamiento del material. En dichas arenas, el fenómeno se produce por la pérdida del material cementante debido a la acción del agua que fluye a través de sus vacíos, transformándola en arenas susceptibles al colapso.

El objetivo del trabajo es establecer las características geotécnicas y los factores que influyen en la colapsabilidad de las arenas cementadas de Asunción mediante ensayos físico, químico y mineralógico en laboratorio, de muestras obtenidas de una excavación existente en ejecución de gran envergadura.

Este estudio se centra exclusivamente en las arenas cementadas en una manzana particular de la ciudad de Asunción donde fue proyectada y realizada una excavación de gran porte para una obra de gran envergadura.

Para cumplir con el objetivo trazado se ha analizado de manera tácil visual, minuciosa y detallada las paredes y fondo de una excavación de gran envergadura. Se establecieron tendencias de comportamiento relativo a la composición física, química y mineralógica, y analizadas las tendencias de comportamiento geomecánico a través de ensayos de laboratorio.

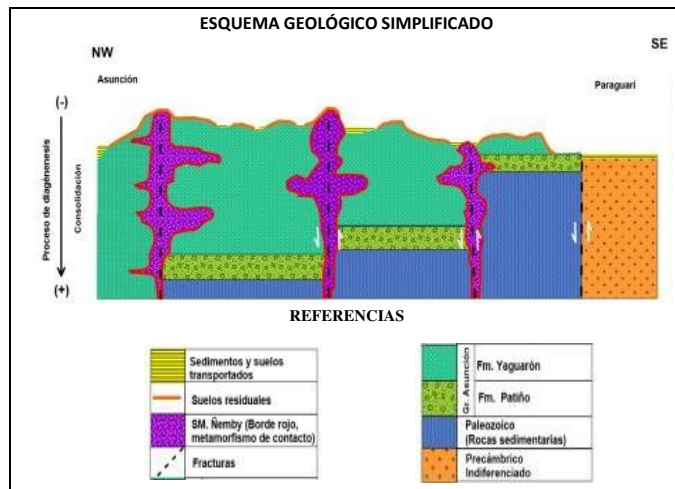
2 GEOLOGÍA

2.1 Geología de Asunción

La ciudad de Asunción y su área metropolitana, se encuentra en zona de ocurrencia del Grupo Asunción, constituido por unidades sedimentarias de edad Cretácico, formadas durante el relleno del graben de Asunción y expuestos por eventos tectónicos posteriores (Carvallo & Villar, 2016)

El rift de Asunción evoluciona durante el Ciclo Tectónico Sudatlántico (Cretácico Superior 100 a 60 m.a.), y vuelve a reactivarse durante el Ciclo Tectónico Andino (Terciario Temprano 65 a 23 m.a.) donde adquiere su morfología actual. (De Graff & Orué, 1984). Entre los ciclos mencionados se produce el relleno de la fosa tectónica con sedimentos de los bordes de esta (MOPC – BGR, 1998). La rápida subsidencia de la estructura produce una sedimentación mal seleccionada e inmadura (con minerales poco estables, tales como, feldespatos o fragmentos de roca) (MOPC – BGR, 1998). Mientras que la reactivación tectónica manifestada por elevación de bloques no permite completar el proceso de litificación especialmente a los sedimentos más superficiales, que experimentan una diagénesis moderada (Bosio, 2008) y son afectados internamente por intrusiones ígneas de la suite intrusiva Ñemby de edad Terciaria. La Figura 1 presenta un esquema geológico simplificado del área.

Figura 1. Esquema geológico simplificado del Grupo Asunción.



El espesor atribuido al Grupo Asunción es de entre 500 m a 600 m (MOPC – BGR, 1998). Las unidades del Paleozoico, subyacentes al Grupo Asunción buzcan hacia interior de la cuenca y presentan principalmente fallas escalonadas (Barthel, 1994). El Grupo Asunción presenta madurez litológica sucesiva en dirección Oeste. Diversos autores han descrito la litología del Grupo Asunción señalando la existencia de al menos dos secuencias. La primera inferior, conformada por cantos y brechas en matriz limo arcillosa, fanglomerados y conglomerados, y una secuencia superior constituida por areniscas conglomeráticas y areniscas cuarzosas grano – decrecientes, agrupadas en la Formación Patiño y la Formación Yaguarón (Barthel, 1994).

La porción superior, principalmente areniscas, está constituida por areniscas de grano fino, buena selección, redondeadas y cuarzosas. Estas pueden estar en forma de cerros testigos, preservados gracias a procesos metamórficos (Celabe, Gadea & Salinas, 2023).

Debido a la diagénesis moderada, la parte más externa son arenas cementadas y presentan singularidades como cavernas, oquedades, tubificaciones y bolsones (Bosio, 2008). Estas arenas cementadas son densas y presentan más de 93 % de clastos de cuarzo, 5 % de arcillas con una porosidad del orden de 27 al 33 %. El material cementante es caolinita con un contenido menor al 1 % de la composición mineralógica actuando como recubrimiento de los granos de cuarzo (Lugo, 1997). Finalmente, en las zonas altas, están cubiertas por suelos residuales que pueden sufrir procesos de eluviación, y en las planicies, por suelos transportados, preferentemente, por acción del agua.

2.2 Arenas cementadas o rocas blandas

El firme de Asunción está formado por arenas pobremente cementadas y, en menor grado, por areniscas alteradas por efectos de la meteorización. Este material es un macizo relativamente homogéneo, aunque puede tener la presencia de areniscas la que le vuelve un material heterogéneo.

Las arenas cementadas de Asunción, denominadas así por su ubicación geográfica, se sitúan en la zona de transición entre suelo y roca. El nivel de techo del macizo es muy variable, siendo fácilmente detectable cuando se alcanza el valor de rechazo en este ensayo (NSPT>50). En sectores bajos o altos de la ciudad, se la encuentra aflorando a nivel de superficie del terreno o por encima del mismo. En zonas intermedias, es detectada a profundidades muy variables, raramente superiores a 25 m, cubiertas por suelos arenosos sueltos, generalmente relacionados a un acuífero superficial de nivel variable que sobreyacen a su techo y dificulta las tareas de excavación (Bosio, 2008).

Las arenas cementadas se formaron mediante un proceso de diagénesis, que se define como el conjunto de procesos que actúan para modificar a los sedimentos luego de ser depositados. También pueden formarse por suelos residuales que sufrieron alguna alteración de las areniscas subyacentes.

2.3 Característica y estructura de suelos colapsables

Los suelos colapsables se caracterizan por poseer un porcentaje elevado de partículas finas, tales como lateritas, loess y limos, estas tienen plasticidad muy reducida, así también presentan una alta relación de vacíos, en condición seca o de bajo contenido de agua, otra característica es que se destacan por su gran resistencia y rigidez. Las características citadas hacen que el suelo presente una desorganización en el empaquetamiento de las partículas debido a la gran pérdida de cementante y partículas finas con el paso de fluidos a través de él, aumentando así la posibilidad de colapso por procesos naturales. Así, el cambio de clima durante su historia geológica produce cambios en su estructura. (Ramírez, 2021)

Tienen propiedades geotécnicas muy diversas que incluyen una alta relación de vacíos, baja densidad aparente inicial relacionado al contenido de agua, gran resistencia y rigidez en estado seco que disminuye con el aumento de la humedad natural o presencia del flujo del agua. Además, poseen un contenido de finos mayor al 60%, límite líquido por debajo del 35%, índice de plasticidad menor del 25% y límite plástico inferior al 10%. En estado seco se presentan en condición no saturada, con una presión de poro negativa lo que le da una mayor resistencia al corte. Con el aumento de la humedad se produce una disminución notable de la resistencia al corte debido al aumento de la presión de poros. Otro tema no menos relevante es la reacción química del cementante que reduce el enlace entre partículas. (Howayek, et al., 2011)

Existen casos en los cuales el colapso surge por deficiencia de arcilla la cual se encuentra en un rango normalmente inferior al 10%, en otro caso, si contiene cantidades elevadas de arcilla, al humedecerse se este se expande generando un ritmo de colapso controlado (Li, et al., 2016)

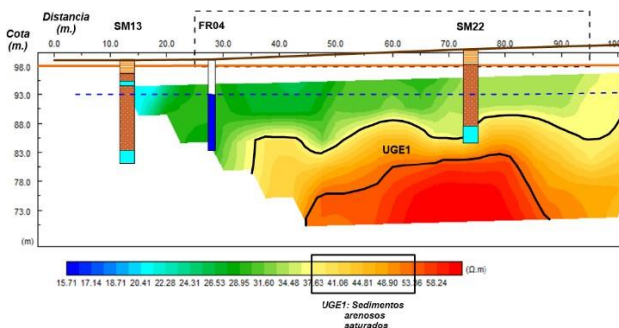
3 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El trabajo se basa en el procesamiento de datos obtenidos de la investigación geotécnica realizada para una obra de gran envergadura y en donde se procedió a una excavación de más de 15 m de profundidad en un área de aproximadamente 13.000 m², en un predio ubicado en la ciudad de Asunción.

Los trabajos de las campañas de investigación geotécnica realizadas para la obra incluyeron la ejecución de treinta y tres (33) sondeos con extracción de testigos mediante la utilización de equipos rotativos. Además, se ejecutaron ensayos de clasificación de suelos según criterio Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ensayos de compresión simple y ensayos triaxiales. Como complemento a la campaña de investigación geotécnica, se realizaron también líneas de tomografía geoeléctrica, como se observa en la Figura 2.

Posteriormente, ya durante la obra en ejecución, se realizaron sondeos y extracciones adicionales de muestras para complementar este trabajo de investigación. Los sondeos adicionales alcanzaron una profundidad aproximadamente 20 m con respecto al nivel natural del terreno.

Figura 2. Línea de tomografía geo-eléctrica representativa



3.1 Caracterización del material estudiado

3.1.1 Propiedades Índice

El material estudiado se caracteriza como una arena limosa (SM) o arena limo arcillosa (SM-SC) muy densa, aparente arenisca friable de grano medio o arena cementada, de color marrón rojizo. El contenido de pasante Tamiz No. 200 es inferior a los 20%, con Índices de Plasticidad inferiores a 5 y en otros casos sin plasticidad (en los casos de las arenas limosas). En la Tabla 1 se presentan resultados de clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos de muestras representativas ensayadas.

En lo que respecta a la densidad del material estudiado, los testigos extraídos presentan densidades entre 18,0 kN/m³ y 19,8 kN/m³, con un valor promedio de 19,2 kN/m³.

Tabla 1. Resultados de clasificación de muestras ensayadas

| Muestra | W (%) | LL | LP | IP | Tamiz No. 200 | SUCS |
|---------|-------|----|----|----|---------------|-------|
| Z1 | 8.6 | 18 | 15 | 3 | 16 | SM |
| Z2 | 6.8 | - | - | NP | 14 | SM |
| Z3 | 7.2 | 19 | 14 | 5 | 17 | SC-SM |
| Z4 | 8.1 | - | - | NP | 18 | SM |
| Z5 | 7.9 | - | - | NP | 15 | SM |

3.1.2. Valores de resistencia a compresión simple y velocidad de onda

A fin de complementar la caracterización del material, se realizaron ensayos de compresión simple y mediciones de velocidad de onda de corte (Vs) en testigos extraídos. Los resultados de resistencia a compresión simple varían entre 6,0 y 17,0 kg/cm², con valores de onda corte entre 1125 y 1934 m/s. Estos rangos son similares a los datos obtenidos en una investigación realizada anteriormente, obteniéndose valores de compresión simple entre 2,0 y 10,0 kg/cm², y valores de onda de corte entre 1260 y 1910 m/s (Chamorro & Diez, 2023).

Los valores anteriormente expresados presentan diferencias significativas, evidenciando la heterogeneidad en estudio.

3.1.3. Índice de colapso

Con el fin de determinar el índice de colapso del material, se siguió la recomendación de la normativa ASTM D5333-03, la cual define al índice de colapso como la magnitud relativa de colapso determinada bajo una carga de 200 kPa, como se observa en la Tabla 2. El procedimiento de ensayo consiste en realizar un ensayo estándar de consolidación (basado en ASTM D2435), con etapas de carga sucesivas, y una vez terminada la lectura de la etapa de carga de 200 kPa, inundar la muestra y volver a realizar una lectura durante 24 hs.

Además, como parte de los ensayos de caracterización de suelo, se realizaron ensayos de consolidación sobre muestras con humedad natural durante todo el ensayo (inundadas después de los 200 kPa) y también ensayos en muestras las cuales fueron inundadas desde el inicio del ensayo. Con esto, se pueden obtener comparativas entre los comportamientos de las distintas condiciones. Esta comparativa se incluye en la Figura 3. El valor obtenido de índice de colapso para la muestra ensayada es de 5.87, el cual puede ser definido como moderadamente severo según la normativa ASTM D5333-03.

Existen casos en los cuales el colapso surge por deficiencia de arcilla la cual se encuentra en un rango normalmente inferior al 10%, en otro caso, si contiene cantidades elevadas de arcilla, al humedecerse se este se expande generando un ritmo de colapso controlado (Li, et al., 2016).

Figura 3. Comparativa de comportamiento al inundar la muestra.

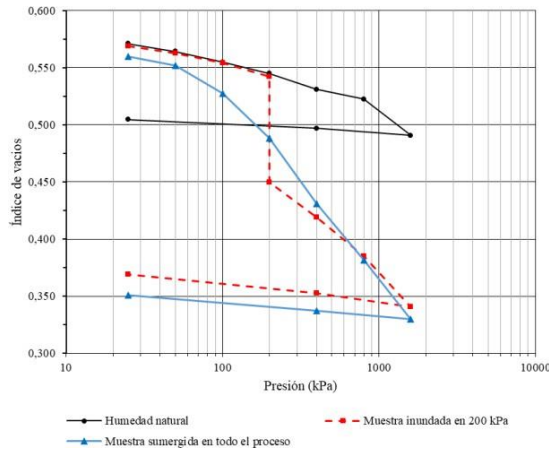


Tabla 2. Clasificación de índice de colapso según ASTM D5333-03

| Grado de colapso | Índice de colapso (I_c) % |
|----------------------|-------------------------------|
| Nulo | 0 |
| Bajo | 0.1 a 2.0 |
| Moderado | 2.1 a 6.0 |
| Moderadamente severo | 6.1 a 10.0 |
| Severo | >10.0 |

3.1.4. Microscopía Electrónica de barrido con Espectrometría de Energía Dispersiva (SEM/EDS)

Fueron realizadas dos perforaciones con equipo rotativo para la adquisición de las muestras denominadas P1 y P2. Las muestras fueron identificadas como P1A (13 m de profundidad), P1B (18 mde profundidad), P1C (20 m de profundidad) y P2 (10 m de profundidad). Las profundidades indicadas están relacionadas al nivel natural del terreno.

Se han analizado cuatro muestras representativas utilizando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) combinada con Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS) obtenidas de distintas profundidades. La finalidad de la realización de este estudio fue caracterizar la composición mineralógica y la distribución de elementos para identificar sus propiedades y procesos geológicos asociados.

Respecto a las imágenes seleccionadas de las muestras disgregadas del P1B y P1C tienen menos fracción gruesa que las estables, muestras P1A y P2, como se observa en las Figuras 4 y 5.

Las imágenes que se observan en forma esférica son granos de sílice (arenas) recubiertas de láminas de arcilla. Se observa, además, que las arcillas se encuentran adheridas a los granos, pero sin una característica cementante.

Las imágenes que se observan en forma esférica son granos de sílice (arenas) recubiertas de láminas de arcilla. Se observa, además, que las arcillas se encuentran adheridas a los granos, pero sin una

característica cementante.

Figura 4. Muestras con características estables

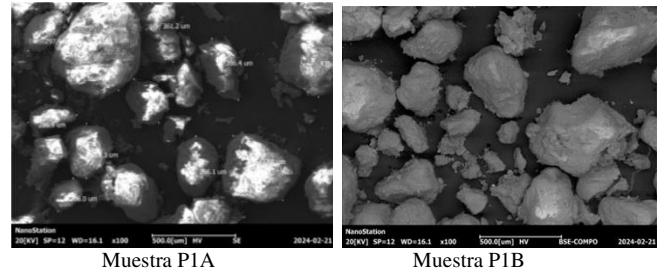
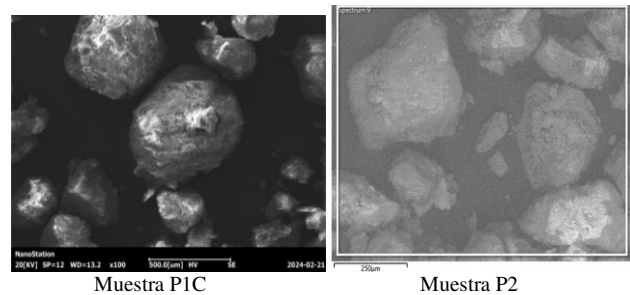


Figura 5. Muestra con características disgregadas



Desde el punto de análisis de los elementos puede observarse que los principales elementos son el sílice (Si) y el oxígeno (O) presente en todos los casos en un valor mayor al 84%, que en conjunto conforman la sílice que es el material principal. Por otro lado, el contenido de aluminio es indicativo de presencia de arcillas, en un porcentaje mucho menor y otros elementos como el hierro y el magnesio y titanio que le dan la coloración rojiza característica. En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos de la composición mineralógica y distribución de elementos.

Tabla 3. Composición mineralógica

| Muestra | O(%) | Si(%) | Al(%) | Fe(%) | K(%) | Mg(%) | Ti(%) | Característica |
|---------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|----------------|
| P1A | 56.4 | 27.8 | 7.9 | 4.6 | 2.1 | 0.5 | 0.4 | Estable |
| P1B | 56.7 | 28.9 | 7.6 | 4.6 | 1.1 | 0.6 | 0.4 | Disgregado |
| P1C | 56.7 | 27.6 | 9.2 | 4.1 | 1.2 | 0.5 | 0.4 | Disgregado |
| P2 | 57.5 | 27.2 | 9.2 | 4.1 | 0.8 | 0.4 | 0.3 | Estable |

Tabla 4. Composición mineralógica

| Muestra | Cu(%) | Na(%) | Ca(%) | Total (%) | Característica |
|---------|-------|-------|-------|-----------|----------------|
| P1A | 0.2 | 0.2 | 0 | 100 | Estable |
| P1B | 0.2 | 0.1 | 0 | 100 | Disgregado |
| P1C | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 100 | Disgregado |
| P2 | 0.2 | 0 | 0.1 | 100 | Estable |

4 CONCLUSIONES

El firme de Asunción está constituido por arenas pobremente cementadas y en menor grado, por areniscas alteradas por efectos de la meteorización. Este material es aparentemente homogéneo, y tiene la apariencia de arenisca, sin embargo, por sus características propias es un material heterogéneo. Por otro lado, puede ser considerado inestable debido a que con el aumento de la humedad natural o paso del agua subterránea puede producir el arrastre de los finos y minerales que actúan como cementante lo que produce el colapso de su estructura.

En principio, dos son los motivos que causan el colapso de las arenas cementadas, por efecto del arrastre de material cementante por causa del agua, o en su defecto, la pérdida del confinamiento del material. En las arenas objeto del estudio, el fenómeno se produce por la pérdida del material cementante debido a la acción del agua que fluye a través de sus vacíos, transformándola en arenas susceptibles al colapso.

El material estudiado es clasificado como una arena limosa (SM) o arena limo arcillosa (SM-SC) muy densa, aparente arenisca friable de grano medio o arena cementada, de color marrón rojizo o marrón rojizo amarillento. Se evidencia una deficiencia importante del material cementante acentuado en sectores. El contenido de pasante Tamiz N° 200 es inferior a los 20%, Índice de Plasticidad inferior a 5. En lo que respecta a la densidad del material estudiado, los testigos extraídos presentan densidades entre 18,0 kN/m³ y 19,8kN/m³, con un valor promedio de 19,2 kN/m³.

De los ensayos de consolidación sobre muestras del comportamiento en distintas condiciones se ha obtenido el valor de índice de colapso para la muestra ensayada que es de 5.87, el cual puede ser definido como moderado a moderadamente severo según la normativa ASTM D5333-03.

En líneas generales se puede afirmar que las muestras analizadas presentan una zonificación marcada donde el agua juega un papel preponderante en el arrastre de partículas, hecho observable a través de las muestras obtenidas y los datos de geofísica, donde existen zonas de diferente valor resistivo coincidente con material disgregado y baja recuperación de testigos en algunos sectores de las perforaciones.

En cuanto al análisis microscópico de las muestras, es claro que el principal componente es la sílice, presente en forma de arenas y limos, en mucho menor proporción de aluminio indicando escasa presencia de material cementante, arcillas, estas recubren como laminas algunos de los granos de arena, sin embargo, es mínima su participación como adherente entre estos, el resto de los elementos presentes, como el hierro, participan dando la coloración al material. Las fracciones muy pequeñas están ausentes, producto del lavado por agua. La estabilidad del material puede estar en función al tamaño de los granos y al empaquetamiento de estos.

Los datos obtenidos y el análisis efectuado de los aspectos físicos, químicos y mineralógicos indican la presencia de un material con estructura con susceptibilidad de colapso, por lo que es de suma importancia continuar con investigaciones en el área de geología y geotécnica a fin de obtener informaciones relevantes para las obras de gran envergadura en desarrollo en Asunción.

5 REFERENCIAS

- Bartel, W., 1994: - Strukturell-sedimentäre Entwicklung des Blocks von Asunción, Paraguay - Clausthal - Zellerfeld.
- Bosio J. 2008. Las arenas cementadas de Asunción. Anales de la Academia Nacional de Ingeniería. Buenos Aires Tomo IV.
- Celabe, R.; Gadea, M.; Salinas, N., 2023 - Un acercamiento a la geología del Cerro Yaguarón. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay. Junio 2023;28(1):30-40
- Carvalho, F.; Villar, F. 2016 - Acuífero Patiño, Fuente de Agua Estratégica del Gran Asunción. Revista de la Facultad de Ciencias y Tecnologías. 2016(7);51-77.
- Chamorro, F; Diez, F. (2023) Estudio de la rigidez y resistencia al corte de las arenas cementadas en asunción en estado de colapso. Facultad de Ciencias y Tecnología, UC, Asunción, Paraguay.
- De Graff, J.M.; Orué, D., 1984 – Proyecto tectónico del Paraguay sur oriental. Informe de progreso. Dindusmil – Universidad de Purdue.
- El Howayek, Aet al., 2011; Identification and Behavior of Collapsible Soils, Purdue University, 550 Stadium Mall Drive, West Lafayette, IN 47907-2051. DOI: 10.5703/1288284314625.
- Lugo, L., 1997 – Determinación química y mineralógica de las arenas cementadas de Asunción. Anales del 1er Congreso Paraguayo de Geotecnia.
- MOPC – BGR a., 1998 – Texto explicativo del mapa geológico de la República del Paraguay, Escala 1:100.000 – Hoja PARAGUARI 5469. Dirección de Recursos Minerales (MOPC) - Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales - Asunción – Paraguay.
- Ramírez, E. 2021; Métodos para Identificar Suelos Colapsables. Universidad Santo Tomás, División de Ingenierías, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá D.C., Colombia.



Proceedings of the Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.

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 the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.