

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.

Estimación de la capacidad soportante admisible del lahar en la ciudad de San José, Costa Rica, mediante ensayos presiométricos (PMT)

Jonathan ECHAVARRÍA VARGAS^{a,1} y Carlos GONZÁLEZ BARRANTES^a

^aMYV Soluciones Geotécnicas, Asociación Costarricense de Geotecnia.

Resumen. En los últimos 8 años se ha acelerado la construcción de edificios de apartamentos y de oficinas, de más de 50 m de altura en el centro de la provincia de San José, Costa Rica, debido al crecimiento de la población. En el centro y este de San José, se encuentran superficialmente suelos limo arenosos y limo arcillosos, con una capacidad soportante admisible de entre 50 kPa y 300 kPa, de 5 a 20 m de espesor. Por debajo de este estrato de suelo, se detecta el lahar, que es una mezcla de suelo y bloques de roca de tamaño centimétrico a decimétrico, y en algunos sectores bloques de más de un metro de diámetro. Este Lahar también es conocido como *debris flow*, y es apto para la fundación de estas estructuras de más de 50 m de altura. Los ensayos geotécnicos más comunes, tales como DMT, CPT y SPT inclusive, no logran determinar la capacidad soportante del lahar debido a que estos equipos no avanzan al encontrarse con un bloque de roca, sin embargo, utilizando ensayos presiométricos (PMT) se puede estimar la capacidad soportante de esta formación geológica, mediante la introducción de la probeta PMT por medio de sondeos a rotación. Con el uso del PMT, los ingenieros estructurales y desarrolladores pueden contar con datos precisos para estimar la capacidad soportante admisible del lahar, la cual varía entre 400 kPa y 1200 kPa, además de otros parámetros necesarios para el diseño de cimentaciones profundas o losas de fundación.

Palabras Clave: Presiómetro, lahar, ensayos in situ, capacidad soportante.

1. Introducción

Hace 15 o 20 años atrás, un estudio de suelos tradicional en Costa Rica con SPT, DMT o CPT era suficiente para diseñar las edificaciones requeridas en el país, ya que las estructuras en general eran relativamente bajas (menos de 55 metros de altura), con fundaciones desplantadas prácticamente superficiales, y en algunos casos se requerían de cimentaciones profundas tipo pilotes o micropilotes. Sin embargo, en la actualidad esta condición cambia, debido al tipo de estructuras requeridas en este momento.

Con el fin de aprovechar los espacios reducidos en la capital, el desarrollo de edificios de condominios de más de 50 m de altura (60 m a >100 m), ha sido fundamental para abastecer la gran demanda habitacional en el sector central y este de la provincia de

¹ Corresponding Author, Jonathan Echavarría Vargas, MYV Soluciones Geotécnicas, Asociación Costarricense de Geotecnia; E-mail: jechavarría@myv-sg.com.

San José. Dichas estructuras requieren a su vez de varios niveles de sótanos, los cuales pueden ser aprovechados como parqueos, y como espacio para la colocación de los sistemas electromecánicos de estas edificaciones. Por lo anterior, estos edificios requieren de cimentaciones desplantadas a mayor profundidad.

Sin embargo, la geología local ofrece suelos muy heterogéneos en pequeñas áreas, por lo que es fundamental una adecuada exploración para determinar la capacidad soportante de los estratos del suelo y subsuelo, para el desarrollo de cualquier proyecto de construcción. Por esto, la presente investigación pretende mostrar la metodología adecuada para determinar la capacidad soportante admisible del estrato de suelo (lahar) en el cual se proyecta cimentar estas edificaciones en desarrollo.

2. Geología local

La formación de la Cordillera Volcánica Central durante el Pleistoceno-Holoceno ocasionó depresiones, en donde, por la erosión, remoción y transporte de productos volcánicos recientes, se acumularon materiales tales como avalanchas de lodo y cenizas, generando un “relleno” de grandes extensiones en lo que hoy se conoce como el Valle Central de Costa Rica (ver Figura 1).

En el periodo cenozoico se formaron los lahares en el Valle Central. Los lahares están constituidos por una matriz de arcillas, limos y arenas, que engloban fragmentos líticos de todo tamaño, tipo y forma, mal cementada y sin ordenamiento, con un espesor aproximado de 60 m [4]. Esta formación geológica subyace la capa superficial conformada por depósitos piroclásticos meteorizados muy finos (cenizas), de espesor variable entre 10 m y 20 m.

Los depósitos provenientes de las laderas norte y este del valle (faldas del cerro Zurquí y el volcán Irazú) se extienden al oeste hasta Pavas y al sur hasta Desamparados.

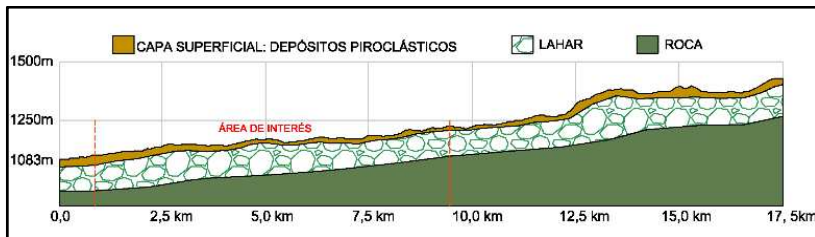


Figura 1. Esquema del perfil geológico del sector Este del Valle Central, Costa Rica. Fuente: Autor.

3. Zona de estudio

Los proyectos revisados se localizan en los cantones de San José Central, Montes de Oca, Curridabat, Goicoechea y Tibás, tal y como lo muestra la Figura 2. Estos proyectos se componen principalmente de edificios de condominios, así como de edificios comerciales y gubernamentales, y obras de infraestructura, los cuales, por su diseño, se proyectaban cimentar sobre el lahar, o en un estrato de suelo cercano al contacto con dicha formación geológica.

Se utilizaron resultados de aproximadamente 200 ensayos presiométricos (PMT) distribuidos en 18 proyectos distintos, y de diferente extensión. Como parte del alcance

de verificación de la capacidad y deformabilidad del lahar, se realizaron entre dos y cuatro pruebas PMT por cada sondeo a rotación. Así también se realizaron ensayos DMT y CPT a los suelos superficiales hasta el contacto con el lahar.

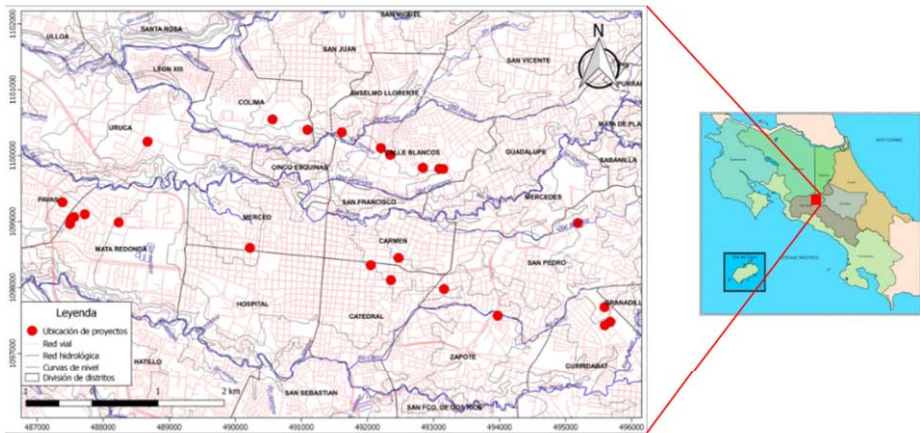


Figura 2. Mapa con la ubicación de los proyectos en la zona de estudio.

4. Ensayos in situ

4.1. Ensayos a suelos superficiales

En todos los puntos de estudio se realizaron ensayos DMT y CPT para caracterizar los suelos superficiales hasta la profundidad de contacto con el lahar. Se determinó que predominan los suelos con comportamiento limo arenoso y limo arcilloso, típico de depósitos volcánicos (depósitos piroclásticos meteorizados muy finos) de la zona.

Además, esta formación geológica se detecta muy claramente con ensayos geofísicos MASW, el cual muestra un aumento en la velocidad de onda cortante (V_s) de los suelos superficiales de entre 200 m/s y 350 m/s, a V_s superiores a 450 m/s en el lahar. En la Figura 3 se observa claramente el contacto con el lahar en dos de los proyectos analizados.

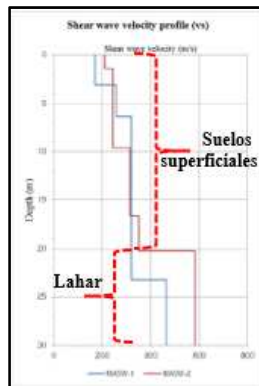


Figura 3. Resultados típicos de ensayos geofísicos MASW en la zona de estudio.

Una vez determinada la profundidad de contacto con el lahar, se procedió a realizar perforaciones a rotación, para introducir la probeta del presiómetro y realizar los ensayos correspondientes. Debido a que la gran cantidad de bloques del lahar hace imposible estimar su capacidad soportante con equipos DMT o CPT, el PMT se vuelve una herramienta importante y útil en este caso.

4.2. Ensayos presiométricos (PMT)

El presiómetro fue desarrollado en Francia por Louis Menard en 1955, sin embargo, con el pasar de los años, este ensayo ha obtenido mejoras en cuanto a aspecto y manejo del equipo, una de ellas fue la creación del equipo TEXAM, que conserva las principales características y procedimiento, no obstante, al ser más compacto que el original, resulta más fácil poder manejarlo y utilizarlo.

En la Figura 4, se aprecian los diferentes componentes del equipo presiométrico utilizado en los ensayos.

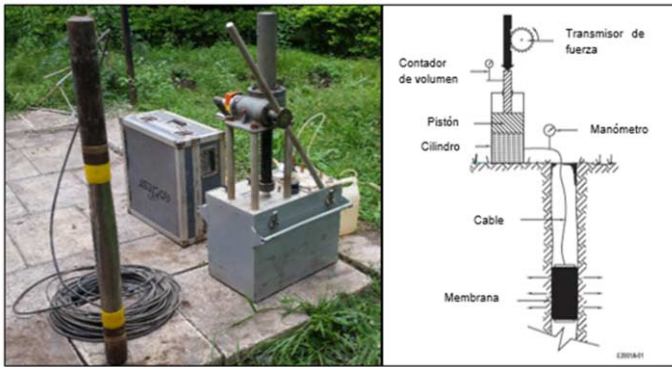


Figura 4. Detalle del equipo PMT utilizado en los ensayos.

La sonda del PMT se introduce en un agujero preexcavado, y es inflada en incrementos iguales de volumen, la misma le ejerce una presión radial uniforme al suelo por el contacto con las paredes de la perforación; obteniendo así curvas de presión - deformación. La prueba presiométrica es esencialmente una prueba de carga in situ llevado a cabo dentro de un pozo. Este ensayo se realiza según la norma ASTM D 4719-07.

La preparación de un pozo de calidad es un paso muy importante para obtener una prueba con presiómetro satisfactoria [2]. Las tolerancias en el diámetro del pozo son:

$$1,03D_p \leq D_i \leq 1,20D_p \quad (1)$$

donde D_p es el diámetro de la sonda PMT desinflada; D_i es el diámetro inicial del pozo.

A partir de los datos de presión y volumen, se construye un gráfico tensión-deformación, del cual se extraen los parámetros necesarios para el cálculo de capacidad soportante presentados en este estudio, además de otros parámetros importantes para el diseño de cualquier estructura.

A continuación, la Figura 5 muestra una curva óptima resultante de uno de los ensayos PMT.

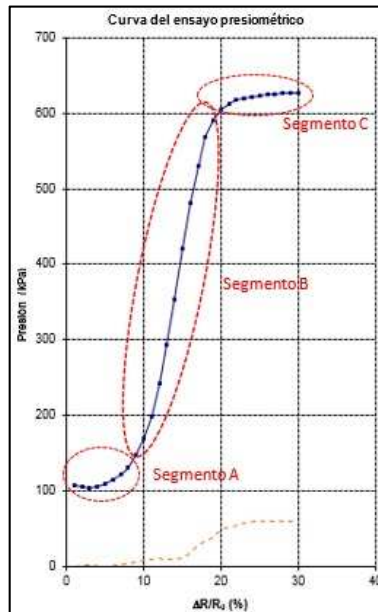


Figura 5. Curva típica obtenida de un ensayo PMT en suelo.

Como se observa en la figura anterior, se trazan 3 segmentos de curva bien definidos:

- Segmento A: Permite definir la presión horizontal in situ (P_0), que es la presión necesaria para ejercer un esfuerzo sobre el terreno debido a la expansión de la membrana y el volumen de la cavidad (V_0).
- Segmento B: La línea recta identifica el rango de comportamiento elástico del suelo. Este segmento define el módulo de deformación del material probado.
- Segmento C: Indica el rango de comportamiento plástico del suelo. La masa cargada entra en un estado plástico durante el cual la deformación se acelera hacia un punto de falla completo, es decir, la presión límite (P_L).

Una vez obtenidas la presión inicial (P_0) y la presión límite (P_L), se calcula la capacidad soportante admisible (q_a), que se expresa así:

$$q_a = K \cdot (P_L - P_0) / FS \quad (2)$$

donde q_a = Capacidad soportante admisible (kPa); K = Factor de capacidad de carga; P_L = Presión límite (kPa); P_0 = Presión inicial (kPa); FS = Factor de seguridad, normalmente $FS=3$ (según el Código Sísmico de Costa Rica, CSCR).

5. Resultados

Se obtuvieron datos representativos de capacidad soportante del lahar en diferentes sectores de la provincia de San José, en donde se realizaron ensayos presiométricos.

En la Figura 6, se aprecia la recuperación de muestras de suelo y lahar por medio del sistema a rotación en uno de los sitios de estudio.



Figura 6. Recuperación de muestras típicas del lahar por medio del ensayo a rotación.

Mediante las muestras obtenidas a rotación, se llevó a cabo una descripción visual del lahar en cada una de las zonas de estudio, mientras que los ensayos PMT permitieron obtener la capacidad soportante admisible (utilizando un FS=3 según CSCR) de esta formación geológica.

En la siguiente figura se detallan los resultados de dichos ensayos presiométricos, en el cual se compara la profundidad con respecto a la capacidad de soporte admisible obtenida de cada una de las pruebas.

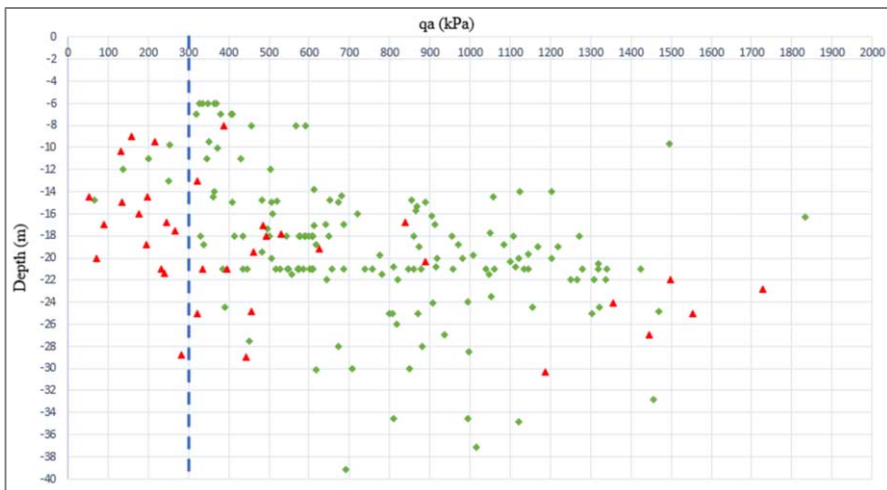


Figura 7. Resultados de capacidad soportante admisible según ensayos PMT.

A partir de este gráfico, se interpretan varios datos importantes:

La mayor cantidad de pruebas se realizaron entre los 14 y 30 metros de profundidad, y presentaron resultados mayores a las 400 kPa y hasta 1400 kPa, sin embargo, se tienen muchos resultados adicionales a profundidades inferiores y superiores al rango predominante.

Los triángulos en color rojo, representan resultados en donde no se alcanzó la plastificación del suelo debido a:

- a) La presencia de bloques angulares y bordes con filos producto del método de perforación a rotación, producen en muchas ocasiones una falla de la membrana

durante alguna de las etapas del ensayo. Esto se ve reflejado como una pérdida de presión en la curva presiométrica, tal y como se aprecia en la Figura 8.

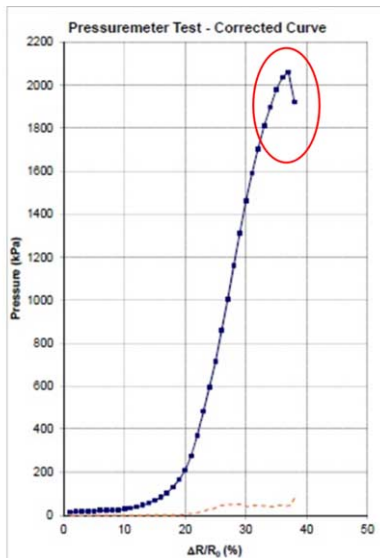


Figura 8. Gráfica presiométrica en donde se aprecia falla de la membrana.

- b) El desprendimiento de los bloques y matriz de las paredes del pozo, que provocan que su diámetro se amplíe considerablemente, por lo que el diámetro del pozo (D_i) fue mucho mayor a 1,2 veces el diámetro de la probeta desinflada (D_p), esto provocó gran cantidad de lecturas iniciales que no permitieron que se alcanzara la zona de plastificación (Figura 9).

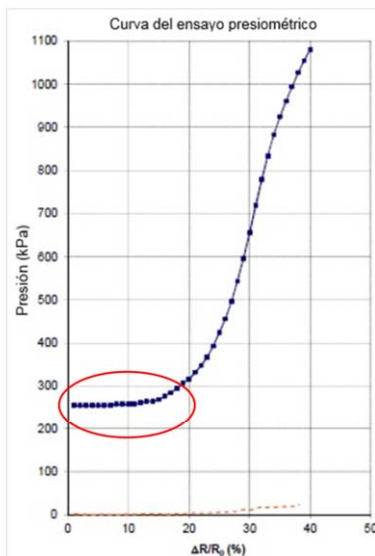


Figura 9. Gráfica presiométrica en donde no se logra alcanzar la plastificación del suelo.

Además, en algunos casos la prueba alcanzó la máxima capacidad del equipo (**10 000 kPa**) muy rápidamente, indicativo de que la probeta de ensayo quedó atrapada en un bloque de roca. En estos casos, se desechó la prueba y se procedió a cambiar la profundidad de la probeta, ya que los valores obtenidos no eran representativos del lahar.

Es importante mencionar que, al presentarse casos como los mostrados en las figuras 8 y 9, en los que no se logra alcanzar la plastificación del suelo, debemos estimar su presión límite (P_L) con el último valor de la curva, por lo que los cálculos de capacidad soportante pueden ser muy conservadores, siendo mucho menores a los que realmente caracteriza al material probado.

Los resultados inferiores a 300 kPa, se debe a que se realizaron los ensayos presiométricos en la zona de transición entre el suelo y el lahar, y/o no alcanzaron la presión límite (P_L), debido a alguna condición del suelo como las que se indican anteriormente.

6. Conclusiones

Las pruebas DMT, CPT y SPT (métodos tradicionales en Costa Rica para estimar las capacidades soportantes en las capas de suelo superficiales), no pueden penetrar el lahar. Sin embargo, el PMT es muy útil en este tipo de estratos, siempre y cuando se tomen los cuidados respectivos. Además, el PMT es lo más semejante a una prueba de carga in situ.

El PMT es una excelente herramienta para estudiar las capacidades de soporte en estratos con bloques de roca. Debido a que la membrana del PMT es radial y de gran área, y permite probar suelos heterogéneos, en donde existen diferentes combinaciones de bloques de roca y matriz (limo, arena, arcilla, etc), como los lahares.

Las capacidades soportantes del lahar oscilan entre 300 kPa y 1400 kPa. Esto es muy importante para el diseño de fundaciones de edificios o algunas otras estructuras, que necesiten cimentarse en esta formación geológica.

Se deben efectuar sondeos a rotación con recuperación de muestras, para visualizar y caracterizar el material que conforma el lahar, así como para determinar la profundidad a la que se detecta. Además, estos sondeos son necesarios para introducir la membrana del PMT y determinar la profundidad del ensayo. Un diámetro adecuado de la perforación a rotación, permite obtener una curva presiométrica típica, necesaria para la obtención de los parámetros del estrato en estudio.

Se recomienda realizar ensayos presiométricos antes de diseñar la estructura, y durante la ejecución de la obra para confirmar y garantizar la capacidad de soporte estimada, tanto en el estrato en donde se cimenten las fundaciones, así como a mayor profundidad.

Referencias

- [1] American Society for Testing Materials (ASTM). (2007). Designation D 4719-07: Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing Soil. Estados Unidos: Autor.
- [2] Briaud, J. L. (1992). The Pressuremeter. Gran Bretaña: Editorial Taylor & Francis/Balkema.
- [3] Denyer, P. y Kussmaul, S. (2000). Geología de Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- [4] Hidalgo, P., Alvarado, G. y Linkimer, L. (2004). La Lavina de Valle Central (Costa Rica): ¿Lahar o debris Avalanche? Revista Geológica de América Central, 30, 101-109.

- [5] Jiménez Duarte, P. (2010). Implantación y calibración del Presiómetro Ménard para estimación de la capacidad de soporte y deformabilidad de suelos en cimentaciones de proyectos ICE. (Tesis para optar por el grado de licenciatura). San José: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [6] González Barrantes, C. (2017). Utilización del ensayo presiométrico (PMT) para la estimación de la capacidad soportante del lahar en tres zonas diferentes de la provincia de San José. (Tesis para optar por el grado de licenciatura). San José: Universidad Fidélitas.
- [7] Lambe, W. y Whitman, R. (1995). Mecánica de suelos, (2° ed.). México: Editorial Limusa.
- [8] Protti, R. (2003). La formación geológica de Costa Rica. Zurquí.
- [9] Rivier, F. y Calvo, C. (1988). Terciario del sur del Valle Central: Sección Estratigráfica del Cerro Caraigres, Revista Geológica de América Central, 9, 61-74.
- [10] Sowers, B. y Sowers, G. (1994). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. México: Editorial Limusa.