

Correlación de resultados de ensayos presiométricos frente a resultados de compresión uniaxial en materiales de la zona conurbada de Monterrey (México).

Daniel MARTÍN¹, Rolando DÍAZ, Daniel TRANQUILINO
Ingeniería, Consultoría y Asistencia en la Construcción VORSEVI MEXICO, SA de CV

Resumen: El ensayo presiométrico nos permite determinar in situ las características mecánicas de los suelos y macizos rocosos obteniéndose parámetros de resistencia y deformación de los mismos de una manera directa y simple. Por otra parte, también pueden obtenerse parámetros de resistencia de un sustrato rocoso a través de ensayos de compresión uniaxial en laboratorio. En el presente artículo se realiza un análisis en base a los datos obtenidos en varias campañas geotécnicas desarrolladas en el área conurbada de Monterrey, pretendiéndose mediante su análisis estadístico, realizar una correlación de los módulos presiométricos obtenidos in situ, frente a resultados de ensayos de compresión uniaxial obtenidos en laboratorio. Dicho análisis se centra en dos de los materiales más característicos del área conurbada, correspondientes al nivel cuaternario de Conglomerados Oligomicticos (QptCgo) y el sustrato terciario de Lutitas y Margas (KcmLu-Mg).

Palabras Clave: Ensayos presiométricos, compresión uniaxial, Monterrey.

1. Introducción

Los ensayos presiométricos son una de las técnicas in situ más versátiles aplicables a la mecánica de suelos y roca para la obtención de parámetros esfuerzo-deformación. Su ejecución es relativamente rápida y nos permiten obtener resultados en plazos compatibles con las necesidades del proyecto. Su uso se ha consolidado como herramienta eficaz para la obtención de módulos de deformación de calidad del terreno.

Mediante ensayos presiométricos debidamente ejecutados e interpretados pueden dimensionarse directamente cimentaciones superficiales y profundas, pueden realizarse tanto cálculos analíticos (capacidad portante) como análisis de diferentes procesos (movimientos inducidos por excavaciones u otras obras).

De acuerdo a la metodología que se utilice para la introducción en el terreno, los presiómetros se clasifican en:

- Sondas PBP (*pre-bored pressuremeter*) que se introducen en un sondeo realizado previamente con el mayor cuidado con el fin de alterar lo menos posible las características naturales del suelo.

¹ Autor de Correspondencia, Vorsevi México SA de CV, Bahía Magdalena #26, Col. Veronica Anzures, Del. Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México; E-mail: danielmartin@vorsevi.mx

- Sondas autoperforantes o SBP (*self bored pressuremeter*) estos presiómetros producen una mínima alteración del terreno natural, su uso está limitado a suelos que no contengan gravas.
- Sondas hincadas a presión o PIP (*push in pressuremeter*) la sonda se introduce con presión como en un ensayo de penetración estática CPT.

Los más comunes utilizados en la mecánica de suelos son las sondas PBP entre los cuales se encuentran:

Presiómetro Menard: Este ensayo permite obtener las características mecánicas del suelo, entre las que se halla, el módulo de compresión, resistencia a la tracción, compacidad, ángulo de rozamiento, presión límite y rigidez del suelo. Es apto para suelos de consistencia blanda hasta rocas blandas, alcanza una presión máxima de 10 MPa.

Presiómetro Texam: Con este tipo de presiómetro se pueden realizar ensayos cíclicos y de fluencia. Se trata de un instrumento confiable para la evaluación de la mayoría de los problemas de ingeniería geotécnica.

Presiómetro Pencil: Es un presiómetro monocelular que emplea hincado dinámico o por empuje estático en el suelo por lo que no se necesita equipo de perforación.

El presiómetro Oyo: Es un presiómetro de tipo monocelular, es apto para todo tipo de terrenos, permite realizar distintos ciclos de carga y descarga y puede llegar a presiones de hasta 20 MPa. En este tipo se centra el presente artículo, pasando a continuación a describir el mismo con mayor detalle.

1.1. Sonda tipo monocelular.

El equipo consta de los siguientes componentes (Figura 1):

Sonda elastométrica: Tiene una longitud de 150 mm en la que va enroscada una camisa de caucho de 70 mm de diámetro. El mecanismo interno lleva incorporado un sensor capaz de medir el diámetro interno de la camisa con gran precisión. Además, lleva un sensor para medir la presión a la que es sometida la camisa.

Estación de lectura: Acoplable a un portátil tiene dos pantallas de lectura, una de P (MPa) y la otra para deformaciones (mm).

Sistema de Presión (N₂): Como sistema de presión se utiliza N₂ debido a su baja compresibilidad y su carácter de gas inerte.

Conductos de presión y señal de medida: Los cables conectan la sonda y el sistema de presión con la estación de medida.

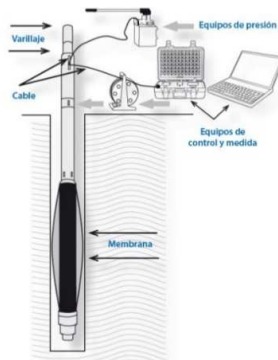


Figura 1. Esquema de un ensayo presiométrico con sonda monocelular.

1.2. Fundamento teórico de ensayo con presiómetro monocelular.

Esta prueba consiste en ingresar una sonda cilíndrica con una camisa de caucho radialmente dilatante en el interior de una perforación previamente ejecutada a la cual se le aplica escalones de presión mediante la inyección de un fluido o gas (nitrógeno) y tomando lecturas de la expansión radial de la sonda en función a la presión aplicada, obteniendo así una relación esfuerzo-deformación.

Dicha prueba se realiza siguiendo los lineamientos de la norma ASTM-D 4719, en este estudio se realizaron pruebas con una sonda “OYO 4181 ELASTMETER 2 HQ SONDE”.

El ensayo presiométrico se analiza a partir de la teoría elastoplástica de la expansión de la cavidad cilíndrica en un medio indefinido, permitiendo determinar “in situ” parámetros de resistencia y deformación a la profundidad deseada. De cada ensayo se obtienen valores como el módulo presiométrico (E_p), presión de fluencia (P_f) y presión límite (P_L).

E_p : Módulo presiométrico, estudio de la fase elástica del ensayo.

P_f : Presión de fluencia, presión correspondiente al final de la fase elástica del ensayo.

P_L : Presión límite, se define como la presión a la que el volumen de la sonda se convierte en dos veces el volumen de la cavidad original del suelo.



Figura 2. Representación gráfica de un ensayo presiométrico con un ciclo de descarga y recarga.

2. Geología regional

La zona conurbada de Monterrey está localizada en el Noreste de México, región ampliamente documentada en geología y tectónica regional a partir de numerosos estudios geológicos y recopilaciones.

Esta zona del país está caracterizada por una evolución tectónica compleja (Goldhammer, 1999) [1]; (Dickinson & Lawton, 2001) [2], donde se ha depositado una gruesa secuencia de rocas sedimentarias marinas carbonatadas y terrígenas, representadas por calizas, lutitas, areniscas y yesos depositados en ambientes de plataforma, cuenca y talud, cuyo rangos de edades abarca desde el Jurásico hasta el Eoceno Superior, según Carta geológica de Monterrey, del Servicio Geológico Mexicano [3].

De manera general, en la zona conurbada de Monterrey afloran materiales que abarcan edades que van del Cretácico superior al Cuaternario (Figura 3).

2.1. Cretácico superior.

Formación Méndez (KcmLu-Mg). Esta formación, analizada en el presente estudio, consta principalmente de lutitas calcáreas de color gris parduzco, con intercalaciones de margas y de capas delgadas de bentonita, así como de algunas areniscas grises oscuras. Su espesor varía de 270 m a 500 m. Aflora ampliamente en la porción oriental en la sierra Cerro de la Silla y en las inmediaciones de la ciudad de Monterrey, así como en el frente oriental de la Sierra Madre Oriental. El contacto inferior de esta unidad es en general concordante, transicional sobre la Formación San Felipe y subyace de manera discordante preferentemente a sedimentos no consolidados de edad cuaternaria.

2.2. Paleógeno.

Conglomerado (TnCgp). Corresponde a las unidades denominadas Conglomerado Reynosa y Conglomerado Neógeno, constituidos por fragmentos de caliza y areniscas; que varían de angulosos y subredondeados, incluidos en una matriz arcillo-arenosa. El espesor de la unidad varía entre 10 y 20 metros. La unidad es suprayacente en forma discordante a la Formación Méndez y a la vez se encuentra cubierta por limos y arcillas.

2.3. Cuaternario.

Cabe destacar que los materiales cuaternarios se encuentran ampliamente representados por depósitos lacustres (Qhola), depósitos aluviales (Qhoal), depósitos aluviales (Qhoco), travertinos (QplTr) y conglomerados oligomícticos (QplCgo), que corresponden a uno de los materiales analizados en el presente estudio. Estos depósitos se disponen en líneas generales discordantes sobre el sustrato infrayacente.

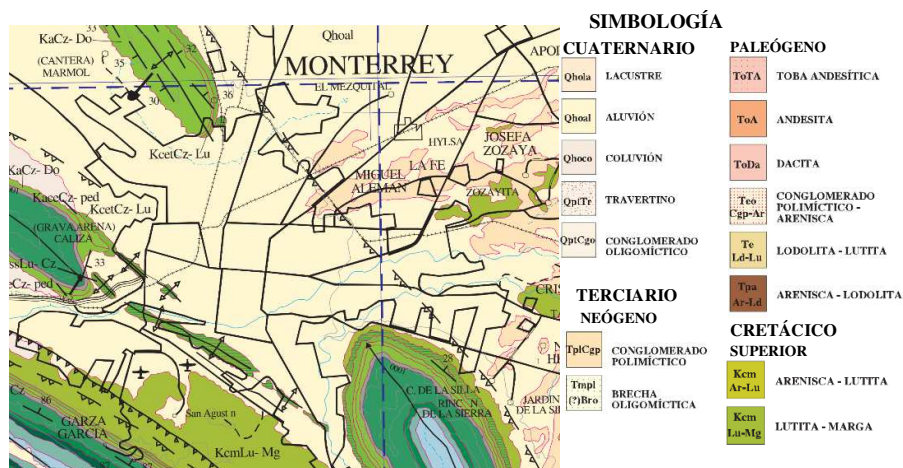


Figura 3. Geología de la zona de Monterrey (SGM, 2018) escala 1:250,000.

3. Unidades Geotécnicas.

A partir de trabajos de campo realizados se definen tres unidades geotécnicas (Figura 4).

UG1. Depósitos aluviales constituidos por gravas y arenas con intercalaciones arenoarcillosas de compactidad densa con contenidos de finos que alcanzan el 70% en algunos puntos. Los finos en general son materiales no plásticos o de baja plasticidad.

UG2. Conglomerado poligénico integrado por boleos y gravas de procedencia sedimentaria empacados en una matriz que va de arcilla con alto contenido de sílice a arena arcillosa con bajo contenido en sílice, presenta variantes de color que van de café claro a gris oscuro. Así mismo la variación del grado de cementación en la matriz que empaca a los boleos y gravas varía considerablemente, lo cual nos da como consecuencia valores de RQD muy variables a lo largo de la unidad.

UG3. Lutitas-margas de color café claro en la parte superior, conforme se va avanzando en la profundidad se torna gris oscuro.

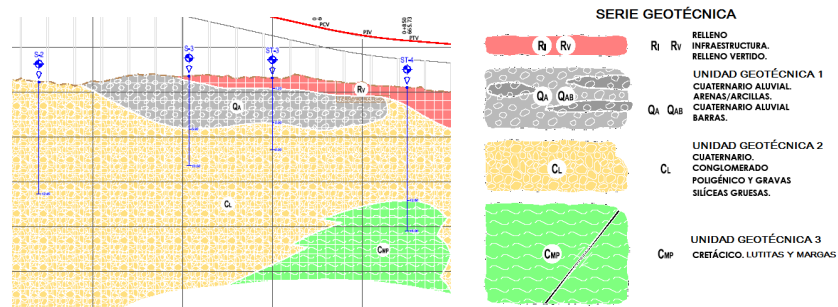


Figura 4. Perfil geotécnico tipo del área de estudio.

4. Resultados de Campo y Laboratorio.

Se realizaron un total de 4 ensayos presiométricos en la UG2 y 11 en la UG3, así mismo 101 compresiones uniaxiales en la UG2 procedentes de 34 sondeos y 194 compresiones uniaxiales en la UG3 realizados en 60 sondeos (tablas 1, 2 y 3).

Tabla 1. Compresiones uniaxiales totales en las diferentes unidades geotécnicas.

Compresiones uniaxiales	U. Geotécnica	Intervalo de valores (MPa)	Valor Medio (MPa)	Desviación estándar s (MPa)
101	UG2	2.2 - 73.2	21.1	17.6
191	UG3	0.6 - 26.8	9.6	5.9

Tabla 2. Módulos presiométricos en las diferentes unidades geotécnicas.

Ensayos presiométricos	U. Geotécnica	Intervalo de valores (MPa)	Valor Medio (MPa)	Desviación estándar s (MPa)
4	UG2	156.3 - 339.6	210.6	86.4
12	UG3	62.5 - 4716.9	1466.3	1519.5

Tabla 3. Compresiones uniaxiales en muestras en sondeos y cotas de presiómetros.

Compresiones uniaxiales	U. Geotécnica	Intervalo de valores (MPa)	Valor Medio (MPa)	Desviación estándar s (MPa)
4	UG2	10.5 - 11.2	11.2	0.7
12	UG3	4 - 21.1	11.5	5.7

Debido a las características litológicas de las unidades geotécnicas descritas en el apartado anterior sólo fue posible realizar ensayos de compresión uniaxial en la UG2 y UG3, ya que en la UG1 el material es fundamentalmente granular y no guarda una estructura adecuada para la realización de los mismos.

Es muy importante tener en cuenta la naturaleza de las unidades analizadas. La UG2 corresponde a conglomerados fuertemente cementados, si bien en los ensayos de compresión uniaxial realizados, frecuentemente la rotura se produce por un desprendimiento parcial de un clasto (Figura 5), mientras que la UG3 de lutitas y margas la rotura se produce principalmente por planos de debilidad intrínsecos del material, como planos de foliación o de estratificación (Figura 6).

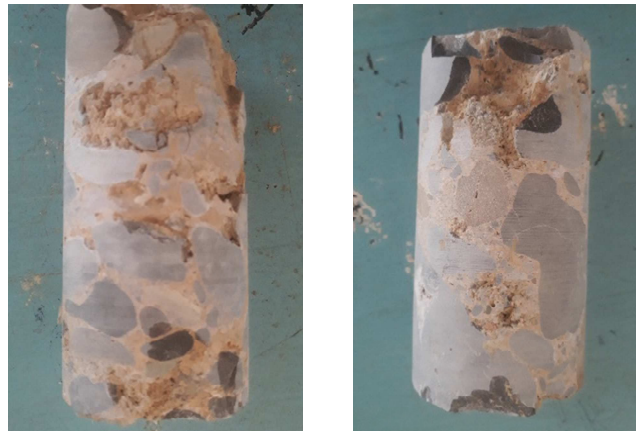


Figura 5. Probetas de UG2 tras rotura en ensayo de compresión uniaxial.



Figura 6. Probetas de UG3 tras rotura en ensayo de compresión uniaxial.

A continuación se recogen los resultados de los diferentes ensayos realizados (Figuras 7 y 8):

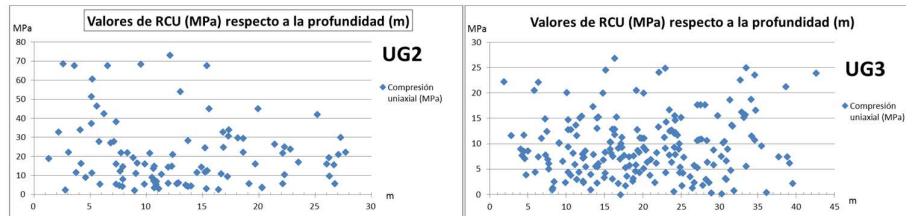


Figura 7. Resultados de ensayos de compresión uniaxial de la totalidad de ensayos realizados.

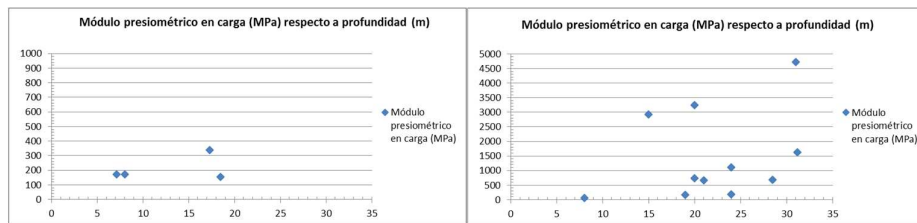


Figura 8. Resultados de ensayos piezométricos realizados.

Con el fin de ver la relación directa que pudiera existir entre ambos resultados se han discriminado los resultados de ensayos de compresión uniaxial realizados que corresponden a los mismos sondeos y a las mismas cotas que los ensayos piezométricos (Figura 9).

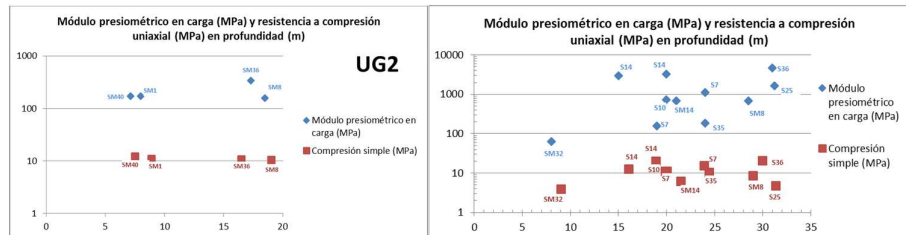


Figura 9. Gráfica de resultados de piezómetros realizados y de compresiones uniaxiales respecto a la profundidad en los sondeos correspondientes a las profundidades de los piezómetros realizados.

En estos gráficos parece observarse en líneas generales una relación directa entre los valores obtenidos en los ensayos de compresión uniaxial y los módulos piezométricos en carga para la mayor parte de los ensayos realizados. No obstante, para poder observar esa relación se ha optado por considerar el eje de presión en escala logarítmica, dado la diferencia de órdenes de magnitud entre los valores en MPa obtenidos entre ambos ensayos.

Finalmente, se ha buscado determinar una correlación entre los resultados de ambos ensayos para cada uno de los materiales analizados (Figura 10).

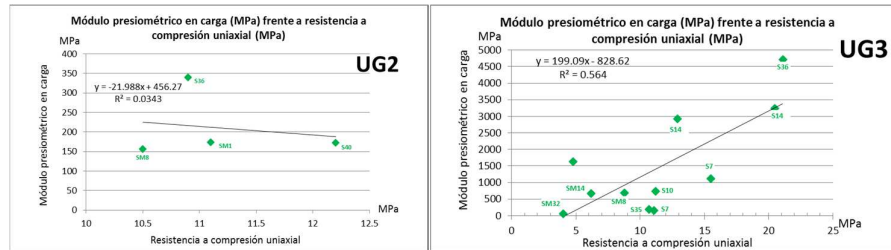


Figura 10. Gráfica de resultados de piezómetros realizados y de compresiones uniaxiales respecto a la profundidad en los sondeos correspondientes a las profundidades de los piezómetros realizados.

5. Conclusiones

Tenemos una amplia muestra de ensayos de compresión uniaxial en los que comparando la resistencia entre la UG2 de conglomerados cuaternarios y la UG3 de lutitas cretácicas, aparentemente el nivel de conglomerados presente una mayor resistencia.

Si comparamos esas mismas muestras únicamente en ensayos de los sondeos y a las cotas donde se han realizado ensayos piezométricos, los resultados de ensayos de compresión uniaxial para ambos niveles son similares.

Con estos datos se ha procurado buscar una correlación directa entre ambos ensayos, si bien para los materiales analizados no se aprecia una función adecuada que permita ver claramente la relación.

Considerando que no se ha podido establecer una correlación adecuada entre el módulo piezométrico y la resistencia de la roca intacta, según se ha observado, para los materiales reconocidos, la realización de ensayos de compresión uniaxial provoca, en gran número de muestras, que las roturas se produzcan por planos de debilidad, tanto en los conglomerados como en los niveles de lutitas, cuyo efecto debemos considerar que no se produce de la misma manera en los ensayos piezométricos, al realizarse éstos en condiciones confinadas. En estos ensayos se observa un comportamiento contrario al observado en las compresiones uniaxiales, de tal manera que obtenemos módulos piezométricos en carga mayores en la UG3 de lutitas cretácicas respecto a la UG2 de conglomerados cuaternarios.

Esta circunstancia haría conveniente considerar otras posibles correlaciones que permitan tener en cuenta otras características del material, como por ejemplo con el valor de RQD, número de fracturas, módulo de deformabilidad de la roca intacta (Et50), etc.

Bibliografía

- [1] DICKINSON, W.R. & LAWTON, T.E. (2001). *Carboniferous to Cretaceous assembly and fragmentation of Mexico. Geological Society of America Bulletin*, 113 (9): 1142-1160.
- [2] GOLDHAMMER, R.K. (1999). *Mesozoic Sequence Stratigraphy and Paleogeographic Evolution of Northeast Mexico. En Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico. Geological Society of America Special Paper* 340: 58.
- [3] SGM. (2018). Carta geológica de Monterrey, G14-7. Escala 1:250,000.
- MEIBURG, P. (1987). Paleogeografía y Desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental septentrional, México. Actas 2, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. Linares, 2, 197-199.
- MICHALZIK, D. (1988). *Trias Bis tiefste Unter-Kreide der Nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko – Fazielle Entwicklung eines passiven Kontinental randes*. Tesis Doctoral, Technischen Hochschule Darmstadt, Alemania. 247pp.