

Estimación del Módulo de Elasticidad (E) en una secuencia de Arcillas Blandas Lacustres de la Ciudad de Bogotá (Colombia)

Jorge Arturo Pineda Jaimes

Universidad Santo Tomás, Bogotá, Cundinamarca, Colombia, jorgepineda@usantotomas.edu.co

Lucero Amparo Estevez Rey

Universidad Santo Tomás, Bogotá, Cundinamarca, Colombia, luceroestevez@usantotomas.edu.co

Natalia Alexandra Daza Rodríguez

Universidad Santo Tomás, Bogotá, Cundinamarca, Colombia, nataliadaza@usantotomas.edu.co

RESUMEN

El artículo presenta la obtención del módulo de elasticidad E, también llamado Módulo de Young, para un perfil de suelos arcillosos de consistencia blanda a muy blanda de la ciudad de Bogotá, D.C. (Colombia). Se demuestra el cálculo empleando dos metodologías, las cuales envuelven ensayos de campo y laboratorio. Se comparan los valores obtenidos y asimismo se presentan las razones por las cuales se elige el módulo de elasticidad calculado desde el ensayo de campo.

Palabras claves: Módulo de Elasticidad, comparación, arcillas blandas, DownHole, Consolidación.

ABSTRACT

In this paper, we demonstrate obtaining Modulus of elasticity or also called Young's modulus of a clay soil profile of soft consistency, as are typical to find in the city of Bogotá, D.C., the calculation is shown for two types of tests on the ground, one of the test field as Down Hole, and one laboratory test such as the One-Dimensional Consolidation. The values obtained are compared and also the reason why the Elasticity Modulus test calculated from the field is chosen expressed, to sign in a finite elements system.

Keywords: Elasticity Modulus, comparison, soft clays, DownHole, Consolidation

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá presenta un mosaico de suelos bastante amplio, a lo largo de su extensión se encuentran agrupaciones de formaciones geológicas y suelos con características entre sí muy diferentes. A

través de la historia, la ciudad se ha desarrollado rápidamente, generando un crecimiento hacia el norte y hacia el occidente, donde se encuentran suelos conformados por arcillas y limos blandos, de origen lacustre.

En este trabajo, se presentarán dos metodologías para la obtención del Módulo de Young, o también llamado módulo de deformación normal elástico (E), a partir de dos tipos de ensayos diferentes: un ensayo de campo especializado de propagación de ondas cortantes (ensayo DownHole), y un ensayo de laboratorio convencional y ampliamente empleado para el cálculo de asentamientos diferidos en el tiempo (ensayo de Consolidación edométrico Unidimensional).

La ciudad de Bogotá, está dividida en 17 zonas, distribuidas a lo largo y ancho de su área, como se establece en el Decreto 523 de 2010, Colombia. Gran parte de su extensión y varias de las zonas geotécnicas homogéneas están conformadas por arcillas blandas normalmente consolidadas de origen lacustre, de consistencia blanda a muy blanda, de muy baja resistencia y muy compresibles, con un espesor variable entre 20 y 500 m en profundidad (Daza y Estevez, 2014). Sobre este tipo de material fue determinado el módulo (E), como se describirá a continuación.

2. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DE UN SUELO ARCILLOSO BLANDO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C.

El módulo de Young, también llamado módulo de elasticidad (E), es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico sometido a esfuerzos normales. Al ser un parámetro fundamental para describir la rigidez de un suelo para cálculos de

asentamientos y modelaciones empleando elementos finitos, la selección de este parámetro debe ser cuidadosa. En este trabajo, se han analizado las propiedades geotécnicas de un perfil estratigráfico establecido para un proyecto que contemplaba la construcción de una gran edificación junto con tres sótanos en la zona occidental de Bogotá (Daza y Estevez, 2014). En esta zona, se localizan arcillas muy blandas de altísima compresibilidad (índices de compresión C_c variables entre 1.5 y 3.0), normalmente consolidadas, con altos contenidos de humedad (entre 150% y 280%), límites líquidos variables entre 60% y 300%, índices de plasticidad variables entre 50% y 150% y resistencias a la compresión simple menores a 30 kPa. En la figura 1, se presenta la localización de la zona de estudio. Un perfil que contenía una secuencia de limos y arcillas de los grupos CH y MH del sistema unificado de clasificación de suelos, fue empleado para la determinación del módulo E, empleando dos metodologías diferentes. En la tabla 1, se presenta una descripción simplificada del perfil del subsuelo estudiado.

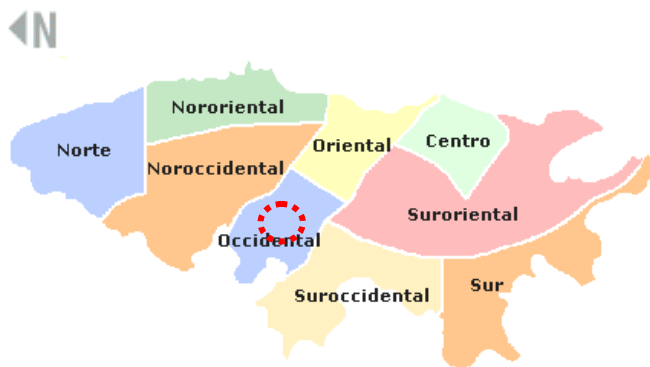


Figura 1: Localización de la zona de estudio en la Ciudad de Bogotá (Línea punteada)

Tabla 1: Descripción del perfil del subsuelo estudiado

Profundidad (m)	Descripción del material	UCSC
0.00 – 1.50	Limo orgánico de color café oscuro con presencia de raíces y arena	MH - CH
1.50 – 4.00	Limo arcilloso de color gris verdoso con presencia de raíces y óxido, de consistencia blanda	MH
4.00 – 50.00	Arcilla en matriz arenosa de color gris oliva, de grano fino	CH

2.1 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO (E) A PARTIR DEL ENSAYO DOWNHOLE

Empleando los registros de dos ensayos de propagación de onda DownHole, se determinó inicialmente el módulo cortante máximo G , y empleando expresiones de la teoría de la elasticidad, que se presentan en las ecuaciones 1 a 3 (Daza y Estevez, 2014). Se determinó el módulo E para una relación de poisson de 0.40.

- Cálculo de la densidad del suelo en cada profundidad

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

- Establecimiento del parámetro dinámico G_{max}

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

La correlación del parámetro G_{max} y el Módulo de Young se establece a continuación:

$$G_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \rightarrow E = G_{max}[2(1+\nu)] \quad [kPa] \quad \text{Ecuación 3}$$

A partir de la nube de datos de los ensayos DownHole, se calculó el valor de velocidad de onda cortante (V_s). En la figura 2, se observa la variación de los valores de las velocidades de onda de corte y onda de cuerpo (V_s y V_p). En la Tabla 2, se presentan los valores de los módulos G y E .

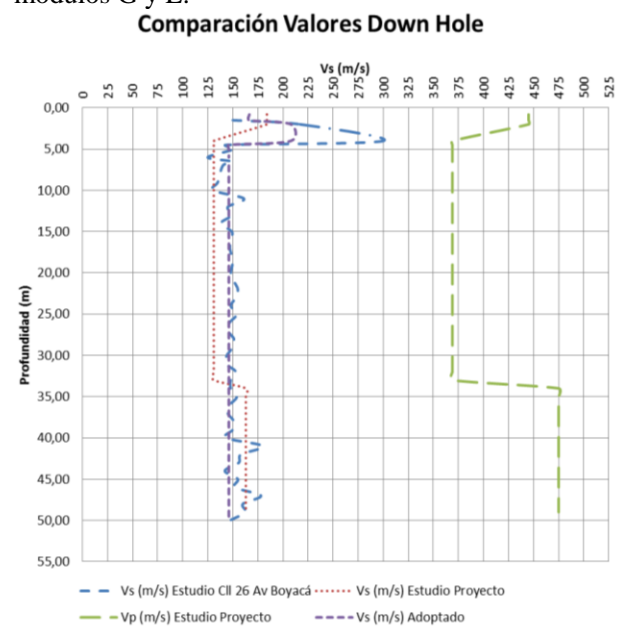


Figura 2: Gráfico de comparación del ensayo DownHole para el proyecto y fuente cercana

Tabla 2: Valores Vs adoptados por estrato y su cálculo

Estrato	Vs Adoptado	G (kPa)	E (kPa)
1	166,50	40474,69	113329,14
2	208,00	59704,62	167172,95
3	146,04	28376,44	79454,04

2.2 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO (E) A PARTIR DEL CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

A partir de la metodología planteada para obtener el módulo E a partir del ensayo de consolidación unidimensional, la cual consiste en analizar en los tres estados de carga del ensayo evidenciados en las tres ramas de la gráfica del ensayo (Rama virgen, Rama sobreconsolidada y Rama de descarga, vistas en la Figura 3), obteniendo un módulo de compresión con confinamiento (D), que responde a ser un módulo en condiciones de deformación lateral restringida, observando únicamente el estado de carga de la muestra. Se obtiene así la relación que se describe en la ecuación 4, de donde es obtenible el módulo de Young (Pineda, 2011).

Gráfica del Ensayo de Consolidación

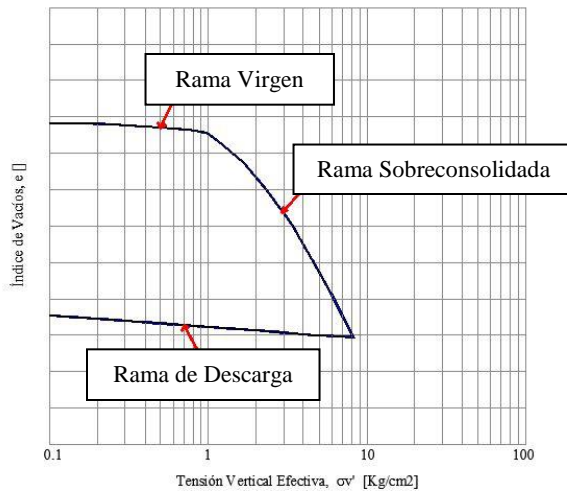


Figura 3: Gráfica del ensayo de Consolidación

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la tabla 3, se presentan los resultados obtenidos a partir de éste método.

Tabla 3: Resultados de Ensayos Consolidación del proyecto y lugares cercanos

Profundidad (m)	av	mv (cm2/Kg)	Cc	Cr	D (kPa)	E (kPa)
3.00 - 3.50	0,04	0,018	0,47	0,00	5080,86	237107,00
5.30 - 5.80	0,10	0,032	1,04	0,00	3029,02	141354,00
8.00 - 8.50	0,21	0,043	2,07	0,00	2126,75	99249,00
8.50 - 9.00	0,17	0,039	1,21	0,00	2191,50	102270,00
13.00 - 13.50	0,13	0,035	1,06	0,00	2578,10	120311,00
13.50 - 14.00	0,15	0,048	1,07	0,00	1849,08	8290,00
16.50 - 17.00	0,16	0,047	1,54	0,00	1997,31	93208,00
17.30 - 17.80	0,12	0,039	0,87	0,00	2200,79	102703,00
22.50 - 23.00	0,172	0,02	0,14	0,05	2206,06	102949,00
24.50 - 25.00	0,19	0,096	0,22	-0,10	997,53	62154,00

A partir de los resultados registrados en la Tabla 3, se puede decir que el ensayo de consolidación unidimensional permite el cálculo de valores menores del módulo (E), con relación a los estimados en el ensayo DownHole. Esto puede explicarse, ya que la muestra del ensayo de consolidación ha sido sometida a un proceso de carga y descarga controlado a deformaciones normales superiores al 1%, mientras que los módulos de deformación deducidos a partir del ensayo DownHole son mayores debido al nivel de deformaciones que impone este ensayo de naturaleza dinámica (en efecto, deformaciones normales unitarias entre 0.001% y 0.1%). Este ensayo, realizado in-situ, se realiza a volumen constante del suelo, evitando las perturbaciones del muestreo asociadas al primer método presentado (Pineda, 2011).

3. CONCLUSIONES

Se conoce que la relación esfuerzo – deformación de los suelos es altamente no-lineal, y depende del estado de esfuerzos, la historia de consolidación del material y el nivel de deformaciones, entre otros aspectos. El método más tradicional para la obtención del Módulo de elasticidad (E), para aplicaciones prácticas de diseño, es la consolidación unidimensional. Este valor, sin embargo, corresponde a una situación en la cual se han producido ya deformaciones considerables del esqueleto mineral (superiores al 1%). Este módulo bien podría emplearse para el análisis de asentamientos durante la construcción, o para calcular expansiones luego de una excavación en la arcilla de Bogotá (Pineda, 2011).

El ensayo de DownHole genera un Módulo de Elasticidad más alto por estrato, ya que analiza el suelo sin ninguna intervención, a un nivel de deformación muy inferior al desarrollado en la consolidación unidimensional. Esta situación (la del ensayo

DownHole) es ideal para estimar el módulo de elasticidad E a muy bajas deformaciones, el cual puede ser empleado sin inconvenientes para realizar modelaciones en elementos finitos que incluyan modelos constitutivos elásticos con degradación de la rigidez.

REFERENCIAS

- Daza R., Estevez R., (2014). “Análisis comparativo de desplazamientos horizontales de muros pantalla para la Excavación de un proyecto ubicado en la zona Lacustre A de Bogotá, D.C.” *Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Santo Tomás Colombia.*
- Pineda Jaimes, J.A. (2011). “Influence of weathering on small-strain stiffness and stress-strain behavior of residual soils derivated from a granodiorite” *Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.*