

## Determinación de la Rigidez Inicial en suelos loessicos de la provincia de Santiago del Estero.

Ricardo Schiava<sup>1</sup> & Gonzalo Zarazaga<sup>2</sup>

(1) *Departamento de Obras Viales, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*

[schiava@unse.edu.ar](mailto:schiava@unse.edu.ar)

(2) *Estudiante Ingeniería Civil. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*

[gon\\_zarazaga@hotmail.com](mailto:gon_zarazaga@hotmail.com)

RESUMEN: Durante décadas, los investigadores de todo el mundo han estudiado el fenómeno de colapsabilidad de los suelos loessicos, es decir, la pérdida de capacidad de carga producto de un incremento en la humedad natural y/o un aumento en la tensión actuante. Para poder estudiar el comportamiento tenso deformacional de estos suelos y poder realizar modelos matemáticos y computacionales que sean capaces de predecir, con cierto grado de precisión, las variaciones volumétricas producto de cualquier alteración en las condiciones existentes, se realizan ensayos edométricos o de compresión confinada y triaxiales para diferentes escalones de carga. Los parámetros tradicionales obtenidos como cohesión, ángulo de fricción interna, módulo edométrico y modulo tangente, no son suficientes para poder realizar modelos computacionales que contemplen no solo el comportamiento del suelo ante el colapso ( $\epsilon > 10^{-3}$ ), sino también el comportamiento para pequeñas deformaciones ( $\epsilon = 10^{-6}$ ). El análisis de una importante base de datos de ensayos Triaxiales de suelos loessicos de Santiago del Estero, nos permiten encontrar el Modulo de Young para pequeñas deformaciones o en otras palabras el Modulo de Rigidez Inicial.

### INTRODUCCION

La provincia de Santiago del Estero se encuentra emplazada dentro de una formación geológica llamada chacoparanense, constituida en su mayoría por suelos de origen eólico denominados loess, a excepción de las sierras de Guasayan, Sumampa y Ambargasta que están ubicados sobre una formación rocosa particular.

Los suelos pertenecientes a la formación Chacoparanense, como el resto de los loess de la República Argentina, son aparentemente firmes, estables al corte y presentan una alta resistencia si se los ensaya a humedad natural. Esto ha llevado a los ingenieros constructores a fundar sus estructuras directamente sobre ellos. Al cambiar las condiciones de drenaje natural de la zona de emplazamiento de la obra, ya sea por el destape de la superficie, por la filtración de cañerías mal ejecutadas, etc, cambian también las condiciones de humedad natural de los loess, provocando una disminución abrupta de su volumen sin un aumento necesario de las cargas que gravitan sobre ellos o dicho de otra manera, el colapso del suelo y los daños consiguientes en las estructuras

que no son capaces de soportar estos asentamientos diferenciales en el mejor de los casos.

La mayoría de las obras son diseñadas en base a modelos numéricos que frecuentemente emplean parámetros de rigidez y resistencia del suelo tales como: cohesión, fricción, colapso relativo según Schiava & Zarazaga (2012), modulo tangente, etc. Algunos de estos parámetros actualmente son calibrados en base a bibliografía referente a suelos de otros países y al comportamiento de obras ya construidas. Dichos parámetros son muy diferentes a los obtenidos en ensayos de campo o de laboratorio realizados sobre suelos de la región. La incertidumbre en su determinación lleva al aumento en los coeficientes de seguridad y por consiguiente un aumento en el costo de la obra. Las desviaciones más marcadas las presenta el módulo de rigidez inicial ( $E_0$ ). Es necesario conocer en profundidad dicho parámetro puesto que la mayoría de los problemas de deformaciones de la geotecnia se desarrollan para estados de tensiones cercanos a  $K_0$  y de deformaciones en el rango de  $E_0$  como lo demuestra Burland (1989).

Por otro lado se ha comprobado que para sucesivos ciclos de carga y descarga en el ensayo de compresión triaxial, la secante a los lazos de histéresis mantiene la misma pendiente que  $E_0$  por lo que este módulo puede ser utilizado para el cálculo de cimentaciones sometidas a cargas dinámicas, tales como las generadas por máquinas vibratorias.

Actualmente existen metodologías para determinar de forma directa e indirecta (mediante correlaciones) el módulo de rigidez inicial ( $E_0$ ). De entre estos métodos podemos mencionar los siguientes: medición de las ondas de corte  $V_S$  (Tatsuoka & Shibuya (1992); Jardine, et al., (1991)), ensayo de plato de carga (PLT), dinamómetros (DMT) y ensayos de penetración. A pesar de la amplia gama de metodologías para la determinación de este parámetro, diversos investigadores han llegado a la conclusión que el módulo de Young así obtenido resulta inferior en magnitud al determinado en base a los ensayos triaxiales.

El estudio comprende la determinación del módulo de rigidez inicial de suelos loessicos propios de la planicie santiagueña, cuya tipología puede consultarse en el trabajo de Schiava et al. (2010) El análisis se basa en los resultados de ensayos triaxiales realizados sobre muestras inalteradas talladas en condición de humedad natural.

#### DESCRIPCION DEL ENSAYO TRIAXIAL.

La finalidad del ensayo triaxial es, por un lado, conocer la relación tensión-deformación, y por el otro, encontrar los parámetros que nos permitan determinar ciertas características de los suelos. Es un ensayo complejo, pero la información que entrega es la más representativa.

Consiste en colocar una muestra de suelo inalterada dentro de una membrana de goma que se introduce en una cámara especial preparada para proporcionarle una presión determinada, igual en todas las direcciones (presión de cámara). Alcanzando un estado de equilibrio se aumenta la presión normal o axial  $\sigma_1$ , sin modificar las presiones laterales aplicadas  $\sigma_3$ , hasta que se produzca la rotura.

Este ensayo se repite por lo menos para tres presiones de cámara diferentes. Esto se puede lograr de dos maneras: ensayando tres testigos, llevando a la rotura a cada uno de ellos para una determinada presión de cámara, o escalonando las presiones de confinamiento en una misma muestra.

Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en las que se trabajará, las alternativas para realizar el ensayo serán: consolidado no drenado

(CU), no consolidado no drenado (UU) o consolidado drenado (CD).

Para la confección del presente trabajo se realizaron ensayos triaxiales escalonados del tipo no consolidado no drenado (UU). Las presiones de cámara elegidas fueron 1, 2 y 3  $\text{kg/cm}^2$ . (Figura 1)

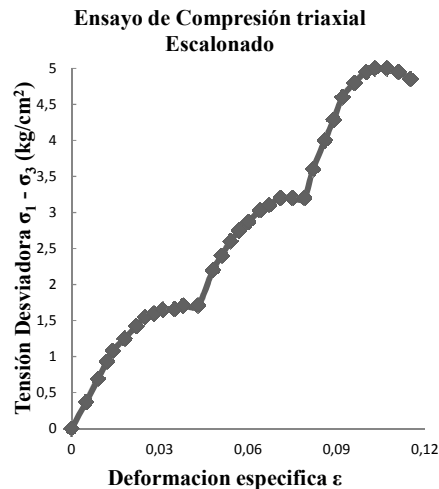


Figura 1 - Curva tensión desviadora vs deformaciones específicas del ensayo triaxial.

#### PREPARACION DE LA MUESTRA.

Las probetas se moldean a partir de muestras inalteradas de suelo extraídos directamente del lugar en cuestión a la profundidad del estrato en estudio. La correcta extracción y la conservación de la humedad natural son de fundamental importancia para que los parámetros de allí determinados sean representativos del suelo.

Para prevenir la aparición de fisuras que modificaran el comportamiento tenso deformacional, la técnica del moldeo es crucial y debe hacerse con sumo cuidado. Las dimensiones utilizadas normalmente en ensayos triaxiales son de 35 mm de diámetro por 70 mm de largo.

#### DETERMINACION DE LA RIGIDEZ INICIAL, MODELO HIPERVOLICO.

Es bien sabido que en un ensayo de compresión triaxial, el gráfico tensión desviadora – deformación, dibuja líneas curvas que van aumentando progresivamente a medida que lo hace la deformación hasta que finalmente alcanzan un máximo en donde comienza a disminuir. (Figura 2)

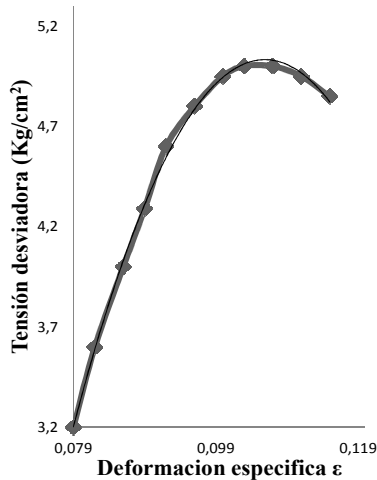


Figura 2 - Curva tensión – deformación, obtenida del ensayo de compresión triaxial.

Duncan y Chang (1970) continuaron el trabajo de Kondner (1963) y propusieron que tales curvas podrían ser asimiladas a hipérbolas con la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon}{a + b \cdot \epsilon} \quad (1)$$

Donde los parámetros a y b se tienen que determinar para cada muestra de suelo. Eso se consigue despejando los parámetros de la ecuación (1) como sigue:

$$\frac{\epsilon}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b \cdot \epsilon \quad (2)$$

Como la tensión desviadora y la deformación específica son conocidas, a y b se obtienen como la ordenada al origen y la pendiente respectivamente de la recta definida por la ecuación (2) (Figura 3).

Volviendo a la (2), el parámetro (a) es el límite para la condición  $\epsilon = 0$ , es decir, la pendiente de la tangente en el origen, por lo que su inversa proporcionará el valor del módulo inicial:

$$E_0 = \frac{1}{a} \quad (3)$$

Por su parte, b es el límite cuando  $\epsilon = \infty$ , o sea, la ordenada de la asíntota a la hipérbola, que físicamente se interpreta como la resistencia máxima teórica a rotura ( $\sigma_a$ ) de la probeta ensayada.

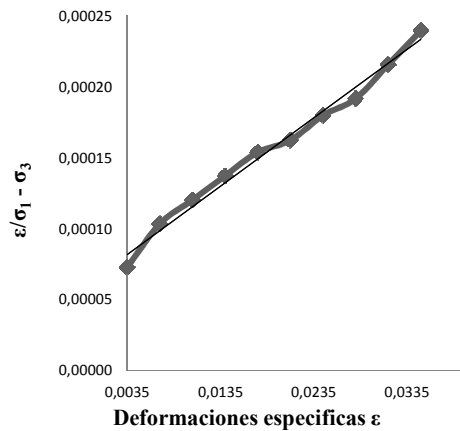


Figura 3 - Recta obtenida de la ecuación (2).

Realizados estos cálculos para cada valor de presión de cámara sobre todas las probetas ensayadas se obtiene el siguiente gráfico (Fig. 4)

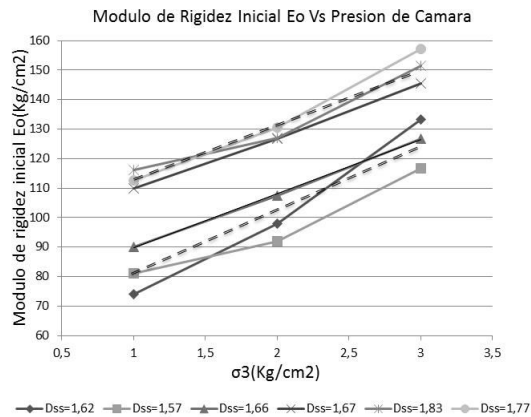


Figura 4 – Modulo de rigidez inicial vs tensión de cámara para las muestras ensayadas.

Como era de esperar, el valor de  $E_0$  depende de  $\sigma_3$ , aumentando con el incremento de la presión de confinamiento. Otra observación realizada fue que los valores de  $E_0$ , no solo varían con la presión de confinamiento sino que también lo hacen en función de la densidad seca inicial (Dss) (Figuras 5-6). Esto se debe a que un mayor volumen de vacíos posibilita una mayor deformación inicial en el momento de la carga. Por lo tanto, en vista de la dispersión de los valores obtenidos, se considera necesario, para proponer una mejor expresión de correlación entre  $E_0$  y la presión de confinamiento, tener en cuenta la densidad seca de la muestra Dss. Se propone entonces, para disminuir la dispersión,

separar los datos en dos grupos limitados por un valor límite  $D_{ss} = 1,66 \text{ gr/cm}^3$ .

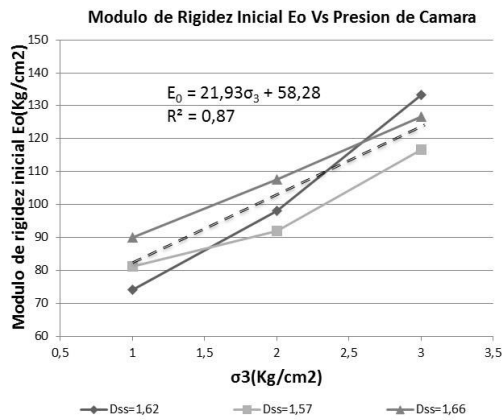


Figura 5 – Módulo de rigidez inicial vs tensión de cámara para muestras con  $D_{ss} \leq 1,66 \text{ gr/cm}^3$

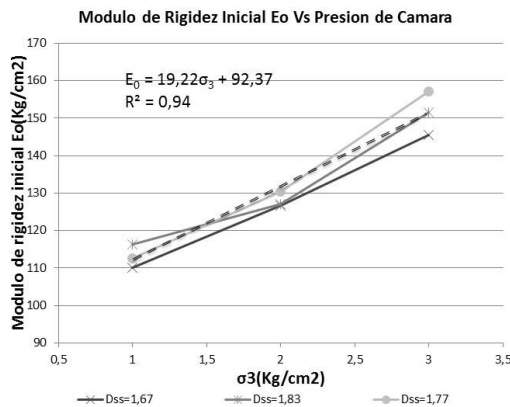


Figura 6 – Módulo de rigidez inicial vs tensión de cámara para muestras con  $D_{ss} > 1,66 \text{ gr/cm}^3$ .

Realizando una regresión lineal a través del método de los mínimos cuadrados para cada uno de los gráficos obtenidos, resultan las siguientes expresiones:

Para  $D_{ss} \leq 1,66 \text{ gr/cm}^3$

$$E_0 (\text{kg} / \text{cm}^2) = 21,93\sigma_3 (\text{kg} / \text{cm}^2) + 58,28 \quad (5)$$

Para  $D_{ss} > 1,66 \text{ gr/cm}^3$

$$E_0 (\text{kg} / \text{cm}^2) = 19,22\sigma_3 (\text{kg} / \text{cm}^2) + 92,37 \quad (6)$$

## CONCLUSIONES

Así como en el modelo hiperbólico de Duncan y Chang (1970) se determinó que los suelos presentan curvas tensión-deformación que varían

en función del confinamiento, un incremento del confinamiento resulta en una curva con una pendiente inicial más pronunciada y una mayor tensión de falla, y por lo tanto implica un aumento en los valores de  $E_0$ . Como resultado de esta investigación y con el apoyo de la información obtenida de los ensayos triaxiales se propone una correlación de variación del módulo de rigidez inicial ( $E_0$ ) con la tensión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) para estos tipos de suelos.

Se determinó que la densidad seca del suelo tiene una marcada influencia en su comportamiento frente a la compresión. Al aumentar el valor de  $D_{ss}$ , disminuye el volumen de vacíos y por consiguiente aumenta la rigidez inicial a compresión.

La correlación propuesta es útil para modelar el comportamiento tenso – deformacional de los suelos loessicos de nuestra región con mayor precisión y por lo tanto, prescindir de los valores obtenidos por otros investigadores e indicados en publicaciones internacionales.

## REFERENCIAS:

- Duncan, J. M. y Chang, C. Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 96, NO. SM5, pp.1629-1653., 1970
- Burland J. On the generalized stress strain behavior of wet Clay. *Geotechnique* 18(4):535-608.1968
- Kohan P.H., Prato C., F. Pinto. Determinación de las curvas tensión deformación para pilotes excavados mediante modelo constitutivo hiperbólico. *Mechanical Computational, Volume XXXI. Number 13. Structural Dynamics*. 2008
- Konder R. Hiperbolic stress-strain response, cohesive soil. *ASCE J Soil Mech Found Div* 78(SM1):115-143. 1963
- Schiava R. & G. Zarazaga. Determinación del Colapso Relativo en Suelos Loessicos de la Provincia de Santiago del Estero. *VIII Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades del NOA* 2012. ISSN 1853-7871,2012