

Medición del coeficiente de presión de tierras en reposo “*K_o*”, por medio del consolidómetro de Rowe modificado

Fernando Alberto Nieto Castañeda*

RESUMEN

En la presente investigación se obtuvo el coeficiente de presión de tierras en reposo “*K_o*” de un suelo artificial compuesto por arena y arcilla; para encontrar dicho coeficiente se realizó una adaptación del anillo de consolidación de Rowe. El resultado se comparó con los coeficientes obtenidos con la famosa ecuación de Jaky (1948).

Palabras clave: coeficiente de presión de tierras en reposo, esfuerzos efectivos, consolidómetro de Rowe.

MEASUREMENT OF COEFFICIENT OF EARTH PRESSURE AT REST “*K_o*” USING THE MODIFIED ROWE’S CONSOLIDATION RING

ABSTRACT

In this research work, coefficient of Earth Pressure at Rest *K_o* of an artificial soil composed by sand and clay was directly measured with a modified adaptation of Rowe’s consolidation ring. These results were compared with the coefficients found with the well-known Jaky’s equation (1948).

Key words: Coefficient of Earth Pressure at Rest, Effective Stress, Rowe’s Consolidation ring.

* Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, Maestría en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Ingeniería Sísmica del *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, Tsukuba-Japón, Profesor investigador de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: fnieto@lasalle.edu.co

Fecha de envío: 1 de marzo de 2007

Fecha de aceptación: 9 de abril de 2007

INTRODUCCIÓN

La presente investigación compara los resultados del coeficiente de presión lateral de tierras en reposo encontrado en laboratorio contra los resultados obtenidos con la fórmula de Jaky (1948).

El comportamiento mecánico del suelo está marcadamente influenciado por el estado de esfuerzos, la trayectoria de esfuerzos y la historia de consolidación. Esto se pone de manifiesto en las propiedades mecánicas del material o, dicho en otras palabras, del modelo constitutivo del suelo.

Por lo tanto, el ingeniero geotecnista debe prever las trayectorias de esfuerzos que seguirán determinados puntos del suelo cuando se sometan a las acciones naturales y a las solicitaciones impuestas por las obras de ingeniería, con el fin de garantizar un proceso de diseño de óptima calidad. En muchas circunstancias, la determinación de esas trayectorias requiere del conocimiento de la condición de reposo o geostática y, concretamente, del coeficiente de presión de tierras en reposo.

La compresibilidad del suelo, básica en el comportamiento esfuerzo deformación del suelo, depende del nivel de esfuerzo efectivo, de la trayectoria de esfuerzos a que se somete el suelo y de la historia de consolidación del suelo.

MARCO TEÓRICO

La historia de consolidación se evalúa, normalmente, con la relación conocida como *Relación de Sobre Consolidación vertical (RSC_v)*, la cual depende de la dirección considerada. Por supuesto que la RSC_v tiene una influencia definitiva sobre el **K_o**, tanto que muchas de las relaciones empíricas para hallar dicho coeficiente están dadas en función de la RSC_v.

La relación de esfuerzos efectivos iniciales es requerida para cualquier análisis de comportamiento mecánico del suelo, en cuanto que constituye el punto de arranque de cualquier trayectoria de esfuerzos. Su evaluación resulta ineludible para poder determinar los máximos incrementos de carga antes de que se produzca la falla y para calcular las deformaciones y desplazamientos del suelo producidos por las cargas impuestas.

Un caso particular de esa condición inicial de esfuerzos es el que se presenta cuando el suelo se ha formado en un proceso unidimensional de deformaciones, también conocido como geostático.

Si se aplicara la teoría elástica a ese caso, se establecería que las deformaciones laterales son iguales y nulas gracias a la condición de compatibilidad de deformaciones, esto es:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y \text{ y } \varepsilon_x = 0 \quad (1)$$

De escribir las deformaciones en términos de los esfuerzos efectivos y de los módulos elásticos se llega a las ecuaciones 2 y 3.

$$\Delta\sigma'_x = \Delta\sigma'_y \quad (2)$$

$$\Delta\sigma'_y = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \Delta\sigma'_z \quad (3)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson.

En mecánica de suelos la relación $\left(\frac{\nu}{1-\nu} \right)$ obtenida a partir de la teoría de elasticidad se asocia con el coeficiente lateral de presión de tierras en reposo **K_o**.

Lo anterior es válido para materiales puramente elásticos, homogéneos e isotrópicos, que no es el caso de los suelos. Aun, si en una primera carga se pudiera aplicar esa teoría, en descarga conduciría a graves

errores pues el esfuerzo horizontal tendería a conservarse ante un decremento radical del vertical y la relación de esfuerzos varía sustancialmente.

Los métodos que se usan para hallar el K_o son empíricos que correlacionan otros parámetros del suelo con este, o métodos *in situ* de gran costo y complicados en su desarrollo, o métodos de laboratorio que implican equipos especiales.

A continuación se presentan algunos de los métodos empíricos para hallar el K_o .

Jaky (1948), la cual es una correlación empírica de segundo orden, debido a que:

$$K_o = \left(\frac{1 - \text{sen}\phi'}{1 + \text{sen}\phi'} \right) \left(1 + \frac{2}{3} \text{sen}\phi' \right) \quad (4)$$

Donde: ϕ' es el ángulo de fricción interna del material.

La simplificación de la ecuación de Jaky es ampliamente trabajada, la cual se usa principalmente para suelos gruesos es:

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi' \quad (5)$$

Para arcillas normalmente consolidadas Brooker e Ireland (1965) sugieren:

$$K_o = 0,95 - \text{sen}\phi' \quad (6)$$

Para suelos sobreconsolidados se propone la siguiente ecuación:

$$K_{oSC} = K_{onc} RSC_v^N \quad (7)$$

Donde: K_{oSC} Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo para suelo sobre consolidado.

K_{onc} Coeficiente de presión lateral de tierras en reposo para suelo normalmente consolidado.

$$RSC_v = \frac{P'_c}{P'_o} \quad (8)$$

Donde: P'_c Esfuerzo de preconsolidación.

P'_o Esfuerzo efectivo inicial.

N Coeficiente que depende del suelo y de la naturaleza de la ecuación formulada por los autores.

Cuando se trabaja en terreno inclinado Kezdi (1972) sugirió usar la ecuación de Jaky de la siguiente forma:

$$K_o = \left(\frac{1 - \text{sen}\beta}{1 + \text{sen}\beta} \right) \quad (9)$$

Donde: β es el ángulo del terreno con respecto a la horizontal.

Otros métodos que existen para hallar K_o en el terreno son los de ensayos *in situ* como son el presurómetro de Menard (1956), la celda Glotz (Massarsch (1975)) y el dilatómetro plano de Marchetti (1980).

ENSAYOS DE LABORATORIO

En la presente investigación se trabajó un único tipo de suelo, el cual es artificial con una mezcla de arena y caolín, en un porcentaje de 70% a 30% respectivamente, buscando un material con una permeabilidad intermedia, que permita que haya tiempo de consolidación, pero con unos tiempos de falla para ensayos no drenados que no sean altos.

El suelo fue reconstituido en el laboratorio con un peso unitario del orden de 17kN/m³, de manera que el comportamiento del suelo sea de endurecimiento por deformación y se adaptara a los modelos que se trabajaron en el proyecto.

Se buscó una arena media uniforme, tanto en granulometría como en mineralogía, trabajando una arena tipo Sika y un caolín industrial marca Uno, en la Tabla 1 se presenta un resumen.

TABLA 1. RESULTADOS DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Ensayo	Arena	Caolín
Límite Plástico		40.5%
Límite Líquido		25.4%
Índice de Plasticidad		15.1%
Línea A		15.0%
Cu	1.33	
Cg	1.07	
Peso específico de sólidos	2.70	2.64
Clasificación USC	SP	CL

Fuente: autor

La arena trabajada es de grano medio, uniforme, la mayor porción del suelo es retenida por el tamiz No 30, de diámetro nominal de 0.6 mm y tamaño máximo de 2,0 mm., y el caolín es una arcilla de baja plasticidad y de bajo potencial de expansión.

Con el fin de encontrar los parámetros de resistencia, se realizaron cuatro puntos de ensayos triaxiales drenados. Para los ensayos del triaxial las muestras se conformaron en un molde de 5 cm de diámetro y 9 cm de altura, compactándolos en la máquina Versatester, en tres capas cada una de 3 cm de altura, buscando que cada capa quedara con la misma compactación. El peso de cada una de las capas fue de 100 gr, para un total de 300 gr. El peso unitario promedio es de 17.2kN/m³, con una humedad de 14.3% y un peso unitario seco de 15.1kN/m³.

Para medir el esfuerzo lateral se adaptó un anillo al consolidómetro de Rowe, la muestra se compactó con un pistón manual directamente en el anillo, buscando la misma compactación con la que se realizaron las muestras en el triaxial.

ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

A las muestras armadas en laboratorio se le realizaron ensayos de compresión triaxial en condición consolidada drenada con el fin de calcular los diferentes parámetros de resistencia.

Los ensayos de compresión triaxial se realizaron con un esfuerzo horizontal de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa y 200 kPa. A los diferentes ensayos se les midió el parámetro B, el cual arrojó en todos muy cercano a 1, lo que indica que la muestra estaba saturada.

Los suelos normalmente consolidados no tienen un ángulo de fricción interna constante con el esfuerzo de confinamiento, sino que este va disminuyendo con el aumento de dicho confinamiento.

El suelo trabajado no posee cohesión y el ángulo de fricción interna del material disminuye con el esfuerzo efectivo de confinamiento, por lo tanto, la envolvente de resistencia no es una recta. Para evaluar matemáticamente el ángulo de fricción secante en función del esfuerzo efectivo de confinamiento se utilizó la Ecuación 10.

$$\phi' = \phi'_o - \Delta\phi \times \log \left[\frac{\sigma'_3}{Pa} \right] \quad (10)$$

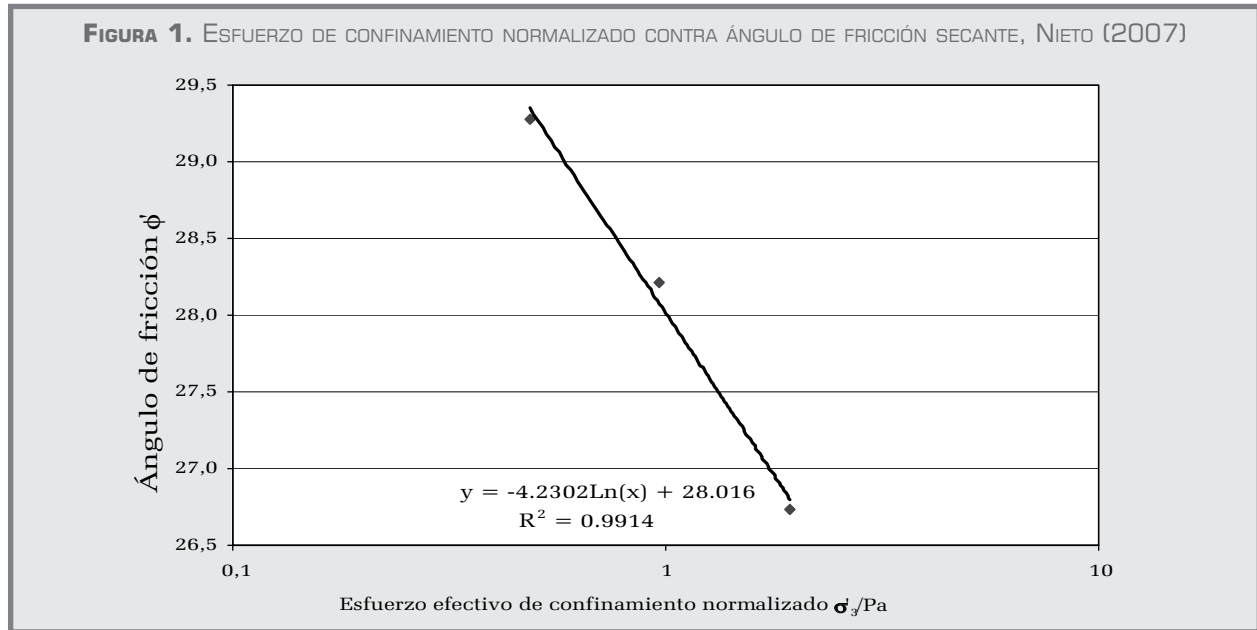
Donde: ϕ'_o : Ángulo de fricción para la presión de referencia, que se tomó la presión atmosférica.
 $\Delta\phi$: Es un parámetro de disminución de ϕ' con el esfuerzo de confinamiento.

Para encontrar los parámetros de la Ecuación 10 se encontraron los valores del ángulo de fricción secante para cada uno de los esfuerzos de confinamiento, los valores encontrados se muestran en la Tabla 2, los cuales fueron hallados con el mayor ángulo que presente la relación del esfuerzo cortante y el esfuerzo normal en los círculos de Mohr.

TABLA 2. VALORES DE ϕ' PARA CADA UNO DE LOS ESFUERZOS DE CONFINAMIENTO

σ'_3	ϕ'
50	29.3
100	28.2
200	26.7

Fuente: autor.



El valor de ϕ'_o es el valor de ϕ' cuando el logaritmo del esfuerzo de confinamiento normalizado vale 1 y $\Delta\phi$ es el valor de la pendiente de la línea resultante, los resultados de estos parámetros se encuentran en la Tabla 3.

TABLA 3. PARÁMETROS PARA HALLAR ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA

ϕ'_o	28.02
$\Delta\phi$	-4.23

ENSAYO EN EL CONSOLIDÓMETRO DE ROWE

Para los ensayos de presión lateral se usó el consolidómetro de Rowe el cual presenta medición de las presiones de poros en el fondo de la muestra, medición de cambios volumétricos con equipo de contrapresión y deformaciones unidimensionales verticales.

El anillo del consolidómetro de Rowe original, fue adaptado para poder medir los esfuerzos laterales, para esto se le colocaron dos pistones laterales de un centímetro de diámetro, a los cuales se le adapta una

tubería de cobre con aceite hidráulico y un deformímetro lateral (Nieto, 2007).

El diámetro de los pistones se escogió de manera que tuviera un área suficiente, para que la lectura de esfuerzo sea representativa con relación a la muestra y, que a su vez, no sea tan grande y así dicha lectura sea adecuada.

La tubería de cobre se conectó a la ye de mercurio del triaxial, lo que permite colocar una presión al pistón. Cuando el pistón trata de moverse se le aplica carga al pistón para impedir su movimiento. El esfuerzo lateral medido es la suma de la lectura de la presión necesaria para mantener el pistón en su lugar más la fricción entre el pistón y su camisa.

En las figuras 2 a 6 se muestra el consolidómetro de Rowe y el anillo con las adaptaciones realizadas para poder medir las cargas laterales. Para que las lecturas de los esfuerzos laterales del anillo sean más cercanas a la realidad se calibró la lectura del anillo con agua. Las lecturas encontradas para la presión de poros del agua y las lecturas de presión lateral del anillo dieron una diferencia de 40kPa, en promedio,

que es una resultante de la fricción entre el pistón y su camisa.

En la Figura 7 se muestra el corte del pistón y de uno de las paredes del anillo modificado de Rowe. Para evitar cambios en los esfuerzos laterales, el diseño y manejo del anillo modificado de Rowe busca que las deformaciones de la muestra sean mínimas. La lectura del esfuerzo lateral está dada por un esfuerzo inducido y medido por el equipo de presión del aparato triaxial, el cual es medido en el instante en que el pistón intenta moverse.

El pistón tiene movimiento cuando la presión interna de la muestra supera la presión aplicada al pistón más la fuerza de fricción entre el pistón y su camisa.

Para obtener la lectura de carga lateral se realizó el siguiente procedimiento:

1. Aplicar una presión al pistón, por medio del equipo de presión del aparato triaxial, mayor a la esperada para que el pistón tenga movimiento, dentro del rango de la fricción del pistón 40 kPa.
2. Asegurarse que el deformímetro del pistón esté en cero.
3. Disminuir lentamente la presión dentro del pistón.
4. Observar el punto donde el deformímetro tenga movimiento y anotar la presión del pistón.
5. Aumentar la presión del pistón.
6. Colocar manualmente el pistón en la lectura de deformación inicial.

Los datos tomados durante cada ensayo de presión lateral son; el tiempo, la presión de poros en el fondo de la muestra, la deformación axial, el cambio volumétrico y la lectura de presión de poros lateral.

Debido a la alta permeabilidad de la muestra, la consolidación se produce rápidamente, lo cual impide realizar varios ensayos con una sola carga. Para poder tener varias lecturas de esfuerzos laterales por cada uno de los esfuerzos de confinamiento, el ensayo se realizó cerrando la válvula de salida de agua de la muestra, se tomaron los datos y se permitió de nuevo la salida del agua, repitiendo el ciclo para otro tiempo.

Para saturar la muestra se trabajó con presión de confinamiento y contrapresión de 80 kPa, se realizó la medida del parámetro B dando 0.99, después de saturar la muestra se procedió a realizar el ensayo, en un tiempo de 24 horas aproximadamente.

Los ensayos se realizaron con presiones de confinamiento de 100, 150, 200, 250 y 300 kPa.

Como la presión de la muestra es tomada en la parte inferior y la lectura de presión de poros lateral se asume en la mitad del pistón, se realizaron los siguientes procedimientos para su cálculo:

1. Se halló el $\frac{U}{U_o}$ para tres tiempos diferentes en cada incremento de presión de poros.

Donde: U Presión de poros.
 U_o Presión de poros inicial.

2. Según Hernández (2001), utilizando las series de Fourier, por medio de la ecuación 11 se puede encontrar el factor tiempo para cada uno de los tiempos:

$$\frac{u}{u_0} = \sum_{n=0}^{\infty} 2 \cos(MZ) e^{-M^2 T} \quad (11)$$

Donde: $Z = \frac{z}{H}$ Factor profundidad.

$T = \frac{Cv \cdot t}{H^2}$ Factor tiempo.

H Altura de drenaje.
 C_v Coeficiente de consolidación.

$$M = \frac{(2n+1)\pi}{2}$$

Como el consolidómetro de Rowe tiene drenaje superior la altura de drenaje es la misma altura de la muestra 3.152 cm y, por lo tanto, el factor profundidad en el sitio de medida de presión de poros se toma un factor profundidad $Z=1$.

Las gráficas resultantes del uso de la serie de Fourier se presentan en la Figura 8.

FIGURA 2. VISTA GENERAL DEL CONSOLIDÓMETRO DE ROWE

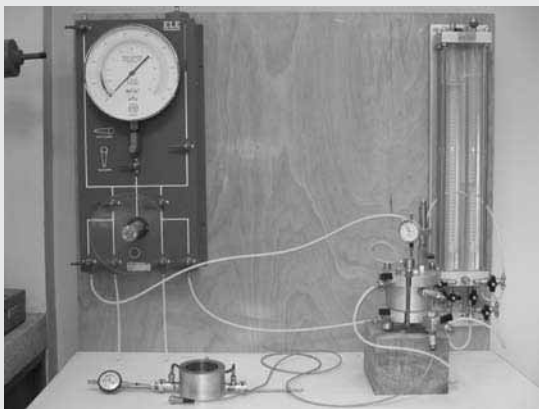


FIGURA 3. CONSOLIDÓMETRO DE ROWE CON ANILLO MODIFICADO

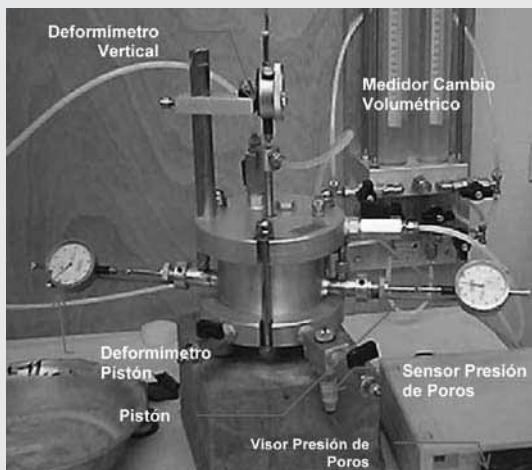


FIGURA 4. CONSOLIDÓMETRO ROWE CON ANILLO MODIFICADO: DETALLE ANILLO

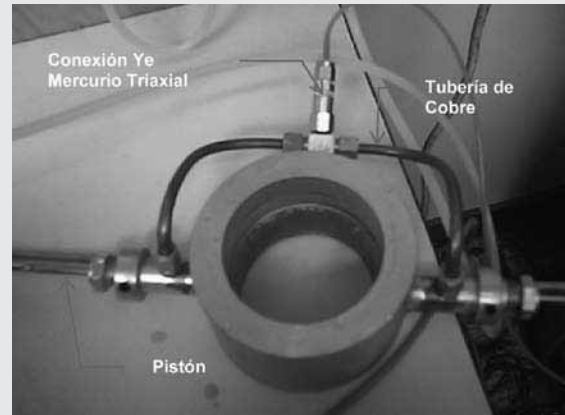


FIGURA 5. CONSOLIDÓMETRO ROWE CON ANILLO MODIFICADO: PISTÓN



FIGURA 6. CONSOLIDÓMETRO ROWE CON ANILLO MODIFICADO: PISTÓN Y DEFORMÍMETRO



FIGURA 7. ESQUEMA ADAPTACIÓN ANILLO CONSOLIDÓMETRO DE ROWE

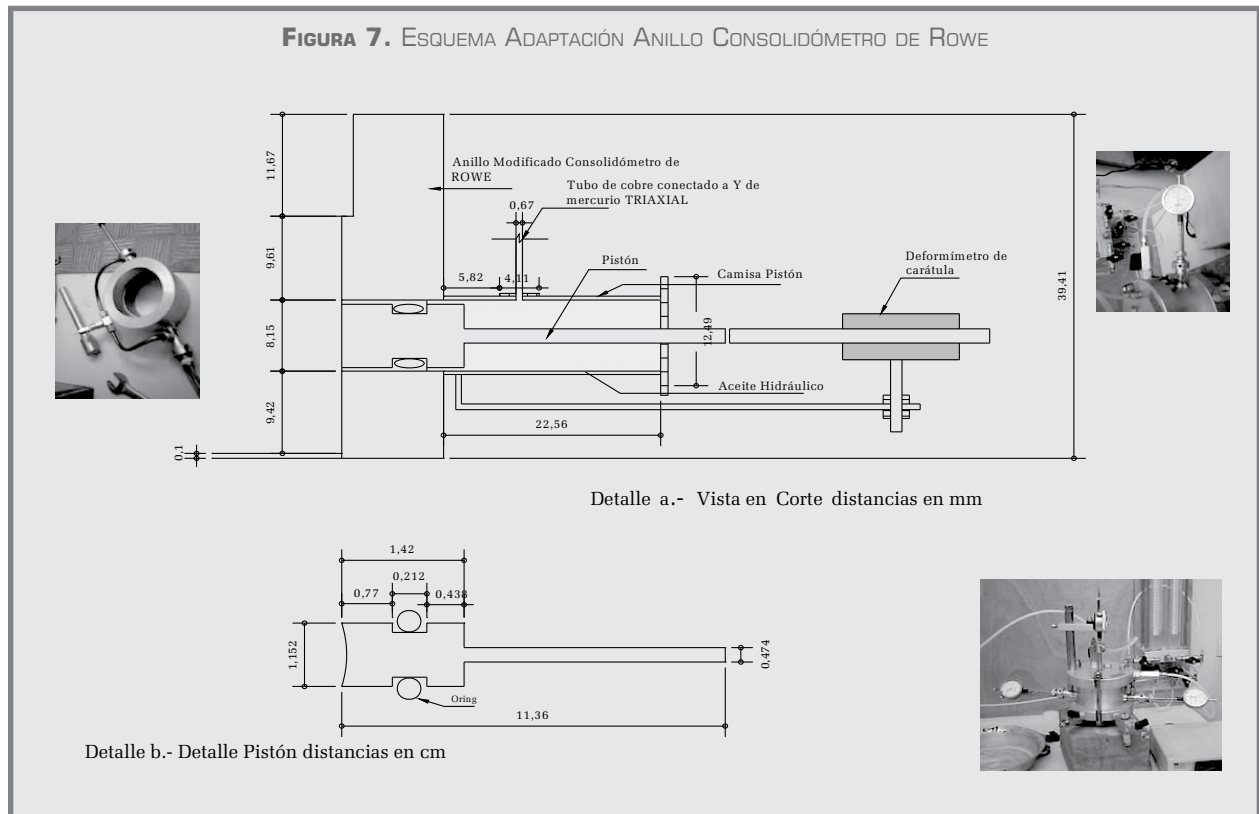
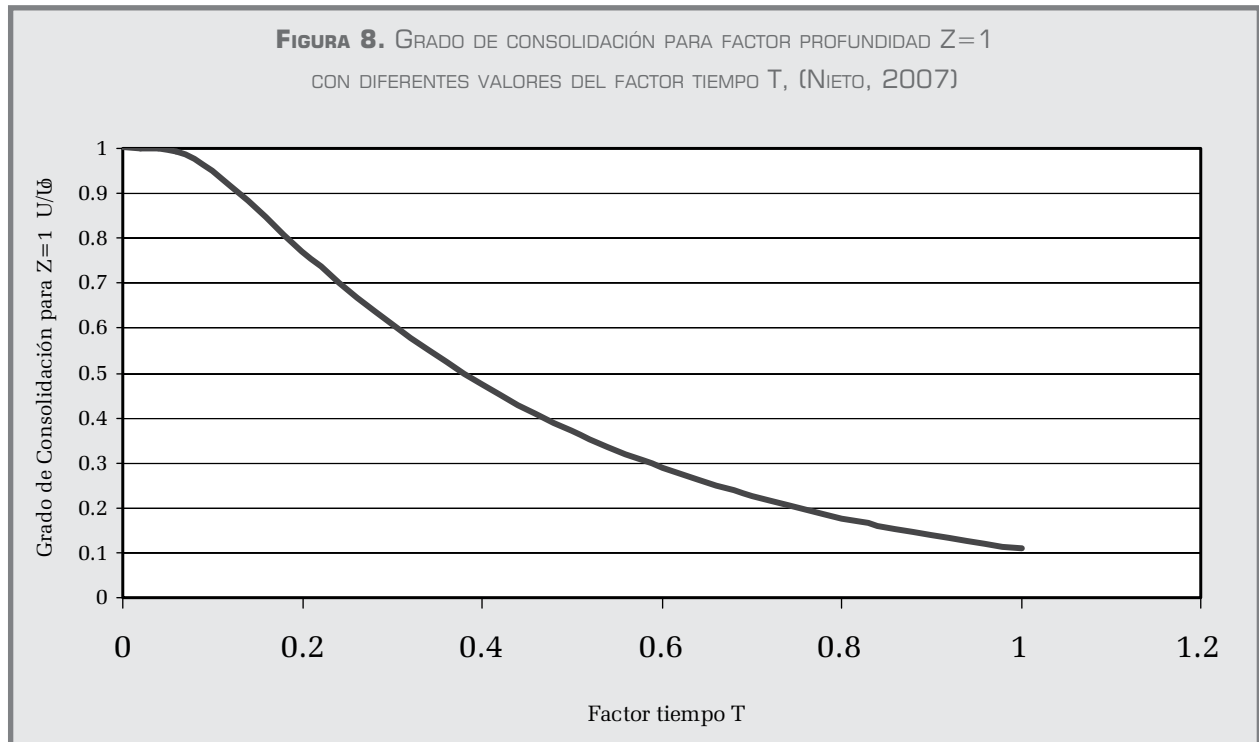


FIGURA 8. GRADO DE CONSOLIDACIÓN PARA FACTOR PROFUNDIDAD $Z=1$ CON DIFERENTES VALORES DEL FACTOR TIEMPO T, (NIETO, 2007)



3. Hallar el coeficiente de consolidación C_v para cada uno de los incrementos de carga, utilizando la Ecuación 12, el valor C_v de utilizado para cada uno de los incrementos de presión de poros es el promedio de los tres C_v calculados.

$$C_v = \frac{T \cdot H^2}{t} \quad (12)$$

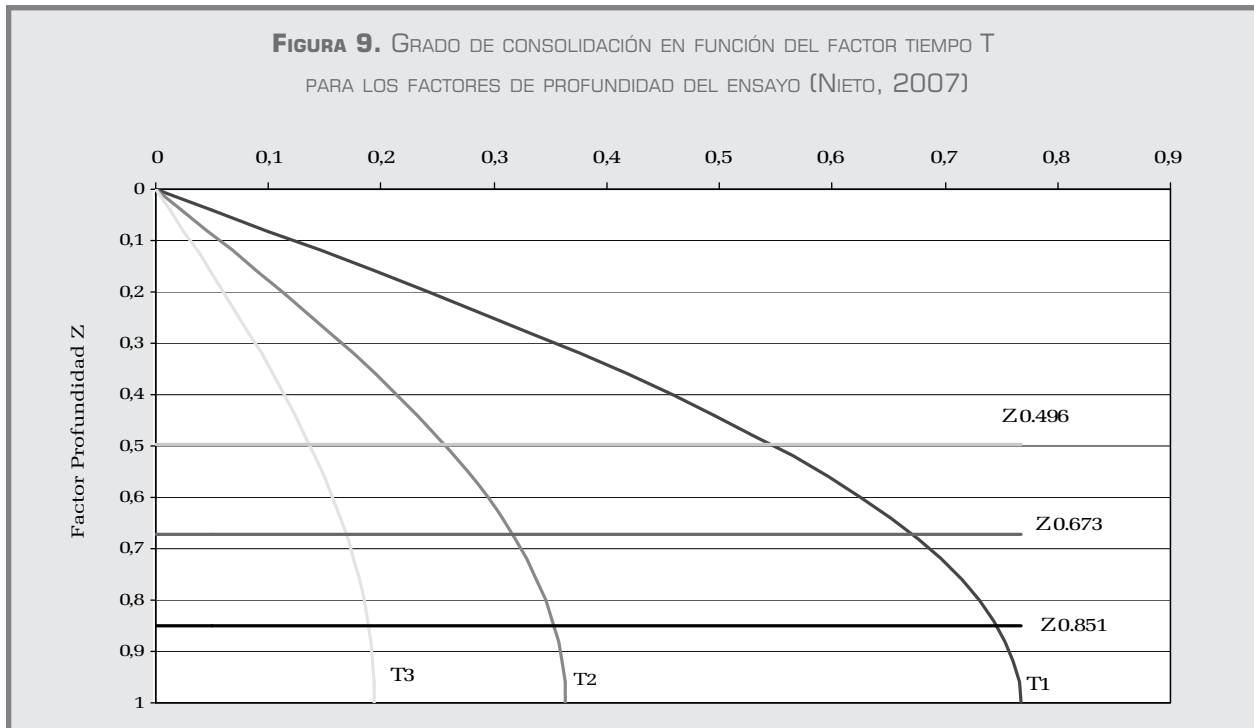
4. Se halla el factor profundidad para tres puntos, el comienzo, el centro y el final del pistón, los valores de z medidos y Z calculados se presentan en la Tabla 4.

6. Encontrar el grado de consolidación $\frac{U}{U_o}$ en cada uno de los factores profundidad, utilizando la Ecuación 11 (véase Figura 9).

TABLA 4. FACTOR DE PROFUNDIDAD, (NIETO, 2007)

z (cm)	Z
1.562	0.496
2.122	0.673
2.682	0.851

5. Hallar el factor tiempo



7. Se halla el valor de U para el centro del pistón con la Ecuación 13:

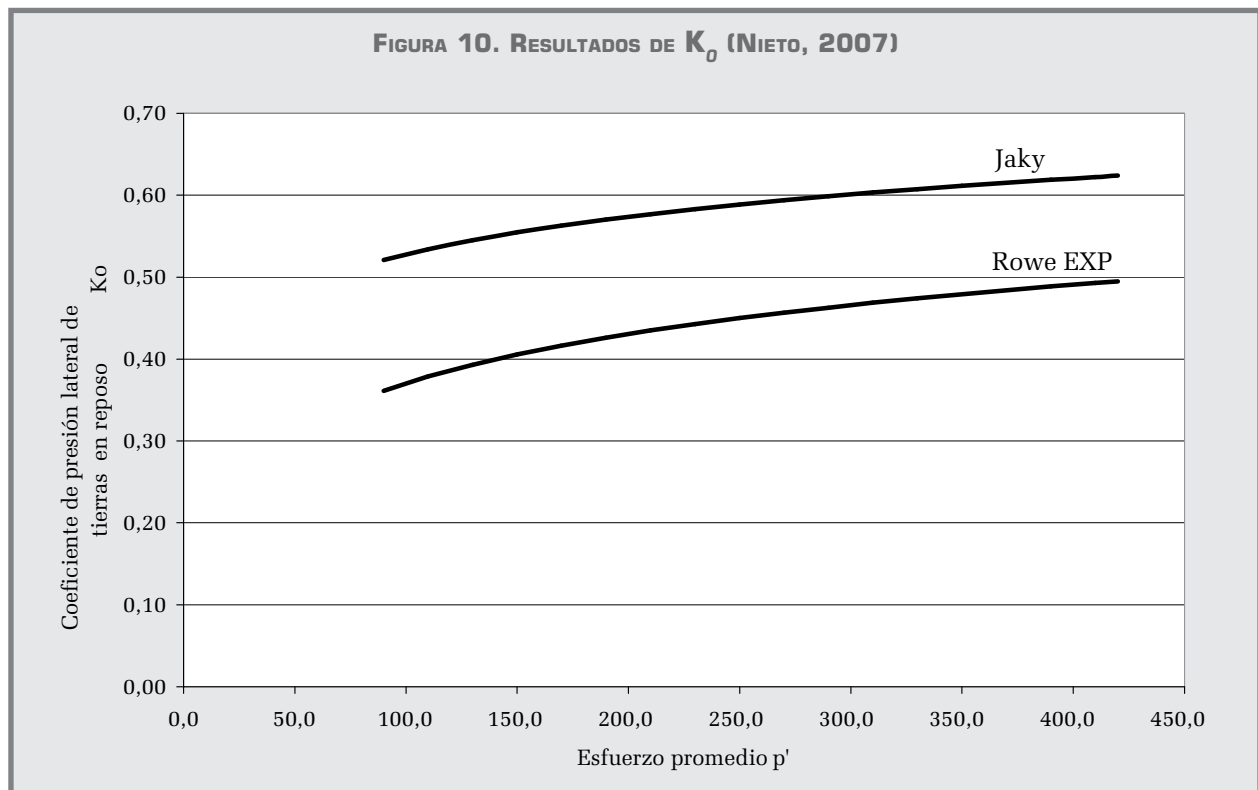
$$U^1 = \frac{U_{0.496} + 2U_{0.673} + U_{0.851}}{4} \quad (13)$$

La presión de poros encontrada en este punto es utilizada para encontrar los esfuerzos efectivos, tanto horizontales como verticales.

Para hallar el esfuerzo horizontal se uso la Ecuación 14.

$$\sigma_x = U_{lateral} + 40 - U^1 \text{ (kPa)} \quad (14)$$

Los resultados de K_o y del volumen específico obtenidos del ensayo con el consolidómetro de Rowe se muestran en la Figura 10.



Los resultados de los K_0 , encontrados por medio del consolidómetro de Rowe, indican que éste no es constante, sino que aumenta con el esfuerzo vertical, por lo tanto aumenta con el esfuerzo de confinamiento.

El volumen específico encontrado en el ensayo del consolidómetro de Rowe da una tendencia de disminución con el esfuerzo vertical, la cual es la esperada para el tipo de ensayo realizado.

CONCLUSIONES

En esta investigación se diseñó un aditamento para medir el esfuerzo radial total, en una prueba de consolidación unidimensional. Se trata de un pistón hidráulico ubicado en la pared del anillo de consolidación, el cual no se deja mover aplicándole una presión mediante un anillo de control, la presión aplicada iguala al esfuerzo radial total.

Para las condiciones de flujo transitorio que se presentan en el suelo, al consolidarse en el equipo de Rowe, es posible evaluar, matemáticamente, el valor de la presión de poros que se desarrolla a la altura en que se ubica el pistón y su variación con el tiempo. De esa manera es posible tener el esfuerzo lateral efectivo, restando del total la presión de poros. Para obviar los problemas que se derivan de la compresibilidad del sistema de medición de presión lateral y de su velocidad para medir esa presión, se hizo una consolidación por etapas, en la cual se impedía el drenaje mientras se estabilizan las lecturas.

De esta manera se pudo determinar la variación del coeficiente de presión de tierras en reposo " K_0 " con el nivel de esfuerzos efectivos. Como era de esperarse, en un suelo con un comportamiento esfuerzo deformación marcadamente no lineal y con una envolvente de resistencia curva, la predicción del lugar geométrico en que solo hay deformaciones en una dirección, no es una recta en el espacio de esfuerzos.

Con los resultados del coeficiente lateral de tierras en reposo " K_0 " medido en laboratorio y los resultados encontrados con la famosa expresión de Jaky, pareciera que la segunda sobrevaloraría el valor de ese coeficiente, en el marco de los resultados obtenidos en esta investigación de tipo experimental. Los resultados de K_0 hallados por los diferentes métodos se presentan en la Figura 10.

Jaky (1948) es una formulación empírica, la cual tiene en cuenta el ángulo de fricción pero no los pará-

metros de compresibilidad, los resultados encontrados por esta formulación dan valores aparentemente altos comparados con los valores medidos en el aparato de Rowe.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Félix Hernández Rodríguez, los ensayos se realizaron en Laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia y en los Laboratorios de la Universidad de La Salle.

BIBLIOGRAFÍA

Brooker, E.W., and Ireland, H. "Earth Pressure at Rest Related to Stress History", CGJ, vol. 2, no 1, Feb., (1965): 1- 15.

Jaky, J. "Pressure in Soils" 2d ICSMFE, vol. 1. (1948): 103 - 107.

Kezdi, A. "Stability of Rigid Structures", Proc. 5th European Conf. on SMFE, vol. 2, (1972): 105 - 130.

Massarsch, K. R. "New Method for Measurement of Lateral Earth Pressure in Cohesive Soils", CGJ, 12, 1, (1975): 142 - 146.

Marchetti S. "In Situ test by flat dilatometer", Journal of the geotechnical engineering division, SCE, 106, GTE. (1980): 299 - 321.

Menard, L. An Apparatus for Measuring the Strength of Soils in Place, M.Sc. Thesis, University of Illinois, Urbana, IL, 1956.

Nieto, F.A. Medición Experimental del Coeficiente de Presión Lateral de Tierras en Reposo " K_0 ", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2007.