



U.N.N.E. - Facultad de Ingeniería

CÁTEDRA: GEOTECNIA

Integrantes:

Prof. Titular: Ing. Arturo Borfitz

Prof. Adjunto: Ing. Dante Bosch

Auxiliares: Ing. Guillermo Arce

Ing. Hugo Casco

Ing. Daniel Nuñez

Edición y Maquetación:

Tec. Nelson J. Rodriguez

Año: 2008

TRABAJO PRÁCTICO DE LABORATORIO N° 6

CONSOLIDACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Al someter una masa de suelo saturado a un incremento de carga, ésta es soportada inicialmente por el agua contenida en los poros, ya que ella es incompresible en comparación con la estructura del suelo. La presión que resulta en el agua a causa del incremento de la carga es llamada exceso de presión hidrostática. A medida que el agua drena de los poros del suelo, el incremento de carga es transmitido a la estructura del suelo. La transferencia de carga es acompañada por un cambio en el volumen del suelo igual al volumen de agua drenada. Este proceso es conocido como consolidación.

Este es un proceso que tiene un tiempo acotado de ocurrencia, comienza cuando se aplica el incremento de carga, y finaliza cuando la presión de los poros es igual a la hidrostática, o lo que es lo mismo, cuando se ha producido la totalidad de la transferencia de carga del agua a la estructura de suelo. Terminado este proceso llamado consolidación primaria, el suelo continúa deformándose, aunque en menor magnitud, debido a un reajuste de los granos. A este último proceso se lo denomina consolidación secundaria.

El asiento total, suponiendo que el último valor medido coincide con el momento en que desaparece toda la sobrepresión intersticial creada al aplicar la carga, es una medida de la deformación del esqueleto del suelo. Si se realizan varios escalones de carga, se obtendrá una curva de compresibilidad, que relaciona la presión efectiva (en escala logarítmica) con la deformación del esqueleto mineral, expresada por el índice de poros o relación de vacíos.

El propósito fundamental del ensayo de consolidación es determinar ciertos parámetros que se utilizan para predecir la velocidad y la magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre arcillas. Además, el ensayo permite obtener información acerca de la historia de presiones a que ha sido sometido el suelo.

Los parámetros más importantes que se obtienen del suelo al realizar el ensayo son:

- a) El coeficiente de consolidación (c_v), que indica el grado de asentamiento del suelo bajo un cierto incremento de carga y vinculado a la velocidad del mismo.
- b) El índice de compresibilidad (C_c), que expresa la compresibilidad de una muestra.
- c) La presión de preconsolidación (P_c), que indica la máxima presión que ha soportado el suelo en su historia geológica.

2. EQUIPO NECESARIO

- 1- Molde del consolidómetro, de sección igual a 100 cm^2 , el cual está compuesto por:
 - Base de bronce con canales para permitir el drenaje del agua.
 - Anillo de bronce que contiene la muestra de arcilla saturada.
 - Anillo de bronce, de sujeción, que vincula la base con el que contiene la muestra mediante tornillos.
 - Tornillos de fijación y juntas de goma para sellar las uniones.
 - Tubos laterales que se comunican a través de los canales de la base con la piedra porosa inferior.
- 2- Juego de dos piedras porosas.
- 3- Papel de filtro para ser utilizado entre la muestra de suelo y la piedra porosa.
- 4- Cabezal de carga.
- 5- Mecanismo de transmisión de carga a palancas.
- 6- Extensiómetro con precisión $0,001''$.
- 7- Balanza de laboratorio sensibilidad $0,01 \text{ gr}$.
- 8- Horno de secado.
- 9- Elementos menores (cuchillo o espátula cortante, probeta, pesafiltros, etc.).

3. PROCEDIMIENTO

- 1- Se coloca en el interior de la base del molde del consolidómetro la piedra porosa inferior y sobre ésta un papel de filtro.
- 2- Luego se introduce el anillo que contiene la muestra de suelo a ensayar, colocándose sobre la muestra papel de filtro y la piedra porosa superior.
- 3- Posteriormente se fija con los tornillos correspondientes el anillo de sujeción de la piedra porosa superior, el que permite mantener agua sobre la muestra, para evitar pérdida de humedad por evaporación. Para prevenir que las piedras porosas tomen humedad de la muestra, deben estar libres de aire entrampado antes de montar la unidad. Es importante centrar correctamente las piedras porosas para prevenir el atascamiento contra el anillo durante la prueba.
- 4- Después de armado, el consolidómetro se asienta sobre la plataforma del mecanismo de transmisión de cargas, ubicando el cabezal de carga sobre la piedra porosa superior, y se llenan de agua los tubos laterales que comunican con la piedra porosa inferior, comenzando la saturación de la muestra.
- 5- Cuando está preparado para iniciar el ensayo, el extensiómetro para medir las deformaciones verticales debe ser puesto en cero, y la palanca de aplicación de carga debe estar en posición horizontal.
- 6- Se aplica una carga en el sistema de tal manera de obtener una presión de $0,10$ o $0,25 \text{ Kg/cm}^2$ (10 o 25 KPa) en la muestra de suelo y se comienza a tomar lecturas de tiempo y deformaciones verticales, para conocer la deformación correspondiente a distintos tiempos. Es útil utilizar la siguiente secuencia: 8 seg , 15 seg , 30 seg , 1 min , 2 min , 4 min , 8 min , 15 min , 30 min , 1 hs , 2 hs , 4 hs , 8 hs , 16 hs , 24 hs , etc.
Cabe recordar que la barra de suspensión frontal tiene una multiplicación mecánica de 1 a 40 , mientras que la barra de suspensión posterior tiene una relación de 1 a 10 .
Las mediciones se realizan hasta que la velocidad de deformación se reduzca prácticamente a cero, o sea cuando se haya sobrepasado la consolidación primaria y se encuentra la consolidación secundaria, lo que podrá determinarse en los gráficos de consolidación, realizados durante la ejecución del mismo. Para la mayoría de las arcillas el

período necesario de aplicación de la carga para obtener el cien por ciento de consolidación es de 24 hs.

- 7- Luego de obtenida la lectura final de un escalón, se prosigue el ensayo aplicando cargas en una progresión geométrica con una relación incremental $\Delta P/P=1$, registrándose lecturas de tiempo y de deformaciones verticales como en el punto anterior.
Se sigue aplicando incrementos de carga hasta que en la gráfica de compresibilidad se esté en el tramo recto o virgen. Luego se podrá descargar en dos o tres decrementos de carga hasta la presión inicial.
- 8- Posteriormente se recargará hasta llegar a una presión superior a la lograda en la etapa de carga, de manera de ingresar a la prolongación del tramo virgen correspondiente al primer ciclo de carga.
- 9- Luego de retirada toda la carga, se deja que la muestra expanda hasta que no se registre expansión en el extensiómetro por un período de 24 hs.
- 10- Al terminar la prueba, se quita el extensiómetro y se desarma el consolidómetro. Se seca el agua del anillo del consolidación y de la superficie de la muestra, para registrar el peso del conjunto. Luego de secado en horno se conoce el peso seco de la muestra (W_d), con lo que se puede calcular peso específico seco final (γ_d).

4. CÁLCULOS Y REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez colocada la muestra en el anillo del consolidómetro, se pesa el conjunto, y como el peso del anillo es conocido, se puede determinar el peso húmedo de la muestra (W_n).

Calculando previamente la humedad de la muestra, se puede obtener el peso seco (W_d) y con ello la altura de sólidos (h_s) y el peso específico seco inicial (γ_d), utilizando las siguientes expresiones:

$$h_s = \frac{W_d}{A \times G_s \times \gamma_w}$$

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V}$$

donde:

W_d = peso del suelo seco en el anillo.

A = sección del anillo.

G_s = peso específico relativo de los sólidos.

γ_w = peso específico del agua.

V = volumen del anillo.

Luego es posible calcular para cada escalón la altura de la probeta (H_i), y la altura de vacíos (h_{vi}), por medio de las siguientes expresiones:

$$H_i = H_0 - \delta_i$$

$$h_{vi} = H_i - h_s$$

donde:

H_i = altura final de la probeta para un escalón de carga.

H_0 = altura inicial de la probeta.

$\bar{\delta}_i$ = asentamiento final para un escalón de carga.

h_{vi} = altura de vacíos para un escalón de carga.

h_s = altura de sólidos de la probeta.

Con esto es posible calcular la relación de vacíos para cada escalón de carga (e_i):

$$e_i = \frac{h_{vi}}{h_s}$$

CURVA DE CONSOLIDACIÓN

Con los datos registrados para cada escalón de carga, se traza la curva de consolidación, en la que se puede representar en abscisas el $\log t$ o \sqrt{t} , y en ordenada la lectura del extensómetro que mide la deformación vertical de la muestra.

CURVA DE COMPRESIBILIDAD

Para cada incremento de carga aplicado se tiene finalmente un valor de relación de vacíos y otro de presión correspondiente, actuante sobre el espécimen. De todo el ensayo de consolidación, una vez aplicados todos los incrementos de carga, se tienen valores que permiten construir una curva en cuyas abscisas se representan los valores de la presión actuante, en escala logarítmica y en ordenadas se anotan los correspondientes valores de la relación de vacíos en escala natural.

COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN (c_v)

Para el cálculo del coeficiente de consolidación, en cada escalón de carga, se utiliza la expresión:

$$c_v = \frac{T \times H^2}{t}$$

donde:

T = es el factor tiempo, cuyo valor es 0,197 para un tiempo de consolidación del 50 %, y 0,848 para un $t=90\%$.

H = longitud para el máximo camino de drenaje durante un incremento de carga dado. Si la muestra es doblemente drenada, el valor de H será la mitad de la altura de la misma.

t = tiempo para el correspondiente factor de tiempo, obtenido de la curva de consolidación.

ÍNDICE DE COMPRESIBILIDAD (C_c)

En la curva de compresibilidad, se distinguen tres tramos bien diferenciados: la rama de recompresión, la rama virgen y la rama de descarga.

En el tramo recto o virgen, la variación del índice de vacíos es lineal con el logaritmo de las tensiones aplicadas, es por ello que se puede determinar la pendiente de esta recta, denominada índice de compresión (C_c), utilizando la siguiente expresión:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(P_{i+1}/P_i)} = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log(P_{i+1}/P_i)}$$

donde:

e_i = relación de vacíos para un estado.

P_i = presión transmitida al suelo para un estado.

De igual modo, en la rama de descarga se puede obtener el índice de expansión C_s como:

$$C_s = \frac{\Delta e}{\log(P_{i+1}/P_i)} = \frac{e_i - e_{i+1}}{\log(P_{i+1}/P_i)}$$

Es de resaltar que la inclinación de la curva de compresibilidad, es una medida de la compresibilidad de la arcilla. La pendiente del tramo de curva que se encuentra por debajo de la carga de preconsolidación, es menor que la pendiente del tramo virgen.

CARGA DE PRECONSOLIDACIÓN

De la curva de compresibilidad, se puede observar que cuando se realiza la recarga por encima de las presiones alcanzadas durante la carga inicial, la línea recta de recompresión es paralela a la rama de carga. Si se compara la curva de recarga con la curva de carga de una muestra inalterada de una arcilla depositada naturalmente, se nota la gran similitud existente.

Casagrande propuso un método empírico para la determinación gráfica de la carga de preconsolidación, denominándose así a la mayor presión posible bajo la cual se consolidó la muestra durante su pasado geológico. El método consiste en:

- a) Se traza una tangente por el punto de mayor curvatura de la curva.
- b) Por ese punto de tangencia se traza una línea horizontal.
- c) Se traza la bisectriz del ángulo formado por la tangente y la línea horizontal.
- d) Se prolonga la recta virgen hasta interceptar la bisectriz.
- e) En el punto de intercepción del tramo recto y la bisectriz se traza una vertical que permite leer en el eje de las abscisas el valor de la carga de preconsolidación.

FACULTAD DE INGENIERÍA-U.N.N.E.
LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

DATOS DE LA MUESTRA:

Suelo Arcilla
 Escalón N°
 Carga Kg
 Flexímetro: 0,0001 "/div.

Fecha	Hora	Tiempo	t (min)	Log t	\sqrt{t}	Lectura flexímetro	Asentamiento (□)
		8 seg					
		15 seg					
		30 seg					
		1 min					
		2 min					
		4 min					
		8 min					
		15 min					
		30 min					
		1 hs					
		2 hs					
		4 hs					
		8 hs					
		16 hs					
		24 hs					

**FACULTAD DE INGENIERÍA-U.N.N.E.
LABORATORIO DE SUELOS**

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN

DATOS DEL ENSAYO:

Anillo N°		1
Peso del anillo	$W_a =$	gr
Sección del anillo	$A =$	100 cm ²
Altura del anillo	$H =$	cm
Volumen del anillo	$V =$	cm ³
Humedad inicial	$w_0 =$	%
Peso anillo y muestra húmeda	$W_{a+m} =$	gr
P.E. relativo de sólidos	$G_s =$	
Peso de muestra seca	$W_d =$	gr
Altura de sólidos	$h_s =$	cm
P.E. seco	$\rho_d =$	gr/cm ³
Relación de vacíos inicial	$e =$	

Fecha	Presión efectiva (kg/cm ²)	Asentamiento (mm)	Altura de la probeta (H _i)	Altura de vacíos (h _{vi})	Relación de vacíos (e _i)	Longitud de drenaje	Coefficiente de consolidación (c _c)

CONSOLIDACIÓN

Ensayo realizado en el 1° cuatrimestre de 2.008

Para la realización del ensayo se confeccionó una probeta en el anillo del consolidómetro, se montó el mismo y se calibró el flexímetro con una lectura inicial igual a cero. Posteriormente se cargó con las pesas necesarias para transmitir a la probeta una presión de 40 Kpa y se dejó consolidar totalmente. El día del ensayo, que se indica en la planilla siguiente, se duplicó la carga, registrándose en el instante inicial una lectura de 5 vueltas y 173 divisiones. La información en bruto tomada del consolidómetro con una presión **total** de 80 Kpa se indica a continuación:

fecha	hora	tiempo	lectura	
			vueltas	divisiones
17/05/04	17:05	00:00	5	173
		6"	6	20
		15"	6	27
		30"	6	33
		1'	6	40
		2'	6	49
		4'	6	63
		8'	6	81
	17:20	1 5'	6	102
	17:35	30'	6	137
	18:05	1h	6	190
	19:05	2h	7	63
	20:30		7	142
18/05/04	10:00		9	78
	15:30		9	130

fecha	hora	tiempo	lectura	
			vueltas	divisiones
	20:30		9	174
19/05/04	13:30		10	16
	17:05		10	22
	20:30		10	28
20/05/04	13:30		10	46
21/05/04	10:20		10	59
	14:00		10	61
	20:30		10	65
23/05/04	18:30		10	78
24/05/04	14:00		10	82
	20:30		10	84
25/05/04	18:30		10	87
26/05/04	13:30		10	90
	19:00		10	92

En las planillas siguientes se ha volcado los datos resultantes del ensayo necesarios para la confección de las curvas; ellos son: tiempo - lecturas del flexímetro (son las columnas exteriores); en la 2^ª columna se agrega logaritmo del tiempo en segundos y en la 3^ª se sustrae de las lecturas un número constante para "colgar" las mismas de una referencia

t (seg.)	log. t	lect.	lect. flex.
0			1,173
6	0.778	980	1,220
15	1.176	973	1,227
30	1.477	967	1,233
60	1.778	960	1,240
120	2.079	951	1,249
240	2.380	937	1,263
480	2.681	919	1,281
900	2.954	898	1,302
1,800	3.255	863	1,337
3,600	3.556	810	1,390
7,200	3.857	737	1,463
12,300	4.090	658	1,542

t (seg.)	log. t	lect.	lect. flex.
98,700	4.994	226	1,974
159,900	5.204	184	2,016
172,800	5.238	178	2,022
185,100	5.267	172	2,028
246,300	5.391	154	2,046
321,300	5.507	141	2,059
334,500	5.524	139	2,061
357,900	5.554	135	2,065
437,100	5.641	122	2,078
507,300	5.705	118	2,082
530,700	5.725	116	2,084
609,900	5.785	113	2,087
678,300	5.831	110	2,090

TRABAJOS DE LABORATORIOS

60,900	4.785	322	1,878	698,100	5.844	108	2,092
80,700	4.907	270	1,930				

Luego de estabilizado el sistema se procede a desmontar todo el aparato. Se pesa el anillo con la probeta adentro:

$$W_{an+Sh} = 2.326,77g$$

Se lleva anillo y probeta a estufa hasta conseguir peso constante, el que resulta:

$$W_{anSs} = 2.128,63g$$

Y el peso del anillo vacío:

$$W_{an} = 1.728,63$$

La humedad final del suelo resulta:

$$\omega = \frac{2.326,77 - 2.128,63}{2.128,63 - 1.728,63} = 0.4953 = 49,53\%$$

Aplicando lo visto en teoría, y asumiendo que la saturación de la probeta es total, la relación de vacíos final será:

$$e = \omega \times G = 0,4953 \times 2,65 = 1,31$$

Además de la relación de vacíos final se puede calcular la que tenía el suelo cuando sobre el mismo actuaba una presión efectiva de: 80 KPa; 40 Kpa y 0 ya que para esas presiones se cuenta con las respectivas deformaciones. Es, (sabiendo que la constante del flexímetro es 0,0001"/div.):

p' (Kpa)	lect.	def. (mm)
0	10 v. 63 div	5.2400
80	10 v. 92 div	5.3137
40	5 v. 173 div	2.9794
0	0 v. 0 div	0.0000

En la tabla anterior el orden es:

- la probeta luego de la descarga
- la última lectura del escalón realizado
- la última lectura antes de cargar para el escalón del ensayo
- la lectura inicial antes de cargar con 40 Kpa

Sabiendo que (ver teoría)

$$\Delta e = \frac{\Delta \delta}{h_{sól}} \quad \text{y:} \quad h_{sól} = \frac{h}{1+e}$$

$$h_{sól} = \frac{25,4 - 5,24}{1 + 1,31} = 8,73 \text{ mm}$$

y las relaciones de vacíos:

$$\text{para 80 Kpa: } e_1 = 1,31 - \frac{5,3137 - 5,2400}{8,73} = 1,31 - 0,0084 = 1,3016$$

$$\text{para 40 Kpa: } e_2 = 1,3016 + \frac{5,3137 - 2,9794}{8,73} = 1,3016 + 0,2674 = 1,5690$$

$$\text{antes de cargar: } e_i = 1,5690 + \frac{2,9794 - 0}{8,73} = 1,5690 + 0,3413 = 1,9103$$

con los valores anteriores puede calcularse la permeabilidad del suelo ensayado cuando éste está sometido a una sobrepresión entre 40 y 80 KPa:

$$k = C_v \times m_v \times \gamma_w \quad \text{y:} \quad C_v = \frac{T \times H^2}{t}$$

C_v se calcula para el tiempo correspondiente al 50% de consolidación del escalón aplicado; para ello se determina en la curva el 0% y 100% de consolidación y consecuentemente el tiempo para el que se cumplía la mitad del proceso (50%)

el factor tiempo T para ese porcentaje de consolidación es teórico y vale 0,197; el valor H es el espesor efectivo, en este caso la mitad del espesor de la probeta, por lo que es posible calcular C_v ; m_v es:

$$m_v = \frac{\Delta e}{\Delta p'} \times \frac{1}{1 + e} = \frac{1,5690 - 1,3016}{0,4 \text{ kg/cm}^2 \times (1 + 1,5690)} = 0,26 \text{ cm}^2 / \text{kg}$$

lo que resta entonces es trabajar con la curva de consolidación lo que depende de cada caso en particular.