

Tesis de grado en Ingeniería Civil

# RIGIDEZ EDOMÉTRICA DEL PAMPEANO MEDIO

Autor:

Maribel Denise Quintela

Tutor de Tesis:

Profesor Ing. Alejo O. Sfriso

Tesis de grado en Ingeniería Civil

# RIGIDEZ EDOMÉTRICA DEL PAMPEANO MEDIO

Autor:

Maribel Denise Quintela

Tutor de Tesis:

Profesor Ing. Alejo O. Sfriso

Firma del autor:

Firma del tutor:

Aceptada por:

Fecha: Mayo 2009

## AGRADECIMIENTOS

Para poder realizar con éxito mi tesis de grado fue necesario contar con el incentivo, la confianza y la buena predisposición de todos los que compartieron esta etapa conmigo.

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento al Ing. Alejo O. Sfriso, por su constante y paciente seguimiento y asistencia, compartiendo su tiempo de manera generosa durante el desarrollo del presente trabajo.

A Osvaldo Ledesma, Gastón Quaglia, la Ing. Patricia Sagües y el Ing. Mauro Codevilla, por sus aportes, críticas, comentarios y sugerencias, y por compartir todo el proceso que significó la realización de esta tesis.

A los compañeros que trabajan en los laboratorios de la FIUBA, por su permanente disposición y desinteresada ayuda.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a mi familia, en especial a mi mamá, por su cariño, comprensión y constante estímulo, recordándome que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr los objetivos.

ÍNDICE	4
I. INTRODUCCIÓN	6
II. FORMACIÓN PAMPEANO	7
1. <i>Características generales</i>	7
2. <i>Formación</i>	7
3. <i>El Pampeano en Buenos Aires</i>	7
4. <i>La preconsolidación por desecación</i>	8
5. <i>Propiedades índices</i>	8
6. <i>Rigidez edométrica y expansividad</i>	8
III. MARCO TEÓRICO	9
1. <i>Concepto</i>	9
2. <i>Suelos normalmente consolidados y preconsolidados</i>	9
3. <i>Banco edométrico</i>	9
4. <i>Procedimiento de ensayo</i>	10
5. <i>Representación del ensayo edométrico</i>	10
6. <i>Índices</i>	10
7. <i>Módulo edométrico</i>	11
8. <i>Consolidación secundaria</i>	11
9. <i>Curvas de consolidación</i>	11
9.1. <i>Método logarítmico</i>	11
9.2. <i>Método de Taylor</i>	12
10. <i>Factores que pueden provocar errores</i>	12
10.1. <i>Efecto de la fricción lateral</i>	12
10.2. <i>Magnitud de la carga aplicada</i>	12
10.3. <i>Fuentes comunes de errores</i>	13
IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL	14
1. <i>Extracción de las muestras</i>	14
2. <i>Preparación de las muestras</i>	14
3. <i>Sistema de adquisición de datos</i>	14
4. <i>Características físicas del suelo ensayado</i>	15
5. <i>Ensayos de consolidación unidimensional</i>	15
5.1. <i>Ensayo n°1 (C1)</i>	15
5.2. <i>Ensayo n°2 (C2)</i>	16
5.3. <i>Ensayo n°3 (C3)</i>	17
5.4. <i>Ensayo n°4 (C4)</i>	18
5.5. <i>Ensayo n°5 (C5)</i>	19

5.6. Ensayo n°6 (C6)	20
5.7. Ensayo n°7 (C7)	20
5.8. Ensayo n°8 (C8)	21
5.9. Ensayo n°9 (C9)	21
5.10. Ensayo n°10 (C10)	22
5.11. Ensayo n°11 (C11)	22
5.12. Ensayo n°12 (C12)	23
5.13. Ensayo n°13 (C13)	23
5.14. Ensayo n°14 (C14)	24
5.15. Ensayo n°15 (C15)	24
6. Ensayo químico - Contenido de Carbonato de Calcio	25
V. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	26
1. Contenido de $\text{CaCO}_3$	26
2. Ensayos de consolidación	26
2.1. Presión de preconsolidación	28
2.2. Índices de compresión y recompresión	28
2.3. Módulo edométrico secante	28
VI. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO NUMÉRICO	29
VII. CONCLUSIONES	31
VIII. REFERENCIAS	32
IX. ANEXOS	33
1. Informe de Avance I	
2. Informe de Avance II	
3. Determinación del contenido de Carbonato de Calcio	

## I. INTRODUCCIÓN

Entre los modelos constitutivos empleados para la simulación del comportamiento mecánico de suelos de la Formación Pampeano, el más utilizado es el modelo hiperbólico, que incluye mecanismos de deformación plástica por corte y compresión.

La deformación plástica por corte es la que se produce cuando se aumenta el cociente  $\sigma_1/\sigma_3$ , como por ejemplo durante los ensayos triaxiales de compresión. Por otra parte, la deformación plástica por compresión es la asociada a trayectorias  $\sigma_1/\sigma_3 = cte$ , como por ejemplo las deformaciones producidas por consolidación primaria o expansividad.

Los suelos de la Formación Pampeano están fuertemente preconsolidados, por lo que su comportamiento en trayectorias  $\sigma_1/\sigma_3 = cte$  debería ser esencialmente elástico. Sin embargo, el material está fisurado y se presenta como expansivo para desconfinamientos importantes. Esto implica que existen deformaciones inelásticas para trayectorias  $\sigma_1/\sigma_3 = cte$ , tanto en carga como en descarga.

No es posible simular el fenómeno de la expansividad mediante el empleo de modelos desarrollados para reproducir el mecanismo de la consolidación primaria, porque la expansividad produce deformaciones inelásticas tanto en el ciclo de contracción como en el de expansión, mientras que la consolidación primaria sólo produce deformaciones plásticas en primera carga. Sin embargo, un modelo de compresión convencional puede ser calibrado para reproducir la trayectoria de recompresión de un suelo que ha sufrido expansión.

El objeto principal de este trabajo de tesis es la calibración de los parámetros de compresión del modelo hiperbólico implementado en Plaxis V8.6 para los suelos de la Formación Pampeano.

La organización de este documento de tesis es como sigue: En el capítulo II se describen los suelos de la Formación Pampeano, con especial énfasis en los mecanismos de compresión plástica. En el capítulo III se estudia y describe el ensayo de compresión edométrica. En el capítulo IV se detallan y enumeran las distintas tareas llevadas a cabo antes y durante los ensayos de consolidación y en el capítulo V se muestran los resultados obtenidos de ellos. En el capítulo VI se realiza una comparación entre los resultados de la simulación de los ensayos realizados en laboratorio, lo cual implicó la calibración de los parámetros del modelo constitutivo HSM, y los valores medidos. Finalmente, el capítulo VII está constituido por una serie de conclusiones que se obtuvieron de la presente tesis.

## Simbología

$C_c$	Índice de compresión
$C_r$	Índice de recompresión
$C_s$	Índice de expansión
$CaCl_2$	Cloruro de Calcio
$CaCO_3$	Carbonato de Calcio
$CO_2$	Dióxido de Carbono
$E_c$	Módulo edométrico en primera carga
$E_{edo}, E_{oed}$	Módulo de compresión edométrico
$E_{edo,ur}$	Módulo edométrico en descarga
$E_r$	Módulo edométrico en recarga
$E_{ur}$	Módulo de Young elástico
$E_{50}$	Módulo de Young secante al 50% de rotura
$e$	Relación de vacíos
$e_f$	Relación de vacíos final
$e_o$	Relación de vacíos inicial
$k_h$	Coef. de permeabilidad horizontal
$k_v$	Coefficiente de permeabilidad vertical
OCR	<i>Over consolidation ratio</i>
$p_{ref}$	Presión de referencia
$\Delta\varepsilon_v$	Deformación unitaria volumétrica
$\Delta\sigma_v$	Variación de la presión vertical
$\varepsilon_v$	Deformación unitaria volumétrica
$\varepsilon_{1max}$	Deformación específica vertical max
$\sigma_1$	Presión axial
$\sigma_3$	Presión de confinamiento
$\sigma_{max}$	Tensión máxima
$\sigma_v$	Presión vertical
$\sigma'_{vc}$	Presión de preconsolidación
$\phi$	Ángulo de fricción interna
$\omega$	Humedad

## II. FORMACIÓN PAMPEANO

### 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La Formación Pampeano es un suelo loésico<sup>1</sup>. Éstos son suelos finos de origen volcánico que se clasifican en dos tipos: un *loess primario* es un loess que conserva la estructura generada durante su primera deposición; si ha habido procesos de transporte o alteración in situ el material se denomina *loessoide* o *loess secundario*.

Con una superficie de 600.000 km<sup>2</sup>, los suelos loésicos de Argentina son el principal depósito de su tipo en Sudamérica.

Los dos tipos de loess se presentan en amplias extensiones del territorio nacional. Desde el punto de vista de su comportamiento geotécnico, los loess primarios pueden tener comportamiento de suelo colapsable, mientras que los loess secundarios de Argentina son, en general, depósitos preconsolidados por desecación sin susceptibilidad a colapso (Rocca, Redolfi y Terzariol 2006).

Los suelos loésicos presentan anisotropía de su conductividad hidráulica. Se ha comprobado que el coeficiente de permeabilidad vertical  $k_v$  es mayor que el coeficiente de permeabilidad horizontal  $k_h$ . Los niveles superiores de estos depósitos presentan una red de fisuras y microfisuras visibles, que incrementa la permeabilidad secundaria del material (Rocca, Redolfi y Terzariol 2006).

### 2 FORMACIÓN

La Formación Pampeano está compuesta por partículas de origen volcánico, como andesitas y basaltos, provenientes de la zona central de la cordillera de los Andes y la Patagonia (Fidalgo et al 1975).

Las partículas fueron trasladadas por erosión glacial e hídrica al norte de la Patagonia y finalmente redepositadas en el centro del país por transporte eólico (Rocca et al 2006). Se cree que la deposición final estuvo acompañada por procesos de subsidencia<sup>2</sup>. La subsidencia a su vez fue interrumpida periódica y temporalmente por levantamientos que generaron erosión y redeposición de algunos sectores de la Formación (Bolognesi y Moretto 1957).

<sup>1</sup> Loess: sedimentos eólicos, uniformes y cohesivos, con cementante de naturaleza predominantemente calcárea o arcillosa. (Terzaghi & Peck 1973).

<sup>2</sup> "Subsidencia es el hundimiento progresivo del fondo de una fosa o depresión que se desarrolla paralelamente a la sedimentación depositada en ella". Diccionario Rioduero – Geología y Mineralogía.

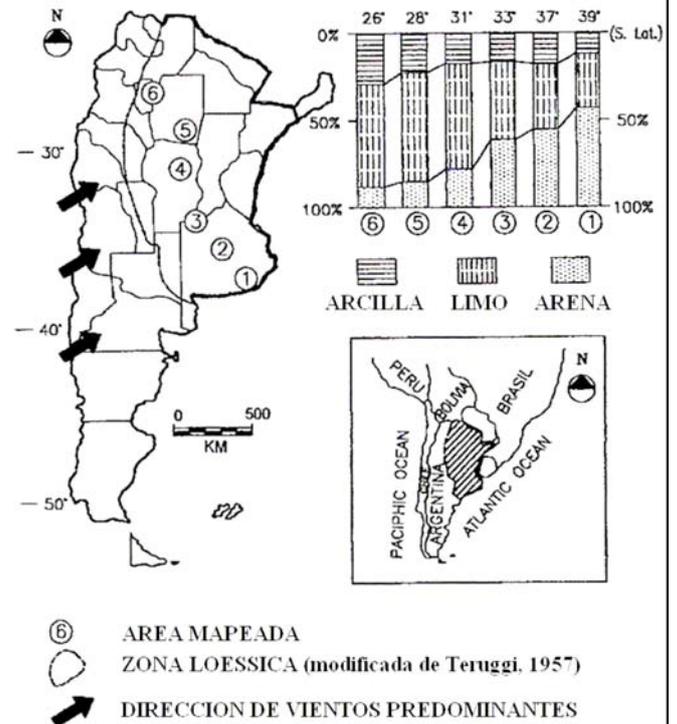


Figura 1. Influencia del transporte en las propiedades de sedimentos (Sayago et al 2001, Rocca, Redolfi y Terzariol 2006).

Los ciclos de humedecimiento y secado produjeron ascenso capilar de agua con bicarbonato, cuya concentración aumentó hasta que se produjo la cristalización de nódulos de carbonato de calcio insoluble (Rinaldi et al. 1998).

Una descripción más completa de la Formación Pampeano puede verse en Sagüés (2008) y en Quaglia (2008).

### 3 EL PAMPEANO EN BUENOS AIRES

El perfil típico del centro de la ciudad de Buenos Aires corresponde a suelos de la Formación Pampeano, sobreconsolidados por desecación y cementados con carbonato de calcio en forma de matriz y nódulos. Los horizontes típicos son:

- *Relleno Superficial* (Superficie a 1-3 m): Arcillas de baja plasticidad, medianamente compactadas, descompactadas.
- *Pampeano Superior* (1-3m a 8-12m): Limos y arcillas de mediana plasticidad compactos con nódulos calcáreos en matriz pobremente cementada.
- *Pampeano Medio* (8-12m a 25-30m): Limos y arcillas de mediana plasticidad, con matriz mediana a fuertemente cementada, fisurados.
- *Pampeano Inferior* (25-30m a 36-40m): Arcillas de mediana y alta plasticidad compactadas, pobremente cementadas y fisuradas.

#### 4 LA PRECONSOLIDACIÓN POR DESECACIÓN

La preconsolidación por desecación actuó de manera diferenciada en los diferentes sub-estratos en los que se divide a la Formación Pampeano. Esta diferenciación de zonas se debe a que la deposición se produjo durante distintos períodos y procesos climáticos.

El tercio inferior de la Formación Pampeano se depositó en un ambiente fluvial. Durante las glaciaciones se produjo un descenso del nivel del mar que expuso el depósito a un proceso de desecación. Las altas presiones efectivas producidas por la desecación indujeron a su vez una importante consolidación de tipo isotrópico. El aumento posterior del nivel del mar – en los períodos interglaciares – sumergió el depósito, que quedó entonces preconsolidado por desecación y saturado (Bolognesi 1975).

En los dos tercios superiores, formados por deposición eólica, la preconsolidación fue causada por la succión inducida por períodos de fuertes sequías. La influencia de la contracción por secado y de la restricción a la expansión durante la humectación pudo haber provocado cambios en el estado tensional del depósito (Bolognesi 1975). La presión de preconsolidación del Pampeano Superior se estima que está en el rango 0.8-1.2 MPa (Bolognesi 1991, Núñez 1986a, 1986b).

#### 5 PROPIEDADES ÍNDICE

Las propiedades índices varían con el tiempo y modo de deposición y con los procesos subsiguientes a la deposición e intemperismo.

En las capas formadas por arcillas, el Límite Líquido cae en el amplio rango 30% a 80%. En cambio, en las capas limosas, el rango es más estrecho, entre el 35% y el 55% (Bolognesi 1975).

El peso específico absoluto está en el rango 25.5 kN/m<sup>3</sup> a 27.0 kN/m<sup>3</sup>, con relaciones de vacíos entre 0.8 y 1.2 (Bolognesi 1975).

Tabla1: Datos de las distintas zonas del Pampeano (Bolognesi 1975).

Prof. m	Cota m	$e_o$	w %	$w_L$ %	$w_P$ %	IP %
10.16	+15.00	0.848	32.0	67.0	30.0	37.0
12.16	+13.00	0.888	33.5	67.0	31.5	35.5
20.00	+05.16	0.826	31.4	41.3	27.8	13.5
27.20	-02.04	0.848	32.0	51.0	30.0	21.0
32.70	-07.54	1.180	44.5	69.0	33.5	35.5
39.05	-13.89	0.860	32.5	88.0	27.0	61.0
49.70	-24.54	0.888	33.5	48.5	22.0	26.5
53.75	-28.59	1.000	37.0	64.5	24.5	40.0

#### 6 RIGIDEZ EDOMÉTRICA Y EXPANSIVIDAD

La rigidez edométrica del material está determinada por la relación de vacíos inicial, la plasticidad, el contenido de humedad del suelo y el grado de cementación. Otros parámetros relevantes son la fábrica, la composición química del fluido saturante, la cantidad de sales solubles, la cantidad de agentes cementantes no solubles, la profundidad y el nivel de cargas externas.

En la literatura se reporta que el índice de compresión varía entre 0.15 y 0.62 (Bolognesi 1975). En los ensayos presentados en este documento se aprecia que los suelos del Pampeano no tienen una relación  $e - \log(p)$  lineal en el tramo de primera carga (Sfriso et al 2008, Quintela & Sfriso 2008).

Tampoco se aprecia un comportamiento lineal en descarga. Se ha observado que el fenómeno de expansión inelástica es muy superior a la recuperación elástica, y por lo tanto controla el comportamiento de los suelos de la Formación Pampeano, al menos en los estratos conocidos como Pampeano Medio e Inferior.

Codevilla (2008) estudió el comportamiento de diez muestras de suelos activos superficiales provenientes del área metropolitana de Buenos Aires, incluyendo una muestra extraída del Subterráneo Línea H a 15m de profundidad (el mismo sitio del cual se obtuvieron las muestras inalteradas para la realización de este trabajo de tesis). Se destacó el hecho que aunque su expansión libre es similar a la de las otras muestras, su presión de hinchamiento es significativamente superior (figura 2: la muestra de la línea H se identifica como “Once”).

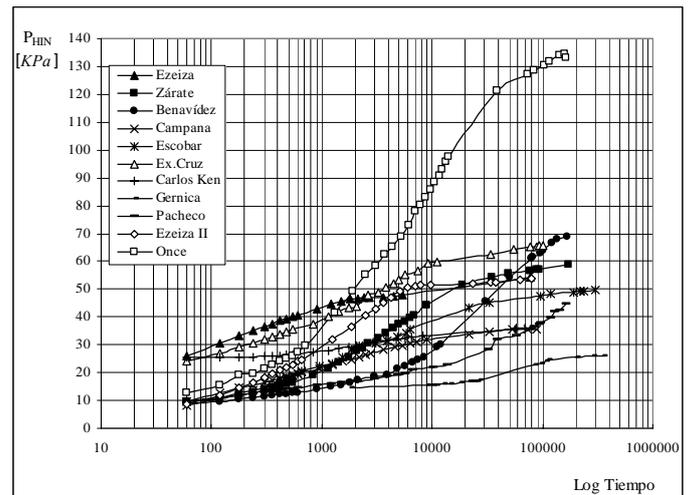


Figura 2. Curvas de presión de hinchamiento (Codevilla 2008)

El suelo de Buenos Aires está saturado y cementado, razones por las cuales no presenta características colapsables.

### III. MARCO TEÓRICO

Los conceptos citados en este capítulo fueron en su mayoría extraídos de la siguiente bibliografía:

*Mecánica de Suelos*, Juárez Badillo,

*Soil Mechanics - Concepts and Applications*,

William Powrie,

*Geotecnia y Cimientos*, Jiménez Salas.

#### 1 CONCEPTO

Al proceso mediante el cual el suelo experimenta una reducción de su volumen durante un determinado tiempo debido a un aumento de cargas se lo conoce con el nombre de *consolidación*.

La carga y descarga de los estratos de suelo se debe tanto a causas naturales como provocadas por el hombre - deposición geológica, erosión, formación de terraplenes, edificación con fundaciones directas, excavaciones, etc. Generalmente se desarrollan bajo condiciones de compresión unidimensional ya que existe un confinamiento lateral provocado por el suelo mismo. Se considera que los estratos tienen gran extensión horizontal en comparación con su espesor.

Durante la consolidación, el agua contenida en los vacíos es expulsada a través de ellos, de esta manera disminuye gradualmente la presión de los poros de agua y aumentan las presiones efectivas hasta recuperar el estado de equilibrio. El volumen de la masa de suelo disminuye, pero los desplazamientos horizontales de las partículas sólidas son nulos.

#### 2 SUELOS NORMALMENTE CONSOLIDADOS Y PRECONSOLIDADOS

Un suelo se dice que es *normalmente consolidado* cuando durante su pasado geológico nunca fue sometido a presiones efectivas superiores a la que actualmente experimenta. Queda definido por oposición, cuándo un suelo es *preconsolidado*.

Existen dos métodos posibles para definir el estado inicial de consolidación o lo que es lo mismo, si un suelo está preconsolidado o no. Esto es, mediante el cálculo del OCR (*over consolidation ratio*) o de la  $\sigma'_{vc}$  (*presión de preconsolidación*).

Se define OCR como la relación entre la presión vertical máxima a la que fue sometido el suelo y la presión actual. Y  $\sigma'_{vc}$  a la presión máxima bajo la que ha estado sometida la muestra.

Un estrato de suelo puede quedar preconsolidado debido a diferentes causas entre las cuales se pueden nombrar: la erosión y el deshielo que disminuyen el peso sobre el estrato, y la desecación y

descenso de la napa freática que generan altas presiones efectivas.

Es posible que para un suelo cementado, la curva de compresibilidad obtenida de un ensayo de consolidación muestre una presión de preconsolidación aparente (Bjerrum 1967).

#### 3 BANCO EDOMÉTRICO

El *edómetro*, también conocido como *consolidómetro*, es el aparato que se utiliza para ensayar muestras de suelo en laboratorio bajo condiciones de compresión unidimensional.

Se compone principalmente por un anillo dentro del cual el suelo se encuentra confinado lateralmente. Por sobre y debajo de la muestra de suelo se coloca una placa porosa que favorece la circulación de agua a través de ella de una forma homogénea. Generalmente se utiliza como unidad de consolidación un *anillo flotante* en lugar de uno *fijo*, siendo éste último empleado cuando se ejecutan simultáneamente ensayos de permeabilidad y de consolidación.

Se recomienda la utilización de papel filtro entre la muestra y cada piedra porosa, pues de este modo se evita que se taponen los poros de dichas piedras y, además, el papel filtro actúa como vehículo del agua entre poros de la piedra, lo cual da lugar a la obtención de mejores curvas de consolidación (Newland y Allely 1960).

Comúnmente la carga se aplica por medio de un sistema de palancas que permite mantener la presión constante para cada incremento. Sin embargo, también existen consolidómetros neumáticos en los cuales la carga es accionada mediante presión de aire controlada con un regulador de presión constante, o bien aplicándose las presiones con membranas o diafragmas y midiéndose utilizando manómetros. Para la ejecución de los ensayos de esta tesis se ha trabajado con un consolidómetro que utiliza un sistema de palancas para la aplicación de las cargas.

Los consolidómetros normales tienen una capacidad máxima de carga en la ménsula de 100 a 150 kg.

Con respecto al método de medición de las deformaciones del suelo, para registrar asentamientos se suele utilizar un *reloj comparador* o *flexímetro* solidario al marco móvil del edómetro y apoyado sobre un punto fijo del mismo, excepto cuando se trabaje con suelos excesivamente duros ya que se requerirá de un instrumento que registre asentamientos más pequeños.

#### 4 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Dada la necesidad de conocer o predecir la velocidad de los asentamientos de las estructuras y su correspondiente magnitud, como así también la historia de presiones de un determinado estrato de suelo, adquiere gran importancia la ejecución de ensayos de consolidación.

Luego de la preparación de la muestra de suelo, lo cual incluye enrase, colocación de las piedras porosas y el papel filtro, saturación, pesaje y medición de la altura inicial, se ubica el aro edométrico en posición para ensayar y se posiciona el instrumento de medición que se decida utilizar. Para evitar la pérdida de agua y por lo tanto la disminución del grado de saturación de la muestra durante el ensayo, se recomienda llenar de agua la célula que contiene al aro.

Una vez verificada la horizontalidad del marco móvil del dispositivo y el alcance del recorrido de la palanca de carga, se procede a comenzar el ensayo de consolidación.

Se aplican incrementos de carga de magnitud variable que provocan la deformación del suelo en dirección axial. Dicho asentamiento no se producirá de manera uniforme durante cada escalón de carga, sino que en los primeros segundos será significativamente mayor. Luego, a medida que transcurre el tiempo, la velocidad de deformación se va reduciendo.

Durante cada escalón de carga se efectúan una serie de mediciones, se registra la lectura del flexímetro para intervalos de tiempo adecuados y se confecciona un gráfico que relaciona la compresión del suelo con la raíz del tiempo.

Una vez alcanzada la máxima presión que se desee, se comienza a efectuar la descarga, que suele realizarse mediante 3 o 4 decrementos. Se registra principalmente el comienzo y el final del proceso de deformación que en este caso se manifiesta mediante un hinchamiento - aumento de volumen - del estrato de suelo, ya que está permitido el ingreso de agua al interior de la muestra a través de las piedras porosas tanto superior como inferior.

Una vez finalizado el ensayo, se recomienda que la muestra repose durante 48 hs o bien hasta no registrar expansión en el flexímetro en un período de 24 horas.

Al terminar el ensayo, se desarma el consolidómetro, se calcula la humedad en ese instante y se mide la altura final de la muestra.

#### 5 REPRESENTACIÓN DEL ENSAYO EDOMÉTRICO

Para representar los resultados obtenidos de los ensayos de consolidación ejecutados, se vuelcan en

un gráfico las presiones de cada uno de los escalones de carga sobre el eje de abscisas en escala natural y la relación de vacíos final correspondiente a cada presión en el eje de ordenadas en escala logarítmica.

Se obtiene de esta manera la “*curva de compresibilidad*”, a partir de la cual se puede calcular el asentamiento final de un estrato - normalmente consolidado o preconsolidado. Con la aplicación del método de Casagrande o del de Burmister, se puede calcular la presión de preconsolidación ( $p_c$ ).

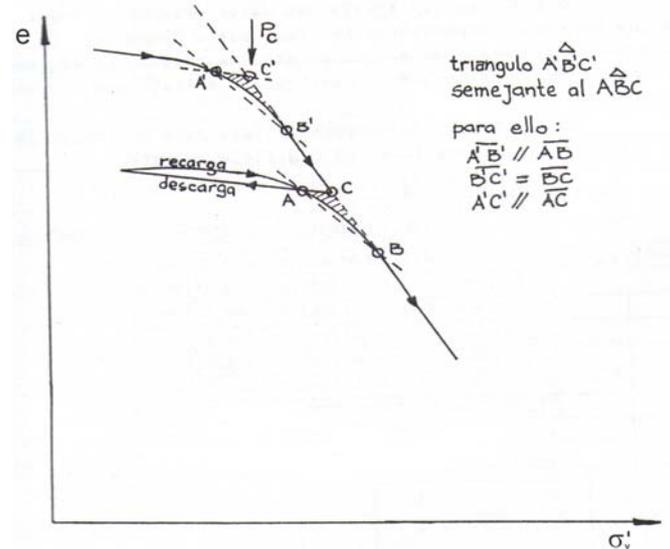


Figura 3. Determinación de  $p_c$  por Burmister.

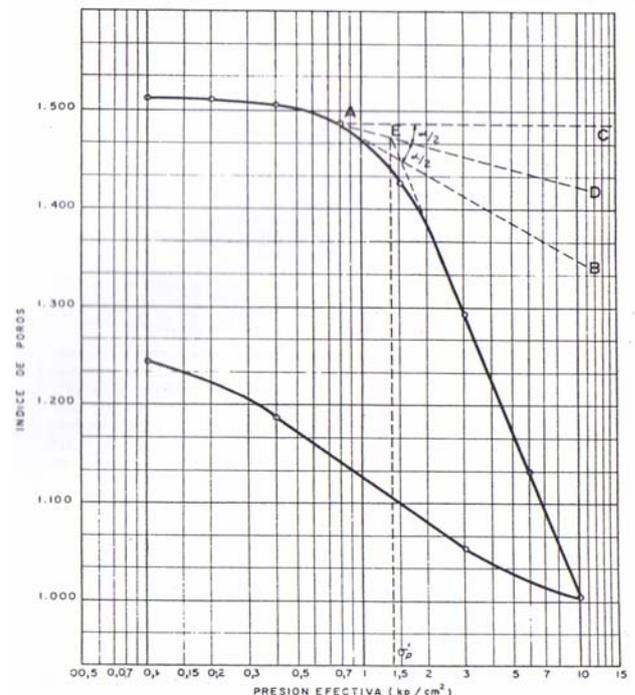


Figura 4. Determinación de  $p_c$  por Casagrande (1936).

#### 6 ÍNDICES

De la curva de la figura 5 se distinguen tres tramos diferentes: el primero corresponde al período de recompresión, luego le sigue una rama virgen y fi-

nalmente la curva de descarga. Se asocian a dichos tramos los índices de recompresión ( $C_r$ ), compresión ( $C_c$ ) y expansión ( $C_s$ ), respectivamente.

La obtención de dichos índices se resume al cálculo de la pendiente de las respectivas curvas.

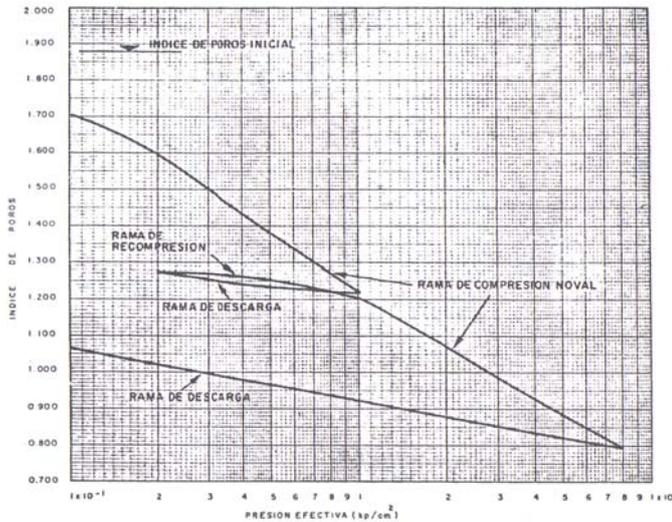


Figura 5. Tramos de la curva  $e - \log(\sigma'_v)$ .

## 7 MÓDULO EDMÉTRICO

Si llamamos  $\epsilon_v$  a la deformación vertical, se puede definir para cada presión vertical ( $\sigma_v$ ) y relación de vacíos ( $e_0$ ) el *módulo de compresión edométrico* como  $E_{edo} = \Delta\sigma_v / \Delta\epsilon_v$ .

La teoría de consolidación establece que, para arcillas normalmente consolidadas, el módulo edométrico se relaciona con el índice de compresión, la relación de vacíos y la presión vertical a través de la siguiente expresión:

$$E_{edo} = \ln(10) ((1+e_0) \sigma_v) / C_c \quad (1)$$

En descarga, se define:

$$E_{edo,ur} = \ln(10) ((1+e_0) \sigma_v) / C_r \quad (2)$$

No debe confundirse al módulo edométrico con el módulo de deformación lineal, el cual se obtiene mediante ensayos triaxiales de compresión simple donde la muestra no está restringida a dilatarse lateralmente.

## 8 CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

Finalizado el proceso de consolidación primaria, el suelo continúa deformándose lentamente.

Este cambio volumétrico secundario, en relación a la deformación debida a la consolidación primaria es generalmente muy pequeño, pudiéndose notar una vez terminada la consolidación primaria. Du-

rante el proceso de descarga se hace despreciable dicho efecto.

Sin embargo, adquiere importancia para incrementos de presiones muy pequeños (Newland y Allely 1960, Leonardo y Girault 1961, Barden 1968).

Cuando la velocidad de consolidación primaria es baja, por ejemplo para estratos de mucho espesor, pasa a ser comparable a la velocidad de consolidación secundaria. Como ésta no depende del espesor del estrato, se hace notoria su influencia.

## 9 CURVAS DE CONSOLIDACIÓN

Para representar la gráfica de cada variación de carga, visto también como los diferentes estados de carga durante el ensayo, se suele volcar en el eje de las abscisas un valor que represente al tiempo - raíz del tiempo, factor tiempo, logaritmo del tiempo - y las correspondientes deformaciones producidas, o bien el grado de consolidación, en el eje de coordenadas.

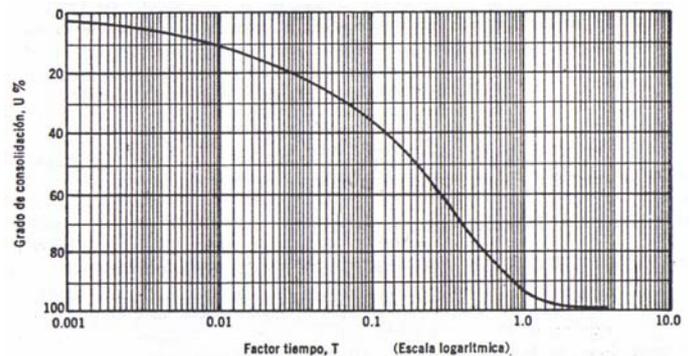


Figura 6. Curva teórica de Consolidación.

Los dos métodos más empleados para conocer el momento en el que se ha alcanzado comienzo y el final de la consolidación (primaria) y por ende cada uno de los porcentajes comprendidos entre el 0 y el 100% de consolidación, son el Método Logarítmico y el Método de Taylor.

Estos métodos son de gran utilidad, por ejemplo en un ensayo edométrico, para saber si ha finalizado la consolidación primaria y entonces poder modificar el estado de carga - incrementarla o comenzar la descarga.

### 9.1. Método logarítmico

Para obtener la deformación correspondiente al 100% de consolidación y el tiempo correspondiente, es necesario utilizar un gráfico en el que el tiempo se represente en forma semilogarítmica.

Se dibuja sobre el gráfico tangentes en la parte central y final de la curva. La intersección de ambas rectas se proyecta horizontalmente hacia el eje de coordenadas y se obtiene de esta manera la de-

formación correspondiente al 100% de consolidación.

Para conocer la deformación teórica para  $t=0$ , se selecciona un tiempo  $t_1$  y un tiempo  $t_2$ , tal que  $t_2=4t_1$ , se mide la ordenada "a" desde  $t_1$  hasta  $t_2$ , y se desplaza este mismo valor verticalmente por encima de  $t_1$ . Luego se dibuja una línea horizontal a partir de allí hasta intersectar el eje de deformaciones.

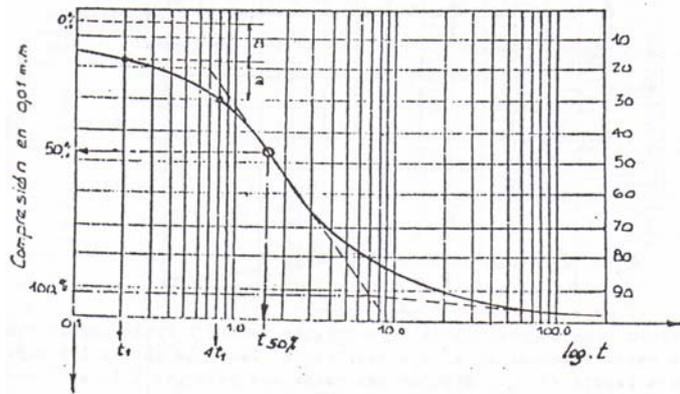


Figura 7. Método logarítmico.

La eficiencia de éste método depende mucho de que la curva de consolidación de apegue a la curva teórica.

### 9.2. Método de Taylor

Si la curva de consolidación graficada no presenta una buena definición de los quiebres y las inflexiones, resulta de gran utilidad el método alternativo desarrollado por D. W. Taylor.

Este método trabaja sobre un gráfico en el que se coloca la raíz del tiempo en el eje de abscisas. De él se obtienen la deformación para el 0 y 90% de consolidación, y a partir de ellos se calcula la correspondiente al final de la consolidación primaria.

Primero, se prolonga el tramo recto de la curva hasta intersectar los ejes. El punto en el que corta al eje de abscisas corresponde al 0%. Luego, partiendo de este punto se traza otra recta con sus abscisas incrementadas 1.15 veces. Esta segunda línea corta a la curva en un punto al que corresponde el 90% de consolidación primaria.

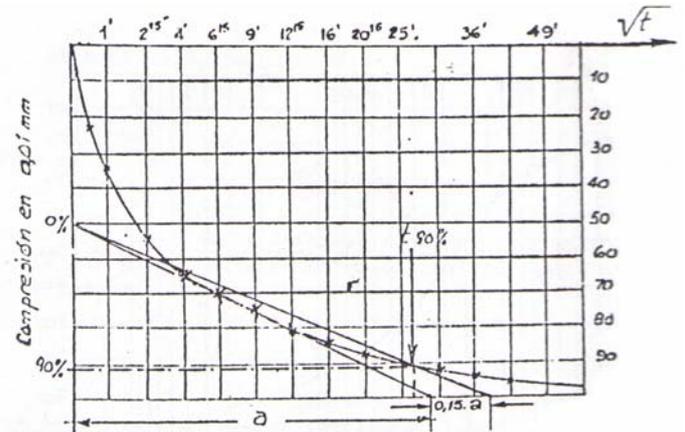


Figura 8. Método de Taylor.

## 10 FACTORES QUE PUEDEN PROVOCAR ERRORES

### 10.1. Efecto de la fricción lateral

La influencia de la fricción entre la muestra de suelo y el anillo disminuye al aumentar la carga y al llegar a la presión de preconsolidación se mantiene relativamente constante (Leonardo y Girault 1961, Monden 1961). Además, según lo que observó Taylor, por encima de dicha presión la fricción en suelos inalterados es de aproximadamente el doble que en muestras amasadas (Monden 1969, Akroyd 1957).

Para evitar los efectos de la fricción se recomienda cubrir las paredes internas del anillo con grasa de silicona (Barden y Berry 1965, Burland y Roscoe 1969).

En el trabajo realizado para esta tesis, no fue posible la utilización de la silicona ya que dificultaba la extracción de la muestra de suelo con los procedimientos que se describen a continuación en el capítulo IV.

Sin embargo, para permanecer dentro de límites de tolerancia adecuados, se trabajó con una relación diámetro-altura del anillo mayor a 2.5.

### 10.2. Magnitud de la carga aplicada

Al comenzar el ensayo, se recomienda la aplicación de una presión de pequeña magnitud con el objeto de provocar un acomodamiento del cabezal con la superficie de la muestra y el aro edométrico.

Al momento de escoger la magnitud de los incrementos de carga que se planeen aplicar, se debe tener en cuenta las siguientes limitaciones:

- Si la magnitud de la carga es muy pequeña, puede ocurrir que el efecto de la consolidación secundaria opaque los de la consolidación primaria.
- Si la magnitud de la carga es demasiado importante, se corre el riesgo que la muestra fluya a

través del espacio libre entre la piedra porosa y el anillo.

### *10.3. Fuentes comunes de errores*

Las muestras deben estar lo más inalteradas que sea posible; para ello se debe tener especial cuidado cuando se extraen y se enrasan; evitar por ejemplo golpes, pérdida de humedad y fisuras. Sin embargo, aún siendo extremadamente cuidadosos en la obtención de las muestras, resulta inevitable que sufran una ligera deformación ya que se pierde el confinamiento que poseían en el terreno.

Por otro lado, puede ocurrir que las muestras de suelo sobre las cuales se determinan el peso específico y los límites líquido y plástico, resulten no ser representativas de la muestra ensayada a consolidación.

Es importante orientar la muestra de manera que la dirección en que se encuentre en la naturaleza coincida con la de la presión aplicada. Y además, evitar excentricidades de las cargas actuantes sobre la muestra.

Con respecto a las consideraciones a tener en cuenta durante el ensayo, debe tenerse especial cuidado al colocar las pesas en la ménsula de carga para evitar posibles distorsiones debido al impacto.

## IV. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 1 EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS

Se extrajeron muestras inalteradas de la obra de ampliación de la línea "H" del Subterráneo de Buenos Aires, a una profundidad aproximada de 20 metros. Con el fin de reducir la manipulación de la muestra y su consecuente alteración, se fabricaron varios aros edométricos completos - con cabezales de acero - provistos de un lado afilado que permitió la extracción por hincada directa en superficies expuestas de la formación Pampeano. La hincada de los aros se materializó mediante la aplicación de una fuerza estática provista por el sistema hidráulico de una retroexcavadora. Según el procedimiento establecido, inmediatamente después de terminada la hincada se remueve la dama que rodea al aro, se separa el aro de la tierra circundante, se lo limpia y sella con film de polietileno autoadherente para protección de la humedad natural.

El empleo de aros grandes reduce los errores de fricción perimetral entre suelo y molde y mejora la precisión de la medición de la respuesta mecánica del suelo.

En la Tabla 2 se muestran las dimensiones principales de los objetos fabricados y en la Figura 9 se muestra el esquema de un aro edométrico.

Tabla 2. Dimensiones de los moldes utilizados

	Altura mm	Espesor mm	Diámetro mm
Aros	51	2.0	101
Cabezales	20		100

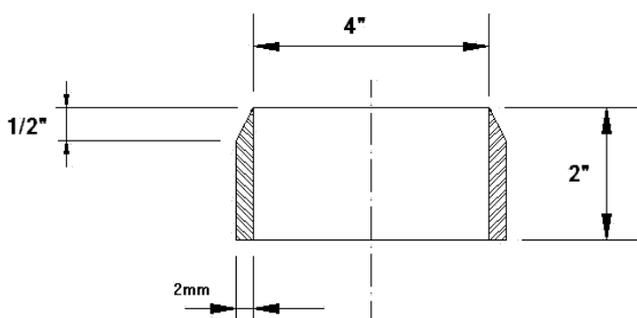


Figura 9. Aros edométricos utilizados para la extracción y ensayo de las muestras.

### 2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras fueron enrasadas y recortadas dentro del aro hasta una altura de 22 a 25 mm mediante herramientas de corte fabricadas a tal efecto.

Los nódulos calcáreos que sobresalían de la altura de enrase fueron removidos y reemplazados por suelo compactado.

La saturación de las muestras se efectuó a carga constante por imbibición directa de agua desaireada a flujo descendente con salida a presión atmosférica, siendo la carga hidrostática del orden de dos metros.

Se forzó el pasaje de dos litros de agua desaireada, lo que demandó entre cinco y veinte horas, en función de la permeabilidad de las muestras.

### 3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La toma de datos se automatizó, a partir del cuarto ensayo, mediante la instalación de una *webcam* frente a cada flexímetro y la adaptación del programa de vigilancia remota de código libre Motion (Motion 2007).

Las cámaras fotografiaban el flexímetro a intervalos regulares ajustados por el operador. Esta actividad se desarrolló en forma conjunta con O. Ledesma (2007). En las Figuras 10 y 11 se muestran vistas del banco edométrico y el sistema de adquisición de datos.



Figura 10. Vista del banco edométrico.



Figura 11. Sistema de adquisición de datos.

Entre las ventajas obtenidas a partir de dicho mejoramiento del método de registro de datos se nombran las siguientes:

- Optimización del tiempo de investigación.

- Dado que aumenta la cantidad de datos registrados y por lo tanto de puntos a graficar, las curvas de consolidación son más precisas y representativas. De esta manera se obtienen mejores resultados.
- Disminuyen los errores debido al registro de datos por observación directa del operador, como por ejemplo el desfase entre el desplazamiento observado y el tiempo correspondiente registrado. La influencia es mayor en los primeros puntos de la curva ya que la relación entre variación de tiempo y variación de desplazamiento es mucho menor.

#### 4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO ENSAYADO

Según el análisis de cada una de las muestras, los suelos clasifican como ML, CL, MH o CH, con predominancia de suelos MH. Los ensayos de clasificación presentan alta dispersión debido a la existencia de pequeños nódulos de carbonato de calcio que afectan la ejecución, especialmente en el caso del límite plástico. La molienda forzada de los nódulos se descarta porque altera el valor medido.

Se trabajó con 13 muestras inalteradas (C3 a C15) y a fines comparativos también se realizaron ensayos sobre suelo amasado (C1) y compactado en molde Proctor Standard, con una energía de compactación de 15 golpes de martillo de 2.25 kg de masa (C2). Las características de las muestras ensayadas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades físicas de las muestras.

Ensayo	$\omega$	$e_o$	$e_f$	$LL$	$LP$
C1	42.5%	1.080	0.730	56%	41%
C2	33.0%	1.091	1.056	50%	32%
C3	41.2%	1.273	1.050	56%	33%
C4	28.1%	1.070	0.917	46%	30%
C5	32.0%	1.100	0.913	56%	33%
C6	34.0%	1.345	0.982	49%	34%
C7	32.6%	0.957	0.962	42%	28 %
C8	34.3%	1.085	0.804	45%	28%
C9	32.8%	1.050	0.995	56%	33%
C10	32.8%	1.223	0.873	56%	33%
C11	32.0%	0.987	0.952	59%	37%
C12	32.0%	1.273	1.065	59%	37%
C13	32.0%	1.207	0.730	59%	37%
C14	34.3%	1.378	1.056	55%	33%
C15	32.0%	1.167	1.050	59%	37%

La notación es la siguiente:  $\omega$  es la humedad de amasado para el ensayo C1, la humedad de compactación para el C2 y la humedad natural para C3 a C15,  $e_o$  es la relación de vacíos al inicio del ensayo,  $e_f$  es la relación de vacíos al final del ensayo,

yo,  $LL$  es el límite líquido,  $LP$  es el límite plástico.

#### 5 ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Una vez colocada la célula edométrica en posición, se ajustaba la posición de la palanca de carga con el objeto de asegurarse de tener todo el recorrido necesario durante el ensayo. Las mismas precauciones se tomaron con respecto al elemento de medición utilizado.

La carga se aplicó mediante un sistema de palancas cuya constante de amplificación es de 11.2586.

##### 5.1 Ensayo n°1 (C1) – Muestra amasada

En este primer ensayo se realizaron tanto incrementos de carga como también una descarga intermedia, una recarga hasta alcanzar una presión vertical sobre la muestra de 1243 KPa y finalmente la descarga final. Los valores de los escalones de carga y descarga se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	34.60
2	Segundo escalón de carga	98.21
3	Tercer escalón de carga	225.44
4	Cuarto escalón de carga	479.88
5	Primer escalón de descarga	225.44
6	Segundo escalón de descarga	98.21
7	Tercer escalón de descarga	34.60
8	Primer escalón de recarga	257.94
9	Segundo escalón de recarga	479.88
10	Quinto escalón de carga	734.32
11	Sexto escalón de carga	988.76
12	Séptimo escalón de carga	1243.2
13	Primer escalón de descarga final	607.1
14	Segundo escalón de descarga final	0

El método utilizado para calcular el tiempo en el que se alcanza el 100% de la consolidación primaria, en principio fue el Método Logarítmico. De esta manera se determinaba el momento en el que se pasaba al siguiente escalón de carga o descarga.

A continuación se representaron las curvas correspondientes a la variación de la carga aplicada. El gráfico de la Figuras 12 se construyó durante el ensayo, mientras que el de la Figura 13, se hizo a posteriori como herramienta de verificación una vez que se optó por utilizar el Método de Taylor en lugar del Logarítmico. Esta decisión se realizó cuando se observó que en los primeros 3 ensayos, para llegar a visualizar un leve cambio de curvatura en el gráfico desplazamiento-log(t), se requería

dejar consolidar la muestra un tiempo excesivamente extenso.

Sin embargo, una vez comparados los gráficos de ambos métodos se llegó a la conclusión que la no aparición de un cambio de curvatura en el gráfico función del  $\log(t)$  no implicaba la no finalización de la consolidación primaria.

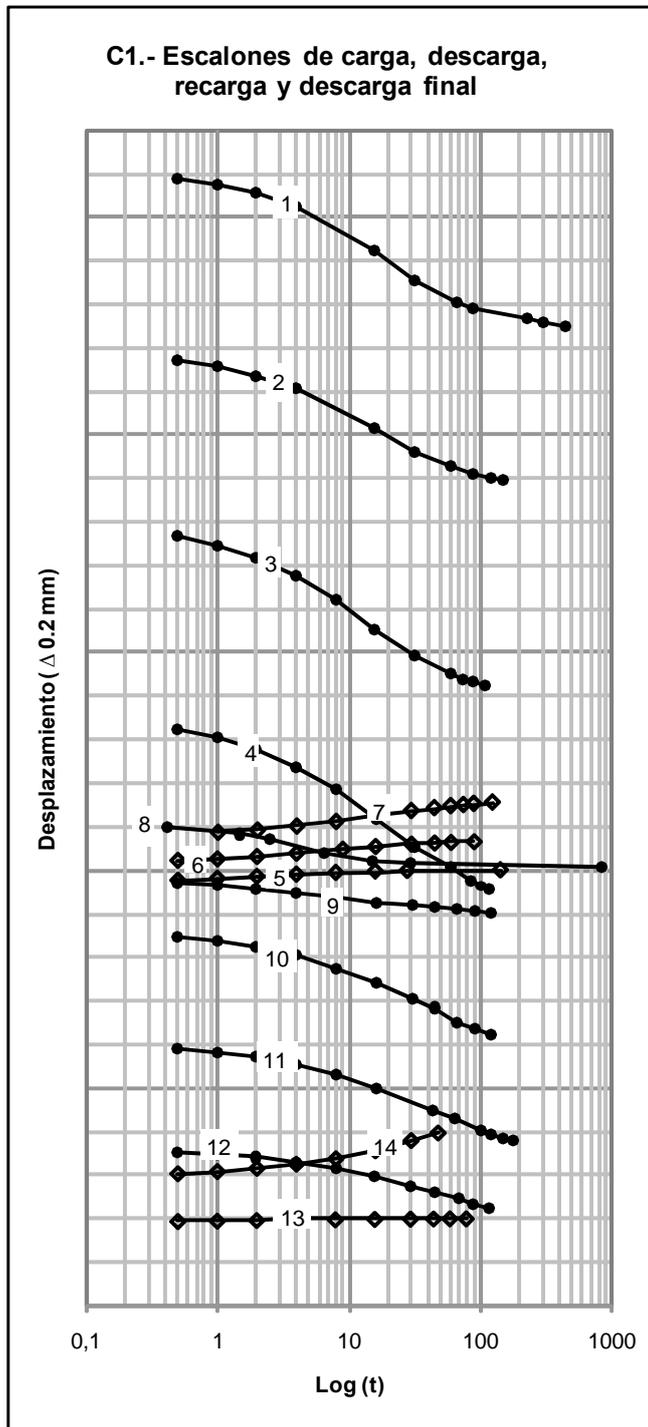


Fig. 12. C1.-Curvas de consolidación en función del Log (t).

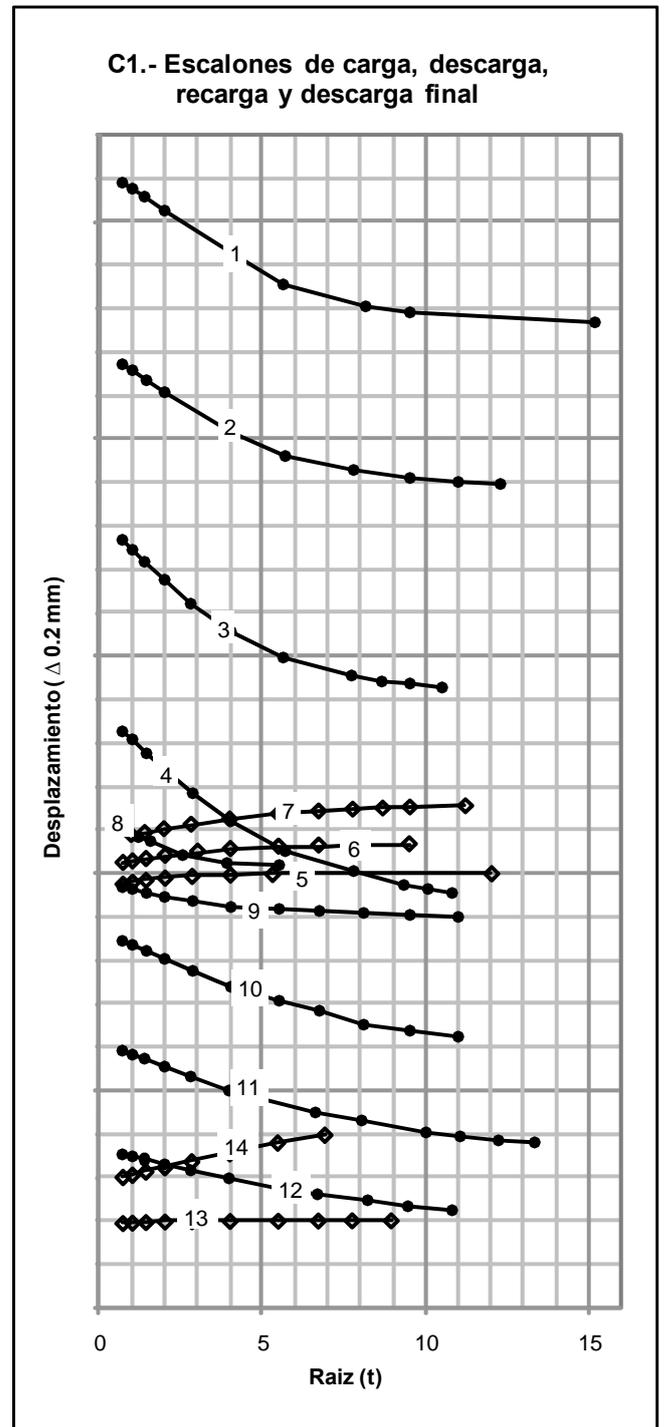


Fig. 13. C1.-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

## 5.2 Ensayo n°2 (C2) – Muestra Compactada

El método utilizado para calcular el tiempo en el que se alcanza el final de la consolidación primaria fue el Método Logarítmico. Luego se aplicó el Método de Taylor como un medio de verificación.

Se describen, mediante la Tabla 5, los pasos realizados en el ensayo y las tensiones verticales alcanzadas ( $\sigma_v$ ).

Tabla 5. Descripción de la variación de la carga aplicada.

Nº	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	113.59
2	Segundo escalón de carga	283.97
3	Tercer escalón de carga	511.15
4	Cuarto escalón de carga	738.33
5	Quinto escalón de carga	1079.11
6	Primer escalón de descarga final	511.15
7	Segundo escalón de descarga final	0

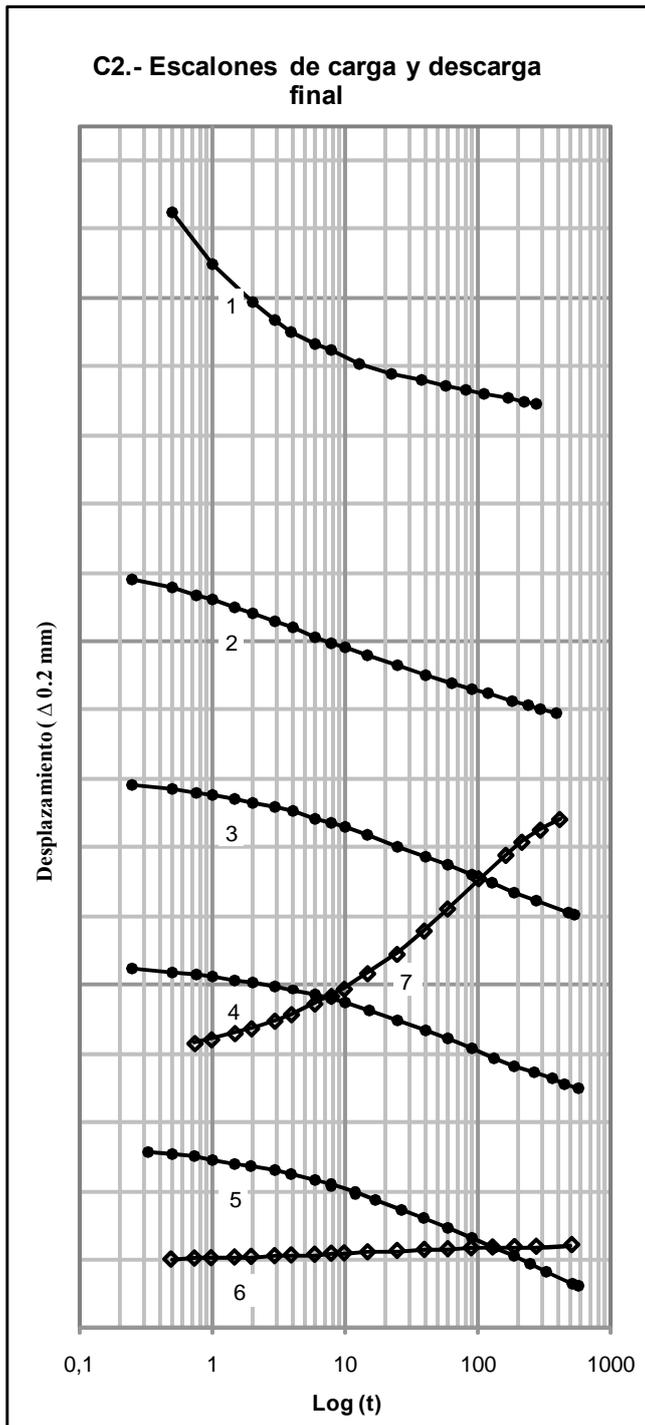


Fig. 14. C2-Curvas de consolidación en función del Log (t).

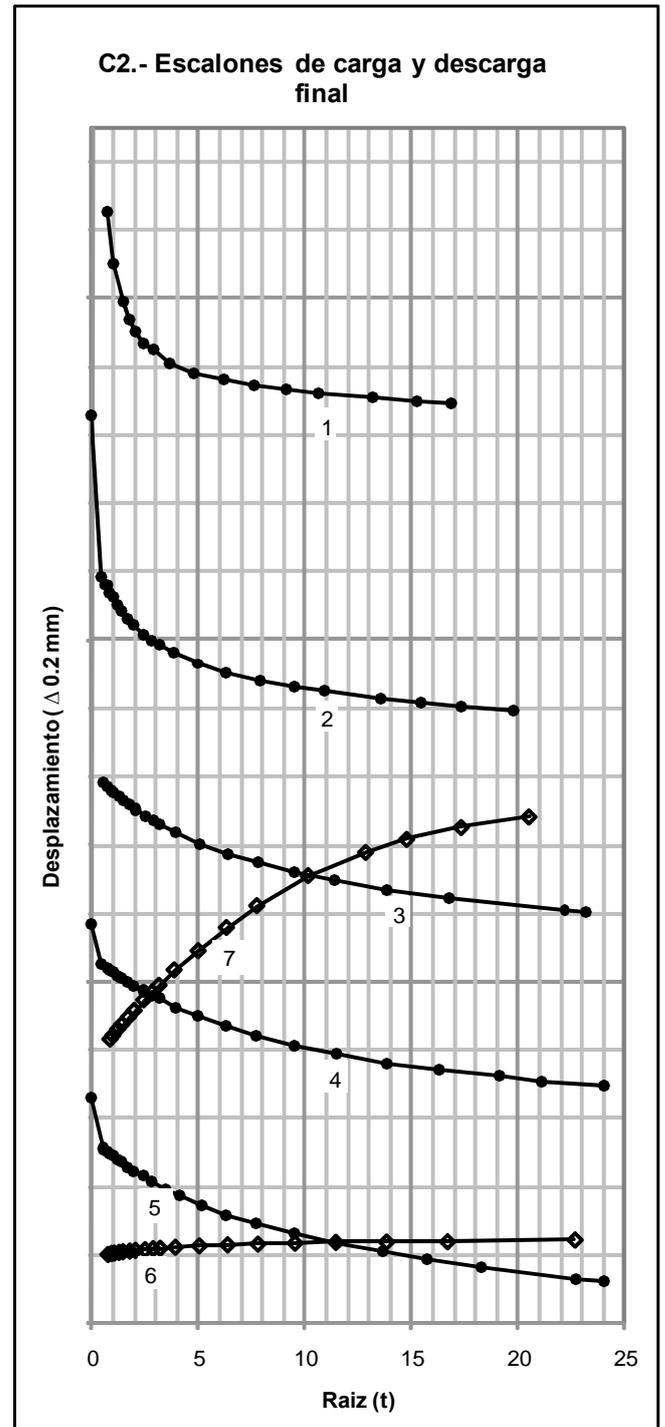


Fig. 15. C2-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

### 5.3 Ensayo n°3 (C3) – Muestra inalterada

Este es el primer ensayo de consolidación realizado sobre una muestra inalterada para el presente trabajo de investigación.

Para calcular el tiempo en el que se alcanza el final de la consolidación primaria se utilizó el Método Logarítmico y a posteriori se utilizó el Método de Taylor como verificación.

Tabla 6. Descripción de la variación de la carga aplicada.

Nº	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	66.47
2	Segundo escalón de carga	193.68
3	Tercer escalón de carga	448.10
4	Cuarto escalón de carga	829.72
5	Quinto escalón de carga	1333.52
6	Primer escalón de descarga final	575.31
7	Segundo escalón de descarga final	0

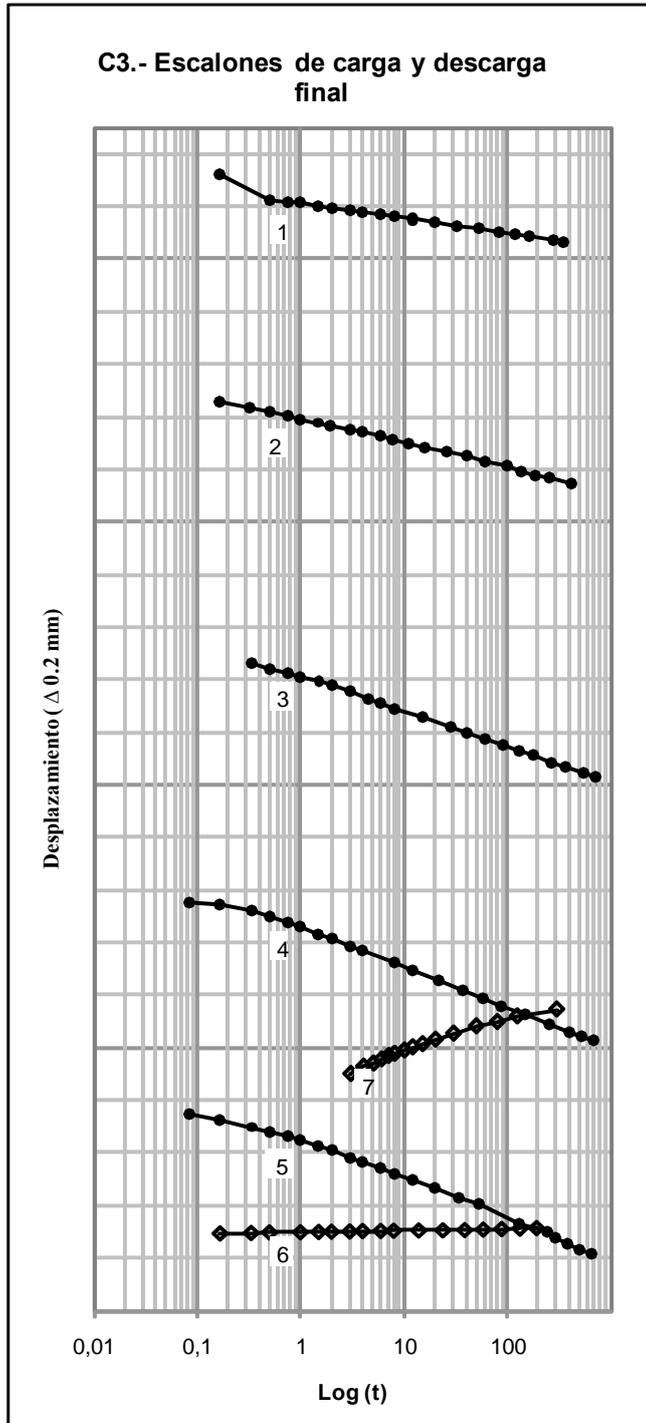


Fig. 16. C3-Curvas de consolidación en función del Log (t).

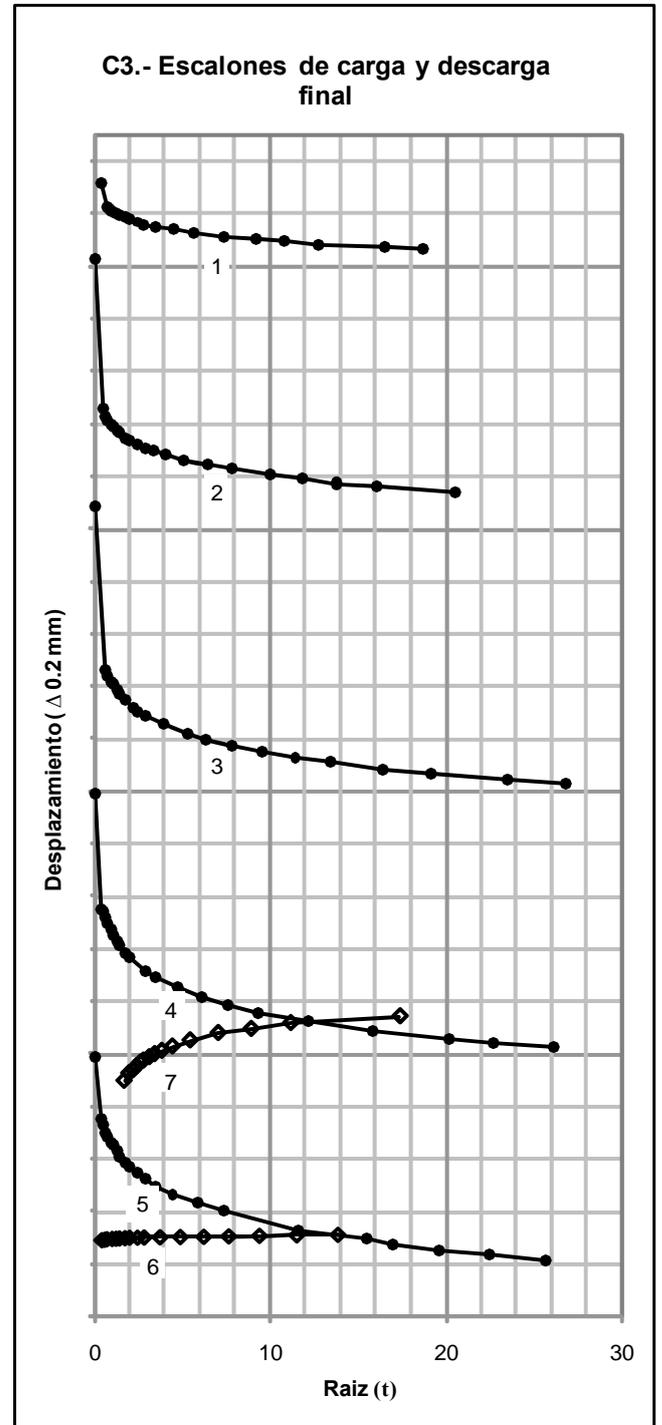


Fig. 17. C3-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

#### 5.4 Ensayo n°4 (C4) - Muestra inalterada

A partir de éste ensayo, se implementó el nuevo sistema de adquisición de datos, antes descrito.

Tabla7. Descripción de la variación de la carga aplicada.

Nº	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	63.61
2	Segundo escalón de carga	190.83
3	Tercer escalón de carga	445.27
4	Cuarto escalón de carga	826.93
5	Quinto escalón de carga	1081.38
6	Sexto escalón de carga	1335.82
7	Primer escalón de descarga final	890.55
8	Segundo escalón de descarga final	0

Como ya se ha dicho, a partir de este ensayo se comenzó a utilizar el Método de Taylor como herramienta más eficiente para determinar el fin de un escalón y el comienzo del siguiente.

### 5.5 Ensayo n°5 (C5) - Muestra inalterada

Tabla 8. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	479.53
5	Quinto escalón de carga	799.21
6	Sexto escalón de carga	1054.96
7	Séptimo escalón de carga	1342.67
-	Primer escalón de descarga final	799.21
8	Segundo escalón de descarga final	415.59
9	Tercer escalón de descarga final	0

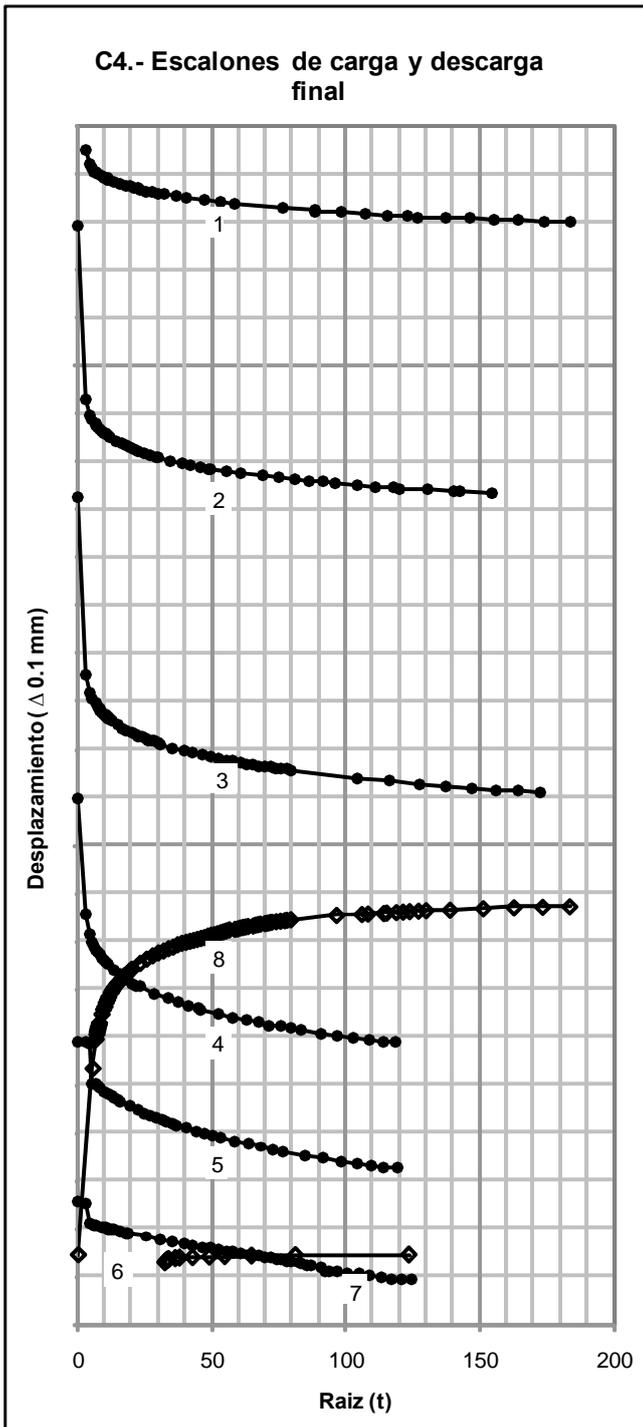


Fig. 18. C4.-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

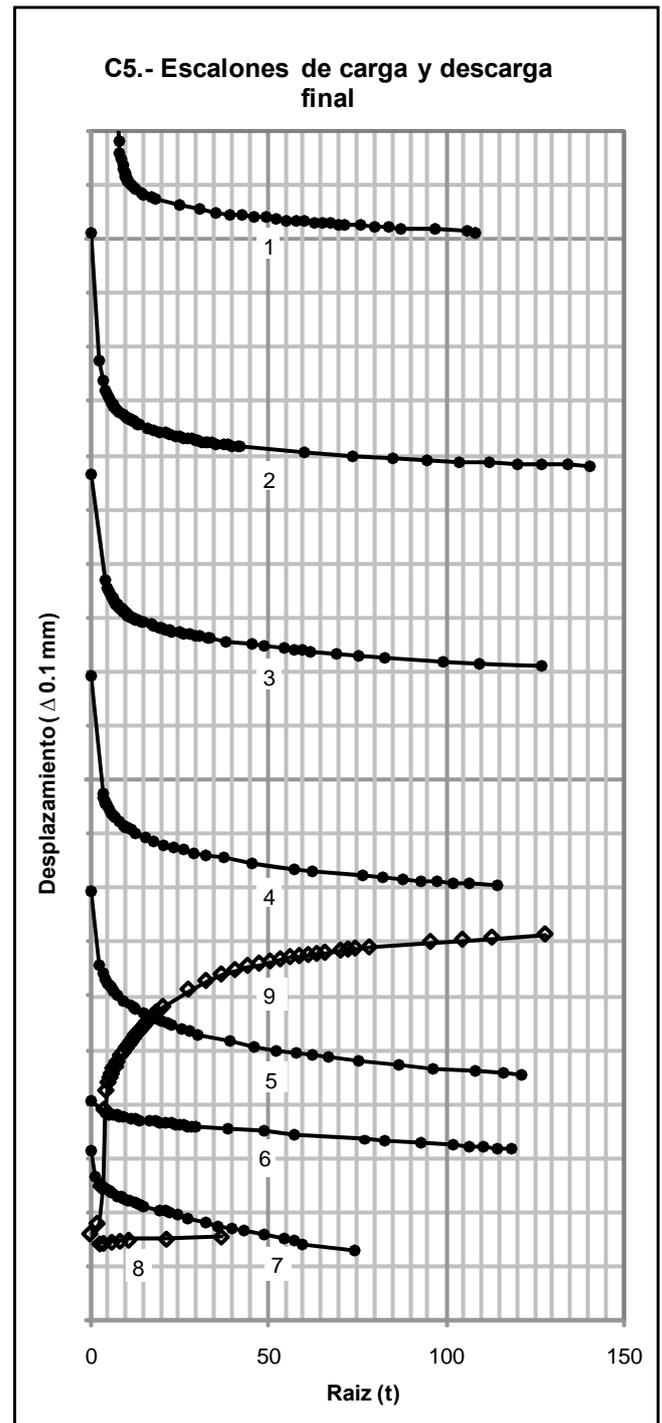


Fig. 19. C5.-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

Observación: como consecuencia del primer escalón de descarga no se registró desplazamiento alguno, es decir, la aguja del flexímetro utilizado como elemento de medición no se movió.

### 5.6 Ensayo n°6 (C6) - Muestra inalterada

Tabla 9. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	63.94
3	Tercer escalón de carga	127.87
4	Cuarto escalón de carga	191.81
5	Quinto escalón de carga	319.68
6	Sexto escalón de carga	447.56
7	Séptimo escalón de carga	703.31
8	Octavo escalón de carga	959.05
9	Noveno escalón de carga	1342.67
-	Primer escalón de descarga final	959.05
-	Segundo escalón de descarga final	447.56
-	Tercer escalón de descarga final	0

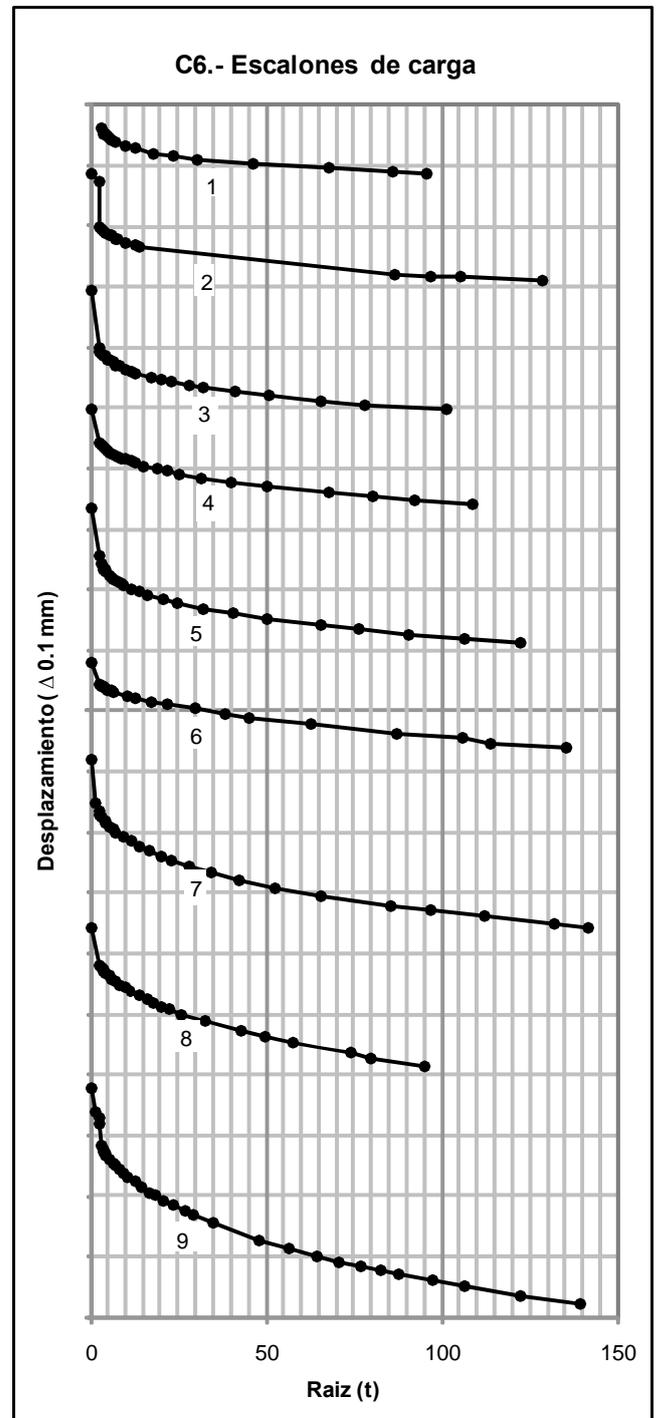


Fig. 20. C6-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

### 5.7 Ensayo n°7 (C7) - Muestra inalterada

Tabla 10. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	415.59
5	Quinto escalón de carga	617.34
6	Sexto escalón de carga	927.08
7	Séptimo escalón de carga	1310.71
-	Primer escalón de descarga final	927.08
-	Segundo escalón de descarga final	479.53
-	Tercer escalón de descarga final	0

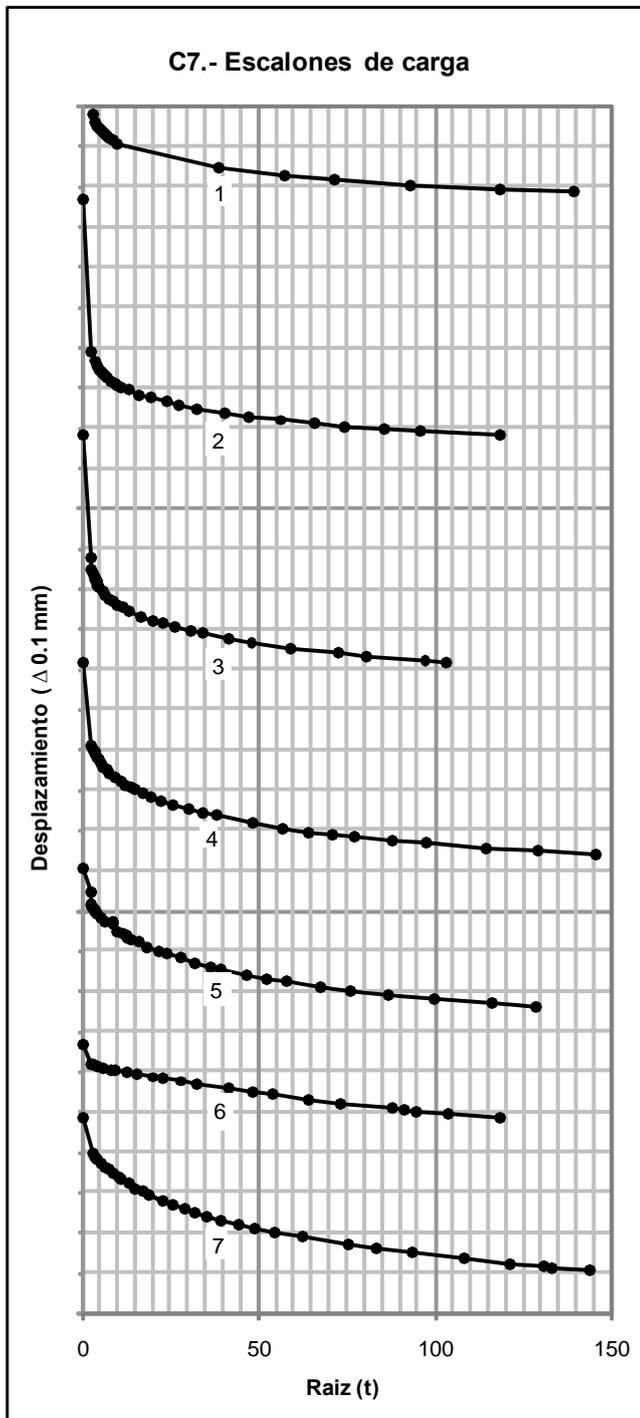


Fig. 21. C7-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

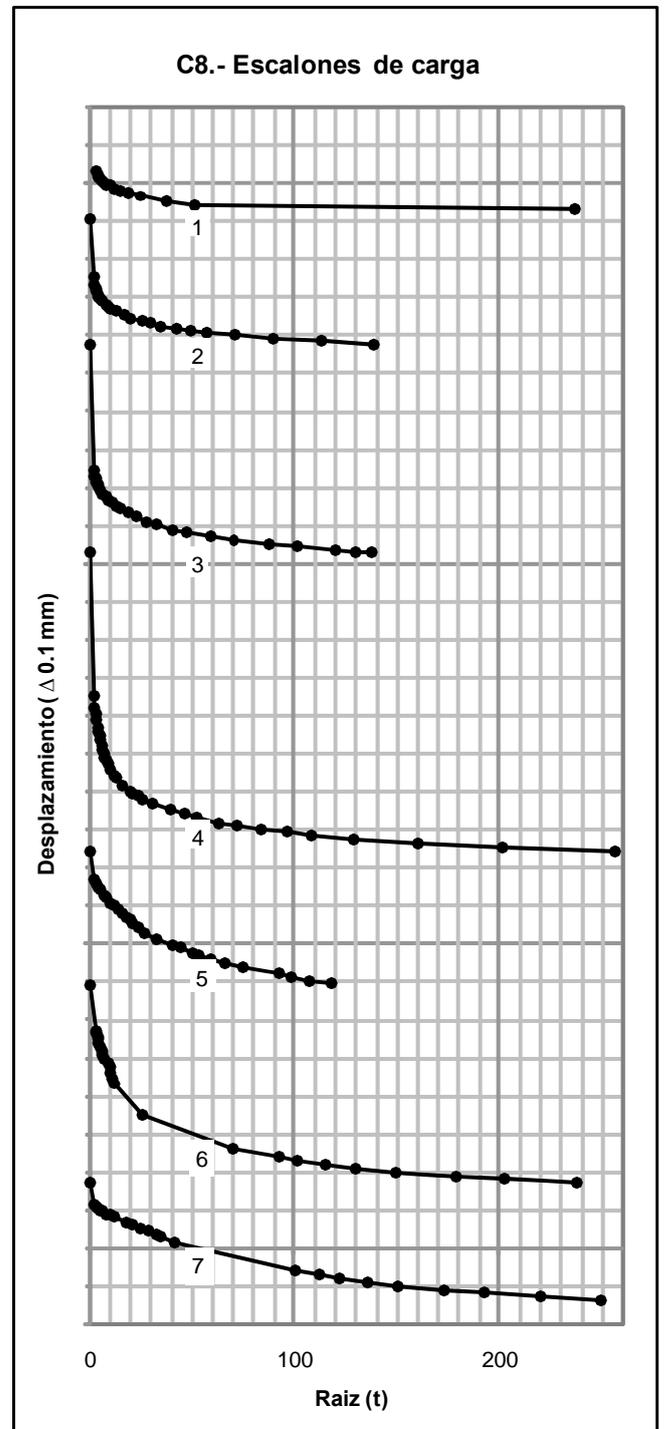


Fig. 22. C8-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

### 5.8 Ensayo n°8 (C8) - Muestra inalterada

Tabla 11. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	415.59
5	Quinto escalón de carga	735.27
6	Sexto escalón de carga	1118.90
7	Séptimo escalón de carga	1502.52
-	Primer escalón de descarga final	991.02
-	Segundo escalón de descarga final	479.53
-	Tercer escalón de descarga final	0

### 5.9 Ensayo n°9 (C9) - Muestra inalterada

Tabla 12. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	479.53
5	Quinto escalón de carga	735.27
6	Sexto escalón de carga	1118.90
7	Séptimo escalón de carga	1502.52
-	Primer escalón de descarga final	991.02
-	Segundo escalón de descarga final	479.53
-	Tercer escalón de descarga final	0

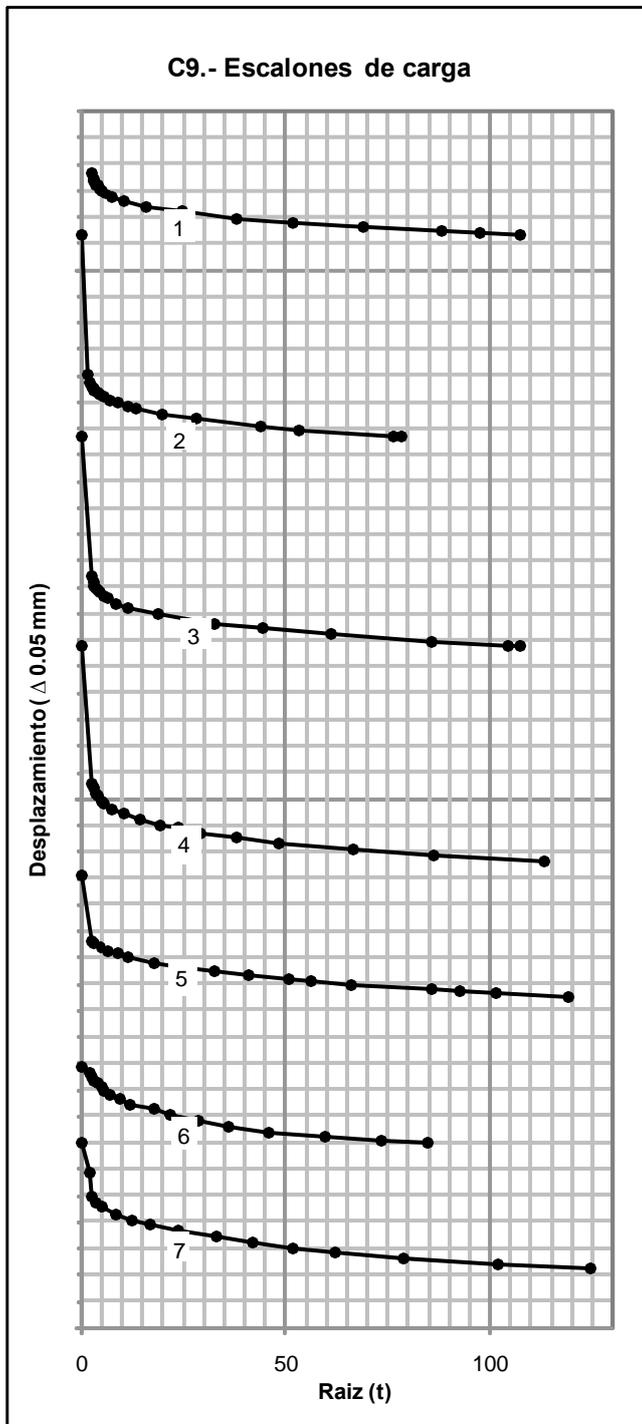


Fig. 23. C9-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

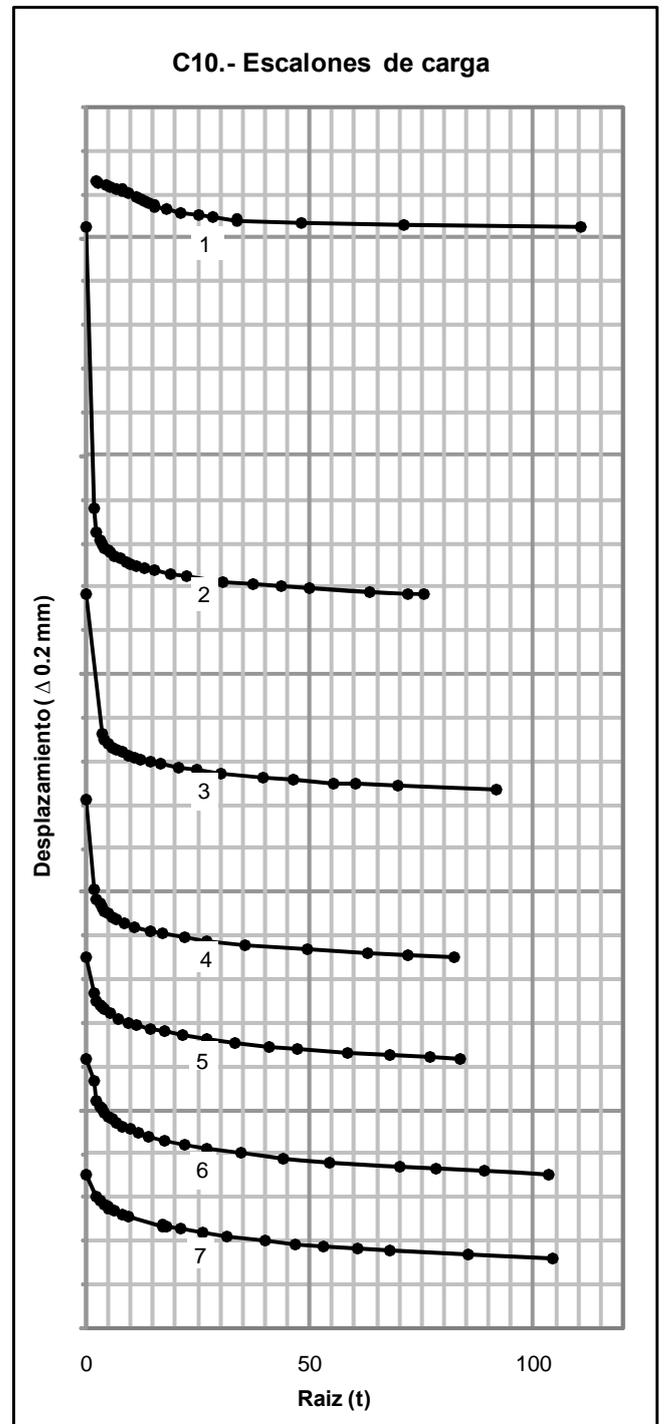


Fig. 24. C10-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

### 5.10 Ensayo n°10 (C10) - Muestra inalterada

Tabla 13. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	479.53
5	Quinto escalón de carga	735.27
6	Sexto escalón de carga	1118.90
7	Séptimo escalón de carga	1502.52
-	Primer escalón de descarga final	1118.90
-	Segundo escalón de descarga final	543.46
-	Tercer escalón de descarga final	0

### 5.11 Ensayo n°11 (C11) - Muestra inalterada

Tabla 14. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	479.53
5	Quinto escalón de carga	735.27
6	Sexto escalón de carga	1118.90
7	Séptimo escalón de carga	1502.52
-	Primer escalón de descarga final	991.02
-	Segundo escalón de descarga final	479.53
-	Tercer escalón de descarga final	0

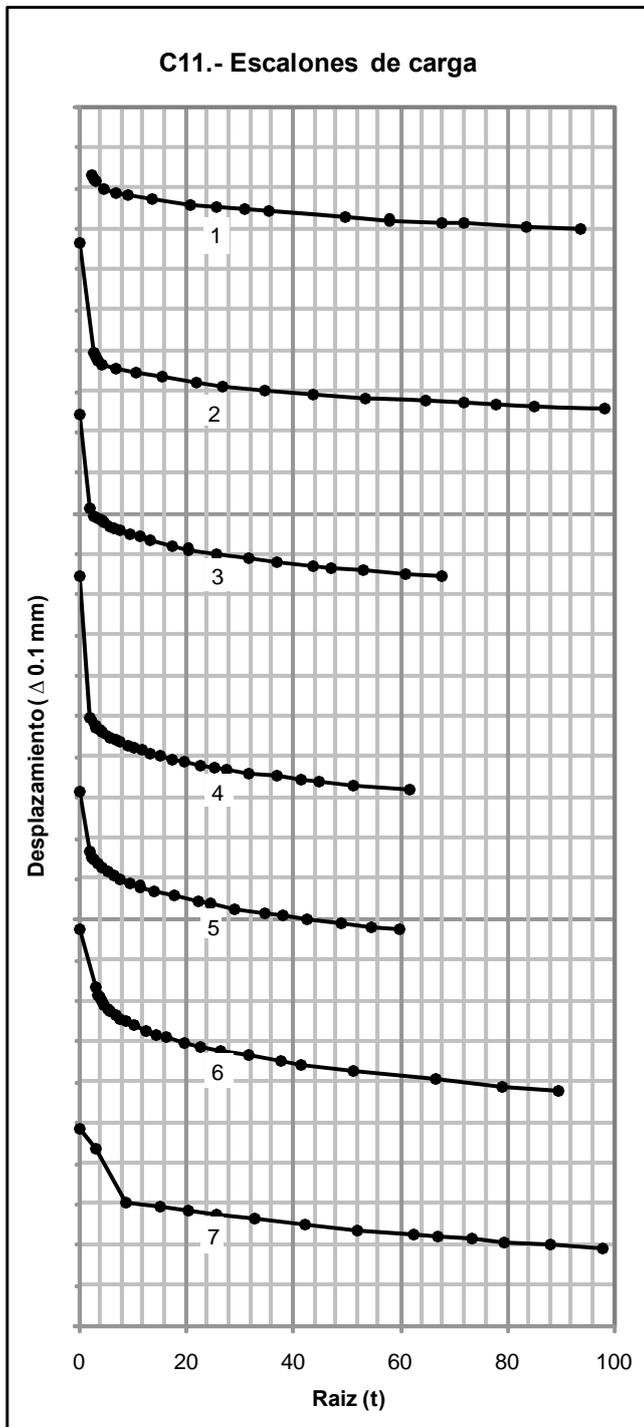


Fig. 25. C11-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

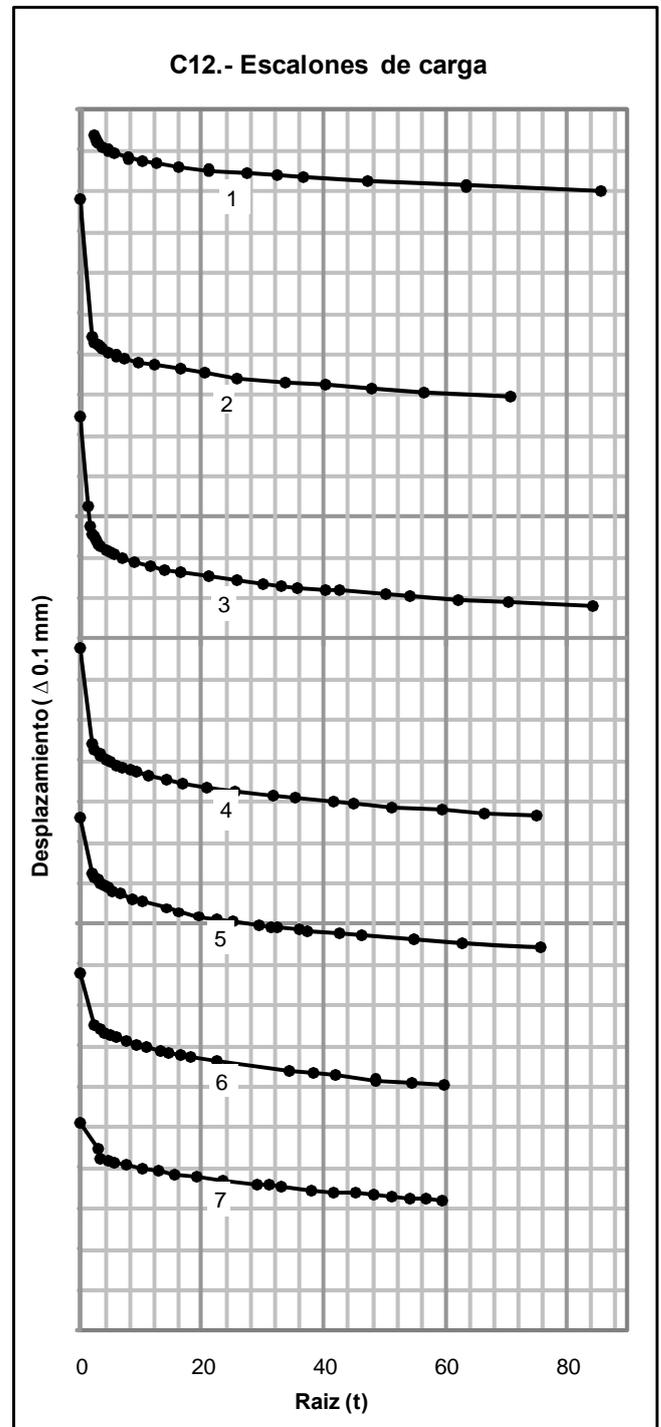


Fig. 26. C12-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

### 5.12 Ensayo n°12 (C12) - Muestra inalterada

Tabla 15. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	29.04
2	Segundo escalón de carga	87.12
3	Tercer escalón de carga	203.28
4	Cuarto escalón de carga	435.59
5	Quinto escalón de carga	667.91
6	Sexto escalón de carga	1016.38
7	Séptimo escalón de carga	1364.86
-	Primer escalón de descarga final	900.23
-	Segundo escalón de descarga final	435.59
-	Tercer escalón de descarga final	0

### 5.13 Ensayo n°13 (C13) - Muestra inalterada

Tabla 16. Descripción de la variación de la carga aplicada.

N°	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	29.04
2	Segundo escalón de carga	87.12
3	Tercer escalón de carga	203.28
4	Cuarto escalón de carga	435.59
5	Quinto escalón de carga	667.91
6	Sexto escalón de carga	1016.38
7	Séptimo escalón de carga	1364.86
-	Primer escalón de descarga final	900.23
-	Segundo escalón de descarga final	435.59
-	Tercer escalón de descarga final	0

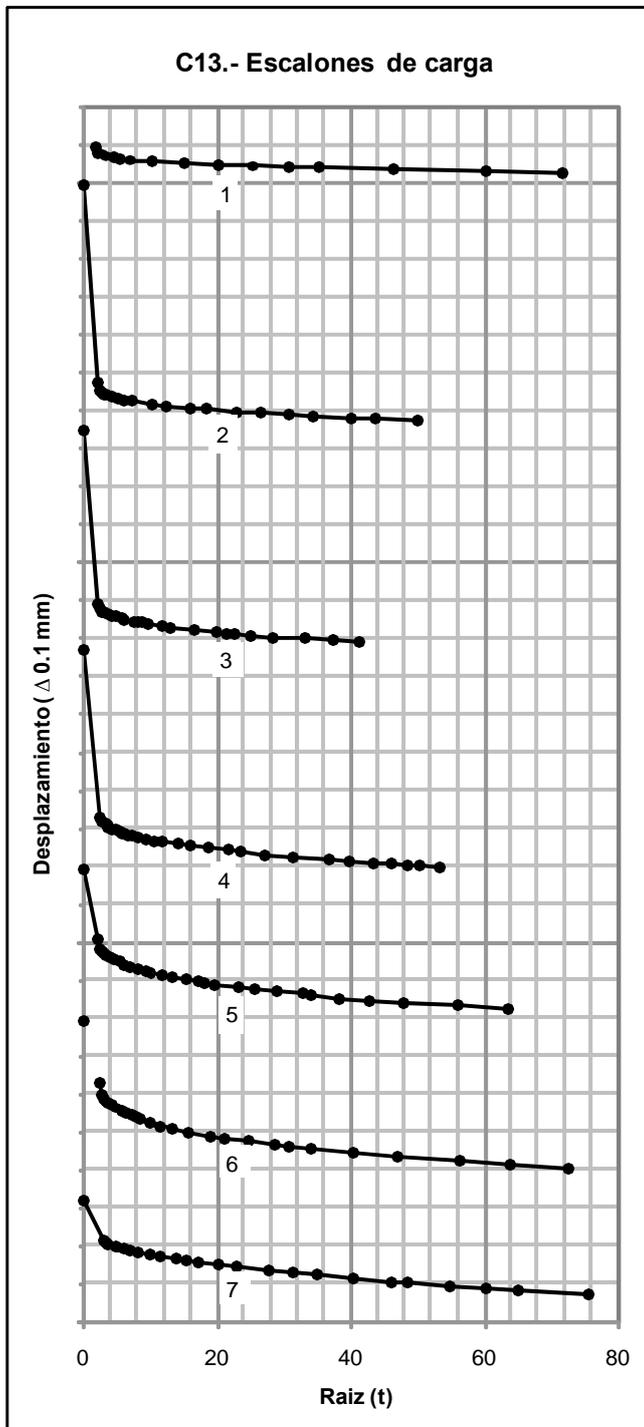


Fig. 27. C13-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

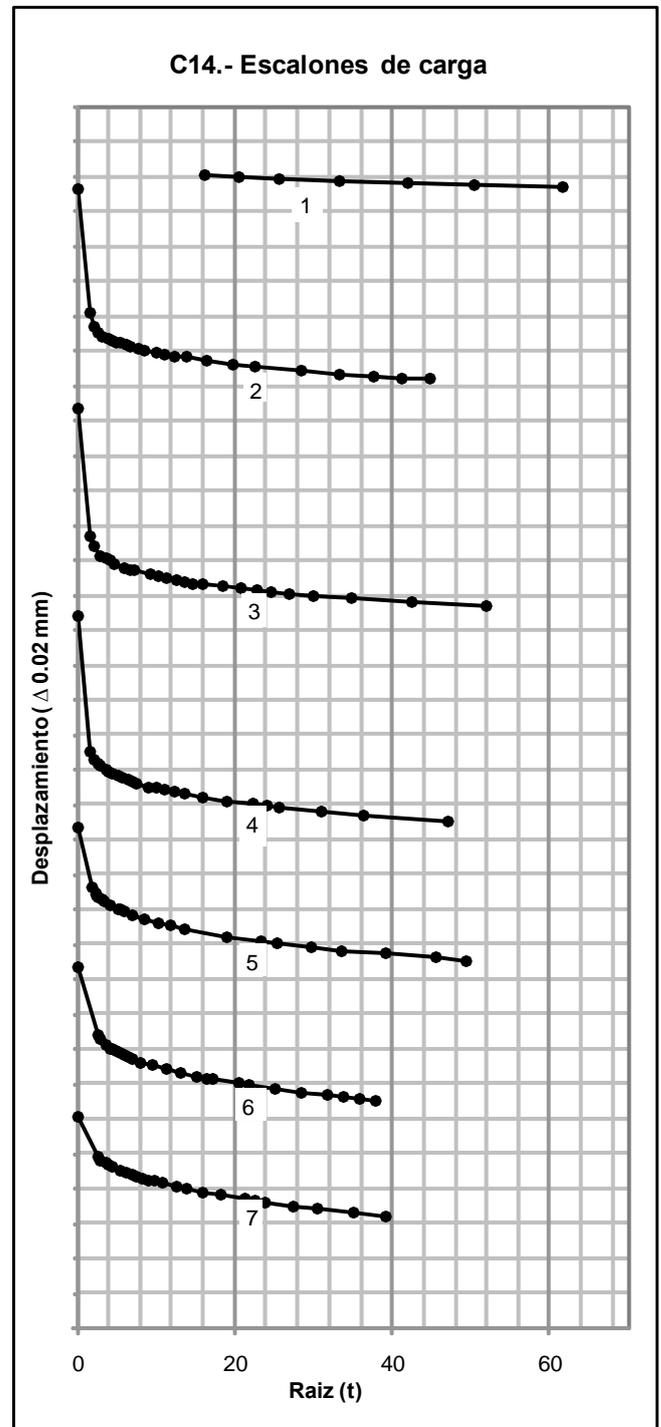


Fig. 28. C14-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

#### 5.14 Ensayo n°14 (C14) - Muestra inalterada

Tabla 17. Descripción de la variación de la carga aplicada.

Nº	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	31.97
2	Segundo escalón de carga	95.91
3	Tercer escalón de carga	223.78
4	Cuarto escalón de carga	479.53
5	Quinto escalón de carga	735.27
6	Sexto escalón de carga	1118.90
7	Séptimo escalón de carga	1502.52
-	Primer escalón de descarga final	991.02
-	Segundo escalón de descarga final	479.53
-	Tercer escalón de descarga final	0

#### 5.15 Ensayo n°15 (C15) - Muestra inalterada

Tabla 18. Descripción de la variación de la carga aplicada.

Nº	Descripción	$\sigma_v$ (KPa)
1	Primer escalón de carga	29.04
2	Segundo escalón de carga	87.12
3	Tercer escalón de carga	203.28
4	Cuarto escalón de carga	435.59
5	Quinto escalón de carga	667.91
6	Sexto escalón de carga	1016.38
7	Séptimo escalón de carga	1364.86
-	Primer escalón de descarga final	900.23
-	Segundo escalón de descarga final	435.59
-	Tercer escalón de descarga final	0

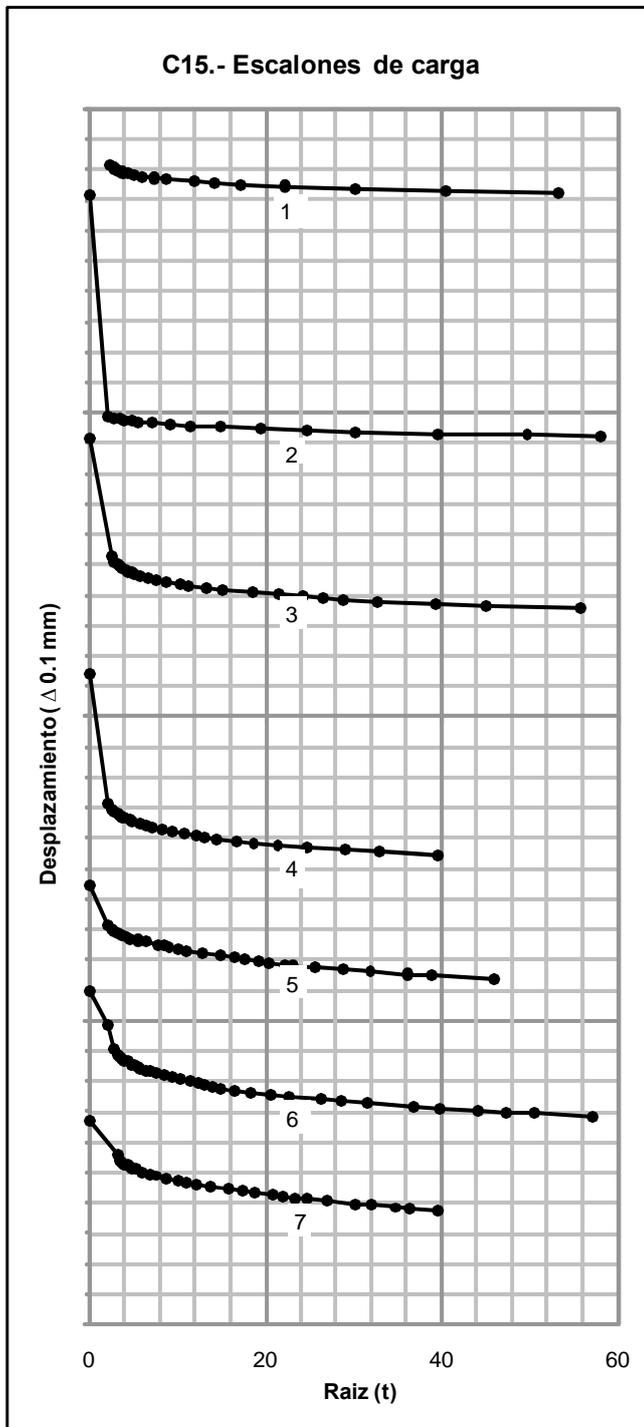


Fig. 29. C15-Curvas de consolidación en función de raíz (t).

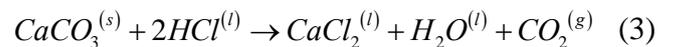
## 6 ENSAYO QUÍMICO - CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO

El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de carbonato de calcio en una masa de suelo conocida consiste en la determinación del volumen de  $CO_2$  que se desprende al agregar una cantidad conocida de ácido clorhídrico. En la Figura 31 se observa el dispositivo de ensayo.



Figura 30. Dispositivo para la medición de  $CaCO_3$ .

La reacción queda representada por la ecuación



De esta manera, la determinación de  $CaCO_3$  es inmediata a partir de la medición del volumen de  $CO_2$  producido por la reacción.

En el matraz de Erlenmeyer se mezcla una cantidad conocida de suelo con agua destilada, se coloca la tapa con los tubos de conexión y se vierte el ácido clorhídrico a través de una válvula superior.

Un tubo conecta el extremo superior del matraz de Erlenmeyer con una bureta invertida llena de queroseno. Cuando comienza la reacción, el  $CO_2$ , producido desplaza el queroseno que se encuentra en la bureta en un volumen que puede medirse directamente en las graduaciones de la bureta invertida. Una vez medida esta variación de volumen se obtiene la concentración de  $CaCO_3$  presente en la muestra.

## V. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 1 CONTENIDO DE CaCO<sub>3</sub>

En la tabla 19 se presentan los porcentajes de CaCO<sub>3</sub> hallados, correspondientes a cada una de las 13 muestras inalteradas ensayadas.

Tabla 19. Porcentuales obtenidos.

Ensayo	CaCO <sub>3</sub> (%)
C3	0.11
C4	0.46
C5	0.06
C6	0.27
C7	0.13
C8	3.14
C9	0.33
C10	0.30
C11	0.49
C12	0.33
C13	1.02
C14	1.22
C15	2.24

### 2 ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN

Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 20. La notación es la siguiente:  $\sigma_{max}$  es la tensión máxima alcanzada durante el ensayo,  $\varepsilon_{1max}$  es la máxima deformación específica vertical,  $C_c$  es el índice de compresión,  $C_r$  es el índice de recompresión,  $E_c$  y  $E_r$  son los módulos edométricos en primera carga y en recarga, respectivamente.

Tabla 20. Resultados de ensayos edométricos

Ensayo	$\sigma_{max}$ [kPa]	$\varepsilon_{1max}$ [%]	$C_c$	$C_r$	$E_c$ [kPa]	$E_r$ [kPa]
C1	1243	22.00	0.319	0.014	1502	35334
C2	1208	18.56	0.169	0.002	2854	268439
C3	1333	17.89	0.295	0.019	1774	27024
C4	1336	13.39	0.216	0.015	2208	31919
C5	1343	11.60	0.160	0.008	3010	57340
C6	1343	10.70	0.220	0.032	2457	16817
C7	1311	15.37	0.239	0.030	1889	14887
C8	1502	12.36	0.218	0.022	2205	21837
C9	1502	10.76	0.161	0.033	2939	14199
C10	1502	20.47	0.257	0.022	1988	23793
C11	1502	13.06	0.239	0.029	1918	15616
C12	1364	16.00	0.254	0.037	2061	14041
C13	1365	15.76	0.305	0.033	1665	15435
C14	1502	13.59	0.280	0.038	1953	14496
C15	1365	16.20	0.264	0.041	1891	12220

Puede verse que la muestra C2, correspondiente a suelo compactado, mostró una rigidez en carga similar a la de las demás muestras mientras que su rigidez en descarga fue del orden de diez veces superior. La muestra C1, amasada, también tuvo una rigidez en descarga superior a la media de las muestras inalteradas.

En la Figura 31 se representan los resultados de los 15 ensayos realizados en laboratorio. Puede verse que todas las muestras tienen una tendencia similar, independiente de la relación de vacíos inicial.

También puede observarse que no hay un umbral nítido que permita asumir un cambio de comportamiento elástico a elastoplástico, dentro del intervalo de presiones analizado.

La existencia de una muestra amasada que presenta el mismo comportamiento que las inalteradas permite, en principio, descartar que la cementación influya en el comportamiento observado.

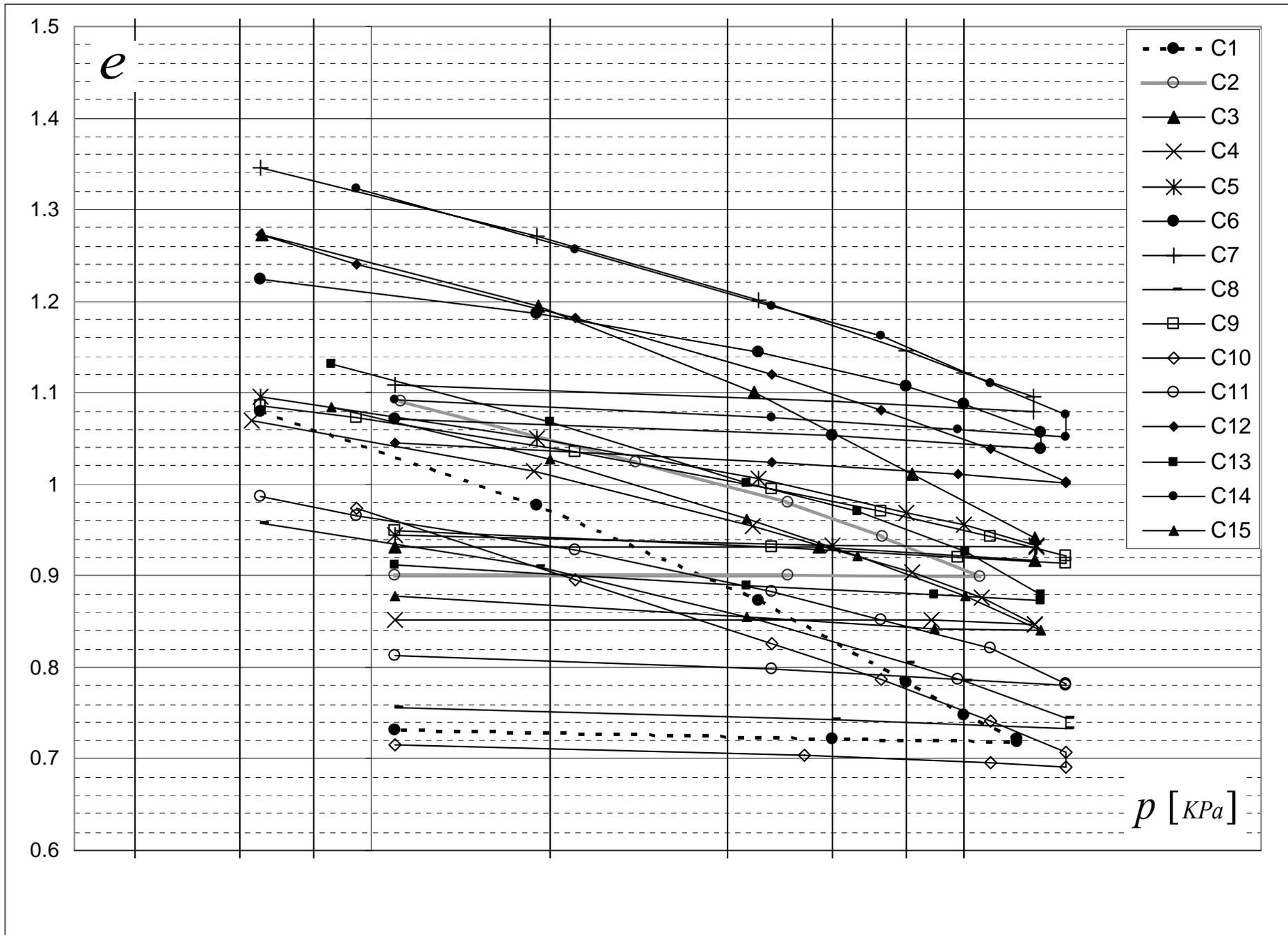


Figura 31. Resultados de ensayos de consolidación unidimensional.

## 2.1 Presión de preconsolidación

No fue posible obtener la presión de preconsolidación a partir de las curvas obtenidas de los ensayos realizados porque no hay tramos rectos sino una curva continua que no presenta saltos de curvatura y porque el mecanismo de deformación inelástica no es la consolidación primaria sino la expansión / contracción.

En otras palabras, la curva de recompresión es desplazada hacia arriba ya que el suelo sometido a presiones de confinamiento inferiores a las que prevalecían en el ambiente natural, se expande. Esto genera deformaciones de sentido opuesto a las aplicadas en el ensayo, de modo que, al menos para los primeros escalones de carga, la relación de vacíos no corresponde al resultado de la presión de consolidación puramente sino a la interacción de los dos procesos.

Al no poder obtener un valor de la presión de preconsolidación, tampoco es posible el cálculo de los correspondientes OCR.

## 2.2 Índices de compresión y recompresión

En las Figuras 32, 33, 34 y 35 se muestran los índices de compresión y recarga en función de LL, LP, la relación de vacíos y el contenido de  $\text{CaCO}_3$ .

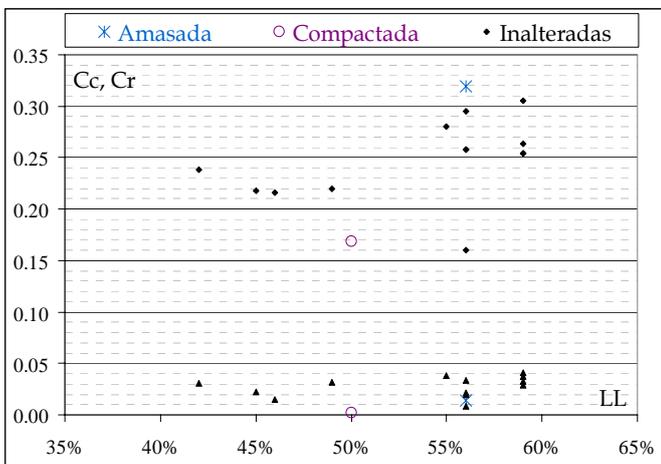


Figura 32.  $C_c$  y  $C_r$  en función del límite líquido.

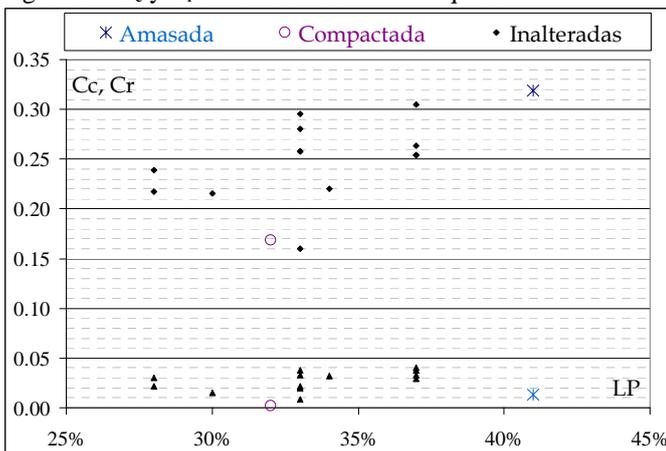


Figura 33.  $C_c$  y  $C_r$  en función del límite plástico.

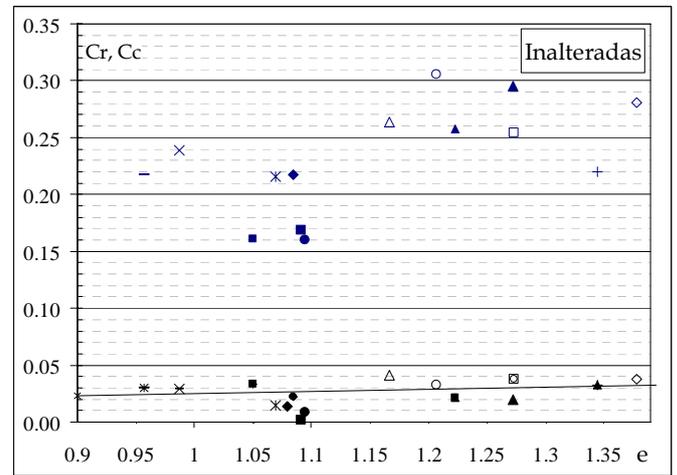


Figura 34.  $C_c$  y  $C_r$  en función de la relación de vacíos.

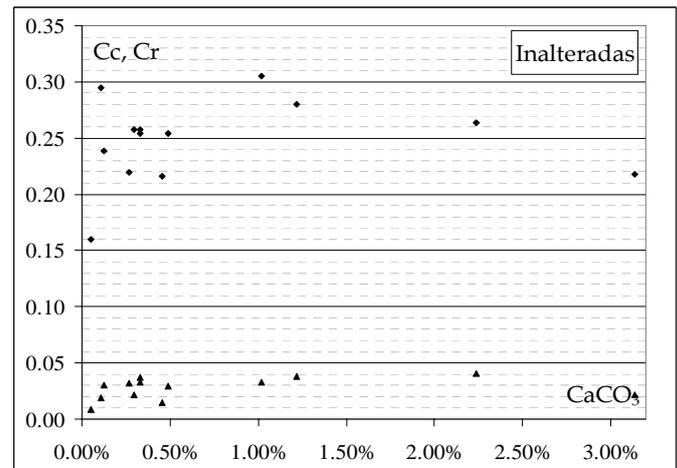


Figura 35.  $C_c$  y  $C_r$  en función del contenido de  $\text{CaCO}_3$ .

Puede observarse que no existe ninguna correlación entre las propiedades mecánicas del material y estos parámetros.

## 2.3 Módulo edométrico secante

En la Figura 36 se muestra la relación entre los módulos de Young secantes [KPa] correspondientes a todos los ensayos y la tensión vertical [KPa].

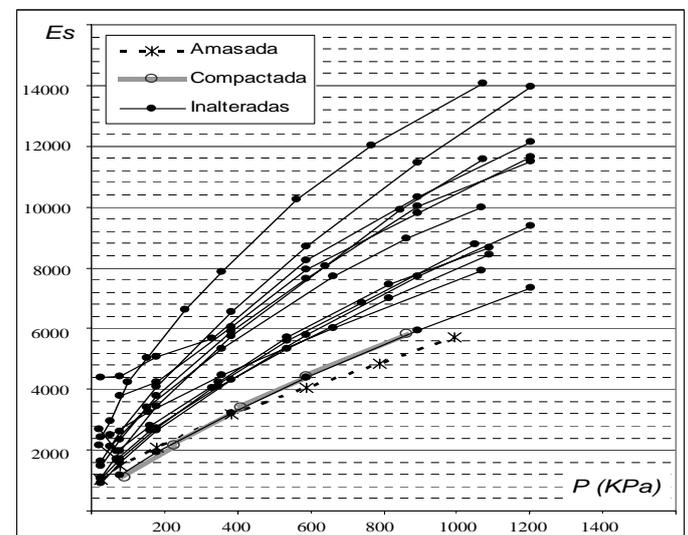


Figura 36. Relación entre el  $E_s$  y la tensión vertical.

## VI. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS - MODELO NUMÉRICO

Con los resultados obtenidos se calibraron los parámetros del modelo constitutivo HSM disponible en Plaxis (Vermeer 1998). Este modelo constitutivo es una extensión del modelo hiperbólico de Duncan – Chang (Duncan - Chang 1970) que incorpora una superficie de fluencia para compresión proporcional.

Las ecuaciones que controlan el módulo de Young elástico  $E_{ur}$ , el módulo de Young secante al 50% de ruptura  $E_{50}$  y el módulo de compresión edométrico  $E_{oed}$  se presentan a continuación.

Puede verse que las tres ecuaciones son del tipo de Janbu (Janbu 1963) con coeficientes definidos para una presión de referencia (en general  $p_{ref}=100$  kPa) y un único exponente  $m$  común a las tres.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{ref}} \right)^m \quad (4)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{ref}} \right)^m \quad (5)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{ref}} \right)^m \quad (6)$$

Los parámetros a optimizar fueron:  $E_{oed}^{ref}$  y  $m$ . En la Tabla 21 se muestran los parámetros de mejor ajuste.

Tabla 21. Resultados de calibración

Ensayo	$m$	$E_{oed}^{ref}$ [kPa]	Ensayo	$m$	$E_{oed}^{ref}$ [kPa]
C1	0.90	1950	C8	0.89	3500
C2	0.93	2350	C9	0.90	3700
C3	0.80	2320	C10	0.90	2150
C4	0.90	2800	C11	0.87	3100
C5	0.91	3600	C12	0.90	2480
C6	0.92	4000	C13	0.89	2220
C7	0.91	2700	C14	0.92	2920
			C15	0.91	2400

Pueden observarse dos hechos significativos: i) el exponente  $m$ , calibrado aquí para ajustar la ecuación (6), es muy similar para todas las muestras pero significativamente diferente del que permite el mejor ajuste de la ecuación (4) (Quaglia y Sfriso 2008) (Sfriso et al 2008); ii) el coeficiente  $E_{oed}^{ref}$  tiene un valor sorprendentemente reducido con una dispersión del orden del 30%. En las figuras 37,

38, 39 y 40 se muestran ejemplos de comparaciones entre los valores medidos y simulados.

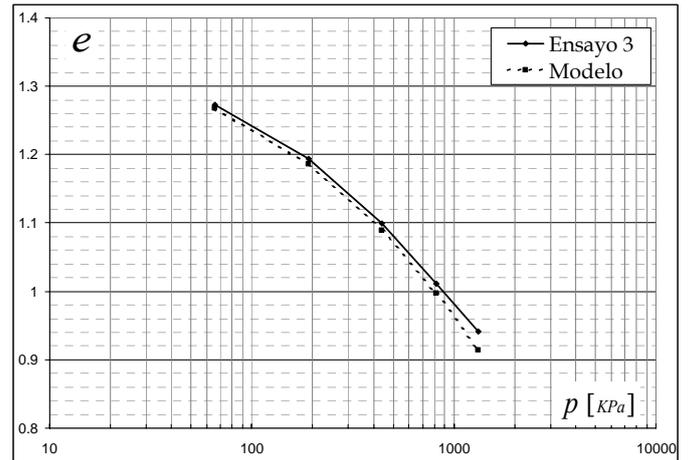


Fig. 37. Curvas experimental C3 y su simulación numérica.

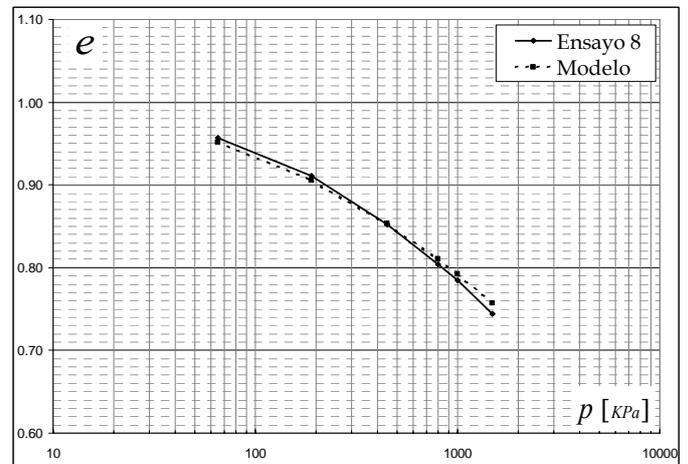


Fig. 38. Curvas experimental C8 y su simulación numérica.

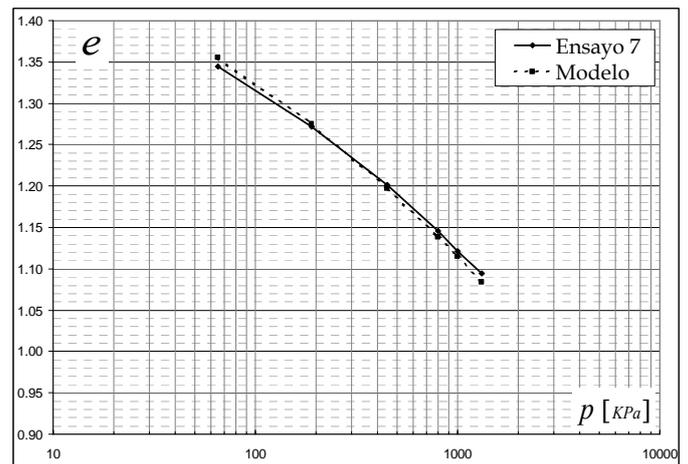


Fig. 39. Curvas experimental C7 y su simulación numérica.

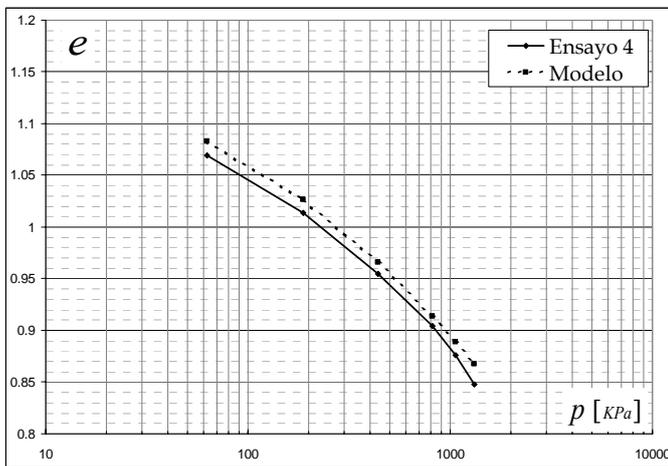


Fig. 40. Curvas experimental C4 y su simulación numérica.

El módulo de Young edométrico medido y simulado es contradictorio con el comportamiento conocido y observado de la formación Pampeano (Sfriso 2006, 2007, 2008), por lo que deberán efectuarse más ensayos.

El efecto de la alteración de las muestras por extracción, manipuleo y saturación, aunque no ha sido totalmente cuantificado, parece insuficiente para justificar el apartamiento entre los valores medidos y los esperados.

El comportamiento expansivo observado en el material cuando se lo ensaya a presiones de confinamiento sensiblemente inferiores a las presiones verticales de tapada también ha sido reportado para suelos compactados (Codevilla 2008).

La calibración fue realizada considerando un OCR igual a la unidad, lo que estaría representando el comportamiento de suelos normalmente consolidados. Sin embargo, se tiene la intención de recalibrar los ensayos ejecutados, mediante la optimización de este parámetro, con la utilización del mismo programa de elementos finitos. De esta manera, poder comparar los resultados obtenidos y sacar nuevas conclusiones.

## VII. CONCLUSIONES

Se ejecutó una serie de ensayos edométricos sobre muestras inalteradas de la Formación Pampeano. Posteriormente se efectuó una simulación numérica de los resultados obtenidos con el objetivo de calibrar los parámetros de plasticidad por compresión del modelo constitutivo HSM disponible en Plaxis.

Se observó que el módulo de Young edométrico es muy inferior al esperado de acuerdo con el comportamiento observado de obras construidas en estos suelos. La diferencia es muy significativa y no puede ser atribuida a errores experimentales.

No se encontró ninguna correlación entre las propiedades mecánicas del material y los parámetros físicos como ser la relación de vacíos, el contenido de  $\text{CaCO}_3$  y los límites líquido y plástico.

Por otro lado, el suelo mostró un comportamiento expansivo lo que impidió que se pudieran obtener valores de la presión máxima a la cual haya estado sometido el material ( $p_c$ ) y por lo tanto los correspondientes OCR.

Esta tesis deja abierta la posibilidad de profundizar y ampliar el tema en estudio mediante nuevos proyectos de investigación.

## VIII. REFERENCIAS

- ASTM D 2435 – 03 (2003). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- BOLOGNESI, A. y MORETTO, O. (1957). Properties and Behaviour of silty soil originated from loess formations. IV ICSMGE. London, England.
- BOLOGNESI, A. (1975). Compresibilidad de los suelos de la formación Pampeano. V PCSMFE Buenos Aires, Argentina.
- BOLOGNESI, A. y VARDÉ, O. (1991). "Subterráneos en Buenos Aires". IX PCSMFE, Viña del Mar, Chile, III:1329-1350.
- CODEVILLA, M. (2008). Arcillas expansivas del Gran Buenos Aires. XIX CAMSIG, La Plata.
- DUNCAN, J. y CHANG, C. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 96, SM5, 1629-1653.
- IRAM 10515 (1968). Preparación de muestras para análisis sedimentométrico y para determinación de las constantes físicas.
- JANBU, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proc. Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, I, 19-25.
- JIMÉNEZ SALAS, J. y otros (1980) Geotecnia y Cimientos. Ed. Rueda.
- JUAREZ BADILLO, E. RICO RODRÍGUEZ, A. (1974). Mecánica de suelos. Tomo I, 1° edición, Ed. Limusa.
- LEDESMA, O. y SFRISO, A. (2008). Calibración del Cam-Clay para arcillas del Postpampeano. XIX CAMSIG, La Plata.
- MORETTO, O. (1957). Fundación de Edificios Livianos sobre Arcillas Activas. Revista La Ingeniería, nro. 955, pp. 168-175.
- NÚÑEZ, E. (2007). Incertidumbres y aproximaciones en geotecnia. IV Conferencia Arthur Casagrande, XVII PCSMGE, Margarita, Ve.
- QUAGLIA, G y QUINTELA, M (2008). Determinación del contenido de Carbonato de Calcio. Informe. [www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm](http://www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm).
- QUAGLIA, G. y SFRISO, A. (2008). Medición de la rigidez inicial y de la cohesión efectiva en muestras inalteradas del Pampeano. XIX CAMSIG, La Plata.
- QUINTELA, M. y SFRISO, A. (2008). Rigidez edométrica de la Formación Pampeano. XIX CAMSIG, La Plata.
- RINALDI, V. y CLARIÁ, J. (1999). Low Strain dynamic behavior of a collapsible soil. XI PCSMGE. Foz de Iguazú, Brasil.
- ROCCA, R., REDOLFI, E. Y TERZARIOL, R. (2006). Características geotécnicas de los loess de Argentina. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2)
- SFRISO, A. (2006). Algunos procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos. XIII CAMSIG, San Juan.
- SFRISO, A. (2007). Procedimiento Constructivo de la Estación Corrientes del Subterráneo de Buenos Aires, Argentina. VI Chilean Conf. Geot. Eng., 124-132.
- SFRISO, A. (2008). Metro tunnels in Buenos Aires: Design and construction procedures 1998 – 2007. Sixth Int. Symp. Geot. Aspects Underground Constr. in Soft Ground (IS-Shanghai 2008).
- SFRISO, A., SAGÜES, P., QUAGLIA, G., QUINTELA, M. y LEDESMA, O. (2008). Small-strain stiffness of the Pampeano Formation. 4<sup>th</sup> Int Symp on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Atlanta 2008, Atlanta, USA.
- TERZAGHI, K., y PECK, R. (1996). Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. 2da Ed. El Ateneo, Buenos Aires, 722 p. 3ra Ed., Wiley.
- TREVISAN, S. y NADEO, J. (1967). El agrietamiento en suelos activos. Revista del Centro de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires, nro 59, pp. 68-76.
- VERMEER, P. 1998. Plaxis Users Manual. Balkema, Rotterdam. Ne, 477 p.
- POWRIE, W. (2004). Soil Mechanics - Concepts and Applications. Spon Press.

## IX. ANEXOS

# Proyecto de Tesis: Rígidez edométrica de la formación pampeano. Informe de avance I

Maribel Denise Quintela  
LMS - FIUBA

## 1 INTRODUCCIÓN

Se presenta el resumen de actividades efectuadas entre el 1 de Agosto y el 15 de octubre de 2007 del programa de trabajo de la Tesis de Grado “Rígidez edométrica de la Formación Pampeano”. En este período se alcanzaron los siguientes objetivos:

- 1 Fabricación de los elementos necesarios para la eficiente realización del ensayo de consolidación y la preparación de las muestras de suelo.
- 2 Caracterización y clasificación inicial del suelo en estudio.
- 3 Detección y control de errores experimentales.
- 4 Puesta en marcha de un sistema de adquisición automática de datos en el banco edométrico.

## 2 FABRICACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA PREPARAR Y ENSAYAR MUESTRAS

### 2.1 Aros

Se fabricaron dos aros edométricos completos con piedras porosas y cabezales de acero. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones principales de los aros. En la Figura 1 se muestra el esquema.

Tabla 1. Dimensiones de los moldes utilizados

	Altura	Espesor	Diámetro
Aros	51	2.5	101
Cabezales	20	20	100

Los aros tienen un lado afilado para facilitar la extracción de muestras inalteradas por hincada directa en superficies expuestas de la formación Pampeano. La extracción directa dentro del molde reduce la manipulación del suelo y su consecuente alteración.

La intervención posterior a la extracción de la muestra se limita a su enrase hasta una altura inicial de ensayo de unos 22 – 25 mm. Se fabricaron las

herramientas para el enrase de las muestras dentro de los moldes.

Los moldes fueron protegidos contra corrosión mediante pintura e-poxi. El espesor de la pintura reduce la holgura molde – cabezal, por lo que se redujo el diámetro de los cabezales y se ajustó la holgura con capas de pintura epoxídica.

El empleo de aros grandes reduce los errores de fricción perimetral entre suelo y molde y mejora la precisión de la medición de la respuesta mecánica del suelo.

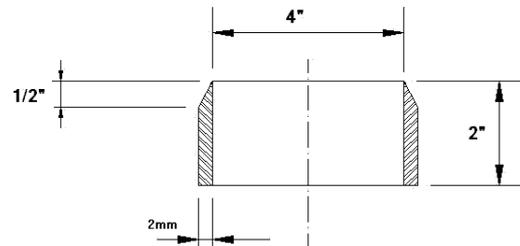


Figura 1. Aros edométricos utilizados.

### 2.2 Sistema de adquisición de datos

La toma de datos se automatizó mediante la instalación de una *webcam* frente a cada flexímetro y la adaptación del programa de vigilancia remota de código libre Motion (Motion 2007). Las cámaras fotografían el flexímetro a intervalos regulares ajustados por el operador. Esta actividad se desarrolló en forma conjunta con O. Ledesma (2007). En las Figuras 2 y 3 se muestran vistas del banco edométrico.



Figura 2. Vista del banco edométrico.



Figura 3. Detalle del sistema de adquisición de datos del banco edométrico.

### 3 MUESTRAS

#### 3.1 Extracción

Las muestras inalteradas se extraen de la obra de ampliación de la línea "H" del Subterráneos de Buenos Aires, tramo C (Once – Corrientes). La extracción fue autorizada por SBASE y por Dycasa SA, la empresa que construye la obra. El Jefe de Obra, Ing. Santiago Sebastián, instruyó a los capataces de campo y maquinistas para que prestaran colaboración a este grupo de trabajo.

La extracción se produce mediante hincas de los aros edométricos en suelo virgen con una fuerza estática provista por el sistema hidráulico de una retroexcavadora. Inmediatamente luego de terminada la hincas se remueve la dama que rodea al aro, se separa el aro de la tierra circundante, se lo limpia y sella con film de polietileno autoadherente para protección de la humedad natural.

#### 3.2 Tallado

Las muestras son enrasadas y recortadas dentro del aro hasta una altura de 22 a 25 mm mediante herramientas de corte fabricadas al efecto. Los nódulos calcáreos que sobresalen de la altura de enrase son removidos y reemplazados por suelo compactado.

#### 3.3 Saturación de las muestras

La saturación de las muestras se efectúa a carga constante por imbibición directa de agua desaireada a flujo descendente con salida a presión atmosférica. La carga hidrostática es del orden de dos metros. Se fuerza el pasaje de dos litros de agua desaireada, lo que demanda entre cinco y veinte horas, en función de la permeabilidad de las muestras.

## 4 PRIMEROS ENSAYOS

### 4.1 Clasificación

Se efectuó una serie de ensayos de clasificación de las primeras muestras recuperadas. Los resultados caen en los rangos

$$LL = 45 - 56 \quad LP = 29 - 40 \quad (1)$$

Los suelos clasifican como ML, CL, MH o CH, con predominancia de suelos MH.

Los ensayos de clasificación presentan alta dispersión debido a la existencia de pequeños nódulos de carbonato de calcio que afectan la ejecución, especialmente en el caso del límite plástico. La molienda forzada de los nódulos se descarta porque altera el valor medido.

### 4.2 Ensayos de consolidación

#### 4.2.1 Muestras

##### 4.2.1.1 Muestra amasada

Se ejecutó un ensayo de consolidación unidimensional sobre suelo amasado (C1). Se obtuvo un índice de compresión  $C_c = 0.34$ . Este resultado compara bien con la fórmula de Skempton para suelos amasados (Terzaghi 1996).

$$C_c \approx 0.007(LL - 10) \pm 30\% = 0.32 \pm 30\% \quad (2)$$

##### 4.2.1.2 Muestra compactada

Se ensayó el mismo suelo del ensayo 1 compactado en molde Proctor Standard, con una energía de compactación de 15 golpes de martillo de 2.25 kg de masa (C2). La humedad de compactación fue de 33%.

##### 4.2.1.3 Muestras inalteradas

Se ensayaron dos muestras inalteradas extraídas de la caverna de la Estación Corrientes, a una profundidad de unos 20 metros (C3 y C4).

#### 4.2.2 Ensayos físicos

Las características de las muestras ensayadas se muestran en la Tabla 2. La notación es la siguiente:  $\omega$  es la humedad de amasado para el ensayo C1, la humedad de compactación para el C2 y la humedad natural para C3 y C4,  $e_0$  es la relación de vacíos al inicio del ensayo,  $e_f$  es la relación de vacíos al final del ensayo,  $LL$  es el límite líquido,  $LP$  es el límite plástico y  $p_c$  es la presión de preconsolidación.

Tabla 2. Propiedades físicas de las muestras ensayadas

Ensayo	$\omega$ [%]	$e_o$	$e_f$	LL	LP	$p_c$ [KPa]
C1	42.5%	1.476	0.730	56%	41%	-
C2	33.0%	1.333	1.056	50%	32%	-
C3	41.2%	1.270	1.050	56%	33%	405
C4	28.1%	1.070	0.917	46%	30%	405

### 4.3 Resultados

Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 3. La notación es la siguiente:  $\sigma_{max}$  es la tensión máxima alcanzada durante el ensayo,  $\varepsilon_{1max}$  es la máxima deformación específica vertical,  $C_c$  es el índice de compresión,  $C_r$  es el índice de recompresión,  $E_c$  y  $E_r$  son los módulos edométricos en primera carga y en recarga, respectivamente.

Tabla 3. Resultados de ensayos edométricos

Ensayo	$\sigma_{max}$ [KPa]	$\varepsilon_{1max}$ [%]	$C_c$	$C_r$	$E_c$ [KPa]	$E_r$ [KPa]
C1	565	22.00	0.333	0.014	1520	37357
C2	1215	18.56	0.153	0.012	3516	46462
C3	1333	16.86	0.343	0.026	1525	20174
C4	1336	13.39	0.266	0.023	1793	20880

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos en los cuatro ensayos.

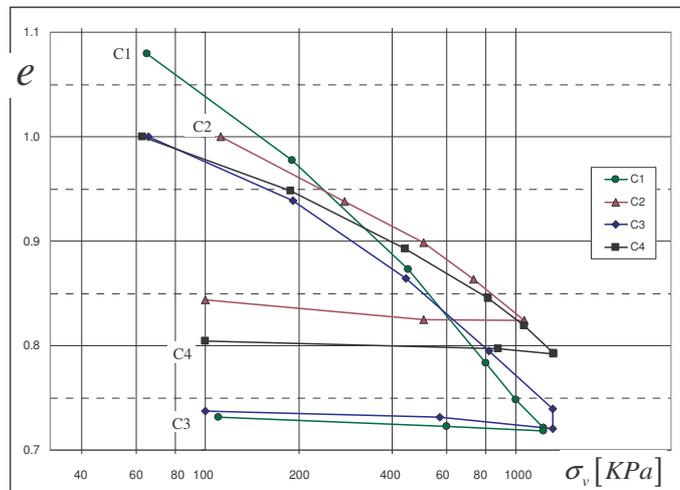


Figura 4. Resultados de ensayos de consolidación unidimensional.

La presión de preconsolidación se calculó con el método de Casagrande. La altura al 100% de consolidación primaria se calculó con el método de la parábola.

Se observó que en los ensayos realizados sobre muestras inalteradas el tiempo necesario para la consolidación primaria varía en un rango de 30 a 60 min con los tamaños de muestra utilizados.

## 5 ETAPA SIGUIENTE

El programa continúa con la ejecución de una serie de ensayos físicos y edométricos sobre muestras

inalteradas de la Formación Pampeano obtenidas en la Obra de Ampliación de la línea H de Subterráneos.

## REFERENCIAS

Motion. [www.motion.org](http://www.motion.org).

Ledesma, O. 2007. Calibración del Cam-Clay para arcillas del Postpampeano. Informe de avance 2. [www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm](http://www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm).

Terzaghi, K., y Peck, R. 1996. Mecánica de suelos en la ingeniería práctica. 2<sup>da</sup> Ed. El Ateneo, Buenos Aires, 722 p. 3<sup>ra</sup> Ed., Wiley.

Maribel D. Quintela, Tesista.

Alejo O. Sfriso, Profesor

# Proyecto de Tesis: Rigidez edométrica de la Formación Pampeano. Informe de avance II

Maribel Denise Quintela  
LMS - FIUBA

## 1 INTRODUCCIÓN

Se presenta el resumen de actividades efectuadas entre el 15 de octubre de 2007 y 28 de febrero de 2008 del programa de trabajo de la Tesis de Grado “Rigidez edométrica de la Formación Pampeano”. En este período se realizaron:

- 1 Ensayos edométricos sobre muestras inalteradas de la Formación Pampeano obtenidas en la Obra de Ampliación de la línea H de Subterráneos.
- 2 Ensayos químicos y físicos complementarios, que incluyeron la medición del contenido de carbonato de calcio, la humedad natural y los límites de Atterberg.

## 2 ENSAYOS

### 2.1 Clasificación y propiedades índice

Se efectuaron ensayos de clasificación de todas las muestras y se midieron sus propiedades índice representativas.

En la Tabla 1 se muestra la caracterización de las muestras ensayadas. La notación es la siguiente:  $\omega$  es la humedad natural,  $e_0$  es la relación de vacíos al inicio del ensayo,  $e_f$  es la relación de vacíos al final del ensayo,  $LL$  es el límite líquido y  $LP$  es el límite plástico.

Tabla 1. Propiedades físicas de las muestras ensayadas

Ensayo	$\omega$ [%]	$e_0$	$e_f$	$LL$	$LP$
C1	32.0%	1.12	0.91	56%	33%
C2	34.0%	1.24	0.98	49%	34%
C3	32.6%	1.39	0.96	42%	28%
C4	34.3%	0.98	0.80	45%	28%
C5	32.8%	1.11	0.99	56%	33%
C6	32.8%	1.12	0.87	56%	33%
C7	32.0%	1.01	0.95	59%	37%
C8	32.0%	1.30	1.06	59%	37%

### 2.2 Determinación de $CaCO_3$

El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de carbonato de calcio en una masa de suelo conocida consiste en la determinación del volumen de  $CO_2$  que se desprende al agregar una cantidad conocida de ácido clorhídrico. La reacción queda representada por la ecuación



por lo que la determinación de  $CaCO_3$  es inmediata a partir de la medición del volumen de  $CO_2$  producido por la reacción. En la Fig. 1 se observa el dispositivo de ensayo.



Figura 1. Dispositivo para la medición de  $CaCO_3$ .

En el matraz de Erlenmeyer se mezcla una cantidad conocida de suelo con agua destilada, se coloca la tapa con los tubos de conexión y se vierte el ácido clorhídrico a través de una válvula superior. Un tubo conecta el extremo superior del matraz de Erlenmeyer con una bureta invertida llena de queroseno.

Cuando comienza la reacción, el  $CO_2$ , producido desplaza el queroseno que se encuentra en la bureta en un volumen que puede medirse directamente en las graduaciones de la bureta invertida. Una vez medida esta variación de volumen se obtiene la concentración de  $CaCO_3$  presente en la muestra.

En la tabla 2 se presentan los porcentaje de  $CaCO_3$  presente en cada una de las ocho muestras ensayadas.

Tabla 2. Determinaciones de  $CaCO_3$ . Porcentajes obtenidos.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
%	%	%	%	%	%	%	%
0.06	0.27	0.13	3.14	0.33	0.30	0.49	0.33

### 2.3 Ensayos de consolidación

Se ensayaron ocho muestras inalteradas extraídas del túnel, a una profundidad de 20-25 metros. Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 3.

La notación es la siguiente:  $\sigma_{max}$  es la tensión máxima alcanzada durante el ensayo,  $\varepsilon_{1max}$  es la máxima deformación específica vertical,  $C_c$  es el índice de compresión,  $C_r$  es el índice de recomprensión,  $E_c$  y  $E_r$  son los módulos edométricos en primera carga y en recarga, respectivamente.

Los escalones de carga duraron entre 2 y 6 horas, mientras que los escalones de descarga duraron entre 1 y 12 horas. El criterio de finalización de cada escalón fue el siguiente:

- 1 Se dibuja en tiempo real el desplazamiento del cabezal del edómetro en función de la raíz del tiempo.
- 2 Luego de transcurridos 10 minutos de ensayo, se traza una línea de tendencia de primer grado de los puntos que se encuentren entre 1 y 10 minutos y una recta cuya pendiente sea un 15% mayor que la anterior.
- 3 El punto de intersección entre esta última y la curva propiamente dicha corresponde (en ordenadas) al desplazamiento correspondiente al 90% de consolidación primaria.
- 4 Obtenido este punto se puede calcular el tiempo para la finalización de la consolidación primaria, lo que permite establecer el momento de cambio de escalón de carga.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los ocho ensayos. En la Figura 3 se muestran los índices de compresión y recarga. En la Figura 4 se muestra al relación entre los módulos de Young secantes correspondientes a todos los ensayos y la tensión vertical.

Tabla 3. Resultados de ensayos edométricos

Ensayo	$\sigma_{max}$ [KPa]	$\varepsilon_{1max}$ [%]	$C_c$	$C_r$	$E_c$ [KPa]	$E_r$ [KPa]
C1	1343	11.60	0.160	0.008	3010	57340
C2	1360	10.10	0.220	0.032	2329	15945
C3	1328	15.37	0.239	0.030	2263	17834
C4	1502	12.36	0.218	0.022	2070	20500
C5	1502	10.76	0.161	0.033	2989	14442
C6	1502	20.46	0.257	0.022	1833	21938
C7	1502	13.06	0.239	0.029	1918	15616
C8	1502	16.00	0.254	0.037	2061	14041

### 2.4 Presión de pre-consolidación

No fue posible obtener la presión de preconsolidación a partir de las curvas obtenidas de los ensayos realizados.

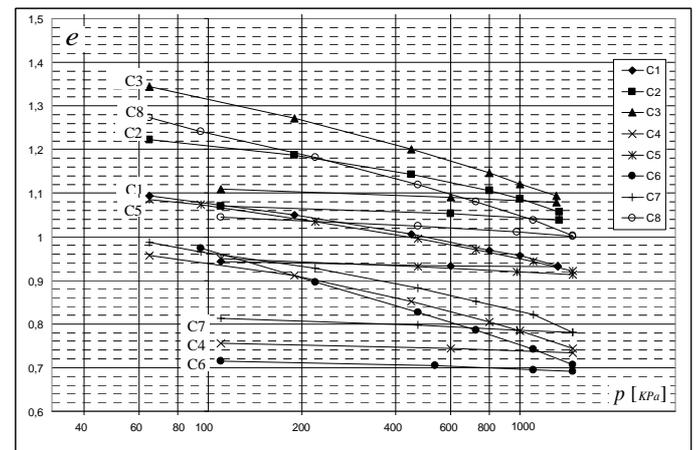


Figura 2. Resultados de ensayos de consolidación unidimensional.

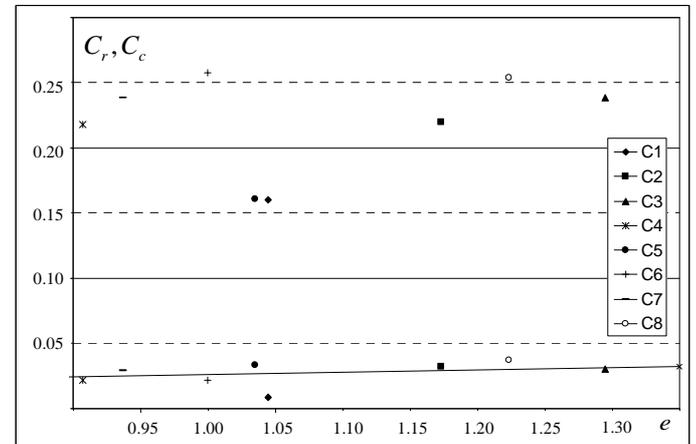


Figura 3.  $C_c$  y  $C_r$  en función de la relación de vacíos.

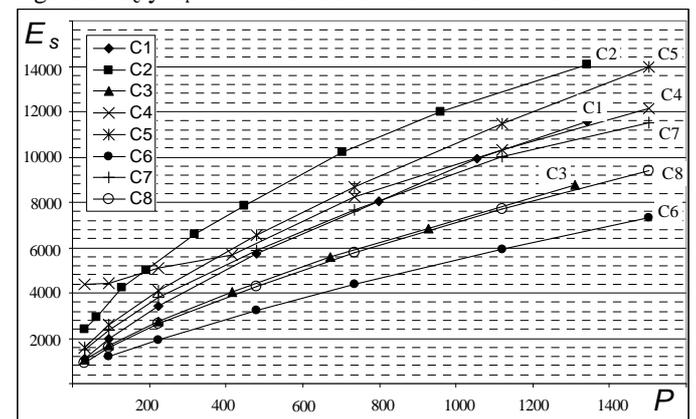


Figura 4. Relación entre el módulo de elasticidad secante y la tensión vertical.

## REFERENCIAS

Quaglia-Quintela, 2008. Determinación del contenido de Carbonato de Calcio. Informe. [www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm](http://www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm).

Maribel D. Quintela, Tesista.

Alejo O. Sfriso, Profesor

# Determinación del contenido de carbonato de calcio.

Procedimiento sobre muestras de suelo del pampeano.

Quaglia G, Quintela M. D.

Laboratorio de Mecánica de Suelos – Facultad de Ingeniería – UBA

## 1 INTRODUCCIÓN

El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de carbonato de calcio en una masa de suelo conocida, consiste en la determinación del volumen de  $\text{CO}_2$  que se desprende al agregar una cantidad conocida de ácido clorhídrico.

La reacción queda representada por la siguiente ecuación.



Dado que el número de moles de carbonato de calcio [ $n\text{CaCO}_{3(s)}$ ] es igual al número de moles de dióxido de carbono [ $n\text{CO}_{2(g)}$ ] midiendo el volumen de gas desprendido la determinación de  $\text{CaCO}_3$  es inmediata. Para ello se utiliza la ecuación de gases ideales:

$$P \cdot V_{\text{CO}_2} = n\text{CO}_2 \cdot R \cdot T \quad (R=0.082 \text{ atm.l/k.mol}) \quad (2)$$

La presión [ $P$ ] y la temperatura [ $T$ ] correspondientes al momento del ensayo.

$$n\text{CaCO}_{3(s)} = n\text{CO}_{2(g)} \quad (3)$$

Conocido el número de moles y la masa molar [ $Mr$ ] del carbonato de calcio (aprox. 100 g/mol), se tiene:

$$m\text{CaCO}_{3(s)} = n\text{CaCO}_{3(s)} \cdot Mr \quad (2)$$

$$\% \text{CaCO}_3 = m\text{CaCO}_3 / m_{\text{total}} \quad (3)$$

## 2 ENSAYO

### 2.1 Dispositivo de ensayo

El dispositivo de ensayo está compuesto de:

Un erlenmeyer, para colocar la muestra de suelo a ensayar. Un recipiente superior para disponer el ácido, el cual está provisto de una válvula que permite dosificar la cantidad de ácido que se agrega. Dos buretas una colocada dentro de la otra y queroseno en el interior de ambas. El erlenmeyer está conectado mediante una manguera a la bureta invertida, de modo que el gas que se genere allí se dirija a la bureta haciendo bajar el nivel de queroseno en la misma.



### 2.2 Procedimiento de ensayo

- 1 Pesar 10-15g de una muestra de suelo molido seco a horno. Colocar en el matraz de un erlenmeyer con agua destilada y luego agitarlo levemente para homogeneizar la mezcla. La combinación con agua destilada permitirá acelerar la velocidad de reacción
- 2 Cerrar el recipiente y verificar que la válvula superior también lo esté. Se recomienda aplicar grasa siliconada en la boca del matraz para asegurar un sellado hermético al colocar el recipiente superior.
- 3 Agregar 10-20ml de ácido clorhídrico al recipiente superior.
- 4 Medir el nivel inicial del queroseno levantando la bureta invertida hasta hacer coincidir el nivel interno con el externo.

- 5 Abrir la válvula para dejar caer el  $\text{HCl}_{(\text{ac})}$  que reacciona con el carbonato de calcio presente en el suelo. La válvula se debe cerrar inmediatamente después de introducir el ácido para evitar el escape del gas. LA cantidad de ácido que se agrega debe ser perfectamente conocida para efectuar una posterior corrección.
- 6 Durante el tiempo en el que se produce la reacción (20-60min) agitar suavemente el recipiente en dos o tres oportunidades.
- 7 Cuando se deja de observar la formación de burbujas sobre la superficie de la mezcla, como consecuencia del desprendimiento de  $\text{CO}_{2(\text{g})}$  se mide nuevamente el nivel del líquido igualando los niveles de las buretas. Con este valor de nivel final se puede calcular el volumen desplazado.

### 2.3 Cálculo del volumen desplazado por el ácido

Parte del volumen es desplazado al incorporar  $\text{HCl}_{(\text{ac})}$  y se lo debe calcular para luego restárselo al obtenido en el ensayo y poder obtener el volumen  $V$  a reemplazar en la ecuación (4).

Para calcular el error que se comete basta con repetir el procedimiento de ensayo descrito anteriormente pero sin colocar el suelo y de este modo sólo medir el cambio de volumen en función de la cantidad de ácido incorporado.