

RIGIDEZ EDOMÉTRICA DE LA FORMACIÓN PAMPEANO

Maribel D. Quintela⁽¹⁾, Alejo O. Sfriso.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Av. Las Heras 2214, Buenos Aires.

⁽¹⁾ E-mail: mdq_mari@hotmail.com

RESUMEN

Se realizó una serie de ensayos edométricos sobre muestras inalteradas de suelos de la Formación Pampeano. Las muestras fueron extraídas de la obra de ampliación de la línea "H" del subterráneos de Buenos Aires, mediante hincas estáticas de los sacatestigos en terreno natural y fueron ensayadas en los mismos sacatestigos, reduciendo su alteración. El programa se completó con la caracterización física y química de los suelos ensayados y con la calibración de modelos numéricos a partir de los resultados experimentales. En el documento se presenta el programa experimental y los resultados obtenidos.

ABSTRACT

A series of one dimensional compression tests on undisturbed samples of the Pampeano Formation was performed. Samples were recovered from the site of the extension of the line H, Buenos Aires Metro, by static pushing of cutting samplers, and were afterwards testes in the same samplers that served as oedometer rings, thus minimizing sample alteration. The program was completed with the physical and chemical characterization of the tested soils and with the callibration of numerical models after the obtained results. The paper presents the experimental program and obtained results.

PALABRAS CLAVE: rigidez edométrica – Pampeano – suelos preconsolidados

KEYWORDS: oedometer stiffness Pampeano – overconsolidated soils

INTRODUCCIÓN

Los modelos constitutivos empleados para la simulación del comportamiento mecánico de suelos de la Formación Pampeano incluyen mecanismos de deformación plástica por corte y compresión. La deformación plástica por corte es la que se produce cuando se aumenta el cociente σ_1/σ_3 , mientras que la deformación por compresión es el mecanismo responsable de las deformaciones inelásticas asociadas 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, se puede calibrar un modelo de compresión convencional para la trayectoria de recompresión de un suelo que ha sufrido expansión. Para lograrlo, se ejecutaron ensayos de compresión confinada de suelos inalterados y se ajustaron los parámetros constitutivos mediante simulación numérica de los resultados experimentales.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

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.

Las características de las muestras ensayadas se muestran en la Tabla 2. La notación es la siguiente: ω 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_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.

Tabla 2. Propiedades físicas de las muestras ensayadas

Ensayo	ω [%]	e_0	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%

Extracción de las muestras inalteradas

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 hincas directas en superficies expuestas de la formación Pampeano. La hincas 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 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. 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 1 se muestran las dimensiones principales de los objetos fabricados y en la Figura 1 se muestra el esquema de una aro edométrico.

Tabla 1. Dimensiones de los moldes utilizados

	Altura mm	Espesor mm	Diámetro mm
Aros	51	2.5	101
Cabezales	20		100

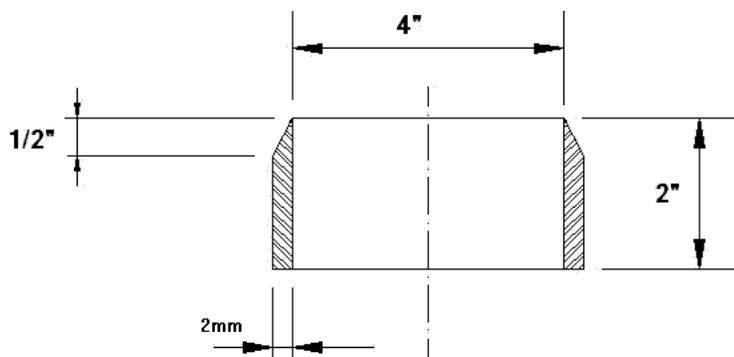


Figura 1. Aros edométricos utilizados para la extracción y ensayo de las muestras.

Preparación de las muestras

Las muestras son 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 sobresalen de la altura de enrase son removidos y reemplazados por suelo compactado.

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.

Ensayos de consolidación unidimensional

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).

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.

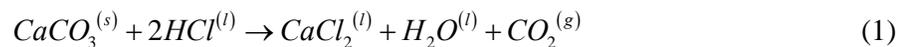
Contenido de Carbonato de Calcio – Ensayo químico

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 Fig. 4 se observa el dispositivo de ensayo.



Figura 4. 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.

RESULTADOS OBTENIDOS

Contenido de $CaCO_3$

En la tabla 2 se presentan los porcentaje de $CaCO_3$ presente en cada una de las 13 muestras inalteradas ensayadas.

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

		C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
$CaCO_3$	%	0.11	0.46	0.06	0.27	0.13	3.14	0.33	0.30	0.49	0.33	1.02	1.22	2.24

Ensayos de consolidación unidimensional

Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 3. La notación es la siguiente: σ_{max} es la tensión máxima alcanzada durante el ensayo, ε_{lmax} 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. 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.

Tabla 3. Resultados de ensayos edométricos

Ensayo	σ_{max} [kPa]	ε_{lmax} [%]	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

En la Figura 5 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.

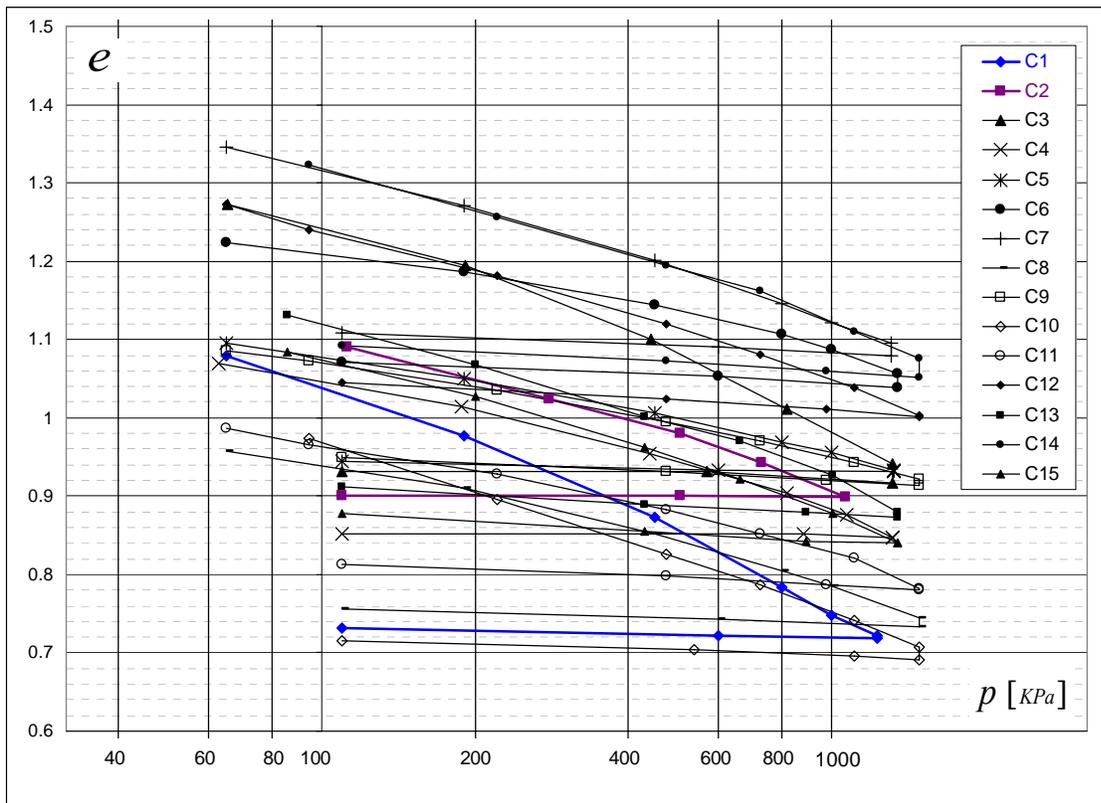


Figura 5. Resultados de ensayos de consolidación unidimensional.

Presión de pre-consolidación

No fue posible obtener la presión de pre-consolidación 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. 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.

Índices de compresión y recompresión

En las Figuras 6 y 7 se muestran los índices de compresión y recarga en función de LL, LP, la relación de vacíos y el contenido de carbonatos de calcio. Puede observarse que no existe ninguna correlación entre las propiedades mecánicas del material y estos parámetros.

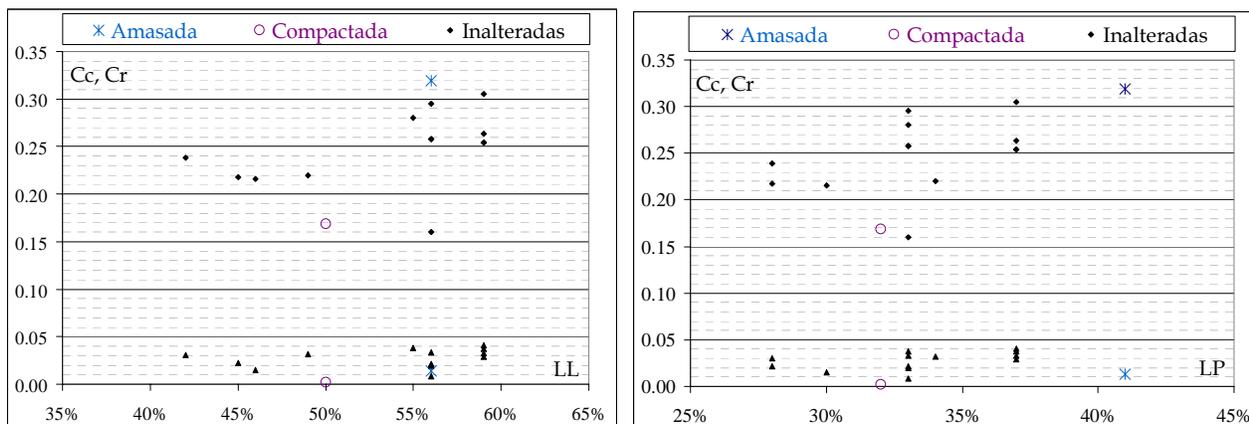


Figura 6. C_c y C_r en función del límite líquido y límite plástico.

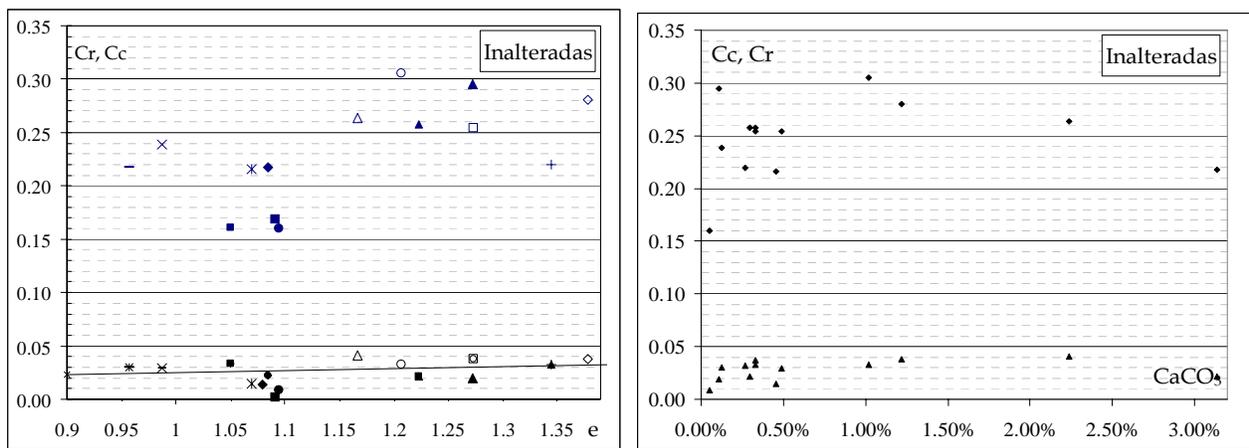


Figura 7. C_c y C_r en función de la relación de vacíos y el contenido de CaCO_3 .

Módulo edométrico secante

En la Figura 8 se muestra la relación entre los módulos de Young secantes correspondientes a todos los ensayos y la tensión vertical.

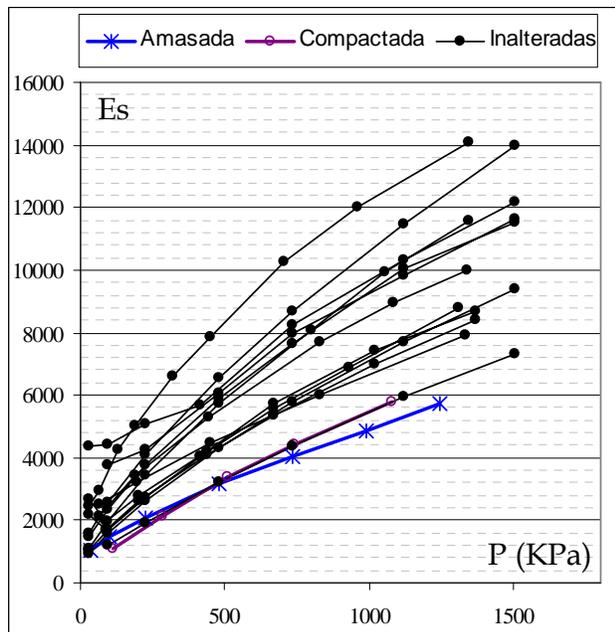


Figura 8. Relación entre el módulo de elasticidad secante y la tensión vertical.

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DEL 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.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{ref}} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{ref}} \right)^m \quad (3)$$

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

Los parámetros a optimizar fueron: E_{oed}^{ref} y m . En la tabla 4 se muestran los parámetros de mejor ajuste.

Tabla 4. 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

En la tabla 4 pueden observarse dos hechos significativos: i) el exponente m , calibrado aquí para ajustar la ecuación (4), es muy similar para todas las muestras pero significativamente diferente del que permite el mejor ajuste de la ecuación (2) (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 la figura 9 se muestran ejemplos de comparaciones entre los valores medidos y simulados.

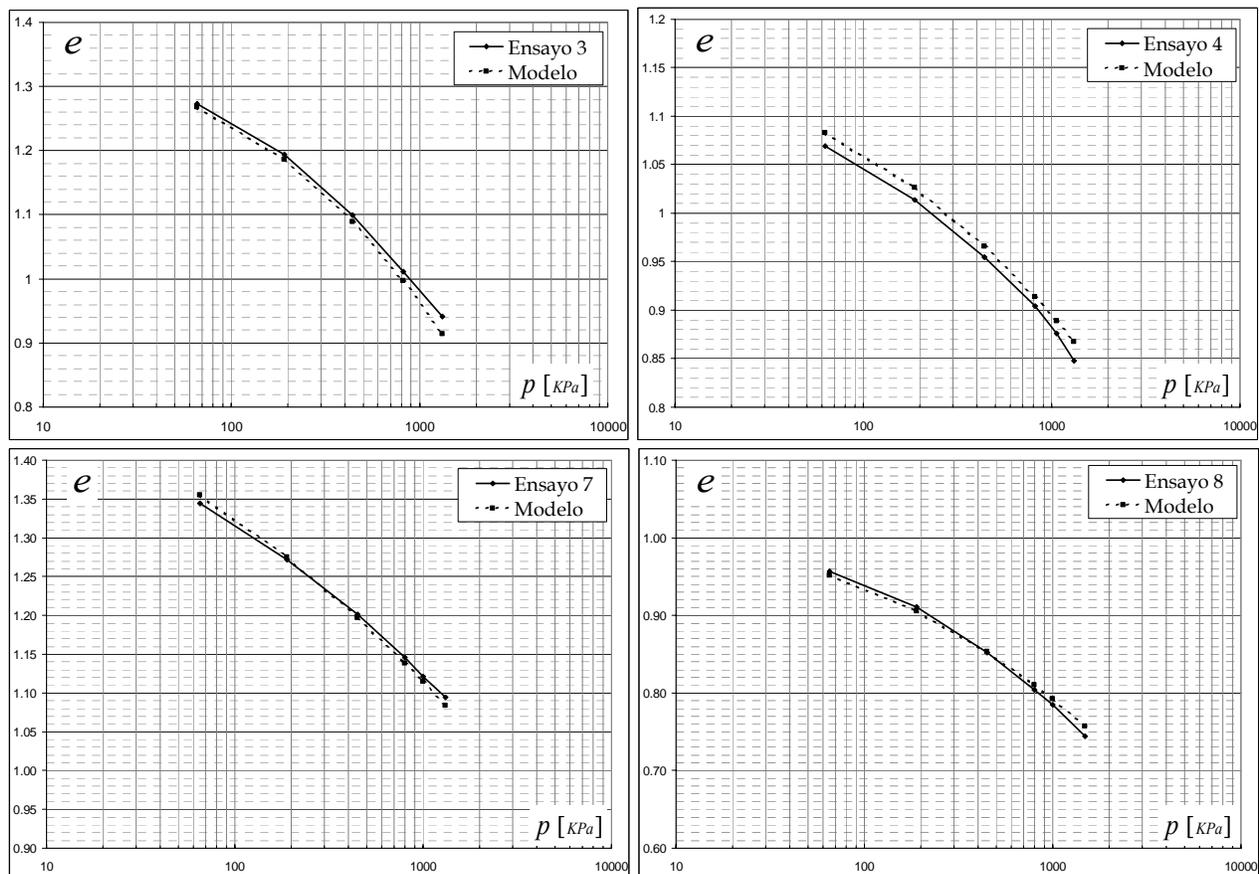


Figura 9. Ejemplos de curvas experimentales y su simulación numérica.

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 deben 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).

CONCLUSIONES

Se ejecutó una serie de ensayos edométricos sobre muestras inalteradas del suelo Pampeano y se efectuó una simulación numérica de los resultados obtenidos. El objetivo del trabajo fue la calibración de 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. Como la diferencia es muy significativa y no puede ser atribuida a errores experimentales, se concluye que el programa experimental debe ser extendido y completado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CODEVILLA, M. (2008). Arcillas expansivas del Gran Buenos Aires. Sometido a 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.
- JANBU, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. *Proc. Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, I*, 19-25.
- LEDESMA, O. y SFRISO, A. (2008). Calibración del Cam-Clay para arcillas del Postpampeano. Sometido a XIX CAMSIG, La Plata.
- 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. Sometido a XIX CAMSIG, La Plata.
- 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), En prensa.
- SFRISO, A., SAGÜÉS, P., QUAGLIA, G., QUINTELA, M. y LEDESMA, O. (2008). Small-strain stiffness of the Pampeano Formation. Sometido a 4th 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.
- VERMEER, P. 1998. *Plaxis Users Manual*. Balkema, Rotterdam. Ne, 477 p.