

MEDICION DE LA RIGIDEZ INICIAL Y DE LA COHESION EFECTIVA EN MUESTRAS INALTERADAS DEL PAMPEANO

Gastón Quaglia, Alejo O. Sfriso.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

email: gquaglia@fi.uba.ar

RESUMEN

Se ejecutaron ensayos triaxiales drenados sobre muestras inalteradas de la Formación Pampeano obtenidas de la obra de extensión de la línea H de Subterráneos. Se empleó una cámara triaxial equipada con instrumentos para la medición local de deformaciones y celda de carga interna para medir el módulo de Young inicial, la curva de degradación del módulo de Young y los parámetros resistentes c y ϕ en términos de presiones efectivas. En el trabajo se presenta: i) una breve descripción de la formación Pampeano; ii) la metodología de extracción de las muestras; iii) una descripción del equipo y los procedimientos utilizados en los distintos ensayos; iv) los resultados obtenidos; y v) la determinación de los parámetros de rigidez y resistencia a partir de un análisis inverso de los resultados de laboratorio mediante modelos numéricos. Se observó que: i) existe una importante dependencia del módulo de Young respecto de la presión de confinamiento para bajas deformaciones; ii) existe una cohesión efectiva en todas las muestras ensayadas; iii) el ángulo de fricción interna para bajas presiones de confinamiento es mayor o igual a 35° ; y iv) no es posible determinar una correlación entre los parámetros de resistencia y el contenido de carbonato de calcio u otras propiedades índice medidas.

PALABRAS CLAVE: Formación Pampeano – rigidez inicial – cohesión efectiva.

INTRODUCCION

Para el diseño de obras subterráneas en la Ciudad de Buenos Aires se emplean modelos numéricos que requieren una serie de parámetros de rigidez y resistencia de los suelos. La experiencia obtenida a lo largo de los años permitió la selección de una serie de parámetros que han resultado efectivos para la predicción del comportamiento de construcciones nuevas (Sfriso 2008). Sin embargo, muchos de estos parámetros están basados únicamente en la observación del comportamiento de estructuras construidas, con poco sustento en ensayos de campo o laboratorio. Las mayores incertidumbres se presentan en la rigidez a baja deformación de los suelos del Pampeano y en su cohesión efectiva. Estos parámetros controlan las predicciones de asentamientos en superficie y de estabilidad de frente, por lo que la incertidumbre asociada a su determinación se traslada de manera directa a incertidumbres de diseño que redundan en costos mayores de construcción. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en el programa de caracterización de los suelos de la Formación Pampeano mediante ensayos de laboratorio.

FORMACION PAMPEANO

El suelo estudiado pertenece a la “Formación Pampeano”, que en la Ciudad de Buenos Aires se extiende desde la superficie (+20 msnm aprox.) hasta una profundidad de 40 m (-20 msnm aprox.), y está compuesto por capas paralelas de arcillas y limos (Bolognesi 1975; Fidalgo et al 1975; Núñez 1986). El Pampeano es un loess modificado, preconsolidado por desecación y cementado con carbonatos de calcio y óxidos de manganeso. Se reconocen tres grados de cementación: i) en forma de nódulos aislados en una matriz preconsolidada no cementada; ii) en forma de una matriz de cementación intermedia con algunos nódulos fuertemente cementados; y iii) lo que se conoce comúnmente como “tosca”, que tiene la misma matriz medianamente cementada pero embebiendo inclusiones grandes, muy resistentes, producidas por precipitación de carbonato de calcio. En las toscas, estas inclusiones tienen bordes muy nítidos en los que se observa un salto importante de propiedades mecánicas respecto a la matriz que las rodea (Núñez y Micucci 1986b).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Material ensayado

En la Tabla 1 se presentan las propiedades índice y clasificación de todas las muestras ensayadas. Se determinaron los siguientes parámetros: LL: limite liquido; LP: limite plástico; ω_i : humedad inicial; ω_f : humedad final; %CaCO₃: porcentaje de carbonato de calcio; γ_d : Peso unitario seco; γ_{sat} : Peso unitario saturado.

Tabla 1. Material ensayado.

Ensayo	Fecha de Extracción	ω_i %	ω_f %	γ_d KN/m ³	CaCO ₃ %	LL %	LP %
T1	25/09/07	32.0	32.8	13.60	2.10	56	33
T2	10/11/07	33.2	34.0	12.50	2.15	42	28
T3	16/11/07	37.7	38.8	14.10	0.96	45	28
T4	16/11/07	27.2	27.8	14.60	0.22	45	28
T5	22/11/07	27.0	28.0	14.40	0.37	40	n/a
T6	22/11/07	27.5	28.7	14.20	0.27	40	n/a
T9	05/12/07	34.5	36.0	13.40	0.89	56	34
T10	05/02/08	37.5	40.9	13.10	1.75	59	37
T11	05/02/08	37.1	40.0	13.40	3.49	59	37
T12	05/02/08	35.4	38.8	13.80	1.79	59	37
T13	09/02/08	35.6	36.3	14.40	1.58	60	35
T14	09/02/08	35.0	36.5	14.70	1.76	60	35
T15	09/02/08	32.0	32.9	14.40	1.15	60	35
T16	05/12/07	39.5	40.5	12.60	1.31	56	34
T17	26/02/08	32.0	34.9	13.70	0.32	55	36
T18	26/02/08	33.1	35.7	14.00	3.58	55	36
T19	26/02/08	33.3	37.0	13.40	3.23	55	36

Extracción de muestras

Las muestras se obtuvieron en la excavación de la caverna de la “Estación Corrientes” correspondiente a la ampliación de la línea H de subterráneos (Sfriso 2007). Se hincaron estáticamente tubos de acero de 101mm de diámetro y 2 mm de espesor utilizando el peso propio de una retroexcavadora como elemento de reacción. Una vez retirados, los tubos se envolvieron con papel film para conservar el contenido de humedad in-situ y se trasladaron al laboratorio (Figura 1).



Figura 1: Extracción de muestras inalteradas mediante hinca estática de un tubo de acero.

Preparación de las muestras

Las muestras se saturaron con agua destilada y desaireada mediante flujo ascendente dentro de los moldes de extracción. Se produjo vacío en la cara superior de la muestra mientras que la cara inferior permaneció inundada en agua a presión atmosférica durante seis a veinticuatro horas. En la Figura 2 se observa el equipo utilizado para la saturación de las muestras.

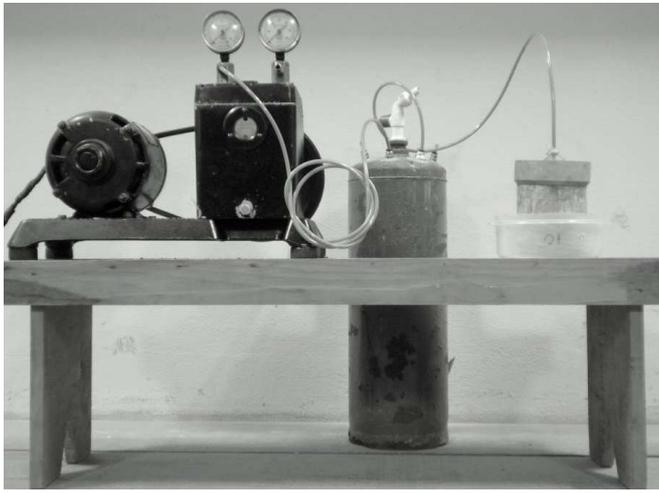


Figura 2: Dispositivo para saturación de muestras

Se instalaron piedras porosas y cabezales de fijación que minimizaron las deformaciones de las muestras durante la etapa de saturación, a pesar de que el gradiente hidráulico inducido fue muy importante ($i \approx 80$). Terminado el procedimiento de saturación las muestras fueron enrasadas a una altura de 127mm +/- 1mm y extraídas de los tubos. El proceso de saturación se completó dentro de la cámara triaxial mediante circulación ascendente de agua desaireada con bajo gradiente y con presión de cola de 100 kPa.

Ensayos triaxiales para medición de rigidez

Los ensayos fueron realizados con una cámara triaxial Wykeham Farrance que fue modificada para utilizar aire como fluido de control de la presión de confinamiento (Quaglia 2007). Se utilizó un sistema de adquisición de datos controlado por PC que permitió mantener un seguimiento en tiempo real del estado del ensayo. Los módulos DAQ están provistos de placas convertoras que permiten la conexión de *strain gauges* y sensores de presión piezo-resistivos. Se emplearon transductores de deformación local (LDT) axiales y radiales para la medición de las deformaciones locales (Sfriso et al 2008) y una celda de carga ubicada en el interior de la cámara triaxial.

En cada ensayo (CD) se realizaron cinco escalones de carga y descarga con el siguiente procedimiento:

- 1- Se impuso un valor constante de presión de confinamiento.
- 2- Se impuso una deformación axial monótonica con una velocidad de ensayo de 0.9mm/hr hasta obtener una relación de tensiones $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$.
- 3- Se detuvo la carga y se descargó a la misma velocidad hasta anular el esfuerzo desviador.
- 4- Se aumentó la presión de cámara y se repitió el procedimiento.

En la figura 3 puede verse una muestra lista para su ensayo.



Figura 3: Muestra armada lista para ensayo

Ensayos triaxiales para medición de resistencia

En estos ensayos las muestras fueron deformadas hasta ruptura, por lo que los instrumentos de medición local de deformaciones tuvieron que ser removidos y fueron reemplazados por calibres digitales externos conectados al sistema de adquisición de datos. La medición de cambio de volumen se realizó mediante una bureta graduada provista de presión de cola y conectada a un sensor piezo-resistivo que mide la altura de agua como diferencia de presión entre la base y cabeza de la bureta.

Se realizaron once ensayos de compresión triaxial drenada con el siguiente procedimiento:

- 1- Se impuso un valor constante de presión de confinamiento de 20 kPa.
- 2- Se impuso una deformación axial monotónica con una velocidad de ensayo de 0.9mm/hr hasta las cercanías de la resistencia máxima.
- 3- Se detuvo la carga y se descargó a la misma velocidad hasta anular el esfuerzo desviador.
- 4- Se aumento la presión de cámara a 50 kPa y se repitió el procedimiento de carga hasta llevar la muestra a rotura.

RESULTADOS OBTENIDOS

Módulo de Young

Se define el módulo de Young inicial E_0 al inicio de cada escalón de carga. E_0 puede ser considerado igual al modulo de recarga E_{ur} que puede obtenerse como rigidez media en un ciclo de descarga y recarga como se muestra en la Figura 4.

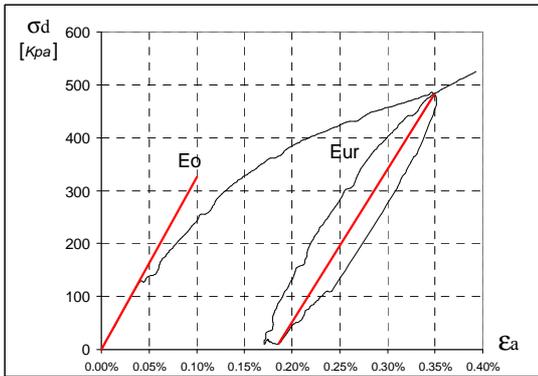


Figura 4: Definición de E_0 y E_{ur} .

Los valores de E_0 obtenidos corresponden a deformaciones del orden de $\epsilon_a \approx 10^{-5}$. Los resultados mostraron gran dispersión para deformaciones menores. Este comportamiento puede estar asociado a imperfecciones en el contacto de los apoyos los LDT axiales (Dasari 1995) y constituye el límite de aplicación de la tecnología LDT. En la figura 5 se presenta la dependencia de E_0 en función de la presión de confinamiento.

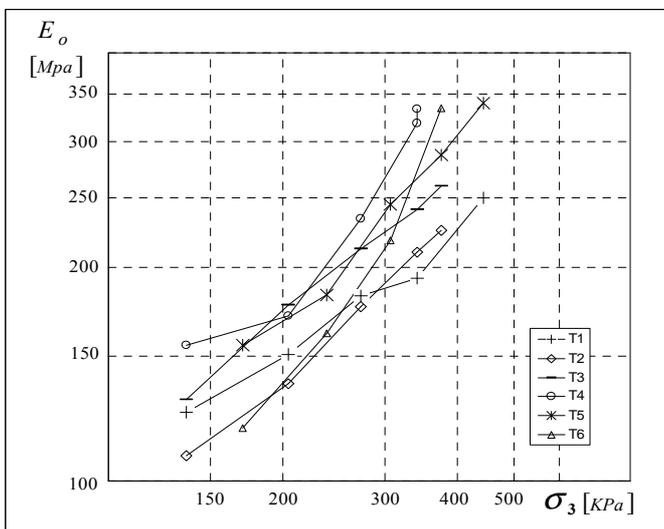


Figura 5: Modulo de Young inicial en función de la presión de confinamiento.

Estos resultados pueden ajustarse con la expresión potencial (Janbu 1963)

$$E_0 = 120 \left(\frac{\sigma_3}{100\text{kPa}} \right)^{0.52} \text{ MPa} \quad (1)$$

Módulo de Poisson

El módulo de Poisson cayó en el rango 0.15 - 0.18 para todos los ensayos y escalones de carga. No se encontró ninguna relación entre el valor del módulo de Poisson y la presión de confinamiento.

Curva de reducción del módulo de Young

El módulo de Young secante se define para un punto cualquiera de la curva de tensión-deformación como

$$E_s = \frac{\sigma_d}{\epsilon_a} \quad (2)$$

donde σ_d es el esfuerzo desviador y ϵ_a es la deformación específica axial. Entre las expresiones disponibles para modelar la reducción del módulo secante con la deformación se eligió la propuesta en el modelo hiperbólico de Hardin y Richart (1963) que relaciona el modulo secante con el modulo inicial a través de

$$E_s = \frac{E_0}{1 + \epsilon_a / \epsilon_r} \quad (3)$$

donde ϵ_r es la deformación para $E_s/E_0 = 0.5$. En la figura 6 se presentan los resultados obtenidos. Puede verse que la banda de curvas es relativamente estrecha y que ϵ_r cae en el rango 10^{-3} a $3 \cdot 10^{-3}$.

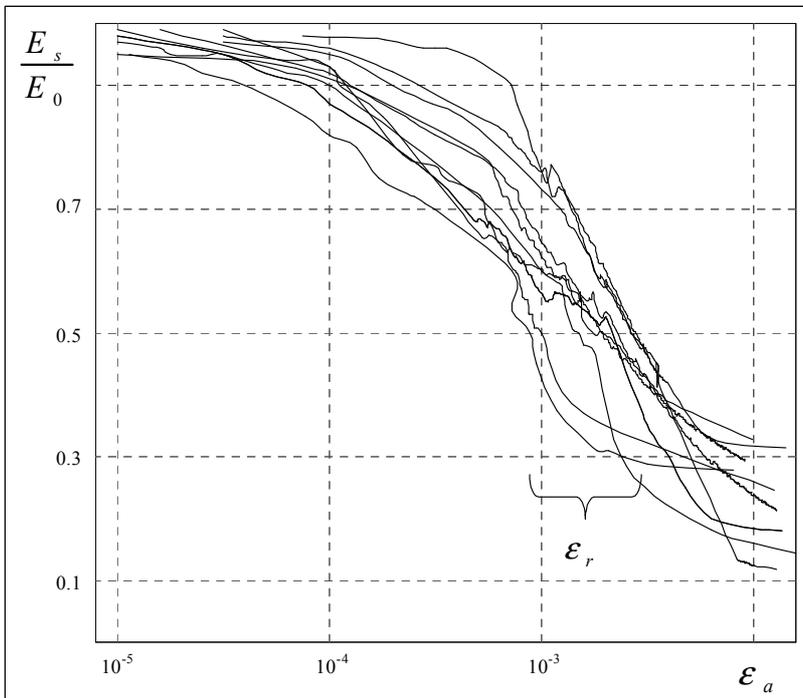


Figura 6: Reducción del modulo de Young secante en función de la deformación axial.

Parámetros resistentes

En prácticamente todas las muestras ensayadas se observó un comportamiento correspondiente al de un material fuertemente preconsolidado con una marcada resistencia máxima y una curva de ablandamiento posterior. La relación altura-diámetro de las muestras utilizadas es $H/D = 5''/4'' = 1.25$, por lo que los parámetros resistentes medidos están influidos por la restricción de deformación impuesta por los cabezales.

No se observó ninguna correlación entre los parámetros resistentes y las propiedades índice medidas o el contenido de carbonato de calcio. Es importante establecer que el proceso de determinación del contenido de carbonato de calcio utilizado (Quaglia y Quintela 2007) no permite distinguir si el carbonato medido pertenece a la matriz de suelo o a inclusiones o nódulos. En la tabla 2 se presentan los parámetros de resistencia y rigidez medidos en cada uno de los ensayos efectuados. Puede observarse que el módulo de Young inicial E_{ur} es significativamente inferior al módulo de Young medido con deformación local y presentado en la figura 5. En la figura 7 se muestra la relación entre la cohesión efectiva y el contenido de CaCO_3 .

Tabla 2. Parámetros resistentes

Ensayo	Fecha de Extracción	c [kPa]	ϕ_{max} [°]	E_{50} [kPa]	E_{ur} [kPa]
T9	05/12/07	38.0	45.8	6700	25200
T10	05/02/08	43.3	37.4	12810	24600
T11	05/02/08	30.8	38.7	11570	22100
T12	05/02/08	37.7	36.5	12400	25300
T13	09/02/08	57.2	35.0	13750	30990
T14	09/02/08	22.4	45.1	14510	32210
T15	09/02/08	47.3	36.6	21520	34670
T16	05/12/07	24.4	35.0	9300	22700
T17	26/02/08	1.8	48.4	13100	28360
T18	26/02/08	21.7	42.6	12250	28760
T19	26/02/08	18.8	43.3	5330	20790

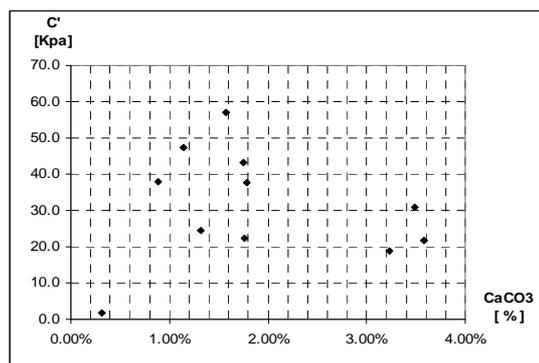


Figura 7. Correlación entre el % CaCO_3 y la cohesión efectiva.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS ENSAYOS

Debido a la baja relación altura – diámetro, las muestras fueron ensayadas con condiciones cinemáticas no uniformes y plano de ruptura impuesto. Por lo tanto, los valores de resistencia obtenidos son mayores que los que habrían sido obtenidos para condiciones ideales. La reducción de los resultados medidos a parámetros convencionales se efectuó mediante un análisis inverso. Se empleó el programa Plaxis (Vermeer 1998) con el modelo constitutivo HSM, que es una modificación del modelo hiperbólico de Duncan – Chang (1970). Para todas las simulaciones se supuso un valor del ángulo de dilatación $\psi=5^\circ$. Los parámetros resistentes corregidos se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Variables de entrada utilizadas en cada ensayo.

Modelo Ensayo	c_{med} [kPa]	c_{calc} [kPa]	ϕ_{med} [°]	ϕ_{calc} [°]	Modelo Ensayo	c_{med} [kPa]	c_{calc} [kPa]	ϕ_{med} [°]	ϕ_{calc} [°]
T9	38.0	37.0	45.8	45.8	T14	22.4	20.0	45.1	46.0
T10	43.3	41.0	37.4	40.0	T15	47.3	44.0	36.6	37.5
T11	30.8	29.0	38.7	39.0	T16	24.4	20.0	35.0	35.0
T12	37.7	37.5	36.5	36.0	T17	1.8	2.0	48.4	48.0
T13	57.2	49.0	35.0	37.5	T18	21.7	20.0	42.6	43.0
					T19	18.8	18.0	43.3	43.0

CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados de dos series de ensayos triaxiales de compresión sobre muestras inalteradas de suelos de la Formación Pampeano. En la primera serie se efectuaron mediciones del módulo de Young inicial con medición local de deformaciones. En la segunda serie se efectuaron mediciones de resistencia al corte con bajas presiones de confinamiento.

Se observó que: i) existe una importante dependencia del módulo de Young respecto de la presión de confinamiento para bajas deformaciones; ii) existe un valor no nulo para la cohesión efectiva en todas las muestras ensayadas; iii) el ángulo de fricción interna para bajas presiones de confinamiento es mayor a 35°; iv) no es posible determinar una correlación entre los parámetros de resistencia y el contenido de carbonato de calcio u otras propiedades índice medidas; y v) los módulos de Young medidos de manera externas son notablemente menores que los obtenidos en los ensayos con medición local.

REFERENCIAS

- BOLOGNESI, A. (1975). Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano. V PCSMFE, Buenos Aires, V: 255-302.
- DASARI, G., BOLTON, M., y Ng, C. (1995). Small strain measurement using modified LDTs. Report CUED/D-SOILS/TR275, Geotech. Group, Cambridge University.
- 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.
- FIDALGO, F., DE FRANCESCO, F. y PASCUAL, R. (1975). Geología superficial de la llanura Bonaerense. En: VI Congreso Geológico Argentino.
- HARDIN, B. y RICHART, F. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. JSMFD, ASCE, 89, SM1, 33-65.
- JANBU, N. (1963). Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proc. Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, I, 19-25.
- NÚÑEZ, E. (1986). Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City. En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- NÚÑEZ, E. y MICUCCI, C. (1986b). Cemented preconsolidated soils as very weak rocks. En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- QUAGLIA, G. (2007) Cohesión efectiva del pampeano medio. Informes de avance I y II. www.fi.uba.ar/materias/6408.
- QUAGLIA, G y QUINTELA, M (2007). Determinación del contenido de carbonato de calcio. www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm.
- 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.
- VERMEER, P. (1998). Plaxis Users Manual. Balkema, Rotterdam. Ne, 477 p.