

Rigidez inicial y cohesión efectiva de la Formación Pampeano

Small-strain stiffness and effective cohesion of the Pampeano Formation

Gastón Quaglia

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Se ejecutaron ensayos triaxiales drenados sobre muestras inalteradas de la Formación Pampeano obtenidas de la extensión de la línea H de Subterráneos de Buenos Aires. 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 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.

ABSTRACT

A series of triaxial compression tests were performed on undisturbed samples of Pampeano formation soils, obtained from the extension of the H metro line in Buenos Aires. A triaxial cell equipped with local measuring instruments and an internal load cell was used to measurement the small-strain Young's modulus, the degradation curve of Young's modulus and the strength parameters c and ϕ . In this work we present i) a brief description of the Pampeano formation; ii) the sampling methodology; iii) a description of the equipment and the procedures used in tests; iv) the obtained results; and v) a determination of strength parameters from an inverse analysis using numerical models. It was observed that: i) the small-strain Young's modulus is strongly dependent of the confining pressure; ii) a value of effective cohesion appears in all tested samples; iii) the internal friction angle is equal or greater than 35° for low confining pressures; and iv) its not possible to determine a correlation between the strength parameters and the calcium carbonate content or others index properties measured.

1 INTRODUCCIÓN

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. A la fecha, estos parámetros están calibrados a partir de 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 y en la cohesión efectiva. En este trabajo se presentan algunas mediciones de laboratorio de estos parámetros.

2 FORMACIÓN 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).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Material ensayado

En la Tabla 1 se presentan las propiedades índice y clasificación de todas las muestras ensayadas. Se determinaron los siguientes parámetros: LL: límite líquido; LP: límite plástico; ω_i : humedad inicial; ω_f : humedad final; $\%CaCO_3$: porcentaje de carbonato de calcio; γ_d : Peso unitario seco.

3.2 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).

Tabla 1: Material ensayado.

Ensayo	Fecha de	ω_i	ω_f	γ_d	CaCO ₃	LL	LP
	Extracci ^o n	%	%	kN/m ³	%	%	%
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



Figura 1: Procedimiento de extracción de muestras inalteradas mediante hinca estática de tubo.

3.3 Preparación de las muestras

Las muestras se saturaron con agua destilada y desaereada 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. Terminado este procedimiento 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 desaereada con bajo gradiente y con presión de cola de 100 kPa.

3.4 Ensayos

Los ensayos fueron realizados en una cámara triaxial Wykeham Farrance equipada con un sistema de adquisición de datos. Se emplearon transductores de deformación local (LDT) axiales y radiales (Sagüés 2008, Sfriso et al 2008) y una celda de carga ubicada en el interior de la cámara triaxial.

3.4.1 Ensayos triaxiales para medición de rigidez

Se ejecutaron seis ensayos de compresión drenada. En cada uno, se realizaron cinco escalones de carga y descarga con el siguiente procedimiento:

1. Se impuso una presión de confinamiento σ_3 .
2. Se impuso una deformación axial monotónica (0.9mm/hr) hasta alcanzar $\sigma_d/\sigma_3 = 1$ ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).
3. Se descargó a la misma velocidad hasta $\sigma_d/\sigma_3 = 0$.
4. Se aumentó σ_3 y se repitió el procedimiento.

3.4.2 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 fueron removidos y fueron reemplazados por calibres digitales externos. La medición de cambio de volumen se realizó mediante una bureta graduada provista de presión de cola y conectada a un sensor de presión piezo-resistivo.

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

1. Se impuso una presión de confinamiento de 20 kPa.
2. Se impuso una deformación axial monotónica (0.9mm/hr) hasta (casi) la resistencia máxima.
3. Se descargó a la misma velocidad hasta $\sigma_d/\sigma_3 = 0$.
4. Se aumento la presión de cámara a 50 kPa y se llevó la muestra a rotura.

4 RESULTADOS

4.1 Modulo 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 2. El modulo de Young secante se define como

$$E_s = \sigma_d / \epsilon_a \quad (1)$$

donde ϵ_a es la deformación específica axial.

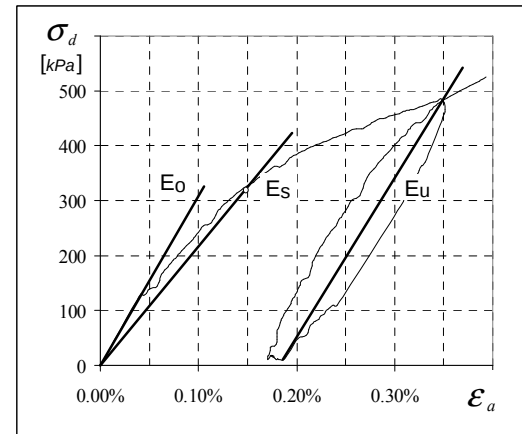


Figura 2: Definición de E_0 , E_{ur} y E_s .

Los valores de E_0 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) o a limitaciones del sistema de adquisición de datos. Los resultados obtenidos pueden ajustarse con la expresión potencial (Janbu 1963)

$$E_o = 95 \left(\frac{\sigma_3}{100 \text{ kPa}} \right)^{0.75} \text{ MPa} \quad (2)$$

En la figura 3 se presenta la dependencia de E_0 en función de la presión de confinamiento.

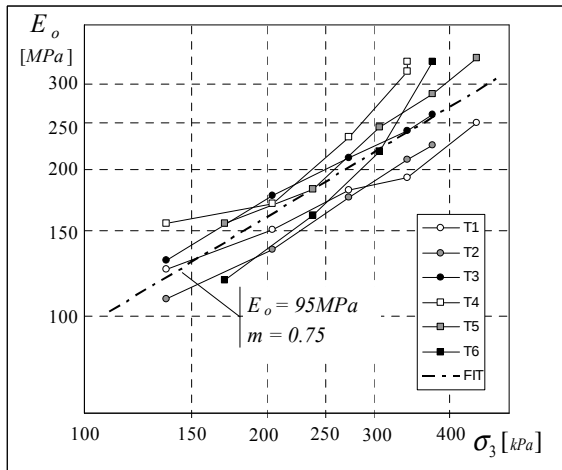


Figura 3: Módulo de Young inicial en función de la presión de confinamiento.

4.2 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.

4.3 Curva de reducción del módulo de Young

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 módulo secante con el módulo inicial a través de:

$$E_s = \frac{E_0}{1 + \varepsilon_a / \varepsilon_r} \quad (3)$$

Donde ε_r , deformación de referencia, se obtiene gráficamente de la representación gráfica de E_s/E_0 vs. ε_a ; cuyo valor es la abscisa que corresponde a una relación en ordenadas de $E_s/E_0 = 1/2$. En la figura 4 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 $3 \cdot 10^{-3}$.

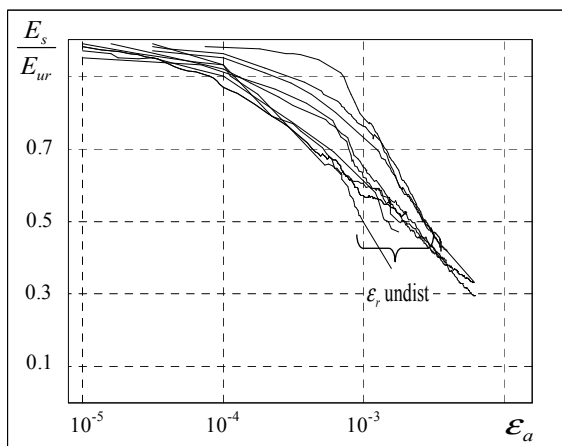


Figura 4: Reducción de E_s en función de la deformación axial.

4.4 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.

Tabla 2: Parámetros resistentes y rigidez.

Ensayo	Fecha de extracción	c kPa	ϕ_{max} °	E_{50} kN/m ²	E_{ur} kN/m ²	CaCO ₃ %
T9	05/12/07	38.0	45.8	6700	25200	0.89
T10	05/02/08	43.3	37.4	12810	24600	1.75
T11	05/02/08	30.8	38.7	11570	22100	3.49
T12	05/02/08	37.7	36.5	12400	25300	1.79
T13	09/02/08	57.2	35.0	13750	30990	1.58
T14	09/02/08	22.4	45.1	14510	32210	1.76
T15	09/02/08	47.3	36.6	21520	34670	1.15
T16	05/12/07	24.4	35.0	9300	22700	1.31
T17	26/02/08	2.0	48.4	13100	28360	0.32
T18	26/02/08	21.7	42.6	12250	28760	3.58
T19	26/02/08	18.8	43.3	5330	20790	3.23

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 E_{ur} es significativamente inferior al módulo de Young medido con deformación local y presentado en la figura 3.

En la siguiente figura se observan los círculos de Mohr de que representan cada ensayo y las líneas de falla correspondientes a los estados pico (ϕ_{max}).

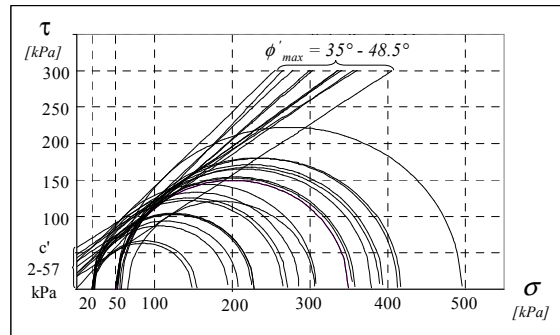


Figura 5: Envolvente de falla para estados pico.

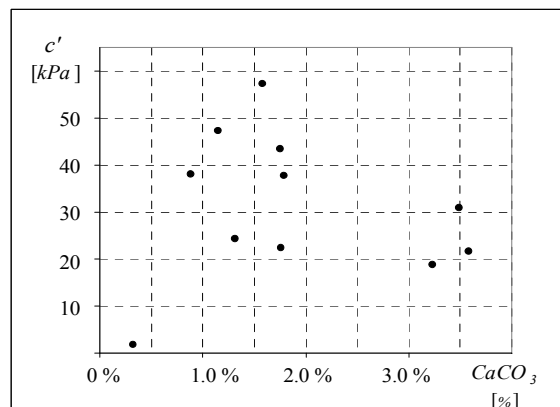


Figura 6: Correlación entre c' y el contenido de carbonato de calcio.

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 no permite distinguir si el carbonato medido pertenece a la matriz de suelo o a inclusiones o nódulos.

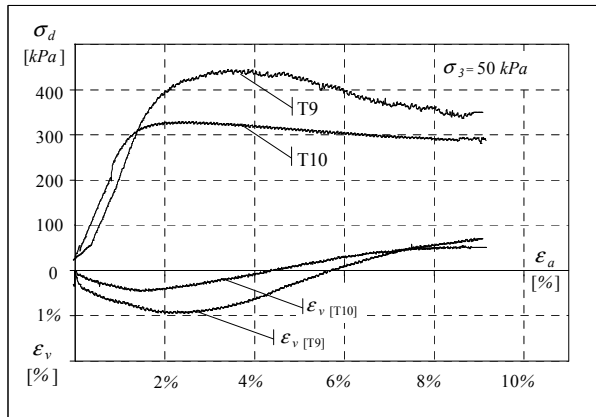


Figura 7: Curvas σ_d - ϵ_a y ϵ_v - ϵ_a .

4.5 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS ENSAYOS

Debido a la baja relación altura – diámetro, puede considerarse que las muestras fueron ensayadas con condiciones cinemáticas no uniformes y con un 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. En la figura 8 se observa la malla deformada en uno de los ensayos, se modelizó un cuarto de muestra con simetría axial.

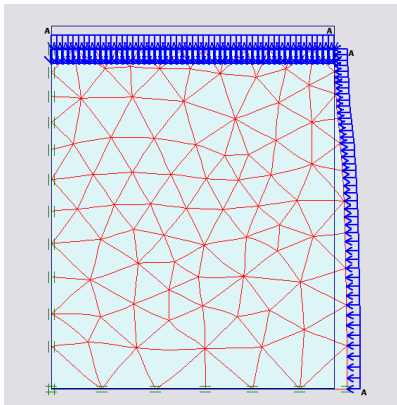


Figura 8: Malla deformada.

Tabla 3: Variables de entrada utilizadas en cada ensayo.

	c_{med}	c_{calc}	ϕ_{med}	ϕ_{calc}		c_{med}	c_{calc}	ϕ_{med}	ϕ_{calc}
	kPa	kPa	°	°					
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

5 CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados de dos series de ensayos triaxiales sobre muestras inalteradas del Pampeano. En los que se midió el módulo de Young inicial con medición local de deformaciones y parámetros 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. y SFRISO, A. (2008). Medición de la rigidez inicial y cohesión efectiva en muestras inalteradas del Pampeano. XIX Cong. Arg de Mec. de Suelos e Ing. Geotécnica (CAMSIG XIX).
- 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. Zhang, L. 2004. Reliability using proof pile load test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Vol. 130, N° 11, pp. 1203-1213.