

# Actualización de la información geotécnica de los suelos de la Ciudad de Buenos Aires

M. Codevilla & A. Sfriso  
AOSA SRL y Universidad de Buenos Aires



## RESUMEN

Entre los años 1998 y 2010 la red de subterráneos de Buenos Aires (Argentina) fue ampliada en más de 15 km. En simultáneo con el desarrollo de estas obras se ejecutaron numerosas campañas geotécnicas y sus resultados se emplearon en el diseño de túneles y cavernas subterráneas. En este artículo se presenta un resumen ordenado e interpretado de la información obtenida en las campañas geotécnicas mencionadas, con particular énfasis en los parámetros de resistencia, rigidez y permeabilidad media de los suelos del centro de la Ciudad de Buenos Aires, conocidos localmente bajo el nombre de "Formación Pampeano". Esta nueva información se compara y consolida con información disponible en publicaciones anteriores sobre los suelos de Buenos Aires y sus obras subterráneas. Se propone la incorporación de los ensayos de carga en placa y presiométricos (PLT y PMT) como parte de los estudios básicos de investigación del terreno, en apoyo del tradicional ensayo de penetración estándar SPT.

## ABSTRACT

Between 1998 and 2010, the metro network of Buenos Aires (Argentina) was extended 15+km. Several geotechnical campaigns were performed and their results employed for the design of tunnels and underground space structures. In this article, an interpreted summary of the information obtained in these campaigns is presented, with particular emphasis on the strength, stiffness and permeability design parameters of the soils of the Buenos Aires city center, locally known as Pampeano Formation. This new information is compared and consolidated with the information available in previous publications about Buenos Aires' soils and its subway works. The incorporation of plate load test and pressurimeters test (PLT and PMT) is proposed as part of the basic soil investigation, supporting the traditional standard penetration test (SPT).

## 1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una actualización de la caracterización geotécnica de los suelos del centro de la Ciudad de Buenos Aires. La nueva información que aquí se presenta es el resultado de las campañas geotécnicas efectuadas para la extensión de las líneas A, B, E y H de la red de Subterráneos de Buenos Aires y otras campañas geotécnicas efectuadas entre 1998 y 2010.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS DE BUENOS AIRES

Los suelos del centro de la Ciudad de Buenos Aires pertenecen a la "Formación Pampeano". Sucintamente, el Pampeano es un loess modificado, preconsolidado por desecación y cementado con carbonatos de calcio y óxidos de manganeso (Fidalgo et al, 1975) (Bolognesi, 1975) (Núñez, 1986).

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 e 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, 1986).

El perfil típico del centro de la Ciudad puede sintetizarse como sigue:

a) Relleno superficial (superficie a 1m/3m): arcillas medianamente compactas y suelos aportados por el hombre.

b) Pampeano Superior (1m/3m a 8m/12m): limos y arcillas de mediana plasticidad, compactos con nódulos calcáreos en matriz pobremente cementada.

c) Pampeano Medio (8m/12m a 25m/30m): limos y arcillas de mediana plasticidad duros y fisurados, con matriz mediana a fuertemente cementada.

d) Pampeano Inferior (25m/30m a 36m/40m): arcillas de mediana y alta plasticidad compactas, pobremente cementadas, fisuradas y probablemente cizalladas.

e) Formación Puelchense: Arenas silíceas limpias, densas a muy densas.

El Pampeano es muy favorable para tunelería porque tiene una importante resistencia a la compresión simple en corto y mediano plazo, y a la vez exhibe un comportamiento altamente friccional.

Los suelos atravesados por la mayoría de los túneles pertenecen al Pampeano medio. Están sobreconsolidados por desecación con una presión equivalente de tapada de al menos 1.0MPa, por lo que la razón de sobreconsolidación  $OCR$  se ubica entre 3.5 y 4.0 (Bolognesi y Vardé, 1991) (Sfriso, 1999, 2006). El coeficiente de empuje en reposo  $K_0$  no fue medido. A partir de la historia geológica del depósito, se infiere que  $K_0$  debe estar en el rango 0.55 – 0.70 en el Pampeano Superior y 0.65 – 0.80 para mayores profundidades (Núñez, 1986) (Sfriso, 2006).

### 3 ANTECEDENTES

Las primeras publicaciones sobre la Formación Pampeano son de Bolognesi y Moretto (1957, 1961) y Trevisán y Mauriño (1963). La primera descripción ordenada de la geología regional es de Fidalgo y colaboradores (1975). Las primeras caracterizaciones geomecánicas modernas, que incluyeron parámetros de diseño basados en extensas campañas de medición, fueron producidas por Núñez (Núñez, 1986) (Núñez y Micucci, 1986). Otras contribuciones significativas son (Moretto, 1972), (Bolognesi y Vardé, 1991), (Núñez y Trevisán, 1999), (Sfriso, 1999, 2006, 2008) y, finalmente, (Sfriso et al 2008).

### 4 PRACTICA ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA EN BUENOS AIRES

Las técnicas rutinarias de investigación en la Ciudad de Buenos Aires se basan fundamentalmente en el ensayo SPT, ejecutado con el sacamuestras convencional de 2" y con otro modificado de 2½" de diámetro exterior (IRAM). Se está abandonando la práctica de ejecutar ensayos triaxiales no consolidados y no drenados sobre muestras obtenidas con el sacamuestras de 2½", aunque aún pueden encontrarse reportes que los contienen.

En obras de tunelería y en otras obras importantes de infraestructura se emplean también los ensayos de carga en placa (PLT), presiométricos (PMT), ensayos de bombeo y ensayos triaxiales efectuados sobre muestras recuperadas con el sacatestigos Denison.

### 5 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS RECIENTES PARA OBRAS SUBTERRÁNEAS

#### 5.1 Ensayos SPT

Se efectuaron numerosos sondeos con registros SPT para las líneas A, B, E y H de la red de Subterráneos de Buenos Aires. En la figura 1 se muestran perfiles típicos.

Se aprecia el aumento de la resistencia a la penetración con la profundidad. A partir de los 8m de profundidad, el nivel de compacidad del terreno es alto, registrándose valores  $(N_1)_{60} > 60$ . La existencia de agentes cementantes distribuidos en forma errática genera la fuerte dispersión de resultados que se observa en los ensayos de penetración.

#### 5.2 Ensayos PLT

En las campañas mencionadas se efectuaron varios ensayos de carga en placa (PLT). En todos los casos se utilizaron dos placas circulares de 0.3m de diámetro, cada una apoyada en las paredes de la excavación en donde se realizó el ensayo. Se aplicó la carga mediante un pistón hidráulico de 120 kN de capacidad. Se obtuvieron curvas presión - deformación lateral a diferentes profundidades, registrando los datos en campo en forma electrónica.

Para cada una de las mediciones se determinaron los módulos de reacción inicial ( $K_i$ ) y de recarga ( $K_r$ ) mediante el empleo de las expresiones:

$$\text{Carga: } p = K_i / [ 1/(\delta - \delta_0) + K_i/p_{ult} ] \quad [1]$$

$$\text{Recarga: } p = K_r (\delta - \delta_1) \quad [2]$$

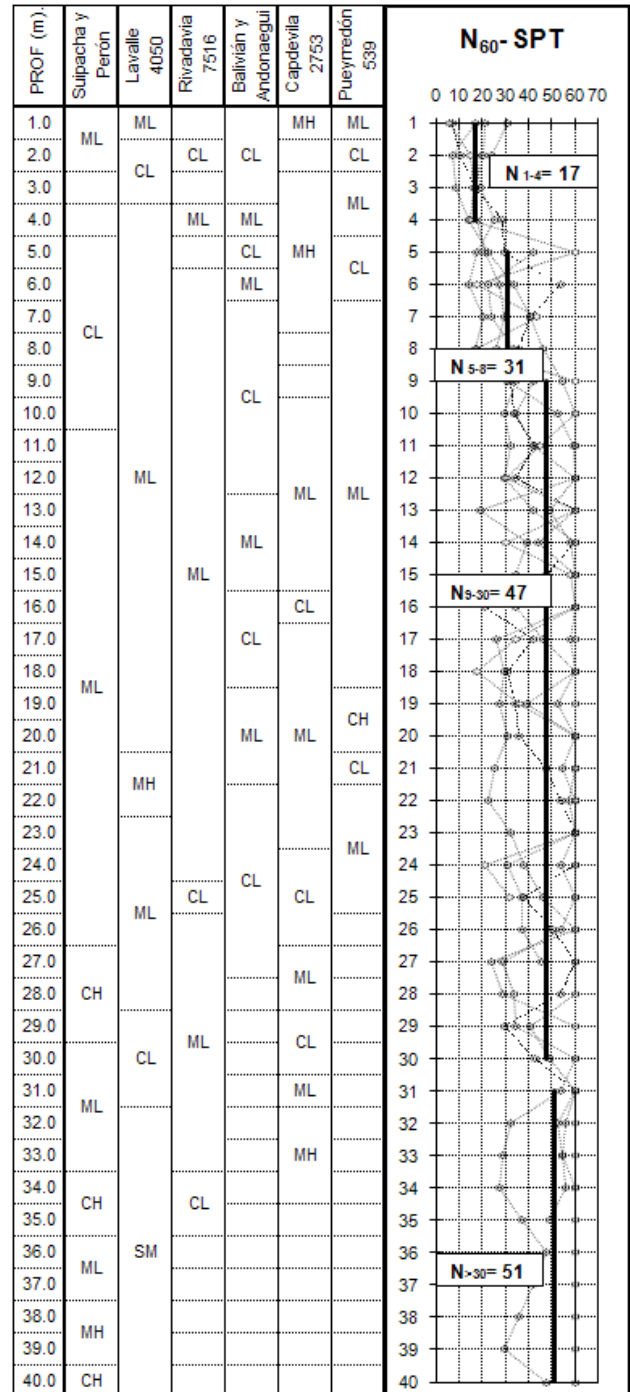


Figura 1. Perfiles geotécnicos en suelos de la Ciudad de Buenos Aires. Ensayo SPT.

donde  $k_i$  es el módulo de reacción inicial,  $\delta_0$  es un ajuste al desplazamiento inicial,  $p_{ult}$  es la asíntota para desplazamiento infinito y  $\delta_1$  es el corrimiento de origen necesario para ajustar la ecuación lineal con el segundo ciclo de carga - descarga. En la figura 2 se observa una de las placas de carga junto con sus sensores de desplazamiento. En la figura 3 se presenta un resultado típico.

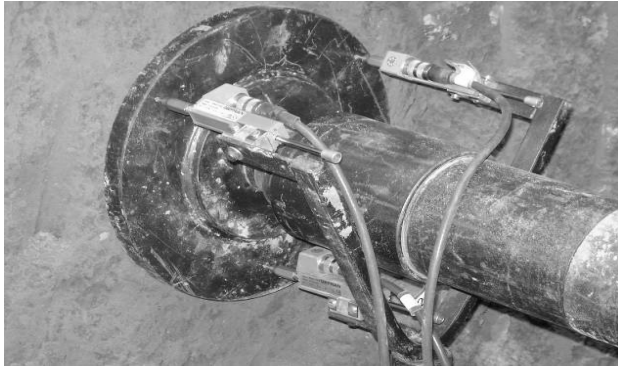


Figura 2. Ensayo PLT. Placa y sensores de desplazamiento.

Estas expresiones se ajustan a los valores experimentales obtenidos en cada ensayo. En las figuras 4 y 5 se presentan respectivamente los módulos de reacción inicial y en recarga medidos, en función de la profundidad. En la Tabla 1 se resumen los resultados (Codevilla y Sfriso, 2010).

Tabla 1. Módulos de reacción  $K_i$  y  $K_r$  medidos.

Prof. (m)	2-8m	8-18m	>18m
Módulos			
$K_i$ (MN/m <sup>3</sup> )	100-880	150-2250	100-750
$K_r$ (MN/m <sup>3</sup> )	170-2000	420-4000	340-2600

Los rangos de resultados son muy amplios. Se observan algunos puntos con resultados muy superiores a los mencionados, en general asociados a niveles de mayor concentración en la cementación calcárea del depósito.

El ensayo PLT permite estimar el módulo de Young inicial y en recarga mediante las expresiones:

$$E_i \sim K_i D/1.5 \quad [3]$$

$$E_r \sim K_r D/1.5 \quad [4]$$

donde  $D$  es el diámetro de la placa de carga. El rango de resultados típico es  $50\text{MPa} < E_i < 200\text{MPa}$  y  $120 < E_r < 450\text{MPa}$ . Estos valores son al menos un 100% superiores a los primeros valores anteriormente publicados en la bibliografía (Bolognesi, 1975) y un 50% superiores a los valores comúnmente utilizados para diseño (Núñez, 1986) (Sfriso, 1999).

### 5.3 Ensayos PMT

También se efectuaron ensayos presiométricos (PMT). Se determinaron valores de presión última aplicada ( $P_L$ ) y módulo presiométrico ( $E_p$ ) en cada uno de los ensayos. En las figuras 6 y 7 y en la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 2. Parámetros  $P_L$  y  $E_p$  medidos.

Prof. (m)	2-8m	8-20m	>20m
Parámetros			
$P_L$ (MPa)	1.8-3.1	3.3-6.1	4.7-6.0
$E_p$ (MPa)	9.0-44.8	19.3-94.7	20.0-96.4

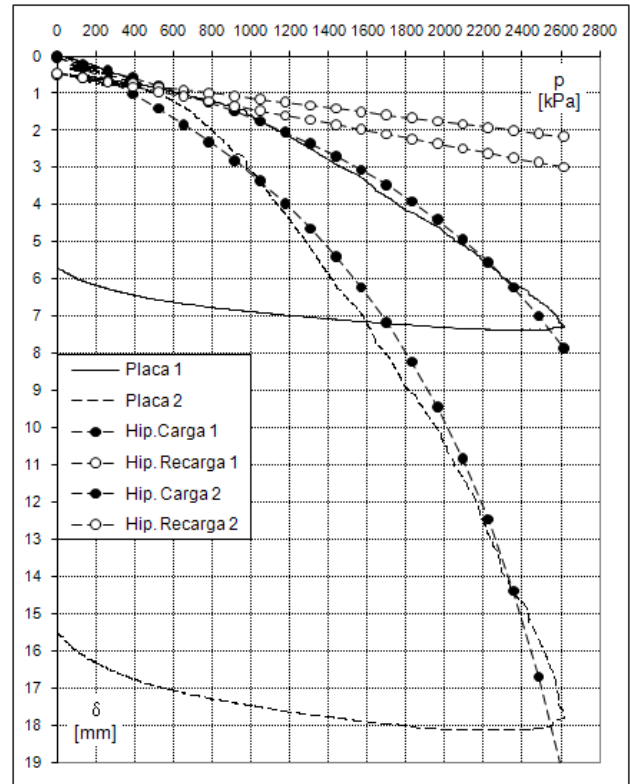


Figura 3. Ensayo PLT. Línea A, Av. Rivadavia 7787, prof. 13.0m. Curvas presión – deformación lateral.

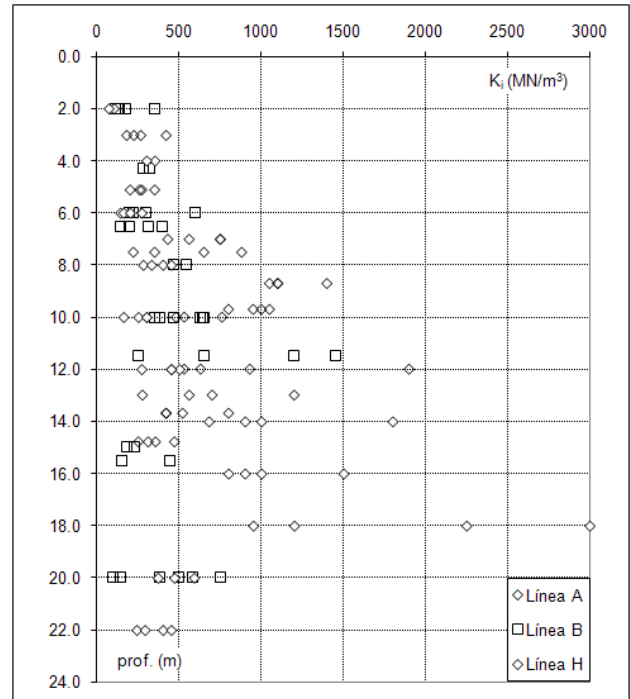


Figura 4. Ensayo PLT. Relación  $K_i$  – profundidad. Líneas A, B y H.

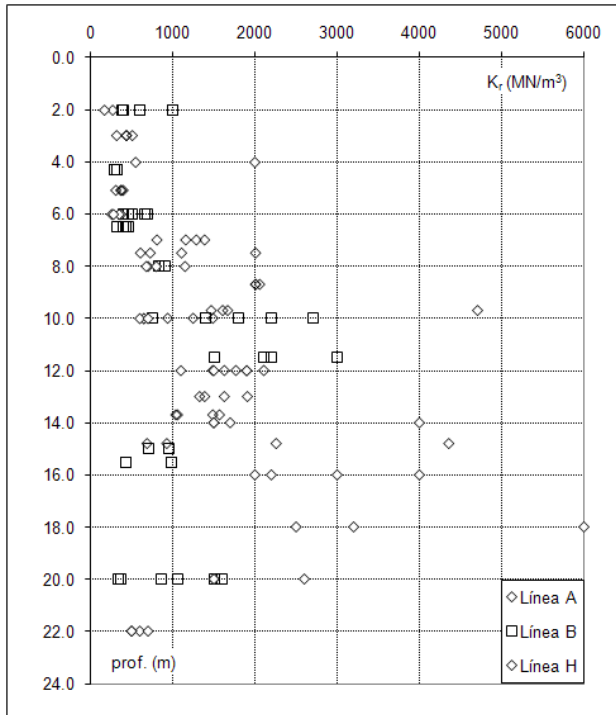


Figura 5. Ensayo PLT. Relación  $K_r$  – profundidad. Líneas A, B y H.

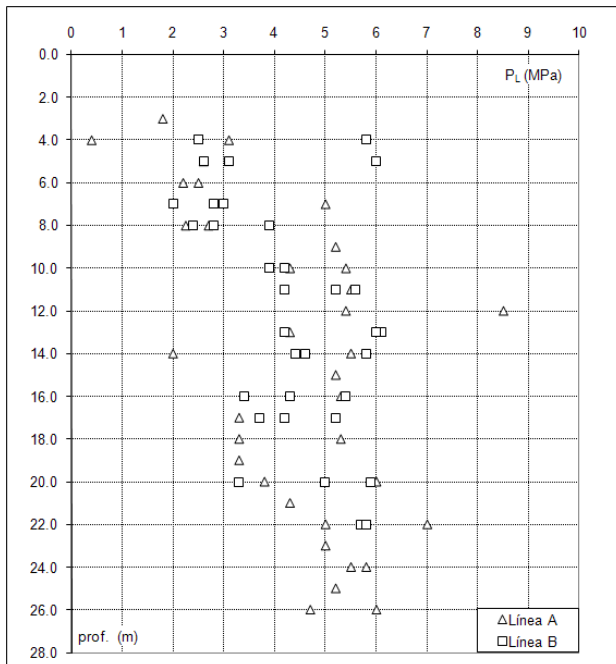


Figura 6. Ensayo PMT. Relación  $P_L$  – profundidad. Líneas A y B.

#### 5.4 Ensayos triaxiales

Se realizaron ensayos triaxiales- condición UU sobre testigos de 5" extraídos con sacamuestras Denison. Se aplicaron dos escalones de carga sobre la misma muestra, con presiones de cámara entre 300 y 600 kPa.

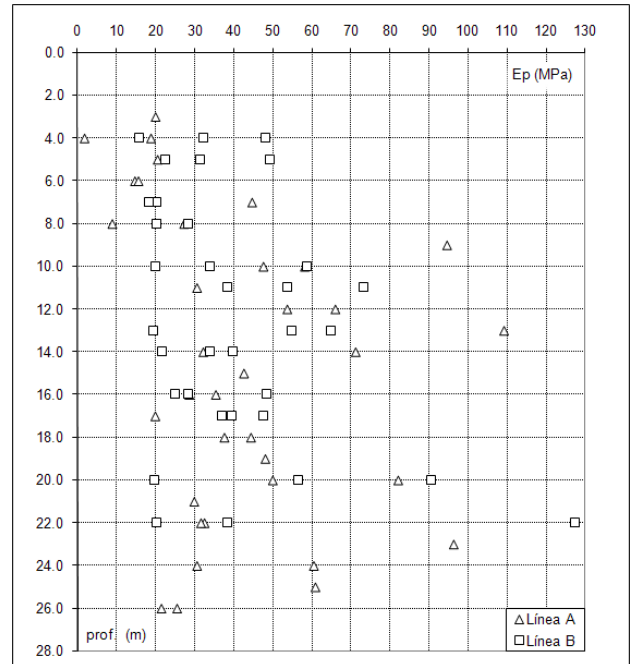


Figura 7. Ensayo PMT. Relación  $E_p$  – profundidad. Líneas A y B.

En el primer escalón no se llega a ruptura. Los parámetros de resistencia se estimaron extrapolando la curva tensión – deformación obtenida con el modelo hiperbólico de Kondner. En la Tabla 3 se presenta el rango de medición obtenido para los parámetros de cohesión y ángulo de fricción en condición no drenada. Los suelos superficiales presentan  $\phi_u > 0$  porque son suelos no saturados. En la figura 8 se presenta un resultado típico.

Tabla 3. Parámetros no drenados  $c_u$  y  $\phi_u$ .

Prof. (m)	1–8m	8–12m	>12m
Parámetros			
$c_u$ (kPa)	50-200	75-270	90-450
$\phi_u$ (°)	8 - 20	0 - 10	0

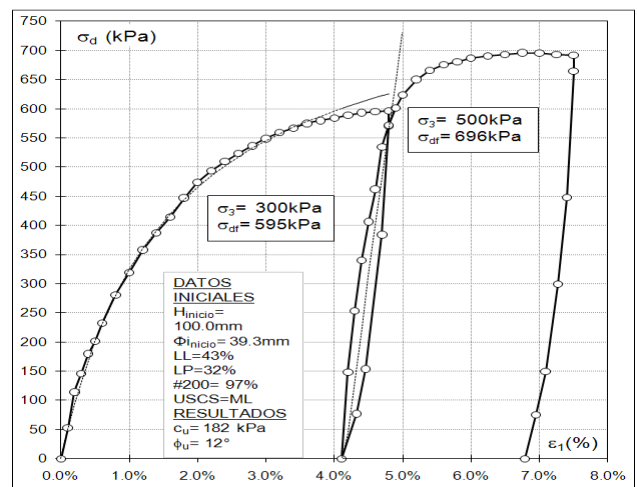


Figura 8. Ensayo triaxial escalonado UU. Línea A, Av. Rivadavia 7735, prof. 9.0 – 10.0m.

### 5.5 Ensayos de bombeo

La permeabilidad media de la Formación Pampeano está controlada por el estado de fisuración del depósito. A pesar de que el Pampeano clasifica como limo o arcilla de mediana plasticidad, su permeabilidad media es similar a la de una arena fina (Núñez y Micucci, 1986). En la Tabla 4 se presentan los resultados de tres ensayos de bombeo convencionales. En la tabla, Q es el caudal bombeado, mientras que R y k son el radio de influencia y la permeabilidad, obtenidos como mejor ajuste de los resultados experimentales a la expresión

$$Q = \pi k [(H-s)^2 - t^2] / \ln(R/a) [1 + (0.3 + 10a/H) \sin(1.8s/H)] \quad [5]$$

Tabla 4. Resultados de ensayos de bombeo.

Ensayo	Q m <sup>3</sup> /seg	R m	k m/s
Jaramillo y V. Obligado	4.6	35	2.36x10 <sup>-5</sup>
La Pampa 2567	3.6	126	7.30x10 <sup>-5</sup>
Triunvirato 5150	4.3	63	1.63x10 <sup>-5</sup>

### 6 PARAMETROS MECANICOS ADOPTADOS PARA EL DISEÑO

La fuente principal de datos para la calibración de parámetros mecánicos y técnicas de modelización es la medición, observación y análisis inverso del comportamiento del terreno durante la construcción de las obras.

En la Tabla 5 se presentan los rangos de los parámetros mecánicos resultantes de ese proceso de calibración realizado en el Pampeano.

Tabla 5. Parámetros mecánicos recomendados.

Parámetro	Unidad	Superior	Medio	Inferior
c <sub>u</sub>	kPa	50-100	110-220	40-120
φ <sub>u</sub>	°	10-20	0-10	0
c'	kPa	10-25	25-50	15-30
φ'	°	30-32	30-34	29-32
ψ	°	0-3	0-6	0-3
E <sub>50</sub>	MPa	60-100	70-150	60-90
E <sub>ur</sub>	MPa	150-250	180-300	140-220
m	-	0.0-0.4	0.0-0.4	0.0-0.4
v	-	0.20-0.30	0.20-0.30	0.20-0.30
R <sub>f</sub>	-	0.80-0.90	0.80-0.90	0.80-0.90

donde c<sub>u</sub> es la cohesión no drenada, φ<sub>u</sub> es el ángulo de fricción no drenado, c' es la cohesión efectiva, ψ es el ángulo de dilatación, E<sub>50</sub> es el módulo de deformación al 50% de rotura y E<sub>ur</sub> es el módulo de Young en recarga (ambos para un confinamiento de 100kPa), m es el exponente de Jambu, v es el coeficiente de Poisson, R<sub>f</sub> es la relación de falla. Las expresiones analíticas se pueden consultar del manual Plaxis (Vermeer, 1998).

### 7 CONCLUSIONES

Se presentó una actualización de los parámetros mecánicos de la Formación Pampeano. Los parámetros propuestos están basados en campañas geotécnicas desarrolladas para el diseño de obras subterráneas y en

el análisis inverso del comportamiento de túneles ejecutados durante la extensión de las líneas A, B, E y H de Subterráneos de Buenos Aires, efectuadas entre 1998 y 2010.

### 8 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las empresas constructoras Roggio, Dycasa y SBASE por su desinterés en la divulgación de estos resultados. A todos sus profesionales que han intervenido y participado en la correcta ejecución de los ensayos en campo. También, al Prof. E. Núñez, por sus permanentes contribuciones y discusiones desarrolladas a lo largo de más de veinte años en la Universidad de Buenos Aires.

### 9 REFERENCIAS

- Bolognesi A., Moretto O. 1957. Properties and behaviour of silty soil originated from Loess formation. 4<sup>th</sup> ICSMFE Vol. 1, p. 9.
- Bolognesi A, Moretto O. 1961. Propiedades del subsuelo del Gran Buenos Aires. 1 PCSMFE. Vol 1, p.303-310.
- Bolognesi, A. 1975. Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano. V PCSMFE, Buenos Aires, V: 255-302.
- Bolognesi, A. y Vardé, O. 1991. Subterráneos en Buenos Aires. IX PCSMFE, Viña del Mar, Chile, III:1329-1350.
- Codevilla, M. y Sfriso, A. 2010. Ensayos de carga en placa en suelos de la Ciudad de Buenos Aires. XX CAMSIG 2010. CD-ROM. Mendoza.
- Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. 1975. Geología superficial de la llanura Bonaerense. VI Cong Geol Arg, Bahía Blanca.
- Moretto, O. 1972. Earth pressures on rigid walls for soils preconsolidated by desiccation in the City of Buenos Aires. V ECSMFE. Vol 2, p.1-10. Madrid.
- Núñez, E. 1986. Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City. Proceedings, V ICIAEG, Buenos Aires.
- Núñez, E. y C. Micucci 1986. Cemented preconsolidated soils as very weak rocks. V ICIAEG, Buenos Aires.
- Núñez, E., Trevisán, S. 1999. Main towers of La Plata City Cathedral. Reinforcement of foundations. XI PCSMGE. Foz do Iguazu, p.1545-1554.
- Sfriso, A. 1999. Tunnels in Buenos Aires soils: Application of numerical methods to the structural design of linings. XI PCSMGE, Foz de Iguazú, Estado de Paraná, Brasil.
- Sfriso, A. 2006. Algunos procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos XIII CAMSIG, San Juan, 1-17.
- Sfriso A, Sagüés P, Quaglia G, Quintela M, Ledesma O. 2008. Small-strain stiffness of the Pampeano Formation. IS-Atlanta, IV Intl Symp Def Char Geomat I:237-244.
- Sfriso, A. 2008. Metro tunnels in Buenos Aires: Design and construction procedures 1998 – 2007. 6th Intl Symp Geot Aspects Underg Constr Soft Ground, Shanghai, 335-341.
- Trevisán, S.J., Mauriño, V. 1963. Condiciones geológicas y geomecánicas del subsuelo de la ciudad de La Plata y sus alrededores. II PCSMFE, San Pablo.

Vermeer, P. 1998. Plaxis Users Manual. Balkema, Rotterdam. Ne.