

Tanque Sobreelevado Apoyado sobre Pilotes

E. NUÑEZ

Ing. Civil – Profesor UBA – Consultor en Geotecnia

SUMARIO: Un gran tanque criogénico se cimentó sobre un grupo de pilotes de hormigón armado premoldeados; la placa cabezal está separada del terreno para eliminar los problemas de transferencia de temperatura. Los pilotes se hincaron en el terreno previa perforación, relleno parcial de la misma con hormigón fresco, e hinca posterior controlada con martillos automáticos de alta eficiencia. Los ensayos de carga mostraron las características particulares del comportamiento mecánico de la interface hormigón – suelo y permitieron estimar el comportamiento integral de la fundación. El trabajo incluye una revisión de los conocimientos sobre los suelos de la Formación Pampeano y su aptitud para recibir las cargas de cimentaciones directas e indirectas.

PALABRAS CLAVE: *Formación Pampeano, Pilotes, Ensayo de Carga, Asentamientos.*

1.- INTRODUCCIÓN

El problema de la cimentación de un gran tanque criogénico de 43 m de diámetro y 44 m de altura con una capacidad de almacenamiento aprox. 45.000 m³, se resolvió ejecutando una gran placa-cabezal apoyada sobre pilotes premoldeados de hormigón; la placa de hormigón armado está separada del terreno para eliminar los problemas de transferencia de temperatura a los suelos subyacentes.

Originalmente se consideró efectuar una cimentación directa que apoyara sobre la Formación Pampeano. Los suelos de dicha formación son, en general, suficientemente resistentes como para permitir la acción de grandes cargas actuando sobre bases aisladas y/o plateas. Ocasionalmente la parte superior del perfil estratigráfico es bastante más débil, por lo cual es necesario profundizar algunos metros el plano de cimentación.

En este caso, la cimentación directa obligaba a considerar los problemas de transferencia de temperatura y emplear las soluciones convencionales de aislación correspondientes. Estas circunstancias condujeron a optar por ejecutar una platea piloteada separada del terreno, eliminando consiguientemente los gastos de acondicionamiento superficial del subsuelo de fundación, y los que se hubieran necesitado para la ejecución y mantenimiento del sistema de aislación.

Como los suelos de la formación pampeano impiden la hinca directa de estos pilotes, los

mismos se colocaron ejecutando previamente una perforación la cual se rellenaba con hormigón fresco inmediatamente antes de la colocación del pilote. Los pilotes fueron hincados con martillo Diesel de alta eficiencia.

2.- CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SITIO

El subsuelo en el área de interés corresponde a la denominada Formación Pampeano. Generalmente se acepta que estos depósitos limo-arcillosos se formaron durante el cuartario, distinguiéndose los 2/3 superiores como de origen eólico y el tercio inferior de origen fluvial. Todos los suelos están preconsolidados por desecación, interpretándose que la zona inferior de origen fluvial sufrió el proceso como consecuencia de los diferentes períodos de glaciación, que al exponer los suelos durante el descenso del mar determinaron épocas "secas" de evaporación y contracción. La parte superior de origen eólico experimentó una alternancia de etapas húmedas y secas. La precipitación de carbonatos de calcio y magnesio y formación de óxidos determinó la existencia de bancos, lentes o estratos más o menos continuos de suelos limo-arcillosos cuya matriz se encuentra inhomogéneamente impregnada y cementada con calcáreos.

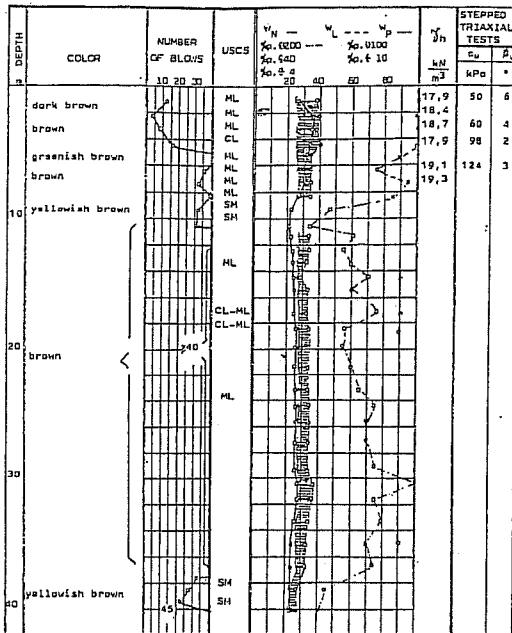


Fig. 1: Perfil Estratigráfico en el sitio

Subyacente al Pampeano se encuentran las arenas medianas y finas del terciario pertenecientes a la formación puelchense, y que son una fase regresiva de una transgresión marina; estas arenas tienen un color blancuzco amarillento, son densas y muy densas. Dependiendo del nivel de la superficie del terreno, y según las cotas locales de la ubicación estudiada, a unos 45 a 70 m de profundidad es común encontrar intercalada una capa de arcilla dura y muy dura color verde azulado, de unos 6 a 8 m de espesor, normalmente consolidada. La permeabilidad media de los suelos medida en el laboratorio sobre muestras inalteradas es del orden de 10^{-4} a $10^{-5} \frac{cm}{seg}$.

La resistividad térmica es del orden de $1 \frac{[hr][ft][degF/ft]}{BTU}$

La resistividad eléctrica es del orden de $R[ohm.cm] \cong \frac{10^4}{0.7 \cdot \omega - 6}$ para

$10 \leq \omega[\%] \leq 25$. La temperatura media anual de esta zona es aprox. 17°C; la precipitación media anual es del orden de 1000 mm y el Índice de Humedad de Thorntwaite está entre el 15 % y el 20 %.

Las investigaciones geotécnicas de rutina incluyen la recuperación de muestras

representativas mediante el uso de un sacamuestras de aprox 2" de diámetro las cuales, alojadas en portamuestras de PVC herméticamente selladas, son enviadas al laboratorio. El sacatestigos se hince en el terreno siguiendo la técnica del SPT. La resistencia a penetración se mide por el número de golpes N' el cual está relacionado con el valor N del SPT mediante la expresión $N = 0,8 \cdot N'$ [2.1]

En el laboratorio se ejecutan los ensayos de identificación que permiten clasificar los suelos de acuerdo con el sistema de A. Casagrande. Además sobre muestras que no presentan signos aparentes de perturbación, se determinan pesos unitarios y se ejecutan ensayos triaxiales no drenados escalonados para estimar el valor de los parámetros C_u y ϕ_u .

Los resultados de los ensayos de terreno y laboratorio se presentan en una Planilla Estratigráfica como se muestra en la Fig.1.

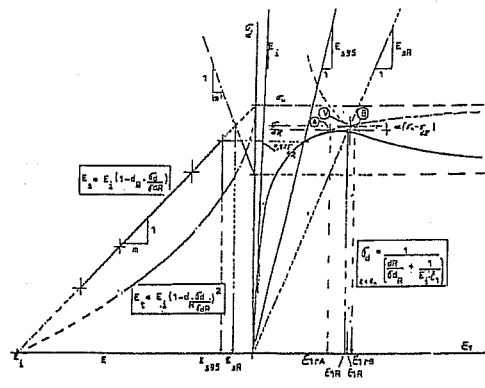


Fig. 2: Tensiones - Deformaciones - Módulos

3.- CONFIGURACIÓN DEL PERFIL DEL ESTRATO - RESISTENTE

Sobre la base de los resultados obtenidos en la investigación geotécnica se configura un perfil de suelos en donde se incluyen las características de resistencia y deformabilidad estableciendo rangos probables de los parámetros significativos.

Las relaciones tensión - deformación resultan según se muestran en las Figs. 2 y 3. Los resultados de un ensayo triaxial no drenado escalonado se procesa de acuerdo con lo indicado en la Fig. 4 Los valores de E_i obtenidos en el laboratorio son tanto menores a los reales cuanto mayor sea el grado de cementación calcárea. Sin embargo, el valor de la resistencia a rotura

$\sigma_{dR} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ en general no disminuye ensayando muestras inalteradas.
 mucho más que un 15% o 20% del que resulta

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_s \quad [3.1]; \quad \left(\frac{\sigma_d = E_s}{\varepsilon_1} \right)_{\varepsilon_1 \rightarrow 0} = E_i \quad [3.2]; \quad E_s = E_i - m \cdot \sigma_d$$

$$[3.3];$$

$$m = \frac{E_i}{\sigma_{du}} \quad [3.4]; \quad \frac{\sigma_{dR}}{\sigma_{du}} = d_R \quad [3.5]; \quad m = \frac{E_i \cdot d_R}{\sigma_{dR}}$$

$$[3.6];$$

$$E_s = E_i - \frac{E_i \cdot d_R}{\sigma_{dR}} \cdot \sigma_d = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.7]; \quad E_s = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_i - m \cdot \sigma_d \quad [3.8] \quad \therefore$$

$$\frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} + m \cdot \sigma_d = E_i = \sigma_d \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + m \right) \quad [3.9]; \quad \sigma_d = \frac{E_i}{\frac{1}{\varepsilon_1} + m} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + m} \cdot \frac{1}{\frac{d_R}{\sigma_{dR}} + \frac{1}{E_i \cdot \varepsilon_1}} \quad [3.10];$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}} = \sigma_{dR} = (N_\phi - 1) \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \sqrt{N_\phi} \quad [3.11]; \quad N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad [3.12];$$

$$\sigma_d = \frac{E_i \cdot \varepsilon_1}{1 + m \cdot \varepsilon_1} \quad [3.13]; \quad E_i = \frac{\partial \sigma_d}{\partial \varepsilon_1} = \frac{E_i}{(1 + m \cdot \varepsilon_1)^2} = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right)^2 = \frac{E_i}{\left(1 + \frac{d_R \cdot E_i}{\sigma_{dR} \cdot \varepsilon_1} \right)^2}$$

$$[3.14]$$

$$E_s = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.15]; \quad \sigma_d = \frac{1}{\frac{d_R}{\sigma_{dR}} + \frac{1}{E_i \cdot \varepsilon_1}} \quad [3.16]; \quad E_i = E_i \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{\sigma_d}{\sigma_{dR}} \right)^2 \quad [3.17]$$

$$\text{Para } \varepsilon_1 > \varepsilon_{1R} \quad \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} = E_s = m' \cdot (\sigma_d - \sigma_{d \text{ mín}}) \quad \alpha \cong 0,2 \quad [3.18]$$

$$m' = \frac{E_i}{\sigma_{dR}} \left\{ \frac{0,8 \cdot (1 - d_R)}{0,2 \cdot \left(\frac{4 \cdot d_R + 1}{d_R} \right) - \frac{\sigma_{d \text{ mín}}}{\sigma_{dR}}} \right\} \quad [3.19]; \quad \sigma_d = m' \cdot \sigma_{d \text{ mín}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{m' \cdot \varepsilon_1 - 1} \right) \quad [3.20];$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{m' \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{d \text{ mín}}}{\sigma_d} \right)} \quad [3.21] \quad \varepsilon_{1R} = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_i}{\sigma_{dR}} \right)} \cdot \frac{4 \cdot d_R + 1}{4 \cdot (1 + d_R) \cdot d_R} \quad [3.22]$$

$$\frac{m}{m'} = \frac{d_R}{0,8 \cdot (1 - d_R)} \cdot \left(0,2 \cdot \frac{4 \cdot d_R + 1}{d_R} - \frac{\sigma_{d \text{ mín}}}{\sigma_{dR}} \right) \quad [3.23]$$

Fig.3 Relaciones Tensión - Deformación

Para el caso de la estructura que se analiza, las características del subsuelo fueron establecidas según se muestra en la Tabla I.

$$\delta_{centro} \cong 6 \text{ cm} \quad \delta_{borde} \cong 3 \text{ á } 4 \text{ cm} \quad (\pm 30\%)$$

Desde el punto de vista estructural estos valores son aceptables.

4.- UNA SOLUCIÓN CON FUNDACIÓN DIRECTA

El tanque contiene gas licuado; su temperatura es de -174°C ; el peso unitario es del orden de 5 KN/m^3 . La carga que se transmite a la fundación es del orden de 0.22 á 0.24 MPa.

Una solución que aparece en primera instancia como la más conveniente es sustentar el tanque sobre una platea apoyada directamente sobre el terreno. Para este caso, resultaría necesario excavar los primeros 4 m de los suelos superficiales. Como la calidad de estos suelos es satisfactoria para recolocarlos compactados, se los puede reusar teniendo cuidado de mantener deprimida la capa freática. Con el objeto de poder realizar estas operaciones en forma rápida y lograr una cierta independencia de las limitaciones que impone los requerimientos de la humedad máxima de compactación, se programó – para esta solución – la adición de cemento Portland y la colocación en capas de unos 15 á 20 cm de espesor compactado.

Para estas condiciones pueden estimarse los siguientes asentamientos :

5.- UNA SOLUCIÓN QUE INCLUYE PILOTES

Las facilidades que resultan de apoyar el tanque sobre una platea separada del terreno independizándose de los requerimientos de aislación térmica durante toda la vida útil del depósito de gas licuado, condujo al estudio de una alternativa con pilotes. En efecto, ésta se mostró como la más conveniente desde el punto de vista programático y económico.

Se optó por el empleo de pilotes premoldeados de hormigón, de sección cuadrada de 40 cm de lado, construidos en el sitio junto al tanque.

Se estableció una profundidad de hinca del orden de los 11 á 12 m ; para poder ejecutar el pilotaje con uniformidad, en correspondencia con la ubicación de cada pilote se practicó una perforación previa con un diámetro del orden del lado del pilote y de unos 6 á 7 m de profundidad.

Prof. (m)	Identificación	c_u (kPa)	ϕ_u (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{iu} (MPa)
0 - 5	Limos Arcillosos medianamente compactos	20 - 70	3 - 10	5	25	20 - 40
5 - 10	Limos arenosos muy compactos a duros	100 - 160	5 - 10	10 - 20	25 - 30	100 - 150
10 - 38	Limos "toscosos" y "Toscas"	200 - 400	5 - 12	20 - 100	28 - 32	150 - 250
38	Arenas finas y medianas densas y muy densas	-	-	0	32 - 42	250

TABLA I

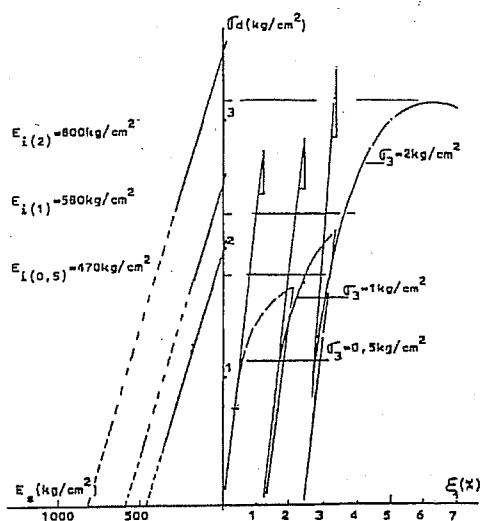


Fig.4 Ensayo Escalonado

Inmediatamente antes de la hincada del pilote se colocaba un volumen de hormigón fresco relativamente seco que aseguraba un perfecto encastre del pilote contra las paredes laterales del suelo. De esta manera, los pilotes penetraban una cierta longitud en terreno virgen del pampeano (localmente denominados "suelos toscos" cuando están impregnados con calcáreos, o "toscas" cuando están fuertemente cementados por los carbonatos ó óxidos de Ca y Mg), verificándose en todos los casos la obtención del "rechazo" mediante el uso de una fórmula de hincada empleada en Argentina que es una adaptación de la conocida fórmula Holandesa e incorporada al Código de Edificación de la Ciudad de Buenos Aires.

6.- LA FUNDACIÓN EJECUTADA

Una placa de Hormigón Armado de 60 cm de espesor, de 45 m de diámetro, sobreelevada aprox. 1 m respecto del terreno. Se emplearon 328 pilotes hincados con un martillo Delmag D22/30, todos a "rechazo". Los pilotes interiores están separados entre sí 2.2 m. En la Fig.5 se muestra el resultado de un ensayo de carga estático en la forma comúnmente empleada por el autor para su presentación.

Los asentamientos esperados del grupo de pilotes fueron estimados de la siguiente manera:

Q: carga axial sobre un pilote
s: separación entre pilotes

$S^2 = A = \text{Área equivalente para cada pilote}$
Coeficiente de reacción correspondiente al área A,

$$k_A = \left(\frac{Q/A}{\delta_A} \right) = \frac{K}{A} ;$$

Valor medio para una placa rígida de diámetro B,

$$k_B \cong 1,5 \frac{E_{eq}}{B} ;$$

δ_B : Asentamiento de la placa de diámetro B;

Relación aproximada de asentamientos:

$$\frac{\delta_B}{\delta_A} \cong \frac{r}{1 + \alpha \cdot (r - 1)}$$

por lo que se puede escribir

$$k_B = \eta \cdot k_A = \eta \cdot (K/A)$$

siendo $\eta = \left(\frac{r}{1 + \alpha \cdot (r - 1)} \right)^{-1}$ resulta

$$E_{eq} = \frac{\eta \cdot k_B}{1,5 \cdot A} \quad \left(r = \frac{B}{B_0} \right)$$

$$B = 43 \text{ m} \quad B_0 = 0.40 \text{ m} \quad r = \frac{B}{B_0} =$$

107,5

$$\alpha = 0,1 \text{ (Arcillas Compactas);} \quad \eta = 0,11$$

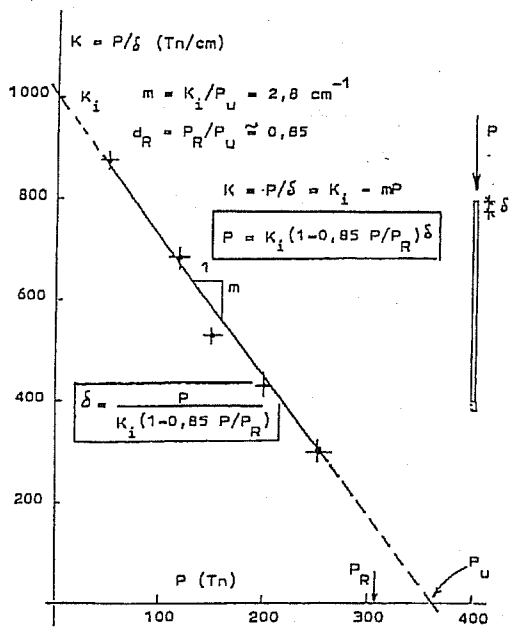
$$A = 2,2^2 = 4,84 \cdot m^2 \quad K_i = 1000 \cdot \frac{MN}{m}$$

$$E_{i,eq} = \frac{43 \cdot m}{1,5} \cdot \frac{1000 \cdot \frac{MN}{m}}{4,84 \cdot m^2} \cdot 0,11 = 650 \cdot MPa$$

$$\delta = \frac{p_B \cdot (1 - \nu^2) I_p}{E_{eq}} \quad (E_{eq} \text{ Módulo de un}$$

prisma de suelo equivalente al grupo de pilotes).

$$\text{Por lo que } E_{s,eq} = E_{i,eq} \cdot \left(1 - d_R \cdot \frac{Q}{Q_R} \right)$$



$$E_{s.eq} = 650 \cdot (1 - 0,85 \cdot \frac{100}{310}) = 473 \text{ MPa}$$

$$\delta_{centro} = \frac{0,20 \text{ MPa} \cdot 43 \text{ m} \cdot 0,85}{473 \text{ MPa}} = 1,5 \text{ cm}$$

$$\delta_{borde} = \frac{2}{3} \cdot \delta_{centro} = 1 \text{ cm}$$

El promedio de los hundimientos medidos sobre el borde de la placa luego de la prueba hidráulica con carga total mantenida, no superaron los 5 mm.- Actualmente está en marcha un programa sistemático de observaciones anuales. El comportamiento de la estructura luego de 3 años de servicio es enteramente satisfactorio.

Fig.5 Ensayo de carga sobre un pilote de H°A° de 40 cm de lado, cuadrado.

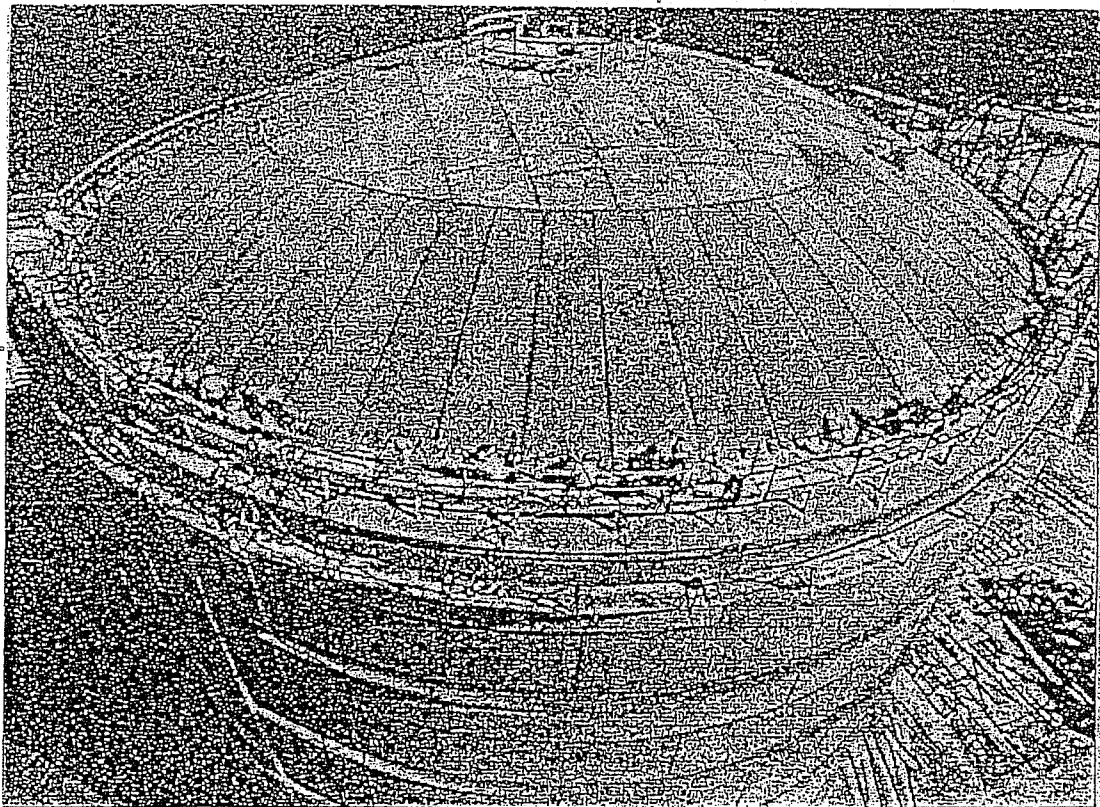


Fig.6: Vista aérea del tanque criogénico.

7.- CONCLUSIONES

Aún cuando las características de los suelos sean aptas para una cimentación directa, razones programáticas y económicas pueden aconsejar el empleo de una cimentación piloteada.

En particular para tanques criogénicos en donde interesa la eliminación de sistemas de aislación térmica, una fundación piloteada puede resultar la más conveniente.

Cuando la elevada resistencia de los suelos naturales impiden la hinca directa de pilotes premoldeados, el uso de preperforación y la colocación de hormigón fresco en el agujero (que al ser violentamente proyectado contra los laterales durante la hinca del pilote aseguran un buen encastre friccional del fuste), constituye una buena solución técnica dentro de límites muy razonables de economía. El pilotaje así ejecutado, minimiza los asentamientos de la fundación.

AGRADECIMIENTOS:

A la firma GAS BAN, por su apoyo durante la ejecución de estos trabajos, en particular a los Ings. H. Cristiani y M. Patitucci y J. Gómez; a la firma EFOI que ejecutó el pilotaje y a su presidente el Ing. E. Riquelme que facilitó los resultados del ensayo de carga. Los estudios de suelos fueron ejecutados conjuntamente por el autor con el Ing. ALEJO SFRISO con quien se han discutido varios aspectos geotécnicos aquí examinados.

REFERENCIAS

- (1) NUÑEZ, E. (1975) General Report, Session II Special Soils: "Suelos Colapsables y Preconsolidados por Desecación" 5th PCSMFE, Buenos Aires, 1975
- (2) BOLOGNESI, A.J.L. (1975) "Compresibilidad de los Suelos de la formación Pampeano" 5th PCSMFE, Buenos Aires, 1975
- (3) NUÑEZ, E. (1986) Panel Report, "Geotechnical Conditions in Buenos Aires City" Proceedings 5th International Congress of Engineering Geology, Buenos Aires, 1986
- (4) NUÑEZ, E. & MICUCCI, C. (1986) "Cemented Preconsolidated Soils as a very Weak Rocks" Proceedings. 5th International Congress of Engineering Geology, Buenos Aires, 1986
- (5) NUÑEZ, E. (1997) "Esfuerzos y Deformaciones en los problemas de interacción" Sesión IV, 1^o COPAINGE, Asunción, Paraguay, Julio 1997.