

# Propiedades geotécnicas de los sedimentos acumulados en la Presa de Proserpina (Mérida)<sup>1</sup>

JUAN CARLOS DE CEA AZAÑEDO (\*); JUAN ANTONIO DÍEZ TORRES (\*\*); CLAUDIO OLALLA MARAÑÓN (\*)

**RESUMEN** El principal objetivo de este trabajo ha sido el de interpretar, analizar y contrastar los resultados obtenidos de los ensayos de campo y laboratorio efectuados sobre los sedimentos acumulados en el embalse de la Presa de Proserpina. La presa fue construida en el siglo II D.C. por las legiones romanas. La investigación de estos materiales desde el punto de vista geotécnico resulta de gran interés debido a que se trata de un depósito "joven", de apenas 2.000 años de existencia. La Presa de Proserpina es, junto con la Presa de Cornalvo, también en Mérida, la más antigua de la ingeniería hidráulica española y ha sido estudiada y analizada en múltiples ocasiones.

## GEOTECHNICAL PROPERTIES OF THE SEDIMENT DEPOSITS IN THE PROSERPINA RESERVOIR (MÉRIDA)

**ABSTRACT** *The aim of this work is to interpret, analyze and compare the results obtained from the field and laboratory tests carried out on the sediment deposits in the reservoir lying behind the Proserpina Dam. The dam was constructed in the 2nd Century A.D. by the Roman legions. Research on the properties of these materials is extremely interesting from a geotechnical viewpoint, because they are "recent" deposits, that are barely 2,000 years old. The Proserpina Dam is the oldest example of Spanish hydraulic engineering, and it has been studied and analyzed on many occasions.*

**Palabras clave:** Arcillas blandas; Resistencia al corte; Depósitos recientes.

## 1. TRABAJOS REALIZADOS

Se han estudiado las principales características geotécnicas de un suelo blando cohesivo, muy plástico de granulometría limo-arcillosa, muy singular, que en cierta forma podría considerarse como antrópico, ya que se ha depositado de manera natural pero a partir de una barrera construida por el hombre.

Aprovechando el vaciado total del agua del embalse para retirar todos los sedimentos acumulados, que reducían de manera importante su capacidad, se pudo llevar a cabo una completa campaña de trabajos "in situ". Todos ellos se realizaron directamente desde su superficie. Cabe destacar: realización de sondeos mecánicos a percusión, ensayos de molinete; piezocono; cross-hole y testificación geofísica (gamma natural, gamma-gamma y conductividad).

Con las distintas muestras inalteradas extraídas de los sondeos se realizaron en el laboratorio ensayos mineralógicos, de identificación, estado, resistencia al corte y deformabilidad. A partir de los resultados de los ensayos de campo y

laboratorio, se han podido establecer perfiles completos de las diferentes variables geotécnicas.

A partir de las campañas mencionadas (campo y laboratorio) se han podido correlacionar entre sí sus resultados permitiendo profundizar en el conocimiento de los suelos blandos y posibilitándose también su contraste con otros suelos similares. Del mismo modo se han podido analizar las técnicas de reconocimiento utilizadas, comprobando cuales de ellas pueden ser las más idóneas para el estudio de suelos blandos arcillosos.

Como estudios geotécnicos similares realizados en España se tiene constancia del trabajo publicado por Bernal (1993) con los sedimentos del embalse de Puentes (Murcia).

En la figura 1, se muestra un plano de la situación del embalse dentro de la Península Ibérica. Geológicamente, tanto la presa, el vaso del embalse y su cuenca se encuentran ubicados en un enclave granítico homogéneo.

## 2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 2.1. ENSAYOS DE CAMPO

Se efectuaron un total de 6 sondeos con extracción continua de testigo, empleando para ello un tomamuestras de metacrilato para visualizar el tipo de terreno atravesado en todo momento. Salvo lentejones singulares de mayor o menor espesor los materiales extraídos han resultado ser muy homogéneos.

En la figura 2 se han representado cuatro perfiles de la resistencia "pico" medida en los cuatro ensayos de molinete

<sup>(1)</sup> Este artículo ha sido presentado en el International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils. Hiroshima. Japón (10-12 mayo, 1995).

(\*) Ingeniero de caminos Canales y Puertos. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. Ministerio de Fomento.

(\*\*) Licenciado en Ciencias Geológicas. Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. Ministerio de Fomento.

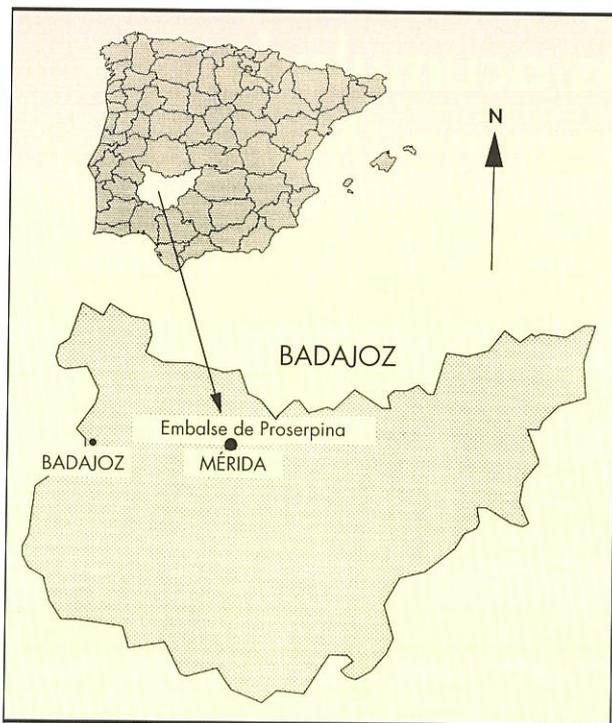


FIGURA 1. Plano de situación.

efectuados. Los cuatro perfiles muestran la presencia de un nivel más resistente en el cual la resistencia es máxima, con una gama de valores variable entre 18 y 32 Kpa. Este nivel corresponde a un paquete de limos de tamaño más grueso que el resto, asociado con toda probabilidad a un período de precipitaciones y arrastres intensos.

Los coeficientes de consolidación obtenidos de los ensayos de piezocono muestran una buena concordancia entre sí a una profundidad de 5 m aproximadamente, con un valor medio del orden de  $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sg}$ . A una profundidad de 3.5 m el valor obtenido es de  $6.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sg}$ , lo que indica la posible existencia en esa zona de un material más impermeable.

Los ensayos Cross-Hole efectuados ponen también de manifiesto la uniformidad de los valores obtenidos de la velocidad de transmisión en profundidad, con un valor medio aproximado de 80 m/sg. Suponiendo una densidad de los sedimentos de  $1.5 \text{ KN/m}^3$ , resulta un módulo de deformación transversal de 9.6 Mpa.

Un resumen de los resultados obtenidos de la campaña de testificación geofísica llevada a cabo se muestra en la figura 3.

## 2.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

### Identificación y estado

Los sedimentos presentan colores grises, más o menos oscuros, y en la zona próxima a la superficie tonalidades pardas debido a la oxidación.

Se ha realizado, en primer lugar, una caracterización mineralógica de los materiales mediante diferentes métodos, evidenciándose su origen granítico y destacándose junto a los componentes del granito la presencia de diatomeas silíceas, fosfatos, carbonatos procedentes de algas, óxidos de hierro y materia orgánica producto de la descomposición de restos vegetales y animales.

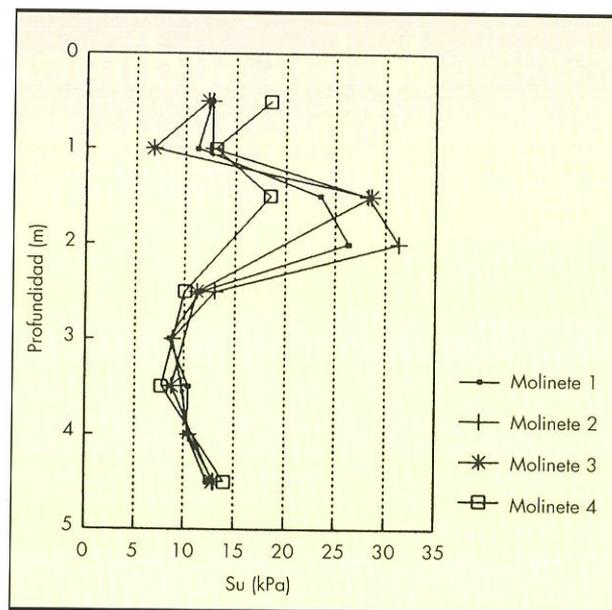


FIGURA 2. Resumen de resistencias "pico" obtenidas de los ensayos de molinete.

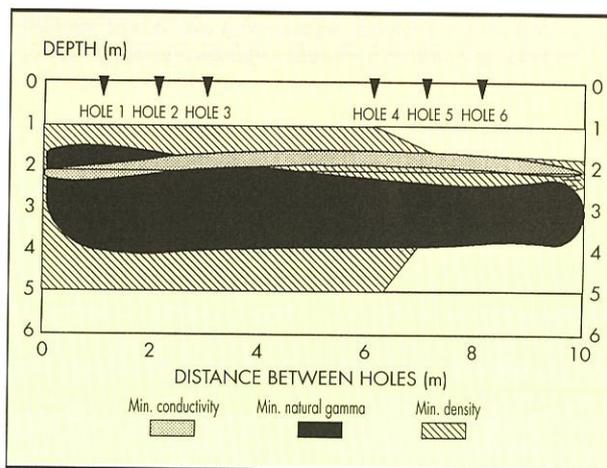


FIGURA 3. Resumen de los resultados obtenidos en la campaña de testificación geofísica.

De particular interés ha sido la detección de vivianita. Identificación que ha sido posible gracias a los trabajos de Hernández Pacheco et al. (1994). La vivianita es un fosfato de hierro hidratado que aparece comunmente en depósitos sedimentarios asociado a huesos, maderas en descomposición y otros residuos orgánicos.

Según los ensayos granulométricos, figura 4, los sedimentos pueden definirse como limos de granulometría continua, de tamaños gruesos a finos, y contenidos variables de arcilla (inferiores al 25%). De estos ensayos se confirma la presencia de un paquete de limos de tamaños más gruesos que el resto de los materiales prospectados, de un metro y medio de espesor aproximadamente, y situado a una profundidad del orden del metro. Este paquete debe de corresponder a un período de fuertes lluvias en el cual predominaron

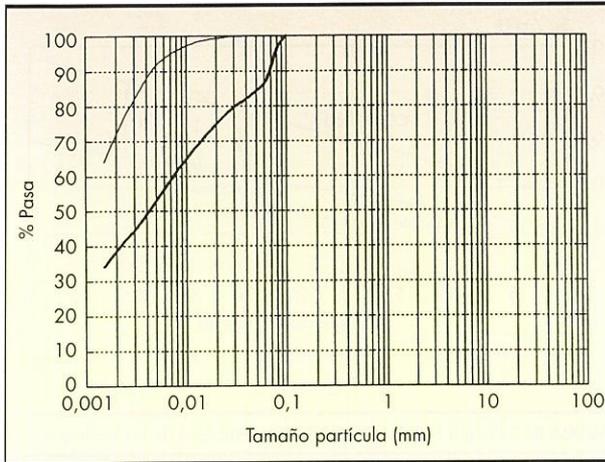


FIGURA 4. Huso granulométrico de los sedimentos.

los arrastres, mientras que en el resto del perfil sondeado la sedimentación de los materiales ha tenido lugar en épocas de mayor tranquilidad.

Los sedimentos presentan una elevada plasticidad y actividad. El peso específico de las partículas sólidas y la densidad seca de los sedimentos son muy bajas, incluso extraordinariamente bajas. Esta última particularidad podría explicarse por el alto contenido de diatomeas (organismos de esqueleto silíceo oqueroso) que presentan. Los contenidos de humedad son muy elevados, lo cual se traduce también en unos índices de fluidez también muy elevados, poniendo de manifiesto la singularidad del suelo estudiado.

El índice de huecos inicial disminuye, en general, con la profundidad, lo cual es indicativo de que los sedimentos se encuentran normalmente consolidados, aunque resultaría más correcto hablar de que se encuentran en proceso de consolidación.

En la tabla I se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de identificación más significativos.

**Resistencia al corte**

Se han efectuado en laboratorio ensayos de molinete y ensayos triaxiales de tipo CU y UU.

En la figura 5 se muestran los resultados de los ensayos triaxiales CU efectuados, diferenciándose los llevados a cabo sobre el paquete de material más grueso detectado en los sedimentos.

De la misma manera, en la figura 6, se muestran los valores de la resistencia al corte sin drenaje,  $S_u$ , que se dedu-

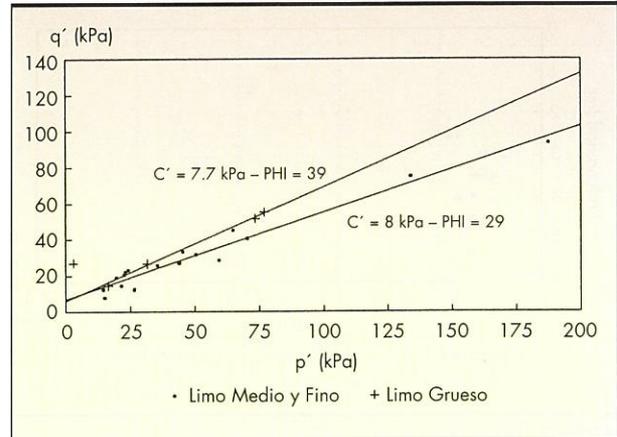


FIGURA 5. Diagrama  $p' - q'$ . Determinación de las leyes de resistencia de los sedimentos.

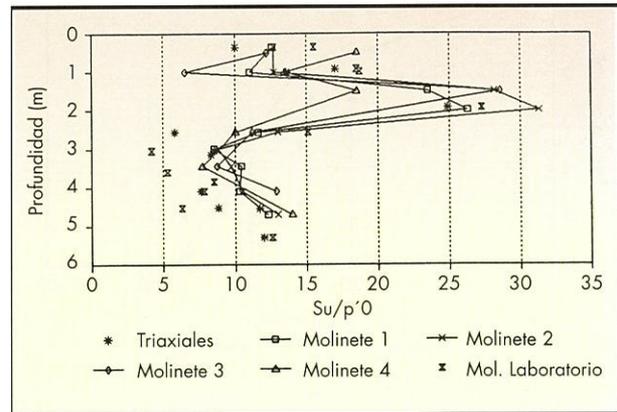


FIGURA 6. Comparación entre la resistencia sin drenaje obtenida "in situ" y a partir de los ensayos de laboratorio.

cen de los ensayos triaxiales, pudiéndose comparar con los que resultan de los cuatro ensayos de molinete efectuados "in situ" y con los de molinete de laboratorio.

Las relaciones existentes entre la resistencia obtenida de los ensayos de molinete de laboratorio, de campo y triaxiales, son las siguientes:

$$(S_u)_{\text{triaxiales}} = 0.855(S_u)_{\text{molinete laboratorio}}$$

$$(S_u)_{\text{triaxiales}} = 0.7(S_u)_{\text{molinete de campo}}$$

Límite Líquido(%)	70-105	# 200 (%)	85-100
Índice Plasticidad	25-45	CO <sub>3</sub> = (%)	1.0-3.5
Índice de Fluidez	1-5	Peso Específico de los sólidos t/m <sup>3</sup>	2.3-2.6
Actividad	3	Densidad Seca t/m <sup>3</sup>	0.4-0.8
Materia Orgánica (%)	3-4	Índice de huecos inicial	3-5
Humedad (%)	90-250		

TABLA I. Resumen de los ensayos de identificación y estado.

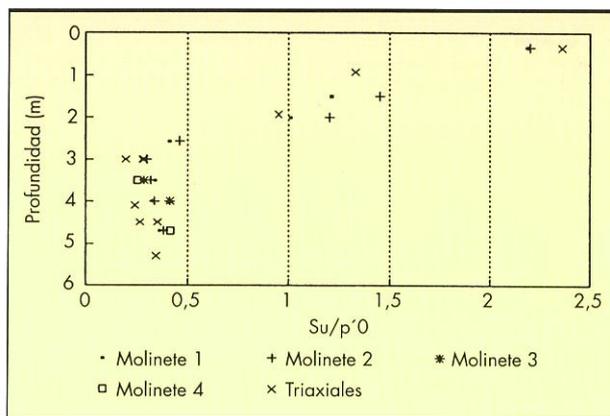


FIGURA 7. Variación de la relación  $S_u/p'_0$ .

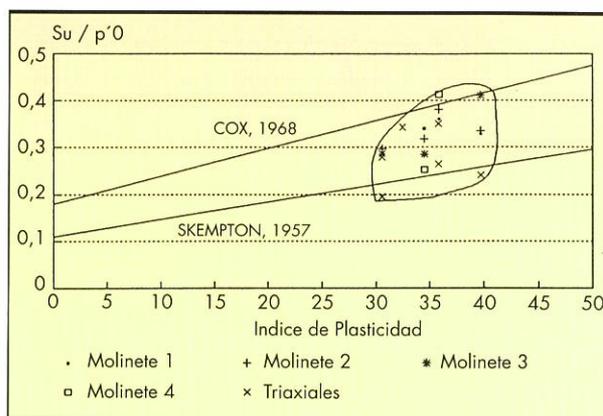


FIGURA 8. Relación  $S_u/p'_0$  y el índice de plasticidad de los sedimentos.

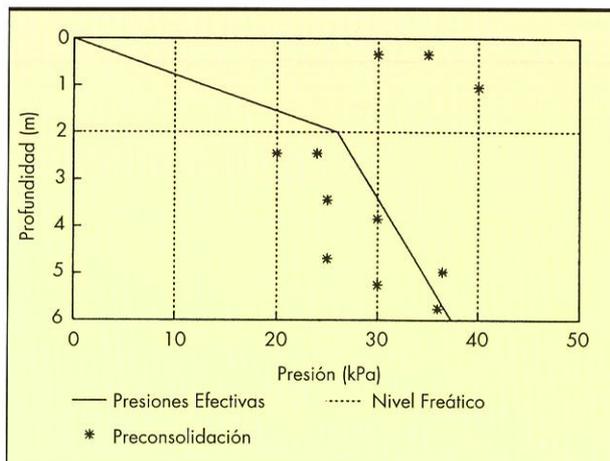


FIGURA 9. Presiones de preconsolidación obtenidas de los ensayos edométricos.

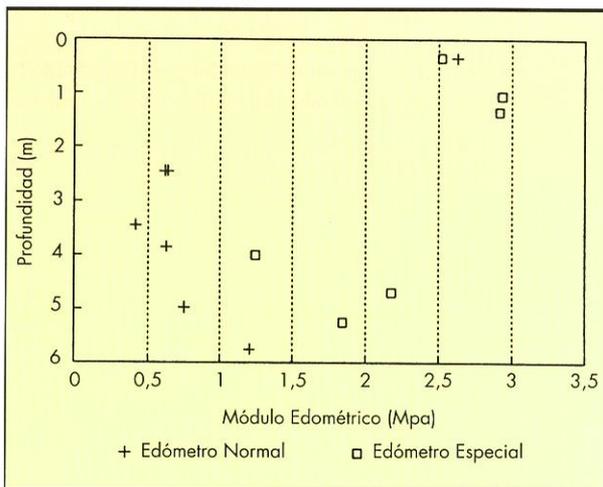


FIGURA 10. Variación del módulo edométrico en profundidad.

El cociente entre la resistencia sin drenaje y la presión efectiva en función de la profundidad se encuentra representado en la figura 7. En la figura 8 se muestra una correlación entre este cociente y el índice de plasticidad, a partir de los 3 m de profundidad. También se han dibujado las leyes definidas por Skempton (1957) y Cox (1968), que en este caso han resultado ser las envolventes inferior y superior de los valores obtenidos.

### Deformabilidad

Se han realizado dos tipos de ensayos edométricos: normales y especiales. En éstos últimos, cada escalón de carga se mantenía durante 20 o más días, en lugar de una semana como suele ser lo habitual. Las curvas edométricas de las muestras ensayadas se agrupan en dos bandas: una superior, que corresponde a las muestras extraídas a una profundidad mayor de 2.0 m, y una inferior que corresponde a las muestras más próximas a la superficie. Estas últimas presentan una menor deformabilidad, probablemente como consecuencia de la desecación sufrida.

En la figura 9 se comparan las presiones de preconsolidación deducidas según el método de Casagrande con la ley de presiones efectivas deducida.

De la misma forma, en la figura 10 se comparan los módulos edométricos obtenidos de los edómetros normales y es-

peciales. Estos últimos han resultado ser superiores a aquellos. En las figuras 11 y 12 se encuentran representados, respectivamente, los valores del índice de compresión y entumecimiento que se obtienen de los ensayos. Complementaria a la figura anterior, la figura 13 muestra la correlación entre el índice de compresión y el de huecos.

En la figura 14 se encuentran representados los valores obtenidos del coeficiente de consolidación,  $c_v$ , incluyéndose, además, los que resultan de los ensayos de piezocono con objeto de ser comparados. Destaca la similitud de los valores obtenidos de los edómetros normales y del piezocono a profundidades superiores a los 3.0 m. Los resultados de los ensayos edométricos especiales resultan notablemente inferiores. Los valores de  $c_v$  que se deducen de los ensayos normales son entre cuatro y sesenta veces superiores a los que resultan de los ensayos edométricos especiales. De la misma manera, allí donde resultan comparables, los que se deducen de los ensayos de piezocono son un 30% o un 40% mayores que los de los ensayos edométricos normales.

### 3. RESUMEN Y CONCLUSIONES

1. El tipo de suelo estudiado está constituido por los sedimentos acumulados en los últimos 2000 años en el em-

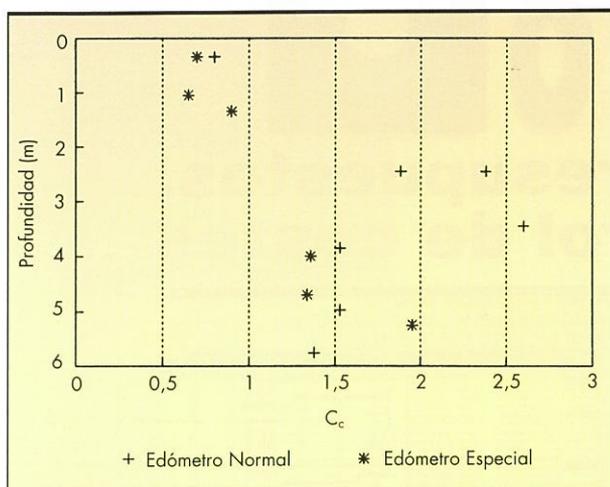


FIGURA 11. Variación del índice de compresión,  $C_c$ , con la profundidad.

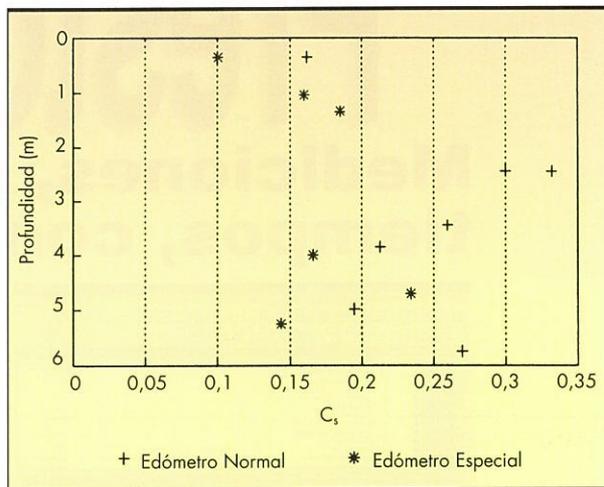


FIGURA 12. Variación del índice de entumecimiento,  $C_s$ , con la profundidad.

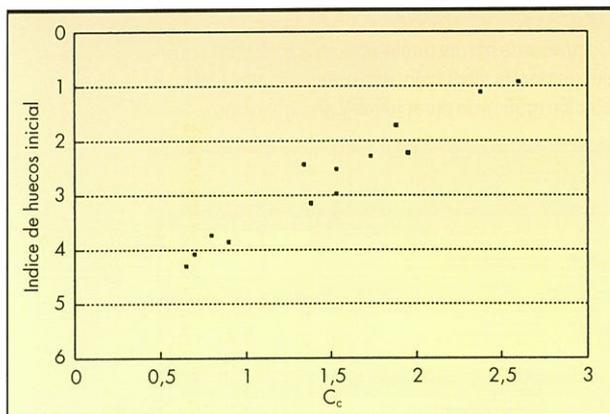


FIGURA 13. Correlación entre el índice de huecos inicial y el índice de compresión.

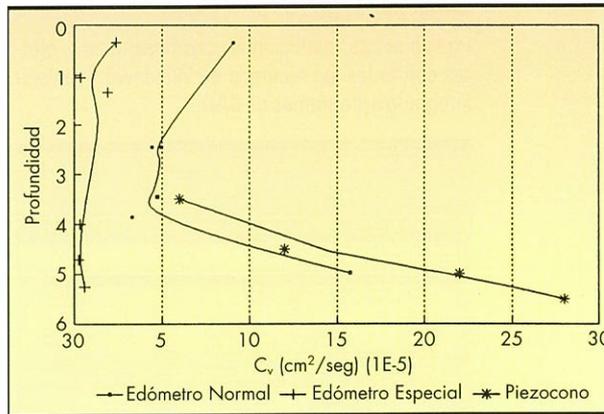


FIGURA 14. Comparación entre el coeficiente de consolidación,  $C_v$ , obtenido de los ensayos de campo y de laboratorio, a diferentes profundidades.

balse de la presa romana de Proserpina, muy blando, plástico y singular.

2. El trabajo realizado ha consistido en determinar sus características geotécnicas más importantes.
3. Se han efectuado un conjunto de labores de campo que permiten afirmar que ensayos como el de molinete, piezocono y testificación geofísica, son muy útiles para determinar las principales propiedades geotécnicas de materiales muy blandos de tipo limo-arcilloso.
4. Son materiales finos (pasando por el tamiz nº 200 de la serie ASTM entre el 80 y el 100%), muy plásticos (LL = 70-100), con densidades muy bajas ( $\gamma_d=0.4-0.8 \text{ t/m}^3$ ) y humedades extremadamente elevadas (90-250%).
5. Los ensayos de laboratorio muestran la elevada deformabilidad de los materiales analizados, siendo muy frecuentes deformabilidades verticales superiores al 50%
6. Si bien es cierto que algunos autores han encontrado que el coeficiente de consolidación disminuye al aumentar la presión efectiva, los resultados de los ensayos llevados a cabo, con la excepción de los ensayos edométricos especiales, muestran lo contrario.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente estudio desean agradecer a la Confederación Hidrográfica del Guadiana, especialmente a D. Antonio Alcaraz Calvo y D. Juan Antonio Martín Morales, el permiso para la publicación de estos datos, así como el apoyo prestado durante la realización de los trabajos.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- BERNAL, A. (1993). "Características Geotécnicas de los Tarquines que rellenan el Embalse de Puentes (Murcia)". Simposio sobre Geotecnia de Presas de Materiales Suelos. Sociedad Española de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Zaragoza. España.
- COX, J. B. (1968). "A review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in South East Asia". Research report nº 6, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.
- HERNÁNDEZ PACHECO, A. et al (1994). "Vivianita de los sedimentos del embalse de Proserpina". Comunicación personal.
- SKEMPTON, A. W. (1957). "Discussion on Planning and Design of the new Hong Kong Airport". Proc. of the Institution of Civil Engineers. Vol. 7. London. England.