

# Estudio de las propiedades geotécnicas de los sedimentos acumulados en el embalse de la presa de Proserpina (Mérida, España)

*Study of the geotechnical properties of the sediments accumulated in the Proserpina dam (Mérida, España)*

J.A. Díez Torres (\*), J.C. de Cea Azañedo (\*), C. Olalla Marañón (\*) y M. Añorbe Urmeneta (\*\*)

(\*) Laboratorio de Geotecnia. CEDEX. Alfonso XII, 3, 28014 Madrid.

(\*\*) Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. Alfonso XII, 3, 28014 Madrid.

## ABSTRACT

*This work study the geotechnical and mineralogical characteristics of the sediments accumulated since the Romans epoch in the Proserpina dam (200 A.C.) sited in Mérida (Badajoz, Spain). From the geological point of view it's a very recent deposit, aging less than 2000 years; very soft and saturated, with silty-clay granularity and coming from the surrounding granitic rocks degradation. Multiple field and laboratory geotechnic tests are conducted over unaltered samples from which identification, state, strength and deformability properties are obtained using technics for soft soils characterization like seismics tests, geophysical testification tests or piezocone and vane tests.*

**Key words:** *Soft soils, Geotechnical characteristics, Silty-clay sediments, Proserpina Dam, Mérida.*

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1331-1333

ISSN:0213683X-

## Introducción

La Presa de Proserpina, ubicada en las cercanías de Mérida (Fig.1), data de la época romana y representa, aparte de su gran importancia histórica, un magnífico ejemplo de lo que fueron las obras de ingeniería hidráulica de los romanos en España.

Con el paso del tiempo el vaso del embalse se ha visto colmatado de sedimentos y ya en los últimos años se venían observando suciedades y malos olores en las aguas. Este hecho, unido a que el embalse representa una excelente zona de baño y recreo para los lugareños, motivó que la Dirección General de Obras Hidráulicas a través de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, procediera a finales de 1991 al vaciado del mismo y a la retirada de la espesa capa de sedimentos (13 m en el centro del vaso) acumulados desde la época romana hasta nuestros días (Fig.2).

Se ha presentado, pues, una excelente oportunidad para estudiar los sedimentos desde diversos puntos de vista: químicos, biológicos, medioambientales y geotécnicos, los cuales han sido llevados a cabo por distintos laboratorios del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

El objetivo principal del trabajo que aquí se presenta se centra en la caracterización geotécnica de dichos sedimentos, analizando, interpretando y correlacionando entre sí los resultados obtenidos en las distintas campañas de investigación llevadas a cabo, tanto en campo como en laboratorio.

## Entorno geológico

Los alrededores del Embalse de Proserpina y la zona que abarcan las cuencas del Arroyo de las Pardillas y el de las Adelfas, los cuales abastecen al embalse, se encuentran ubicados geológicamente en un enclave granítico, que Rosso de Luna y Hernández Pacheco (1949) denominaron Granitos de la Zona de Mirandilla.

El granito observado "in situ" en los

afloramientos que bordean el embalse es de grano grueso, muy alterado. Presenta fenocristales de feldespato a veces de hasta tres centímetros de dimensión mayor, sin ninguna orientación preferente, que se encuentran disgregados de la masa granítica. Se trata de un granito de dos micas, moscovita y biotita, en cristales de dos a tres milímetros. El cuarzo es abundante y también de grano grueso.

En el proceso de alteración del granito,

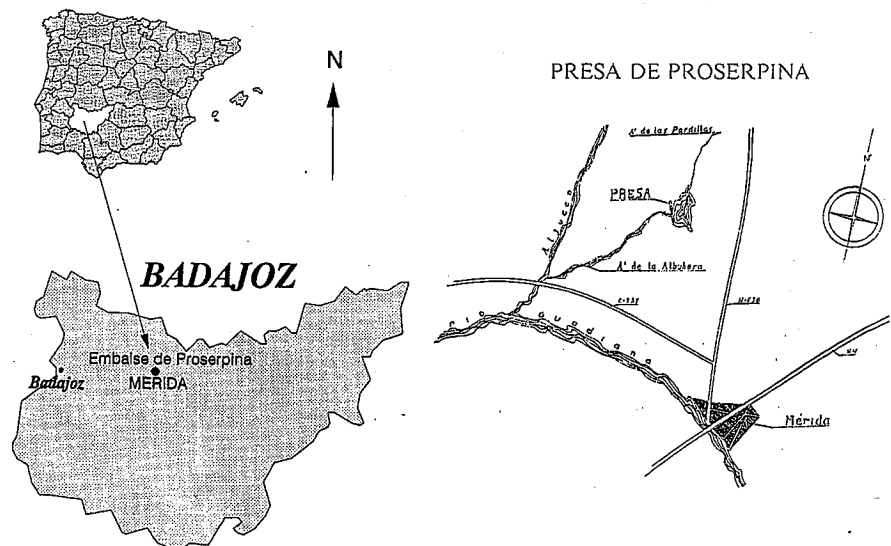


Fig. 1.- Situación geográfica del embalse de Proserpina.

Fig.1.- Geographic situation of Proserpina Dam.



Fig. 2.- Vista general del embalse y los sedimentos acumulados.

Fig. 2.- General view of the reservoir and the accumulated sediments.

éste se va desmenuzando hasta convertirse en arena. La arena forma las playas que rodean el embalse, encontrándose lavadas y limpias de limos y arcillas que fueron a parar al embalse, acumulándose en éste como sedimentos.

### Metodología

**Labores de campo:** Se han efectuado un total de 6 sondeos mecánicos con extracción de testigo. Los tomamuestras utilizados, hincados a presión, tenían la particularidad de ser de metacrilato transparente para poder testificar los sondeos sin alterar las muestras. La profundidad máxima sondeada ha sido de 6 metros.

También se han realizado los siguientes ensayos geotécnicos "in situ": ensayo de molinete, ensayos de piezocono, ensayos cross-hole y ensayos de testificación geofísica con medida de la conductividad, gamma natural, gamma-gamma y temperatura del agua.

**Ensayos de laboratorio:** En el laboratorio se han realizado los siguientes ensayos a partir de muestras inalteradas:

**Ensayos de identificación y estado:** Análisis granulométrico por tamizado y sedimentación, límites de Atterberg, peso específico de las partículas sólidas, contenido de carbonatos, contenido de Sulfatos, contenido de materia orgánica, densidad seca (obtenida en los ensayos triaxiales), contenido de humedad natural (obtenida en los ensayos triaxiales) e índice de huecos.

**Ensayos de resistencia al corte:** Corte sin drenaje con molinete de bolsillo en laboratorio, triaxial rápido sin consolidación ni drenaje (UU) y triaxial con consolidación de la muestra y posterior rotura sin drenaje midiendo las presiones intersticiales generadas durante todo el proceso (CU).

**Ensayos de deformabilidad:** Edómetros especiales donde el tiempo de carga es prolongado (20 o más días) y edómetros normales donde el tiempo de carga es el habitual.

**Caracterización mineralógica:** Para la caracterización mineralógica de los sedi-

mentos se han utilizado las siguientes técnicas de identificación: observaciones con lupa binocular, observaciones al microscopio electrónico de barrido con análisis puntual E.D.X. y difracción de Rayos X.

### Resultados

Con respecto a los resultados obtenidos a continuación se efectúa una síntesis y resumen de los mismos destacando los aspectos más importantes.

**Identificación:** Estos sedimentos son el resultado de la alteración de los granitos que afloran en los alrededores. Están constituidos por materiales de granulometría muy fina: limos de tamaños gruesos a finos con contenidos de arcilla que varían entre el 10 y el 20%.

Presentan una plasticidad elevada con límites líquidos entre 70 y 100% e índices de plasticidad entre 30 y 40%. Se trata por tanto de suelos del tipo MH-OH (suelos limosos con materia orgánica coloidal y de alta plasticidad), según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Apenas contienen carbonatos y sulfatos, sin embargo los porcentajes de materia orgánica son importantes con valores entre un 3 y un 6%. El peso específico de las partículas presenta valores muy bajos y de gran variabilidad, entre 2.3 y 2.6 Tn/m<sup>3</sup>.

**Estado:** Los valores de la densidad seca se pueden considerar extremadamente bajos, con un máximo de 0.8 Tn/m<sup>3</sup> y un mínimo del orden de 0.35 Tn/m<sup>3</sup>. Por el contrario los valores de la humedad natural son muy elevados situándose la mayoría de ellos entre el 125% y el 250%.

Las magnitudes alcanzadas con respecto al índice de huecos son también muy elevadas, puesto que por debajo de los 2 metros los valores varían entre 3 y 5.

La variación del índice de huecos y la humedad natural en profundidad (ambos parámetros decrecientes con la misma), permite afirmar que los sedimentos se encuentran normalmente consolidados o incluso "subconsolidados". Realmente sería más correcto hablar de que se encuentran en proceso de consolidación, ya que los ensayos edométricos demuestran la existencia de deformaciones de importancia bajo la aplicación de pequeñas cargas. Se trata por tanto de un suelo "joven".

Se ha realizado una campaña de testificación geofísica de cuyos resultados se deduce la existencia de una capa de características diferentes al resto de los sedimentos, situada a una profundidad entre 1.5 y 2.5 m y con un espesor relativamente uniforme, alrededor de 1 m. Esta capa presenta los menores contenidos de materiales arcillosos, menores densidades, y en su parte más superficial mínima conductividad (menor humedad). Se trata de un nivel asociado con toda probabilidad a un período de precipitaciones con arrastres intensos de sedimentos más gruesos hacia el embalse.

**Mineralogía:** En cuanto a la mineralogía de los sedimentos acumulados en el embalse cabe decir que presentan características que evidencian su origen granítico. Los minerales encontrados o bien son originales, a partir de la disgregación del granito original, o bien se encuentran alterados a minerales arcillosos en ocasiones con posterior neoformación de nuevos minerales. No obstante cabe destacar que junto a los componentes del granito aparecen también otros sedimentos de origen químico y orgánico.

Los minerales identificados en las muestras y los porcentajes que revela el análisis semicuantitativo son los siguientes: filosilicatos: 52% (moscovita, biotita, illita, esmectitas y caolinita), cuarzo: 14%, feldespato potásico: 11% y feldespato sódico: 23%. Además se han encontrado gran cantidad de diatomeas silíceas (Fig.3), carbonato cálcico procedente de estructuras orgánicas (algas), hematites (Fig.4) y pirita (Fig.5). De particular interés ha sido la detección de vivianita (Fig.6), identificación que ha sido posible gracias a los trabajos de Hernández Pacheco *et al.* 1993. La vivianita es un fosfato de hierro hidratado de color azulado que aparece comúnmente en depósitos sedimentarios asociado a huesos, maderas en descomposición y otros residuos orgánicos.

Respecto a la alteración del granito cabe destacar que la estructura cristalina de los feldespatos al entrar en contacto con el agua se desmorona comenzando su alteración a minerales arcillosos del tipo caolinita si es feldespato potásico o esmectitas si el feldespato es calco-sódico (Montoto y Esbert, 1976).

La formación de esmectitas e illita en medios lacustres requiere que las rocas de las inmediaciones del embalse sean ricas en iones ferrosos, calcio y magnesio, es decir, condiciones alcalinas en las aguas. La caolinita requiere un gran aporte de agua de precipitación, la existencia de elementos alcalinos, pH inferior a 7 y medio oxidante (Coraes *et al.*, 1977).

En cuanto a las micas, es la biotita la que más fácilmente se altera perdiendo los elementos ferromagnesianos cuando está sometida a procesos de hidratación, transformándose parcialmente en clorita con una liberación de potasio y hierro. Este último puede dar lugar a la neoformación de pirita y hematites, minerales que han sido encontrados asociados a vivianita en algunas de las muestras estudiadas.

**Resistencia:** En los ensayos de molinete efectuados "in situ", se pone de manifiesto la existencia de una capa, a 1,50 m de profundidad y de un metro de espesor aproximadamente, de limos más gruesos que el resto de los sedimentos, con una resistencia al corte mayor. El valor de la resistencia al corte sin drenaje (Su) en ésta capa puede fijarse en 0.3 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras que a

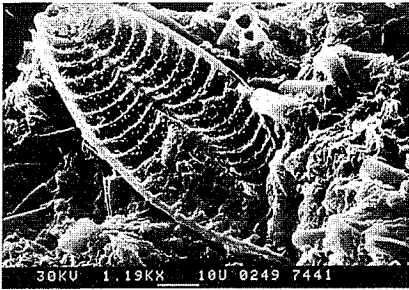


Fig. 3.- Diatomeas formando parte de los sedimentos.

Fig. 3.- Diatoms in the sediments.

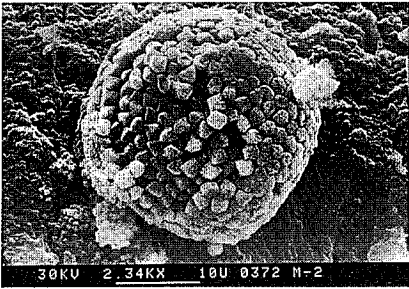


Fig. 5.- Agregado de cristales octaédricos de pirita.

Fig. 5.- Octahedric cristal aggregate of pyrite.

profundidades mayores puede ser del orden de 0.10 Kg/cm<sup>2</sup>. Superficialmente y debido a la desecación se puede adoptar un valor más cercano a 0.15 Kg/cm<sup>2</sup>.

Con los ensayos triaxiales consolidados y no drenados se han determinado las características resistentes del material, en términos efectivos. Se ha obtenido para los sedimentos más finos una ley de resistencia intrínseca definida por la siguiente pareja de valores:  $c' = 0.08$  Kg/cm<sup>2</sup> y ángulo de rozamiento,  $\delta' = 28.6^\circ$ . De la misma forma para el paquete de material limoso más grueso:  $c' = 0.08$  Kg/cm<sup>2</sup> y  $\delta' = 39.0^\circ$ .

La comparación, a diferentes profundidades, de los valores de la resistencia al corte sin drenaje obtenidos de los ensayos de laboratorio (triaxiales rápidos y molinetes) y los resultantes de los ensayos de molinete realizados "in situ", pone de manifiesto una notable similitud de ambos.

**Deformabilidad:** La presión de preconsolidación es notablemente mayor que la presión efectiva en la zona más cercana a la superficie y muy similares a partir de los 2 metros de profundidad. Esto es indicativo de que en la zona más superficial los sedimentos se encuentran ligeramente preconsolidados debido a la desecación sufrida, mientras que en profundidad están normalmente consolidados.

Los valores obtenidos para los módulos edométricos son similares a los referenciados por diferentes autores sobre materiales de similares características (fundamentalmente, los de origen marino); siendo

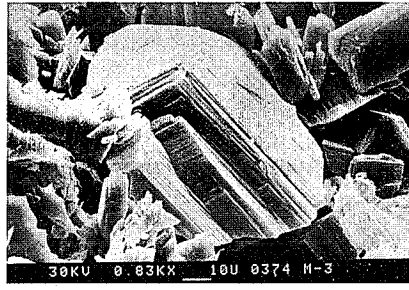


Fig. 4.- Hematites rodeado de vivianita.

Fig. 4.- Hematite surrounded by vivianite.

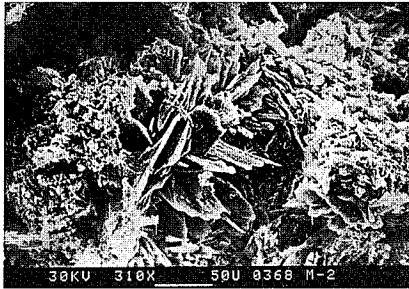


Fig. 6.- Cristales tabulares de vivianita.

Fig. 6.- Tabular crystals of vivianite.

entre 25 y 30 Kg/cm<sup>2</sup> para la zona superficial y entre 5 y 20 Kg/cm<sup>2</sup> a partir de los 2 metros de profundidad, aumentando linealmente con la misma. Por el contrario los que se deducen para el índice de huecos, compresión y entumecimiento resultan mayores.

Los ensayos de compresibilidad han puesto de manifiesto que la deformabilidad tiende a disminuir con la profundidad, diferenciándose claramente dos zonas. La primera, más superficial, en la que debido a su proximidad a la superficie y a la exposición al aire, la desecación sufrida ha hecho que esta zona sea la menos deformable de todo el perfil tipo estudiado. Posteriormente a partir de los 2.50 m de profundidad, la deformabilidad tiende a disminuir con la misma, hasta un valor del 50% a los 6.0 m. En cualquier caso se trata de materiales altamente deformables.

Los valores de los índices de compresión y entumecimiento disminuyen con la profundidad también a partir de los 2 metros, consecuencia de la consolidación sufrida debido a las cargas que existen por encima. Los valores obtenidos varían desde 2.5 a 1.5 para el índice de compresión y de 0.35 a 0.15 para el índice de entumecimiento.

Por último los coeficientes de consolidación de los sedimentos, obtenidos a partir de los dos ensayos de piezocono han sido muy similares a los 5 m de profundidad, y del mismo orden de magnitud entre 3.5 y 5 m (10-4 cm<sup>2</sup>/seg).

## Aplicaciones y recomendaciones

En lo que se refiere a los ensayos de campo, cabe destacar la idoneidad de las técnicas del molinete y del piezocono para el estudio de este tipo de suelos. Los ensayos de molinete constituyen un verdadero ensayo de "corte in situ" a pequeña escala para obtener la resistencia al corte sin drenaje y la técnica del piezocono es una de las más interesantes de las que se han desarrollado últimamente para los suelos blandos, resultando muy útil para obtener la identificación y los parámetros básicos de consolidación del terreno.

A la hora de identificar distintos estratos o capas en un suelo blando o variaciones en la granulometría, mineralogía o humedad, resultan también muy aconsejables los ensayos de testificación geofísica, especialmente los de conductividad, gamma natural y gamma-gamma. En nuestro caso la correlación con el resto de ensayos de campo y laboratorio ha resultado ser de gran fiabilidad.

En lo que a los ensayos de laboratorio se refiere los que más interesan son los edométricos y los de resistencia al corte ya sean triaxiales o de corte directo. En todo caso deben completarse con los necesarios ensayos de identificación, como los granulométricos, plasticidad y contenido de materia orgánica como los más significativos.

Una de las principales conclusiones que se pueden aventurar de este estudio es que con una buena campaña de ensayos de campo se pueden reducir en gran medida los ensayos de laboratorio, pues ambos se complementan y en todo caso los primeros, si se han realizado correctamente, pueden ser mucho más realistas en lo que a parámetros definitorios del comportamiento geotécnico de estos materiales se refiere. Máxime en materiales de características geotécnicas tan excepcionales como son los limos arcillosos recientes.

## Referencias

- Corrales Zarauza, I.; Rosell Sanuy, J.: Sanchez de la Torre, L.; Vera Torres, J.A. y Vilas Minondo, L. (1977). "Estratigrafía". Ed. Rueda.
- Hernández Pacheco, A.; La Iglesia, A. y Fernández Santín, S. (1993). "Vivianita de los lodos del Embalse de Proserpina (Mérida, Badajoz)". Estudios Geológicos, 49 (5-6), 255-260.
- Montoto, M. y Esbert, R.M. (1976). Memorias del Simposio Nacional sobre Rocas Blandas. Tomo I. S.E.M.S. y C., S.E.M.R. y A.E.T. Madrid, 17-18 de Nov. 1976. Comunicación A-3.
- Rosso de Luna, I. y Hernández Pacheco, F. (1949). "Mapa Geológico de España, escala 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España, N° 177, Mérida".