

DEFORMABILIDAD DE LOS SUELOS LIMOSOS DEL PUERTO DE HUELVA⁽¹⁾

V. CUELLAR (*)
C. OTEO (*)
C. OLALLA (*)
J. L. MONTE (*)

RESUMEN. En este artículo se proporcionan datos sobre las características de deformabilidad y velocidad con que se producen los asentamientos de los suelos limosos muy blandos y de la arcilla subyacente estratificada y normalmente consolidada existentes en el puerto de Huelva. Para su obtención se efectuaron ensayos de disipación de presiones intersticiales con un piezocono y se compararon los datos de consolidación y permeabilidad con los proporcionados por un permeámetro autopercutor. El análisis de los resultados obtenidos in situ se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los ensayos de consolidación realizados en laboratorio con muestras inalteradas. Las conclusiones alcanzadas concuerdan con los datos recopilados en un terraplén experimental llevado a cabo por otros investigadores en la misma formación de suelos.

ABSTRACT. The article provides data concerning deformability characteristics of the very soft silty soils and the underlying stratified and normally consolidated clay existing in Huelva harbour. Dissipation tests performed with a piezocone have permitted to compare consolidation and permeability data with those obtained with a self-boring permeameter. An analysis of the *in situ* results was carried out taking into account consolidation tests performed in the laboratory with undisturbed samples. The conclusions drawn are consistent with data collected by other researchers from a trial embankment built on the same soil formation.

1. INTRODUCCION

Debido a la necesidad de ampliar las instalaciones portuarias y de construir un paseo marítimo, la Dirección del Puerto Autónomo de Huelva solicitó la colaboración del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, para caracterizar geotécnicamente una franja de terreno de 1.000 m de longitud y 100 m de anchura, que se encuentra situada en la margen izquierda del río Odiel, cerca de su desembocadura en el océano Atlántico.

La experiencia constructiva propia de esa zona revela la existencia de formaciones muy blandas, puestas de manifiesto por el hecho de que algunos rellenos con taludes del tipo 4H:1V construidos con anterioridad en puntos próximos fallaron al alcanzar una altura aproximada de 3 m.

Los trabajos in situ se realizaron desde una plataforma móvil, fijada a la superficie del suelo en cada punto de interés, ya que la pleamar cubre totalmente el área de estudio.

2. CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO

2.1. GEOLOGIA Y LITOLOGIA

La marisma costera que caracteriza geotécnicamente el emplazamiento es una formación geológica relativamente reciente, compuesta por una acumulación de sedimentos de granulometría fina de origen fluvio-marino, es decir, limos y arcillas con capas de arenas finas y conchas. Dichos depósitos se han formado por la sedimentación de partículas finas, llevadas en suspensión por el río, y depositadas al disminuir la capacidad de transporte de la corriente o al flocular la materia en suspensión por la acción del agua marina.

El perfil litológico que se representa en la figura 1 corresponde a los 450 m centrales del perfil longitudinal levantado en el centro de la zona. Los 10 m superiores están constituidos por capas subhorizontales con espesores muy variables de arcillas limosas y arenas limosas con conchas. Por debajo de éstas, se encuentra una capa de arcilla gris estratificada que con un espesor aproximado de 20 m llega hasta una formación de arenas y gravas existente a los 30 m, que probablemente corresponde a una antigua terraza.

Las isoclasas representadas en la figura 2 muestran el número de golpes por cada 20 cm de penetración obtenido a lo largo del perfil indicado en la figura 1 con un

(1) Artículo presentado en el X Congreso Europeo de la S.I.M.S. celebrado en Florencia, 1991.

(*) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX (MCOPT), Madrid.

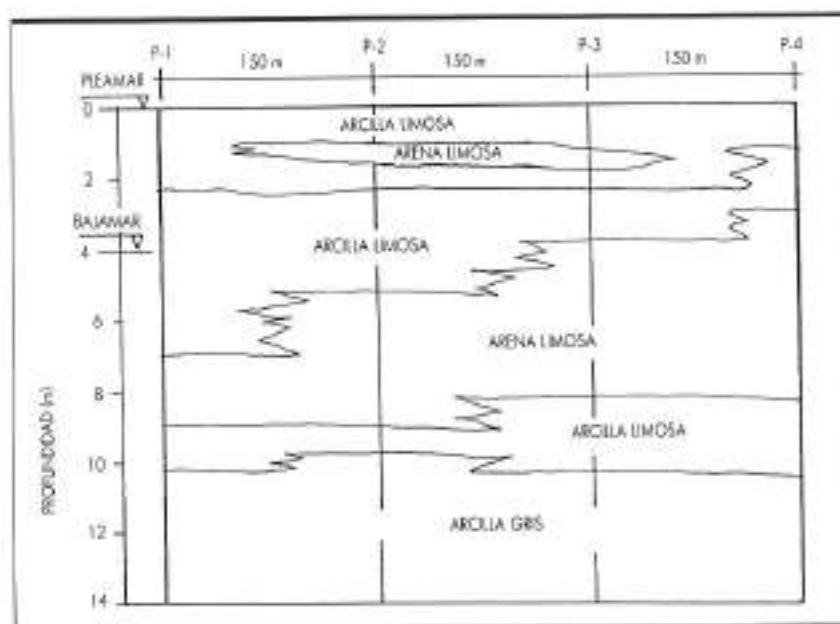


FIGURA 1. Perfil litológico del terreno.

penetrómetro dinámico tipo BORRO'S provisto de una punta cuadrada de 4×4 cm, varillas de 32 mm de diámetro y un martillo de 65 Kp cayendo desde una altura de 0,5 m.

2.2. DESCRIPCION DEL SUELO

La figura 3 muestra las curvas granulométricas de los diversos materiales y en la tabla 1 se indican sus límites de Atterberg y sus parámetros de estado natural.

El parámetro «a» de Skempton, para los materiales plásticos es de 0,5.

La concentración de sales determinada en el agua intersticial de las muestras obtenidas no ha superado nunca el valor de 10 g/l.

En la figura 4 se refleja para uno de los puntos investigados la variación con la profundidad de la humedad límites de Atterberg y resistencia al esfuerzo cortante. El índice de fluidez varía entre 1 y 1,5. El cociente e_s/σ'_v , determinado mediante ensayos de moineo in situ y ensayos triaxiales rápidos sin consolidación y sin drenaje es de 0,3 (ver dicha figura).

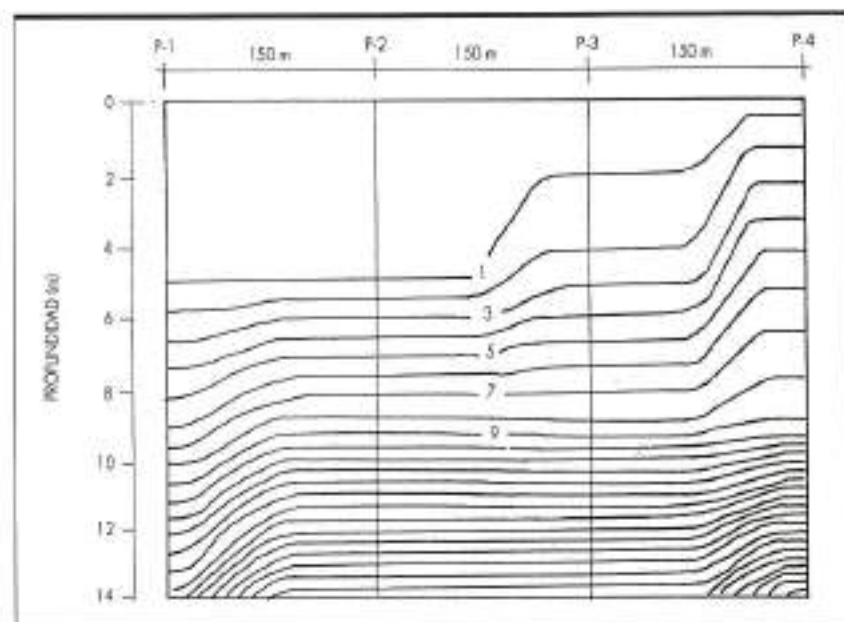


FIGURA 2. Perfil de isoclasas obtenido con el penetrómetro dinámico tipo BORRO'S.

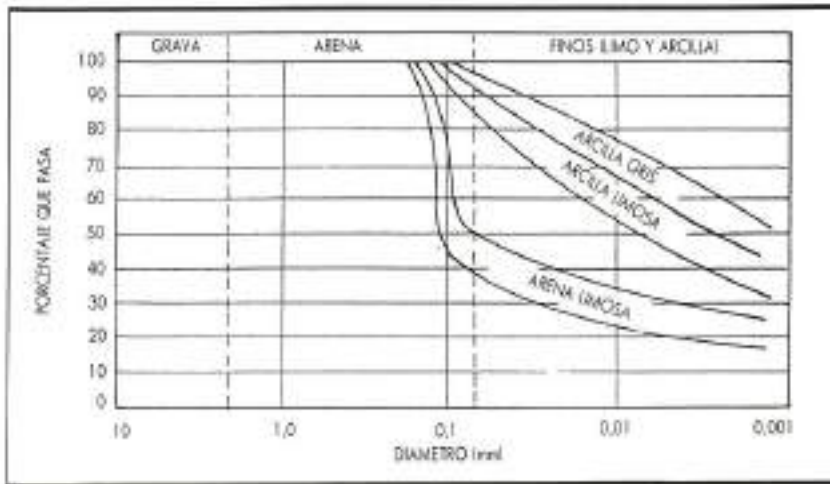


FIGURA 3. Curvas granulométricas.

TIPO DE SUELO	PROF. (m)	W_L	I_p	INDICE DE HUECOS	DENSIDAD SECA (kN/m^3)
Arena limosa	0-0	—	—	0.90	14.5
Arcilla limosa	0-10	41	21	1.30	12.0
Arcilla gris	10-15	50	27	1.15	12.8

TABLA 1. Parámetros representativos del estado natural de los suelos.

3. PARAMETROS DE DEFORMACION

3.1. MODULO EDOMETRICO

3.1.1. Arena limosa. La figura 5 muestra los valores corregidos de la resistencia en punta q_T y de la presión intersticial total w_T obtenidos en uno de los puntos mediante el uso de un piezocono de punta cónica a 60° , 10 cm^2 de sección transversal y con un elemento poroso de 7.8 mm situado 1.5 mm por encima de la base del cono. La utilización del piezocono ha permitido distinguir con claridad las capas de arena y arcilla limosas existentes en los 10 m superiores.

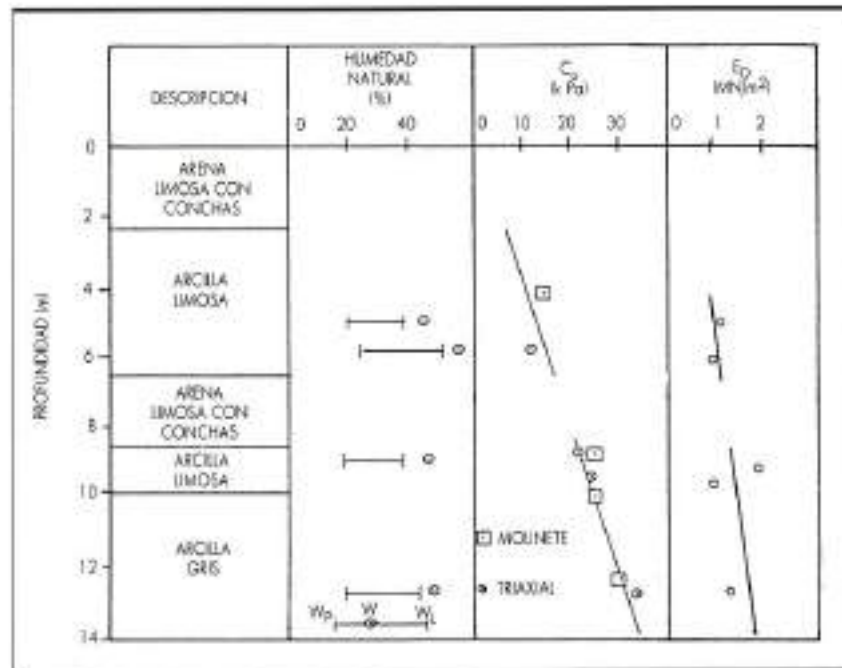


FIGURA 4. Perfil geotécnico del suelo en el punto P-1.

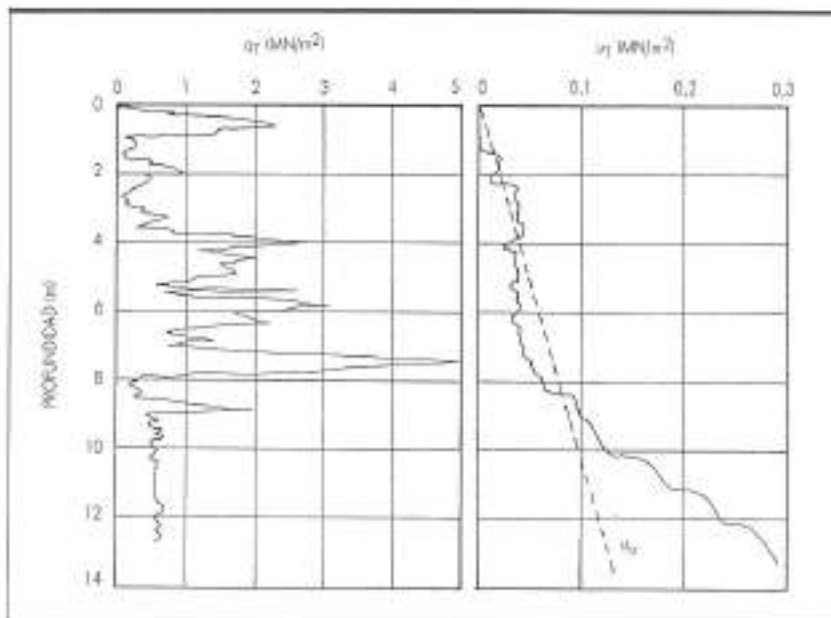


FIGURA 5. Datos registrados con el piezocono en el punto P-3.

A partir de los datos mostrados en la figura 5 y otros similares obtenidos en distintos puntos, se estimó $q_T = 1,35 \text{ MN/m}^2$ como valor representativo de la arena limosa a una profundidad de 5 m. Según Senneset et al. (1980), este valor puede asociarse a un módulo tangencial $M_0 = 2q_T$ de $2,7 \text{ MN/m}^2$.

Por otro lado, ensayos de laboratorio efectuados en células Rowe de 150 mm de diámetro utilizando muestras obtenidas a profundidades entre 4 y 6 m, proporcionaron, para un incremento de carga de 100 kPa sobre las tensiones verticales existentes in situ, un valor E_D muy próximo a 4 MN/m^2 .

Para estimar el valor del módulo edométrico a partir de datos obtenidos in situ con el piezocono, Senneset et al., sugirieron utilizar la ecuación (1) que para un incremento de carga $\Delta\sigma'_v$, relaciona dicho módulo con el módulo tangencial M_0 antes comentado.

$$M = M_0 \sqrt{\sigma'_{vo} + \frac{\Delta\sigma'_v}{2}} \quad (1)$$

Sustituyendo en la ecuación (1) $M_0 = 2,7 \text{ MN/m}^2$, obtenido a una profundidad de 5 m con el piezocono y el valor $\sigma'_{vo} = 42,5 \text{ kPa}$, estimado a esa profundidad mediante los parámetros resumidos en la tabla 1 se obtiene, para el mismo incremento de carga que el utilizado en la determinación del módulo edométrico E_D en laboratorio ($\Delta\sigma'_v = 100 \text{ Kpa}$), un módulo in situ M igual a E_D .

3.1.2. Arcilla limosa y arcilla gris. Para ambos materiales y para incrementos de carga de 100 Kpa por encima de

las tensiones verticales in situ se obtuvo, tal y como muestra la figura 4, la misma ley de variación E_D con la profundidad.

3.2. COEFICIENTE DE CONSOLIDACION

Los coeficientes de consolidación determinados en el laboratorio con muestras de arcilla limosa y arcilla gris obtenidas a profundidades de 5 m y 12 m, han sido $2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg}$ y $2,15 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg}$ respectivamente. A esos valores corresponden coeficientes de permeabilidad de $2,5 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{seg}$ y $1,43 \times 10^{-10} \text{ m}/\text{seg}$, como se puede comprobar sustituyendo en la ecuación (2) los valores E_D correspondientes a esas profundidades identificados en la figura 4.

$$\text{Coeficiente de Consolidación} = \frac{k E_D}{\gamma_w} \quad (2)$$

La pequeña diferencia encontrada en laboratorio entre la permeabilidad de la arcilla limosa y la arcilla gris no parece justificar el gran incremento en presión intersticial detectado con el piezocono a partir de una profundidad de 10 m (ver fig. 5). Ello motivó el que se intentase contrastar los resultados de laboratorio con los datos proporcionados in situ por ensayos de disipación con piezocono y por ensayos de permeabilidad de gradiente constante efectuados mediante un permeámetro autopercutor.

En la figura 6 pueden observarse los tipos de curva de disipación obtenidos con el piezocono en la arcilla limosa y la arcilla gris. El comportamiento de estos dos materiales mostrado en dicha figura es muy similar al obtenido en otros puntos y ensayos. La arcilla limosa se

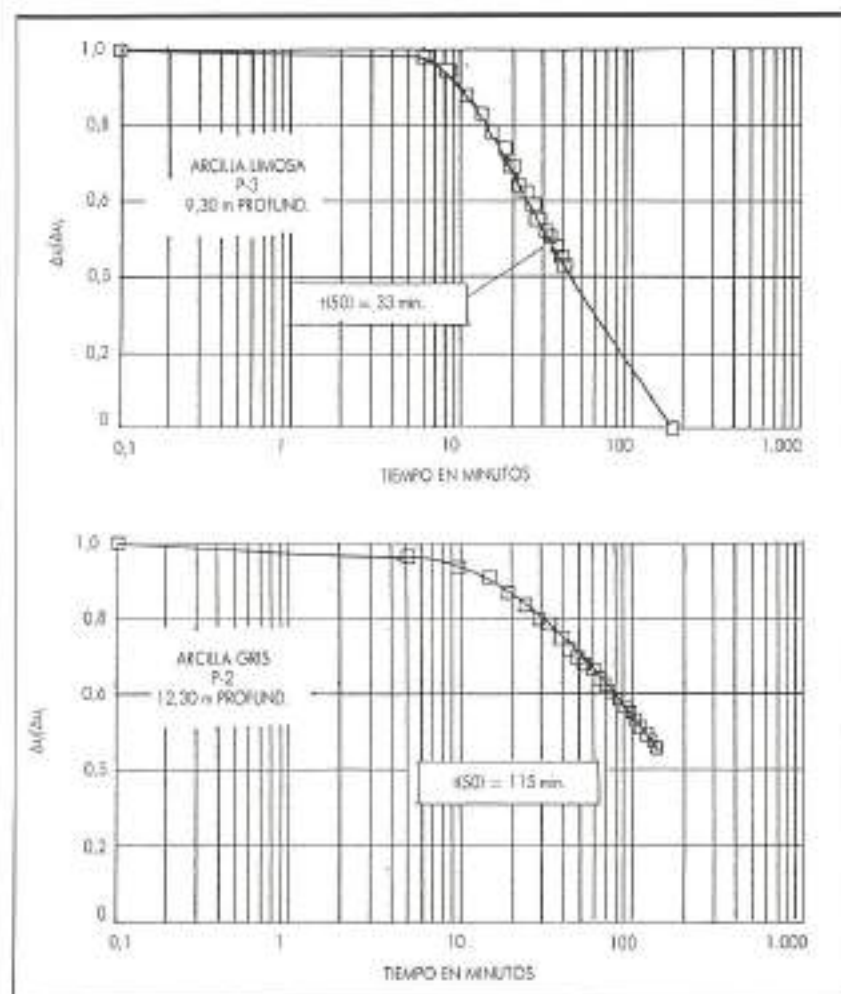


FIGURA 6. Curvas de disipación de presión intersticial obtenidas con el piezocono.

caracteriza por un parámetro t_{50} 4 a 5 veces menor que el de la arcilla gris. La interpretación de este tipo de ensayos se ha llevado a cabo utilizando la siguiente ecuación sugerida por Housley y Teh (1988):

$$c_v = T_{50} \frac{R^2 \sqrt{I_p}}{t_{50}} \quad (3)$$

siendo R el radio de la base del cono (17,8 mm), I_p un coeficiente de rigidez del suelo y T_{50} un factor de tiempo modificado que depende de la situación del elemento poroso en el piezocono.

Sustituyendo en la expresión (3) los parámetros $I_p = 50$ y $T_{50} = 0,245$ se determinaron los siguientes rangos de variación de c_v .

arcilla limosa: $2,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg} - 8,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$
 arcilla gris: $6,8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg} - 12,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg}$

Los ensayos de permeabilidad in situ se han realizado utilizando un permeámetro autopercorador tipo

PERMAC, Tavenas et al. (1986), fabricado por ROC-TEST. Consiste en un tubo autopercorador de 73 mm de diámetro y 1.800 mm de longitud provisto de un elemento central poroso de 146 mm de longitud dotado de una serie de agujeros de 9,3 mm situados a intervalos de 15 mm. Con el fin de mantener una carga hidráulica positiva constante durante cada ensayo se utilizó una botella de Mariotte.

La figura 7 muestra las pérdidas de agua en función del tiempo obtenidas en dos de los ensayos efectuados. Debido a las condiciones climatológicas adversas que predominaron durante la semana en que se realizaron los trabajos de campo, no se pudo llevar a cabo ningún ensayo en la arcilla gris.

Las líneas continuas de la figura 7 corresponden a un ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales llevado a cabo utilizando la ecuación (4) sugerida por Mieussens y Ducasse (1976):

$$V = Q_{\infty} t + 2\alpha \sqrt{t} + V_0 \quad (4)$$

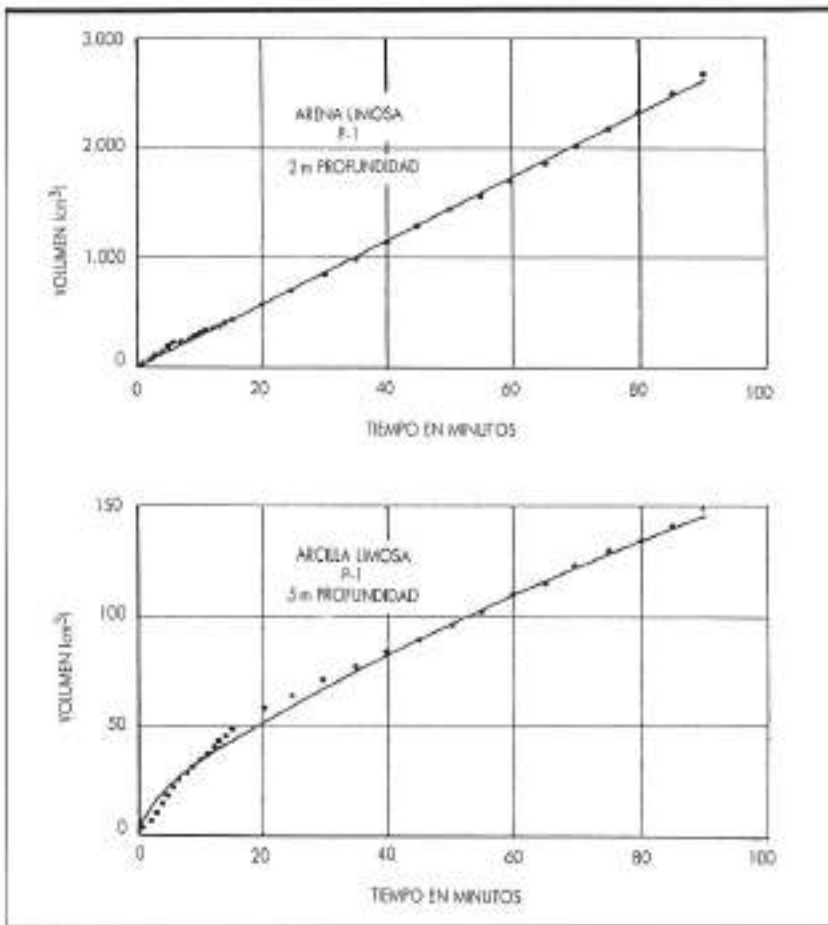


FIGURA 7. Pérdidas de agua observadas en el permeámetro autopercutor.

donde V representa la pérdida de volumen de agua registrada por el permeámetro, Q_{∞} es la pérdida de caudal en condiciones de flujo estacionario, V_0 es la pérdida de volumen de agua debida a la compresibilidad del sistema de medida y « α » es una función del coeficiente de hinchamiento del suelo.

En la tabla 2 se resumen los coeficientes de permeabilidad obtenidos al sustituir en la ecuación (5), derivada por Mieuissen y Durasse, los valores de Q_{∞} determinados en los ensayos.

$$k_A = \frac{Q_{\infty}}{\pi B \gamma_w \Delta u} \quad (5)$$

donde B representa la longitud de la zona porosa del permeámetro y Δu la carga hidráulica.

Sustituyendo en la ecuación (2), el coeficiente de permeabilidad obtenido en la arcilla limosa a una profundidad de 5 m, junto con el valor E_D que corresponde a esa profundidad en la figura 4, se obtiene un coeficiente de consolidación de $8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$, 34 veces mayor que el valor de c_v determinado en el laboratorio,

y que coincide con el valor máximo c_v determinado con el piezoceno en la arcilla limosa. Dicho valor se ajusta bastante bien al coeficiente de consolidación estimado por Serrano y Sopena (1987) con datos obtenidos en un terraplén experimental ejecutado cerca del emplazamiento sobre el mismo tipo de terreno.

PUNTO	PROF. (m)	TIPO DE MATERIAL	CARGA DE AGUA (m)	k_A (m/seg)
P-1	2	Arena limosa	1,55	$6,6 \times 10^{-7}$
	5	Arcilla limosa	3,10	$8,5 \times 10^{-9}$
	6,5	Arcilla limosa	1,35	$4,8 \times 10^{-6}$
	8,6	Arcilla limosa	1,40	$8,7 \times 10^{-6}$
P-3	5,5	Arena limosa	3,10	$1,7 \times 10^{-6}$
	8,0	Arena limosa	3,10	$6,6 \times 10^{-7}$
	9,5	Arcilla limosa	3,10	$4,5 \times 10^{-6}$

TABLA 2. Resultados de los ensayos de permeabilidad in situ.

El coeficiente de permeabilidad horizontal de la arcilla gris se ha estimado sustituyendo de nuevo en la ecuación (2) el coeficiente de consolidación obtenido con el piezocono (10^{-7} m²/seg) y el valor de Δ_D^* correspondiente a una profundidad de 12 m ($1,5$ MN/m²). De esta manera se obtiene un valor $k_h = 6,6 \times 10^{-10}$ m/seg, 4,5 veces mayor que el valor k_v obtenido en el laboratorio y 13 veces inferior al valor k_h obtenido en la arcilla limosa a una profundidad de 5 m.

4. CONCLUSIONES

La utilización de un piezocono y de un permeámetro autopercutor ha permitido diferenciar el comportamiento geotécnico de los diversos materiales limosos que se encuentran en los 10 m superiores del puerto de Huelva del de la arcilla subyacente normalmente consolidada.

El módulo edométrico de la arena limosa obtenido en los ensayos de consolidación efectuados con muestras de 150 mm de diámetro, coincide con el valor estimado a partir de la resistencia en punta obtenida in situ con un piezocono.

La arcilla limosa y la arcilla gris subyacente gozan de la misma ley de variación con la profundidad de la resistencia al esfuerzo cortante. Aunque en el Laboratorio se obtuvieron coeficientes de consolidación similares en estos dos materiales, los ensayos in situ han permitido estimar un c_v en las arcillas limosas de $8,5 \times 10^{-7}$ m²/seg, valor 8,5 veces superior al de la arcilla gris. Dicho valor, que se considera representativo de los datos obtenidos con el permeámetro a una profundidad de 5 m, coincide con el valor máximo de c_h obtenido con el piezocono en la arcilla limosa y es a su vez 34 veces mayor que el valor de c_v obtenido en el laboratorio.

En lo que se refiere a la arcilla gris, el coeficiente de permeabilidad que se deduce de los ensayos realizados con el piezocono es 4,5 veces superior al valor k_v proporcionado por los ensayos de laboratorio.

Las diferencias encontradas entre los parámetros de consolidación de los distintos materiales cabe achacarlas a la mayor heterogeneidad (ej. existencia de conchas y bolsadas lenticulares de distintos materiales) que presenta el terreno natural en relación con las muestras que han podido ser ensayadas en laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a don Manuel Jiménez Cuenca, Director del Puerto Autónomo de Huelva, y a don Joaquín Barba, Jefe de Proyectos del mismo, la colaboración prestada en la realización de los trabajos in situ.

REFERENCIAS

- HOULSBY, G. T., and TEH, C. I. (1988). Analysis of the piezocone in clay. Proc. 1st. ISOPT: 777-788, Balkema, Rotterdam.
- MIEUSSEN, C., et DUCASSE, P. (1977). Mesure en place des coefficients de perméabilité et des coefficients de consolidation horizontaux et verticaux. Canadian Geotechnical Journal 14: 76-80.
- SENNESET, K.; SANDVEN, R.; LUNNE, T.; BY, T., and AMUNDSEN, T. (1988). Piezocone tests in silty soils. Proc. 1st. ISOPT: 955-966, Balkema, Rotterdam.
- SERRANO, A. A., and SOPENA, L. M. (1987). Two trial embankments at Huelva (Spain): Settlements and failure behaviour. Proc. Int. Symp. on Geotech. Eng. of Soft Soil 1: pp. 303-311, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
- TAVENAS, F.; TREMBLAY, M., et LEROUEIL, S. (1983). Mesure in situ de la perméabilité des argiles. Bulletin de L'Association Internationale de Géologie de l'Ingenieur 26-27: 509-513.