

# ASIENTOS DE CONSOLIDACION DE UNA ARCILLA ORGANICA BLANDA PROCEDENTE DE UN MANGLAR EN ECUADOR (1)

DAVOR SIMIC SUREDA (\*)

**RESUMEN.** La vía perimetral de Guayaquil discurre, en una proporción apreciable de su trazado, a través de los manglares junto a los que se asienta la ciudad. Estas formaciones geomorfológicas se caracterizan por estar constituidas por una potente sucesión de sedimentos marinos blandos que plantean variados problemas para el proyecto y la construcción de los terraplenes y las estructuras que deben salvar tanto las zonas emergidas inundables en marea alta como los esteros, que presentan calados de hasta 22 m. En este artículo se describen las características geotécnicas de los suelos arcillosos blandos, estableciendo la influencia del fenómeno de envejecimiento (clay aging) sobre su resistencia y deformabilidad. Asimismo se describen los resultados de la instrumentación de los terraplenes, cuya consolidación fue acelerada mediante un tratamiento del cimiento con drenes prefabricados. En las conclusiones se pone de relieve la importancia de los fenómenos de consolidación secundaria y terciaria en el proceso de asiento de los terraplenes.

**ABSTRACT.** The proposed Guayaquil ringroad, recently constructed crosses the low-lying mangrove plains that border the city. The geotechnical investigation revealed a deep succession of soft marine, organic and alluvial sediments underlain by a completely weathered mudstone which pose a variety of design and construction problems for the earthworks and the structures that will span the swampy canals with a maximum recorded water depth of 22 m. This paper describes the geotechnical properties of the soft deposits, assessing the effect of the clay aging in the soil strength and compressibility. Settlement of earthwork has been extensively surveyed under different conditions of untreated and treated foundation by means of band drains, and the results compared to the estimation of laboratory consolidation test. The conclusions show the importance of secondary and tertiary compression phenomena in the overall settlement behaviour of the soft clay.

## 1. INTRODUCCION

Recientemente han finalizado los trabajos de construcción del tramo occidental de la vía perimetral de Guayaquil, con una longitud total de 35 km. Entre los intercambiadores a Salinas y avenida 25 de Julio, el trazado discurre por unos terrenos blandos sometidos en su mayor parte a la inundación en pleamar con la morfología típica de los depósitos de manglar. A lo largo del trazado en este tramo existen tres estructuras que salvando sendos esteros, las cuales se hallan cimentadas mediante pilotes a niveles de terreno más competentes situados en profundidad. Con el fin de atenuar los previsible asientos diferenciales que se producirían de manera progresiva entre la calzada en terraplén y el tablero de la

estructura, el proyecto preveía la realización de un tratamiento del cimiento de los terraplenes de estribo mediante drenes, con lo cual se aceleraba la consolidación de las arcillas sometidas al peso del terraplén y se reducían al máximo los asientos remanentes de consolidación posteriores a la construcción del firme.

## 2. SINTESIS DE LAS PROPIEDADES GEOTECNICAS DEL TERRENO

La zona de estudio corresponde a los depósitos de manglar que se desarrollaron durante la última transgresión cuaternaria, cuando el océano Pacífico penetró en el estuario del río Guayas. Esta situación dio lugar al establecimiento de un complejo proceso de dinámica litoral en el que se alternaban sedimentos de agua dulce (aluviones del curso bajo del río) y depósitos en agua salada. Desde el punto de vista geomorfológico, el terreno se caracteriza por un laberinto de canales (esteros) que separan zonas emergidas llanas ocupadas por una densa vegetación de mangle y que son inundadas periódica-

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

(\*) Director de Área de Geotecnia. AGROMAN.

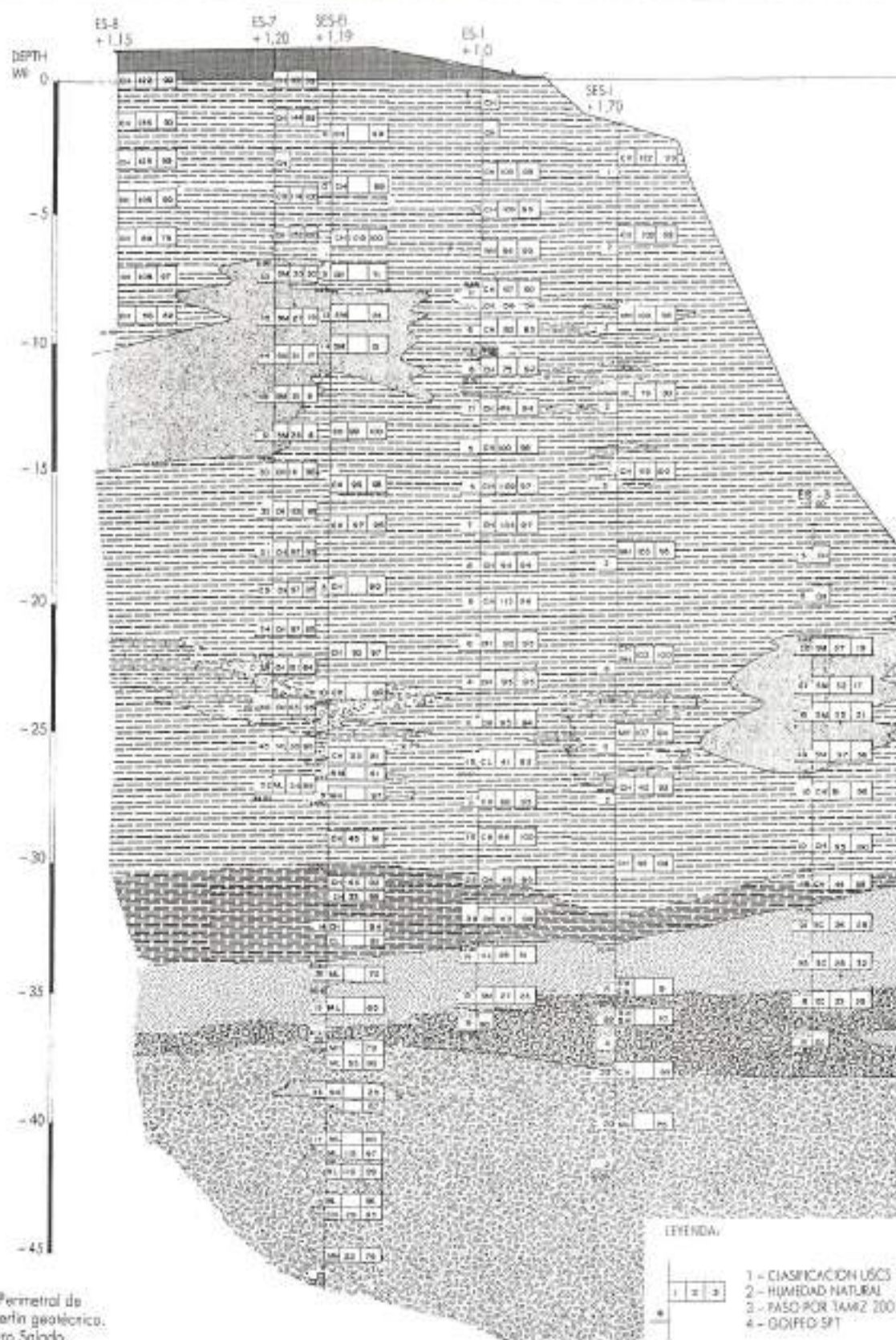


FIGURA 1. Perimetral de Guayaquil. Perfil geotécnico. Estadio I Estero Salado.

mente por la marea, con una carrera máxima de 5,00 m.

Para el proyecto de las obras se realizó una campaña geotécnica de investigación, consistente en la ejecución de sondeos desde plataformas flotantes, en los que se recuperó testigo continuo, se llevaron a cabo ensayos «in situ» de molinete y SPT, así como se utilizó sistemáticamente el penetrómetro manual y el torvane sobre el testigo recuperado. Con las muestras obtenidas se realizó una campaña de ensayos geotécnicos de laboratorio. En la figura 1 se muestra el perfil geotécnico correspondiente al cruce del estero Salado, que representa típicamente los suelos de la zona. Puede verse que, por encima de las gravas basales que tapizan el antiguo lecho del estuario, se han depositado suelos muy blandos, consistentes principalmente en arcillas limosas con delgadas intercalaciones arenosas. Ocasionalmente se detectan estratos de mayor potencia de turbas o arenas. En la figura 1 se han recogido, asimismo, los parámetros más relevantes de identificación geotécnica de los suelos.

### 3. PROPIEDADES DE LA CONSOLIDACION DE LAS ARCILLAS BLANDAS DE LOS ESTEROS

La compresibilidad de las arcillas blandas ha sido extensamente estudiada mediante ensayos edométricos de laboratorio. En la tabla 1 adjunta se muestran los valores medios de los parámetros de resistencia y consolidación

deducidos en el emplazamiento de los siete terraplenes instrumentados. Es interesante destacar que, a pesar de la aparente dispersión de los datos, el modelo SHANSEP permite predecir con un aceptable grado de precisión las propiedades de resistencia y compresibilidad de la arcilla. Este modelo, que deriva su nombre de las iniciales inglesas «Stress history and normalized engineering parameters», fue establecido originalmente en 1974 por Ladd y Foot. Según él, para una arcilla del mismo origen, la resistencia al corte sin drenaje está relacionada con la razón de sobreconsolidación según una ley de tipo:

$$\frac{C_u}{P_o} = S \cdot OCR^m$$

siendo:

- $C_u$  = Resistencia al corte sin drenaje.  
 $P_o$  = Tensión vertical efectiva.  
 $OCR$  = Razón de sobreconsolidación.  
 $S$  y  $m$  = Parámetros normalizados de la arcilla.

En la figura 2 se han representado en escala logarítmica los valores de  $\frac{C_u}{P}$  y  $OCR$  correspondientes a cada uno de los emplazamientos estudiados, obteniendo un buen ajuste mediante la ley:

$$\frac{C_u}{P} = 0,24 \cdot OCR^{0,78}$$

Estos valores de  $S$  y  $m$  están en el rango de las medidas experimentales publicadas para arcillas marinas (Ladd et al., Koutsoftas et al.).

Asimismo resulta interesante comprobar que la arcilla analizada aquí tiene una pauta definida geográficamente en lo que a sobreconsolidación se refiere. En efecto, el trazado de la vía perimetral corta transversalmente la formación del manglar, estando los emplazamientos de la tabla 1 en orden progresivo desde las proximidades del borde del antiguo estuario (Inceel) hasta la zona inmediata a la barra de arena que actualmente separa el medio marino del medio fluvial (Muerto 2). De la citada tabla se deduce que las mayores razones de sobreconsolidación se sitúan en la parte central de la formación (Mogolón 1 y Muerto 1), decreciendo progresivamente hacia los bordes.

Esta variabilidad de la sobreconsolidación de las arcillas puede ser atribuida al fenómeno descrito en la literatura como «envejecimiento», más que a otras causas como la erosión superficial, dado el carácter reciente de los depósitos. El fenómeno del envejecimiento ha sido descrito por Leonards (1964) y Bjerrum (1967) como el comportamiento que exhiben ciertas arcillas en el ensayo edométrico como si estuvieran preconsolidadas, sin que pueda atribuirse dicha preconsolidación a ninguna de las causas usuales (erosión, desecación, etc.), sino

| EMPLAZAMIENTO | PARAMETROS MEDIOS DE LA CONSOLIDACION MEDIDA EN LABORATORIO DE LA ARCILLA DE LOS ESTEROS |       |                      |                      |       |       |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|-------|-------|
|               | $C_u/P_o$                                                                                | $OCR$ | $C_v^{(1)}$          | $C_v^{(2)}$          | $C_c$ | $C_s$ |
| INECEL        | 0,12                                                                                     | 0,50  | $1,2 \times 10^{-3}$ | $6,8 \times 10^{-3}$ | 0,66  | 0,09  |
| SALADO 1      | 0,235                                                                                    | 0,85  | $3,3 \times 10^{-3}$ | —                    | 0,87  | —     |
| SALADO 2      | 0,38                                                                                     | 2,10  | $6,4 \times 10^{-4}$ | $2,0 \times 10^{-3}$ | 1,42  | 0,15  |
| MOGOLÓN 1     | 0,77                                                                                     | 4,00  | $1,2 \times 10^{-3}$ | $7,5 \times 10^{-3}$ | 1,66  | 0,19  |
| MOGOLÓN 2     | 0,86                                                                                     | 5,00  | $3,0 \times 10^{-3}$ | $1,4 \times 10^{-2}$ | 1,84  | 0,18  |
| MUERTO 1      | 0,87                                                                                     | 5,00  | $5,1 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-2}$ | 2,15  | 0,18  |
| MUERTO 2      | 0,31                                                                                     | 1,30  | $6,5 \times 10^{-4}$ | $2,9 \times 10^{-3}$ | 1,40  | 0,16  |

TABLA 1.

NOTA:

$C_u$  = Resistencia al corte sin drenaje.

$P_o$  = Tensión vertical efectiva.

$OCR$  = Razón de sobreconsolidación.

$C_v^{(1)}$  = Coeficiente de consolidación de la rama virgen del ensayo edométrico ( $\ln 2$   $\sigma_{1g}$ ).

$C_v^{(2)}$  = Coeficiente de consolidación del ramo preconsolidado del ensayo edométrico.

$C_c$  = Coeficiente de compresibilidad.

$C_s$  = Coeficiente de hinchamiento.

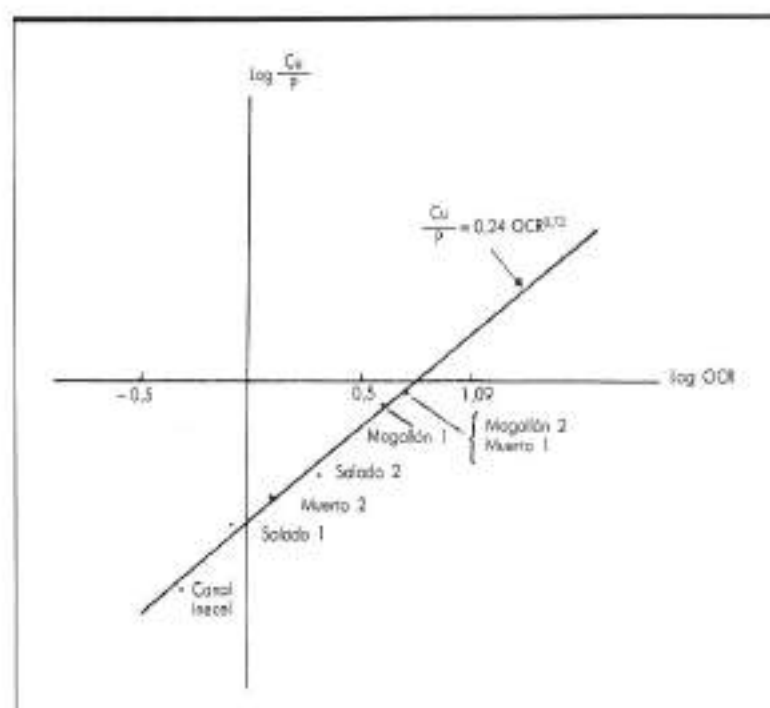


FIGURA 2. Ferrietal de Guayaquil. Parámetros normalizados de la arcilla de los esteros.

que la consolidación secundaria produce una rigidización aparente de la arcilla en la curva edométrica estándar con escalones de veinticuatro horas. En este sentido debe tenerse en cuenta que las arcillas de los esteros se han depositado en un medio salobre, lo cual ha dado lugar a una estructura floculada del esqueleto sólido que favorece la producción de los fenómenos de consolidación secundaria (Jiménez Salas, 1991). Dicha consolidación secundaria ya fue detectada durante los ensayos de laboratorio, aunque el corto número de curvas de consolidación disponibles con una duración superior a la estándar no permitió explicar la dispersión observada de valores del coeficiente  $C_{\alpha}$  de consolidación secundaria, si bien en ningún caso se superaba el valor del 1 % que es concordante con los valores empíricos propuestos en la literatura (Ladd, 1976).

#### 4. COMPORTAMIENTO OBSERVADO EN EL CAMPO

Los terraplenes de estribo fueron construidos con arreglo a las siguientes fases:

- La vegetación fue cortada y retirada.
- Se dispuso una capa granular gruesa de 1,00 m de espesor en la base del terraplén, que constituía una plataforma emergida para trabajo.
- Se hincaron drenes prefabricados en el cimiento del terraplén. Al mismo tiempo se realizó la instalación de la instrumentación mediante piezómetros, inclinómetros y células de asiento.

- El terraplén se construyó por tongadas sucesivas, siguiendo un ritmo prefijado en función de los resultados de los cálculos de estabilidad.

En la figura 3 se muestra un gráfico en el que se representa, en función del tiempo, tanto el proceso de carga como los asientos medidos. Hasta el extendido del pavimento los asientos se miden mediante las células, pasando a medirse a continuación desde el propio pavimento. Los datos de estas curvas fueron interpretados utilizando la construcción geométrica propuesta por Asaoka (1978) para estimar en cada escalón de carga tanto el asiento final como el coeficiente de consolidación. Con los valores de este asiento final se hizo un análisis retrospectivo mediante un modelo de consolidación primaria, para obtener los coeficientes de compresibilidad  $C_c$ ,  $C_{\alpha}$  y la razón de sobreconsolidación  $OCR$ . Se tuvo en cuenta la presencia de los drenes utilizando la formulación usual de la consolidación radial (Barron, 1948) para obtener el coeficiente de consolidación horizontal  $C_{h\alpha}$ .

Volviendo al gráfico de la figura 3 puede apreciarse que, después de la consolidación primaria, el estribo tiene un asiento diferido que normalmente se conoce con el nombre de consolidación secundaria. Sin embargo, en este caso se aprecia un comportamiento algo más complejo del que cabría esperar con los modelos explicativos usuales, pues puede verse como a partir de un momento dado los asientos de consolidación secundaria aumentan sin que se haya producido una variación significativa de

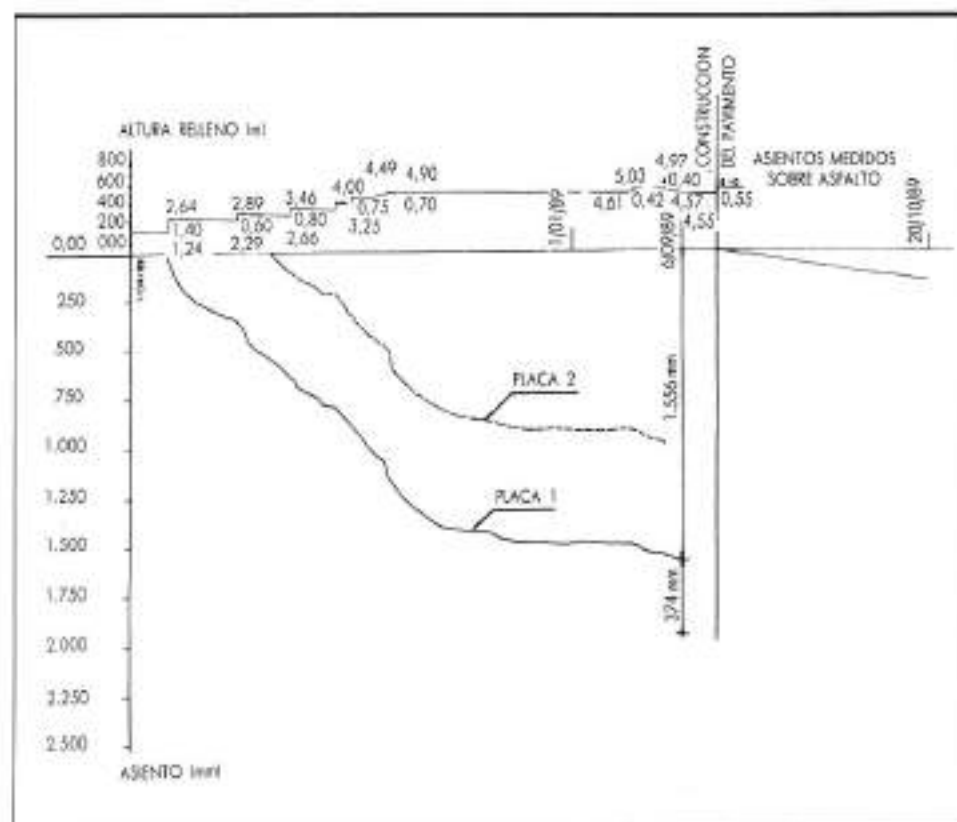


FIGURA 3. Perimetral de Guayaquil. Secuencia constructiva y asentamientos en el Estribo I. Estribo Solado.

las condiciones de carga. Los valores del coeficiente de consolidación secundaria  $C_{\alpha}$ , que figuran en la tabla 2, se han obtenido del análisis retrospectivo de la velocidad de asentamientos medida en la parte inicial del tramo de curva posterior a la finalización de la consolidación primaria.

El modelo matemático de consolidación secundaria utilizado ha sido el más frecuente:

$$S_s = H C_{\alpha} \log \frac{t}{t'}$$

siendo:

$S_s$  = Asiento de consolidación secundaria en el tiempo  $t$ .

$H$  = Espesor de la capa compresible.

$C_{\alpha}$  = Coeficiente de consolidación secundaria.

$t'$  = Tiempo de referencia.

Siguiendo las sugerencias de ciertos autores (Dhawan et al., citado por Alonso et al.) se ha denominado «consolidación terciaria» la fase correspondiente a la aceleración de los asentamientos diferidos posteriores a la consolidación primaria. El coeficiente  $C_{\alpha}$  de la tabla 2 corresponde a los valores obtenidos mediante análisis retrospectivo de este tramo final de la curva de asentamientos. Puede verse que, así como los valores de  $C_{\alpha}$  (conso-

lidación secundaria) están en el orden de magnitud de los coeficientes esperables (tanto medidos en laboratorio como estimados a partir de correlaciones empíricas), los valores de  $C_{\alpha}$  (consolidación terciaria) son mucho mayores.

## 5. CONCLUSIONES

Las tablas 1 y 2 proporcionan una comparación entre el comportamiento geotécnico estimado y el realmente medido de los terraplenes de estribo a la luz de los parámetros usuales de la consolidación de la arcilla del cimiento. De esta comparación pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Admitiendo las inevitables imprecisiones inherentes a todo el proceso de adquisición de datos (toma de muestras, medidas de laboratorio e «in situ», hipótesis simplificadoras de los modelos, variabilidad de las condiciones locales en cada estribo, etc.), los parámetros de consolidación primaria obtenidos a partir de ensayos de laboratorio ajustan aceptablemente con los que se deducirían del comportamiento real del terraplén. Es de destacar el hecho de que el coeficiente de consolidación vertical deducido de los ensayos edométricos es del mismo orden que el coeficiente  $C_h$  deducido del comportamiento del cimiento tratado con drenes.

| EMPLAZAMIENTO | PARAMETROS DE CONSOLIDACION DE LA ARCILLA DE LOS ESTEROS DEDUCIDOS DE LA MEDIDA DE ASIENTOS |                             |                        |                |                           |       |                                             |                                            |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|-------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
|               | PLACA DE ASIENTO                                                                            | TERRENO (T/m <sup>2</sup> ) | CONSOLIDACION PRIMARIA |                |                           |       | CONSOLIDACION SECUNDARIA C <sub>α</sub> (%) | CONSOLIDACION TERCIARIA C <sub>α</sub> (%) |
|               |                                                                                             |                             | C <sub>c</sub>         | C <sub>s</sub> | Ch (cm <sup>2</sup> /seg) | OCR   |                                             |                                            |
| SALADO 1      | P1                                                                                          | 8,17                        | 0,87                   | —              | 1,21 × 10 <sup>-3</sup>   | 0,65  | 1,02                                        | 10,04                                      |
|               | P2                                                                                          | 8,17                        |                        |                | 1,37 × 10 <sup>-3</sup>   |       | 0,71                                        | 9,7                                        |
| SALADO 2      | P1                                                                                          | 8,69                        | n. d.                  | —              | n. d.                     | n. d. | n. d.                                       | n. d.                                      |
|               | P2                                                                                          | 8,69                        |                        |                |                           |       |                                             |                                            |
|               | P3                                                                                          | 8,69                        |                        |                |                           |       |                                             |                                            |
| MOGOLLON 1    | P1                                                                                          | 9,75                        | —                      | —              | 7,02 × 10 <sup>-3</sup>   | —     | n. d.                                       | 7,1                                        |
|               | P2                                                                                          | 11,61                       | 1,66                   | 0,19           | 2,06 × 10 <sup>-3</sup>   | 3,60  |                                             | —                                          |
|               | P3                                                                                          | 11,61                       | —                      | —              | 1,54 × 10 <sup>-3</sup>   | —     |                                             | —                                          |
| MOGOLLON 2    | P1                                                                                          | 9,70                        | —                      | —              | 1,69 × 10 <sup>-2</sup>   | —     | 0,63                                        | 3,0                                        |
|               | P2                                                                                          | 9,70                        | 1,43                   | 0,13           | 1,30 × 10 <sup>-2</sup>   | 3,95  | 0,53                                        | 2,8                                        |
|               | P3                                                                                          | 9,70                        | —                      | —              | 1,30 × 10 <sup>-2</sup>   | —     | 0,85                                        | 2,7                                        |
| MUERTO 1      | P1                                                                                          | 7,10                        | —                      | —              | 2,20 × 10 <sup>-2</sup>   | —     | 0,70                                        | 2,6                                        |
|               | P2                                                                                          | 7,10                        | 0,70                   | 0,09           | 2,09 × 10 <sup>-2</sup>   | 12,0  | 0,73                                        | 2,3                                        |
|               | P3                                                                                          | 7,10                        | —                      | —              | 2,30 × 10 <sup>-2</sup>   | —     | 0,80                                        | 2,6                                        |
| MUERTO 2      | P1                                                                                          | 8,97                        | —                      | —              | n. d.                     | —     | —                                           | —                                          |
|               | P2                                                                                          | 8,97                        | 1,31                   | 0,12           | 4,90 × 10 <sup>-4</sup>   | 1,80  | n. d.                                       | 4,4                                        |
|               | P3                                                                                          | 8,97                        | —                      | —              | —                         | —     | —                                           | —                                          |

**TABLA 2.**

- A partir del momento en que, según el modelo, finaliza la consolidación primaria, el terraplén sigue asentando diferidamente.
- Ajustando los asentos diferidos durante la etapa de postconsolidación primaria a una ley logarítmica, con el tiempo se pueden distinguir dos fases netamente diferenciadas, una inicial con valores del coeficiente  $C_{\alpha}$  comprendido entre el 0,50 % y el 1 % y otra posterior (designada como consolidación terciaria) con un incremento sustancial del coeficiente de proporcionalidad  $C'_{\alpha}$ .
- Es interesante señalar que los mayores valores de  $C'_{\alpha}$  durante la consolidación terciaria se han obtenido en Salado 1, donde la arcilla está infraconsolidada, mientras que los más bajos corresponden a los emplazamientos Mogollón 2 y Muerto 1, donde el cimiento muestra las mayores razones de sobreconsolidación.
- Los datos disponibles no permiten extraer conclusiones sobre la duración de los asentos de consolidación terciaria. En ciertos casos aparecen algún tiempo después de la finalización de la consolidación primaria (en cuyo intervalo sólo se aprecian los asentos de consolidación secundaria predichos por el ensayo edométrico), mientras que en otros casos los asentos de consolidación terciaria se detectan inmediatamente tras la consolidación primaria. Por otro lado, las lecturas realizadas a lo largo de un

año después de la finalización de la consolidación primaria no muestran una tendencia a la variación en la ley logarítmica de asentos.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Consorcio Agro-mán-Drágados (contratista de las obras) y al Ministerio de Obras Públicas ecuatoriano por el apoyo prestado para llevar a cabo estas investigaciones que pertenecen parcialmente a un estudio encargado a las empresas Intecsa y Uriel & Asociados. De modo particular, el autor desea agradecer también al profesor don Angel Uriel sus valiosas sugerencias.

## 7. REFERENCIAS

- ALONSO, E.; GENS, A.; HIGHT, D. W. (1989). Special problem soils General Report. Proc IX ECSMFE. Dublín. Vol. 3, pp. 1087-1146.
- ASAKA, A. (1978). Observational procedure for settlement prediction, Soils and Foundations. Vol. 18, 4, pp. 87-101.
- BJERRUM, L. (1967). Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings. Géotechnique. Vol. 17, n.º 2, pp. 81-118.
- JIMENEZ SALAS, J. A. (1991). Precarga. Curso sobre mejora y refuerzo del terreno. CEDEX. Madrid.
- LADD, Ch.; FOOTT, R. (1974). New design procedure for stability of soft clays. Proc. ASCE. Vol. 100, n.º GT 7.
- LEONARDS, G. A.; ALTSCHAEFFL, A. G. (1974). Compressibility of clay. Jour. Soil Mech. Found. Div. ASCE. Vol. 90, n.º SM 5, pp. 133-156.

**15-19 JUNIO**

**MADRID**



## **SALON INTERNACIONAL DE LA SEGURIDAD VIAL**

### **SECTORES**

- Control y Vigilancia del Tráfico
- Ordenación y Regulación del Tráfico
- Señalización y Balizamiento
- Iluminación de Viales
- Barreras de Seguridad
- Aparcamientos
- Seguridad y Mantenimiento de Carreteras
- Seguridad de Peatones y Ciclistas
- Equipamiento para Automóviles
- Servicios de Emergencia
- Vehículos Especiales

**SEMANA INTERNACIONAL DEL EQUIPAMIENTO PARA MUNICIPIOS**

**Tem'92**

Salón Internacional de Técnicas  
y Equipamientos Municipales



**SALON INTERNACIONAL DE LA SEGURIDAD VIAL**

**TRAFIC'92**  
SALON INTERNACIONAL DE LA SEGURIDAD VIAL

PARQUE FERIA JUAN CARLOS I. 28067 Madrid.  
Apdo. de Correos 67067 - 28080 Madrid.  
Tel: (91) 722 50 00. Fax: (91) 722 57 90. Telex: 44025 - 41674.



**IFEMA**  
Feria Internacional de Madrid

# "20 AÑOS HACIENDO EL BIEN

## En Cadagua llevamos ya 20 años depurando el agua

20 años al servicio del bienestar de miles de personas en toda España.

Diseñando, creando y desarrollando plantas de tratamiento y depuración de agua.

Explotando, manteniendo y gestionando cualquier sistema de abastecimiento o saneamiento de agua.

En Cadagua, ponemos a su servicio 20 años de experiencia, haciéndolo bien.



 **cadagua**  
*Tenemos la fórmula*

A TODAS LAS PERSONAS QUE CON SU COLABORACION HAN HECHO POSIBLE ESTOS 20 AÑOS DE SERVICIO AL HOMBRE Y LA NATURALEZA,  
MUCHAS GRACIAS