

Efectos de la sobreconsolidación en la velocidad de asentamiento secundario

E. ALONSO (*); A. LLORET (*); A. GENS (*); M. SALVADÓ (*)

RESUMEN Se ha estudiado el comportamiento de la consolidación secundaria de una arcilla reconstituida de baja plasticidad. Los análisis edométricos que se realizaron incluyen secuencias de carga, descarga y recarga. De este modo, se determina el efecto del OCR, del incremento de carga y de la magnitud de la recarga final aplicada. Se observa que, una vez el suelo está sobreconsolidado ($OCR \geq 1.5$), las deformaciones por consolidación secundaria dependen de la razón del incremento de la carga y de la carga final. Se ha elaborado un modelo de cálculo para las deformaciones por consolidación secundaria, que incorpora las pautas de comportamiento observadas en la experimentación. Las deformaciones secundarias son proporcionales a las deformaciones primarias asociadas a la razón de incremento de carga y a una función del tiempo controlada por la magnitud de la tensión de recarga. Las predicciones del modelo y las medidas reales concuerdan bien en un número significativo de ensayos que se caracterizan por tener secuencias de cambio de tensiones muy diferentes.

OVERCONSOLIDATION EFFECTS ON SECONDARY COMPRESSION RATES

ABSTRACT *The secondary compression behaviour of a reconstituted low plasticity clay has been investigated. Oedometer tests performed included loading, unloading and reloading sequences. In this way the effect of OCR, loading increment ratio and the intensity of the final reloading or creeping stress was determined. It was found that, once the soil is overconsolidated ($OCR \geq 1.5$), the secondary compression deformations depend on the loading increment ratio and the current creeping stress. A working model for secondary compression strains, which incorporates the experimental findings, was developed. Secondary deformations are proportional to the primary deformations associated with the loading increment ratio and to a function of time, which is controlled by the intensity of the reloading stress. Model predictions and actual measurements are in good agreement for a significant number of tests characterised by widely different stress sequences.*

Palabras clave: Sobreconsolidación; Velocidad; Asentamiento secundario.

1. INTRODUCCIÓN

La precarga es un procedimiento bien establecido para reducir el asentamiento de estructuras cimentadas sobre suelos arcillosos blandos. Los asientos primarios en general se controlan fácilmente si las tensiones de diseño de la cimentación no exceden las tensiones de precarga aplicadas. Sin embargo, los asientos secundarios son relevantes en las estructuras sensibles o cuando el suelo de cimentación experimenta un marcado asiento a largo plazo. La experiencia sobre el terreno y en laboratorio (Ladd 1971, Mesri 1973, Koutsoftas et al 1987, Yu y Frizzi 1994) ha mostrado que la sobreconsolidación del suelo tiene un notable efecto en la reducción de la magnitud de la compresión secundaria. En un estudio reciente relacionado con pruebas de precarga de larga duración convenientemente instrumentadas en depósitos deltaicos (Alonso et al 2000), se demostró que las velocidades de deformación que se determinaron sobre el terreno dependen de la razón de sobreconsolidación estimada "in situ". La figura 1 muestra esta dependencia. El perfil del te-

rrero estaba Normalmente Consolidado (NC) en los 10-15 m superiores y el OCR aumentaba gradualmente con la profundidad hasta alcanzar un valor máximo de 1,4 a 60 m de profundidad. La figura también muestra la relación aproximadamente lineal entre la velocidad de deformación y el tiempo cuando ambos están en una escala logarítmica. En esta figura también se han incluido las velocidades del asentamiento secundario que se han determinado en una serie de ensayos de consolidación, que se examinarán con más detalle en este artículo.

En el programa de ensayos realizado, las muestras reconstituidas de las arcillas deltaicas estaban sujetas a la trayectoria tensional que se muestra en la figura 2. Las trayectorias tensionales reproducen una situación que se encuentra fácilmente en la práctica. El suelo se carga primero y se descarga después (presiones σ'_c y σ'_u). Esta fase corresponde al tratamiento de precarga del suelo. Cuando se ha construido la estructura, se aplica una recarga final (σ'_r en la figura 2). Generalmente se pueden distinguir los tres niveles diferentes de presión (σ'_c , σ'_u , σ'_r) en un problema de precarga del terreno. En los ensayos que se describen en este artículo se miden los asentamientos secundarios manteniendo σ'_r constante durante un periodo largo de tiempo. Por otra parte, la trayectoria de tensiones hasta llegar a la aplicación de la recarga (estado inicial $\rightarrow \sigma'_c \rightarrow \sigma'_u \rightarrow \sigma'_r$) se realizó bastante deprisa, asegurando, sin embargo, la disi-

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

pación del exceso de presiones intersticiales en cada escalón de cambio de tensión.

Las velocidades de deformación que se midieron en los ensayos de laboratorio se muestran en la figura 1 para dife-

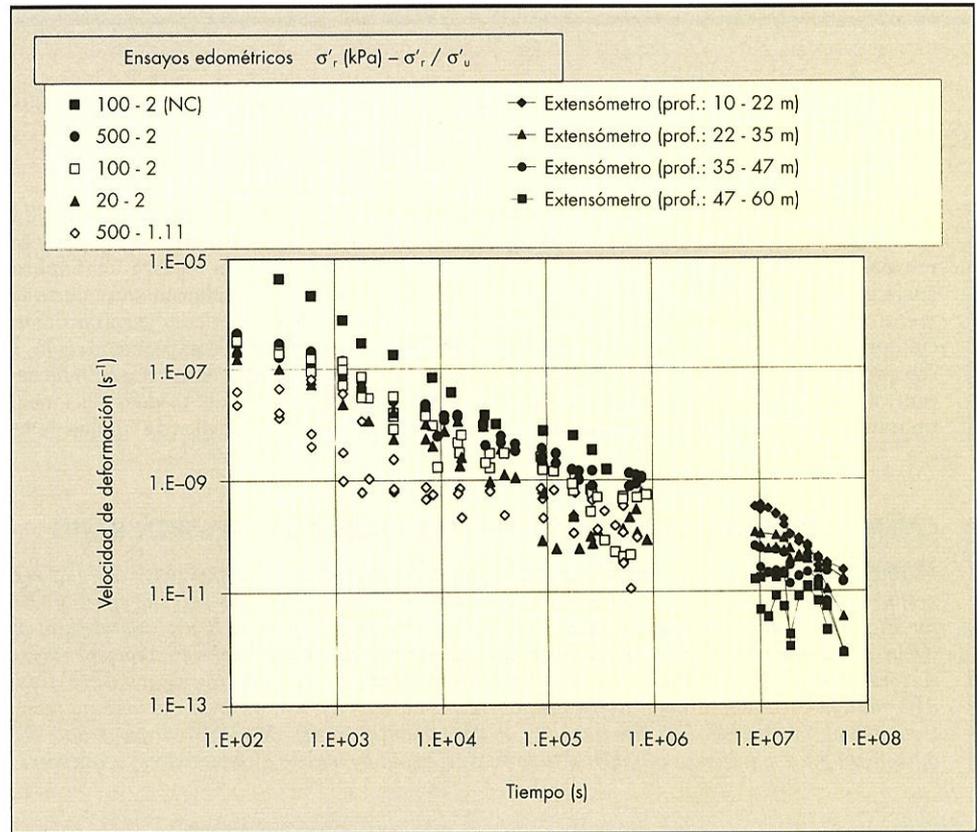


FIGURA 1. Valores de compresión secundaria medidos "in situ" y en laboratorio.

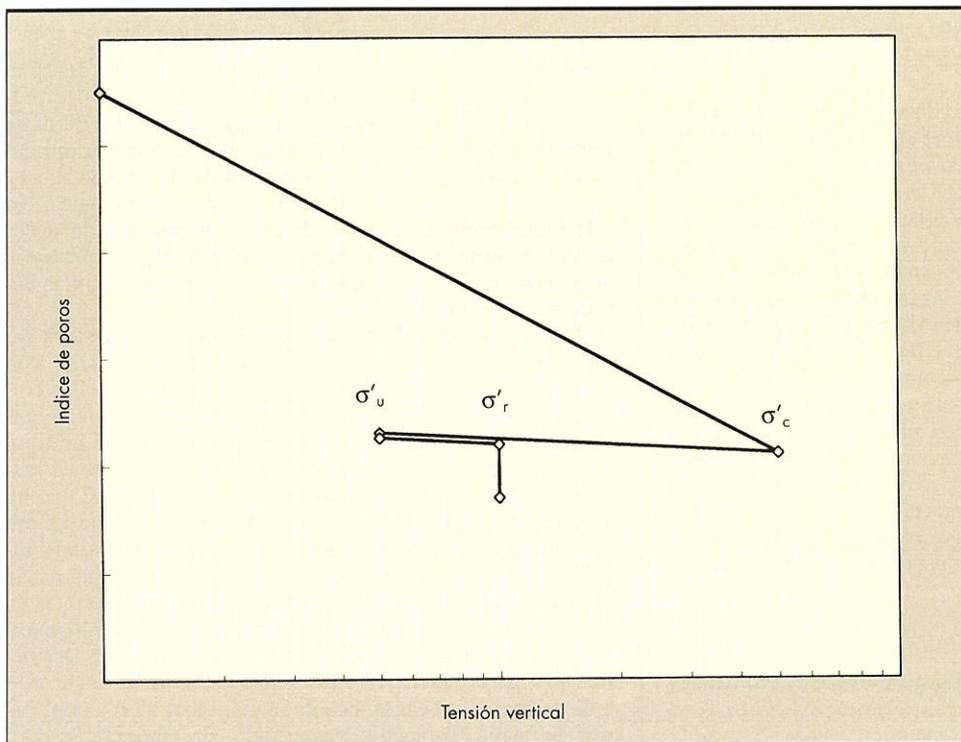


FIGURA 2. Definición de la secuencia tensional aplicada a las muestras.

rentes valores de la tensión final σ'_r y la relación tensional σ'_r/σ'_u . Estos datos parecen coincidir con las medidas sobre el terreno si se tienen en cuenta las escalas temporales de cada grupo de observaciones. Este resultado es esperanzador pues hace más fiable la investigación que se lleva a cabo en el laboratorio. El objetivo de esta investigación es encontrar modelos para la consolidación secundaria donde se considere la historia tensional de descarga-recarga.

2. ENSAYOS DE LABORATORIO

El suelo utilizado es una arcilla deltaica de baja plasticidad (CL, ML: $w_L = 40,1\%$; $w_p = 24,9\%$; $\% < 2\mu m : 13\%$) del delta del Llobregat en Barcelona. Las muestras se tomaron inicialmente en el lugar en que se construirá la nueva planta de tratamiento de agua residual de la ciudad. Puede encontrarse información adicional sobre las características "in situ" de la arcilla en Alonso et al (2000). Las muestras se reconstituyeron con un índice de poros común ($e = 0,85$) bajo una presión efectiva baja ($\sigma'_v = 10$ kPa). El programa experimental, en términos de las tensiones σ'_c , σ'_u , σ'_r aplicadas, se sintetiza en la Tabla 1. En la misma Tabla se incluyen además dos relaciones tensionales (σ'_c/σ'_u y σ'_r/σ'_r). La relación (σ'_c/σ'_r) puede identificarse como el OCR durante la fase de recarga de larga duración (a σ'_r constante). La relación (σ'_r/σ'_u) es una medida de intensidad de la carga en el paso previo a la aplicación de la recarga de larga duración. Las trayectorias de carga/descarga cubren una gran variedad de índice de poros, como se indica en la figura 3.

El valor de (σ'_r/σ'_r), u OCR, para todos los ensayos realizados, excepto en uno, es igual o mayor que 1,5. Sólo en un caso se analizó una muestra normalmente consolidada ($\sigma'_c = 50$ kPa; $\sigma'_u = 50$ kPa; $\sigma'_r = 100$ kPa). Por tanto, la presente investigación se refiere esencialmente a muestras que han sufrido una sobreconsolidación moderada o significativa ($OCR \geq 1,5$).

σ'_c (kPa)	σ'_u (kPa)	σ'_r (kPa)	σ'_r / σ'_u	σ'_c / σ'_r
50	50	100	2	0.5
30	10	20	2	1.5
40				2
100				5
150	50	100	2	1.5
200				2
500				5
1.500	250	500	2	15
750				1.5
1.000				2
1.500	450	500	1.11	3
750				1.5
1.000				2
2.500				5

TABLA 1. Programa experimental.

La evolución de la deformación en el tiempo bajo la tensión σ'_r de todas las muestras analizadas se muestra en la figura 4. Cada ensayo se identifica con los valores de las tensiones más relevantes del mismo (σ'_c , σ'_u , σ'_r). Las deformaciones que se muestran en la figura 4 corresponden al comportamiento secundario del suelo. En la figura 5, para facilitar la comparación entre los diferentes casos se sustrae a la deformación medida una deformación inicial, que

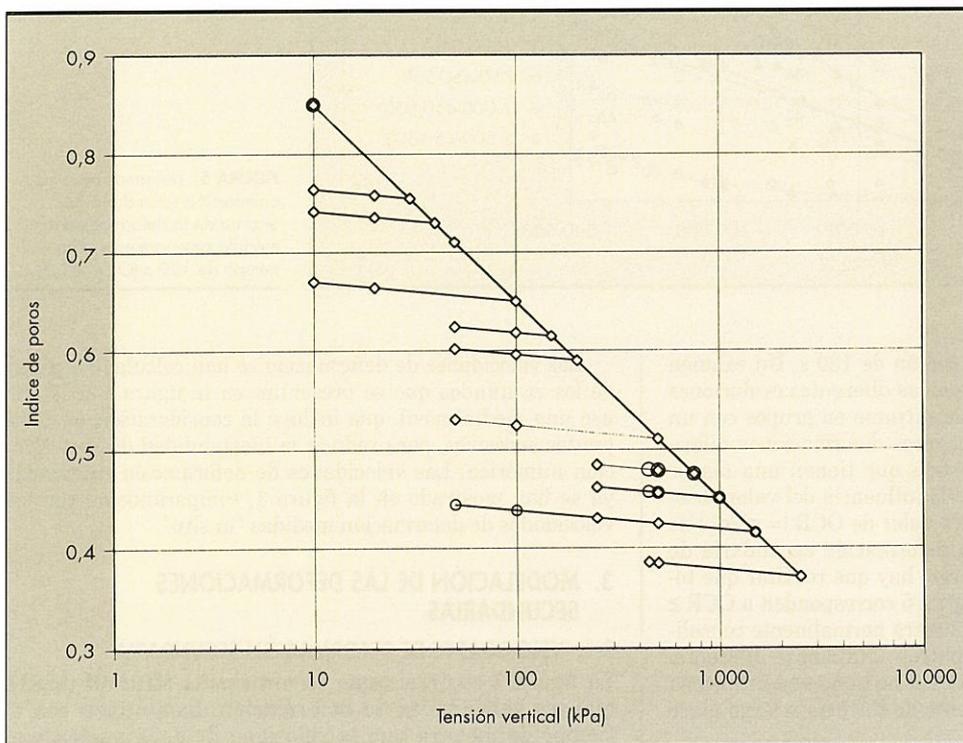


FIGURA 3. Trayectorias de compresión en el plano (e, σ'_v) de los ensayos realizados.

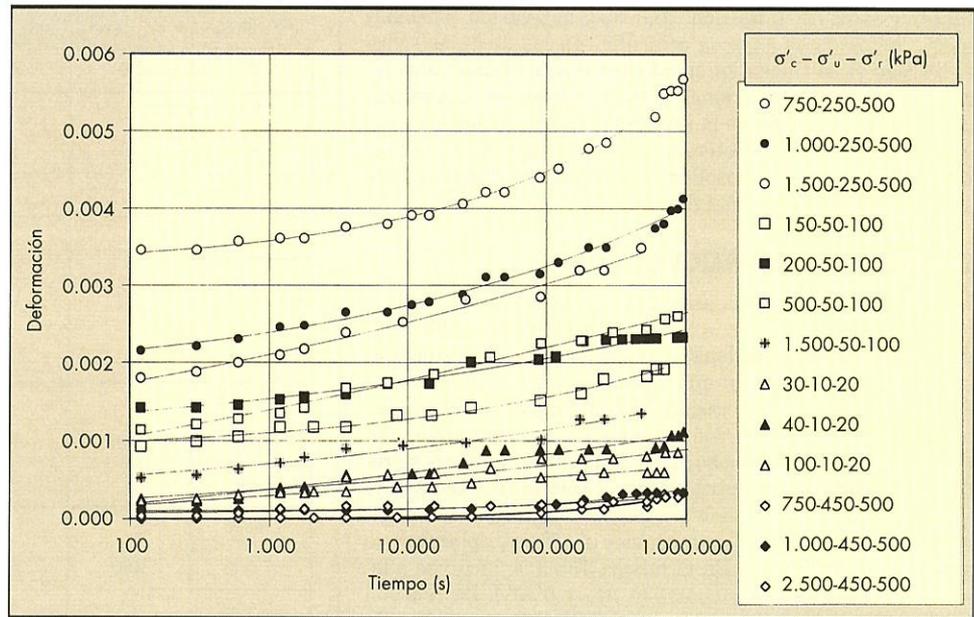


FIGURA 4. Deformaciones de compresión secundaria de todas las muestras ensayadas ($OCR \geq 1,5$).

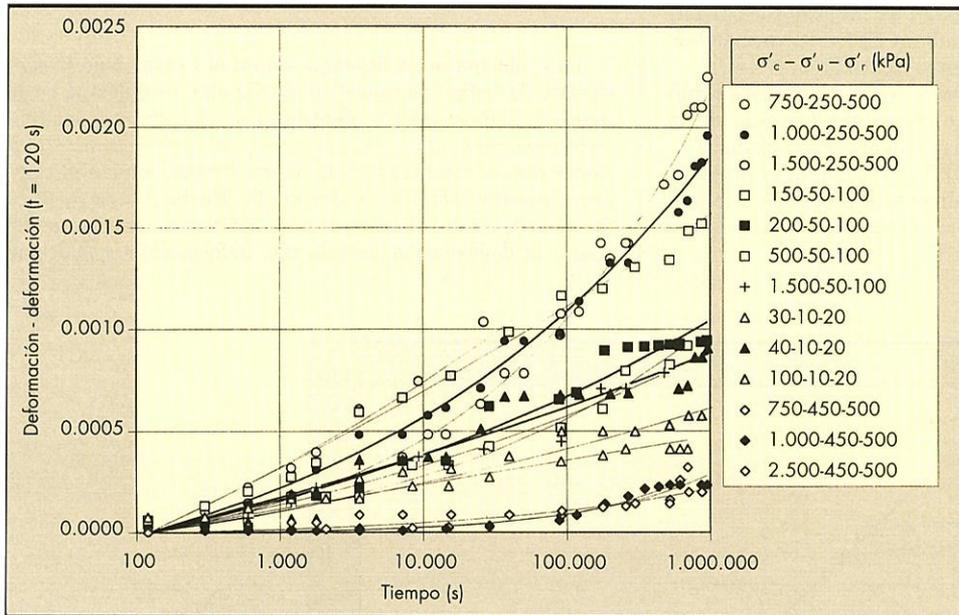


FIGURA 5. Deformaciones de compresión secundaria por encima de la deformación medida anteriormente a un tiempo de 120 s ($OCR \geq 1,5$).

corresponde a la de un tiempo común de 120 s. Un examen detallado de la figura 5 revela que las diferentes evoluciones de la deformación tienden a concentrarse en grupos con un mismo comportamiento. Las mayores deformaciones diferidas se desarrollan en las muestras que tienen una mayor proporción σ'_c/σ'_v , a pesar de que la influencia del valor absoluto de σ'_r también es notable. El valor de $OCR (= \sigma'_c/\sigma'_r)$ no parece controlar el valor de la deformación secundaria de manera significativa. Sin embargo, hay que resaltar que todos los casos ilustrados en la figura 5 corresponden a $OCR \geq 1,5$. De hecho, si se incluye la muestra normalmente consolidada (figura 6) se obtiene un patrón totalmente diferente. Lo que la figura 5 indica es que OCR no tiene una influencia definitiva sobre el comportamiento de fluencia a largo plazo cuando $OCR \geq 1,5$.

Las velocidades de deformación se han calculado a partir de los resultados que se presentan en la figura 4 (ó 5). Se usó una media móvil, que incluye la consideración de cinco puntos sucesivos, para reducir la inestabilidad de la derivación numérica. Las velocidades de deformación calculadas ya se han mostrado en la figura 1, comparándolas con las velocidades de deformación medidas "in situ".

3. MODELACIÓN DE LAS DEFORMACIONES SECUNDARIAS

3.1. VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN SECUNDARIA

La figura 1 sugiere, como ya anticipaba Mitchell (1981), que las velocidades de deformación disminuyen con el tiempo de manera que la velocidad de deformación y el

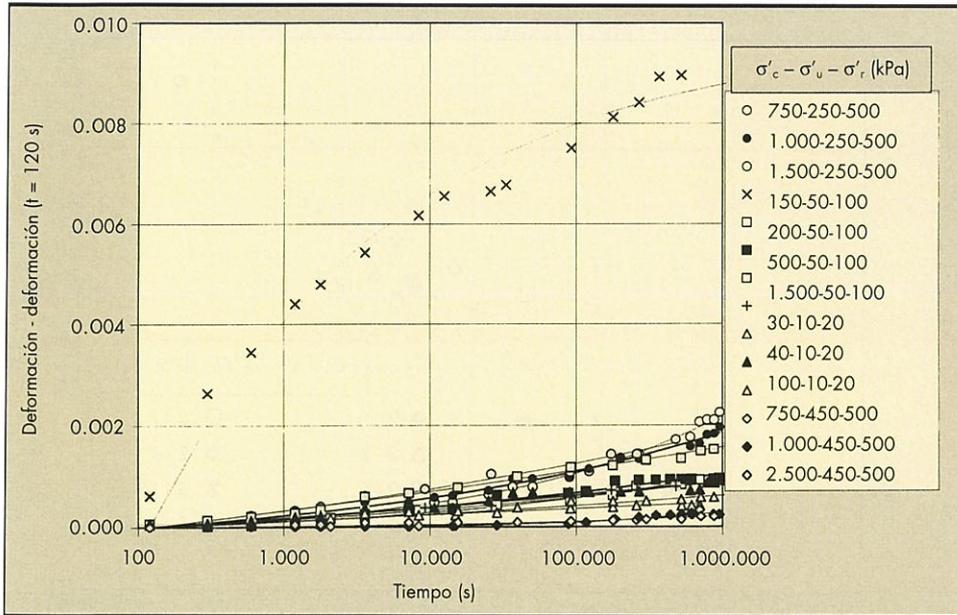


FIGURA 6. Velocidad de consolidación secundaria para todas las muestras ensayadas.

tiempo, ambos en escala logarítmica, están relacionados linealmente:

$$\log \dot{\epsilon} = \log \dot{\epsilon}_i - m \log t / t \quad (1)$$

donde $\dot{\epsilon}_i$ es una velocidad de deformación de referencia para $t = t_i$ y m es la pendiente de la relación (siendo m un número positivo). La integración de la ecuación (1) entre una deformación inicial (ϵ_i para $t = t_i$) y una genérica (ϵ , para un tiempo t) conduce al siguiente modelo de deformación secundaria:

$$\epsilon = \epsilon_i + \frac{\dot{\epsilon}_i t_i}{1-m} \left[(t/t_i)^{1-m} - 1 \right] \quad (2)$$

una ecuación que es ligeramente diferente de la expresión que propone Mitchell. Si $m = 1$, la integración de la ecuación (1) conduce a:

$$\epsilon = \epsilon_i + \dot{\epsilon}_i t_i \ln t / t_i \quad (3)$$

que es la clásica expresión para las deformaciones de compresión secundarias. La ecuación (3) es el valor límite de la ecuación (2) cuando $m \rightarrow 1$. De ahora en adelante se utilizará sólo la expresión general (2).

En la ecuación (1), $\dot{\epsilon}_i$ puede interpretarse como un parámetro del modelo. Si $\log \dot{\epsilon}_i = A$, la ecuación (1) tendrá dos parámetros: A y m . A describe la velocidad inicial de deformación secundaria, mientras que m indica la evolución de la velocidad de deformación con el tiempo.

La evolución medida de la deformación (figura 4, 5 y 6) indica que A y m distan mucho de ser constantes para un suelo determinado, ya que dependen de σ'_c , σ'_u y σ'_r . La expresión (2) se ajustó con los resultados medidos, de manera que se buscaron los pares (A , m) para todos los análisis realizados. Se observó que A y m , estaban correlacionados (figura 7): una velocidad inicial de deformación secundaria rápida implica un valor mayor de m . Este es un resultado conveniente, en el sentido que reduce "de facto" los parámetros materiales de la ecuación (2). Sin embargo, debe investigarse la relación entre m (o A) y la historia de tensiones.

3.2. INFLUENCIA DE LA HISTORIA DE TENSIONES EN LAS VELOCIDADES DE ASENTAMIENTO SECUNDARIO

Se va a considerar primero el efecto de la relación del incremento tensional σ'_r/σ'_u . En la figura 8 se representan los resultados para un σ'_r ($\sigma'_r = 500$ kPa) común y dos valores diferentes de σ'_r/σ'_u (2 y 1.1). El efecto del tamaño del aumento de carga se muestra claramente en esta figura, que sugiere la siguiente normalización de la ecuación (2):

$$\Delta \epsilon = \epsilon - \epsilon_i = \log \left(\frac{\sigma'_r}{\sigma'_u} \right) \frac{e^A t_i}{1-m} \left[(t/t_i)^{(1-m)} - 1 \right] \quad (4)$$

El término $\log (\sigma'_r/\sigma'_u)$ está relacionado con los asientos primarios ϵ_p cuando se aplica un incremento de carga ($\log \sigma'_r/\sigma'_u = \epsilon_p (1 + e) / C_s$), donde e es el índice de poros y C_s el índice de compresión (en un caso normalmente consolidado C_s debería substituirse por C_c). Por tanto, el modelo para deformaciones secundarias se convierte en:

$$\Delta \epsilon = \frac{\epsilon_p (1 + e)}{C_s} \frac{e^A t_i}{1-m} \left[(t/t_i)^{(1-m)} - 1 \right] \quad (5)$$

Este tipo de ecuación subraya que la deformación secundaria depende del valor de la deformación primaria.

Si se aplica la ecuación (4) o (5) a los datos que se muestran en la figura 8, la variabilidad se reduce ampliamente como se ilustra en la figura 9. El efecto del valor absoluto de σ'_r , se indica en la figura 5 donde se reúnen las evoluciones de la deformación para una razón de incremento de presiones común $\sigma'_r/\sigma'_u = 2$ y diferentes valores de σ'_r . Se identifican tres series de historias de deformación diferentes que corresponden, en orden descendente de acumulación de deformación, a $\sigma'_r = 20, 100$ y 500 kPa. Es posible encontrar algunas discrepancias pero la tendencia está claramente marcada. La gráfica sugiere que el parámetro m debería referirse al valor absoluto de la tensión aplicada σ'_r . La correlación observada entre m y σ'_r para diferentes valores de σ'_r/σ'_u , está ilustrada en la figura 10. La siguiente ecuación es la obtenida mediante un ajuste por mínimos cuadrados:

$$m = 1.31 - 0.094 \ln \sigma'_r \quad (6)$$

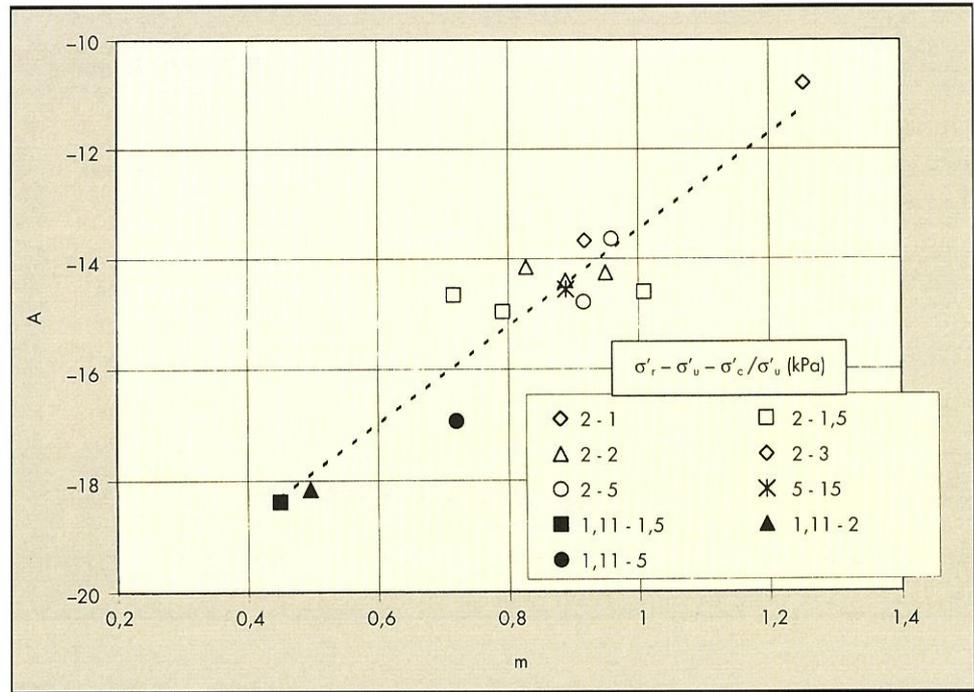


FIGURA 7. Correlación observada entre los parámetros A y m.

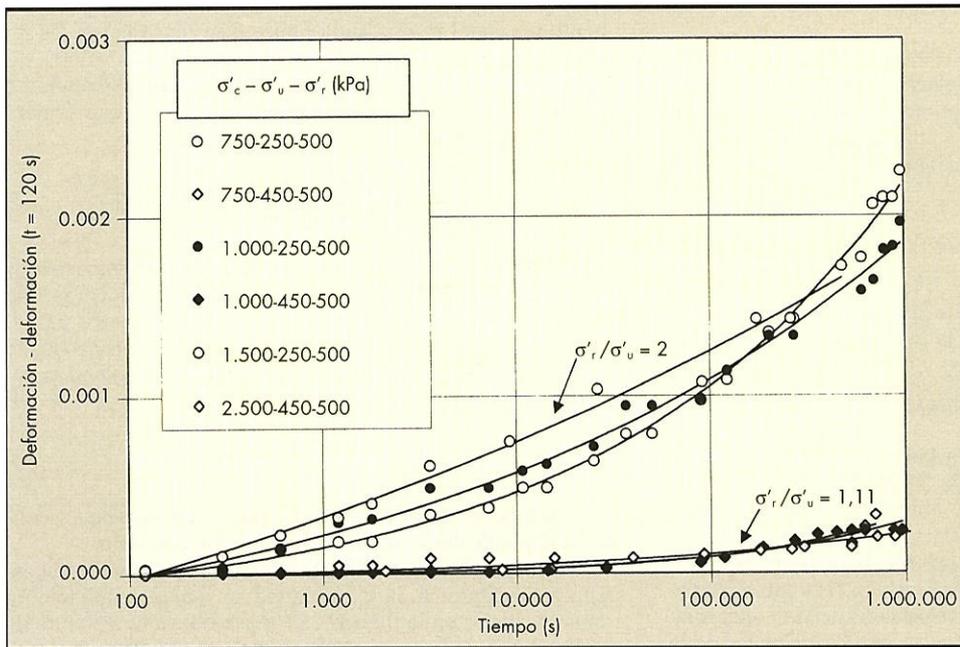


FIGURA 8. Influencia de la relación de tensiones en las deformaciones de compresión secundaria.

Esta relación empírica, junto con la ecuación (3), completa esencialmente el modelo para la consolidación secundaria de la arcilla deltaica de Barcelona. Es de esperar que las diferentes arcillas muestren una relación diferente entre el parámetro m y la recarga aplicada (ecuación (6)) y una correlación diferente entre m y A (figura 7). Sin embargo, es posible que la estructura de las ecuaciones (4) y (5) se mantenga. La estructura de la ecuación (5) se aprecia mejor si se escribe de la siguiente manera:

$$\Delta \varepsilon(t) = f_1(\varepsilon_p) f_2(A) f_3(t) \quad (7)$$

En esta ecuación, $f_1(\varepsilon_p) = \varepsilon_p (1 + e) / C_s = \log(\sigma'_r / \sigma'_v)$ introduce el efecto de la relación de incremento tensional. La función $f_2(A) = e^A = \dot{\varepsilon}_i$ muestra el efecto de la velocidad de deformación inicial y, finalmente, la función $f_3(t) = t_i / [1 - m \ln(t/t_i)^{1-m} - 1]$ describe la evolución en el tiempo de la deformación secundaria. El efecto de la intensidad de la tensión aplicada (σ'_r) se encuentra en m , a través de su correlación con σ'_r y también en la función $f_2(\varepsilon_i)$ dado que A y m parecen estar muy correlacionadas. Para los ensayos realizados, en los que $OCR \geq 1,5$, se encontró un ajuste mejor para la función $f_2(A)$ con una ligera modificación:

$$f_2(A) = ae^{A(m)} = 3.3e^{(16.1-1.96m)} \quad (8)$$

En la figura 11 se comparan las historias de deformación medidas y las de los modelos, basados en las ecuaciones (7) y (8), para los cuatro casos considerados, en términos de la relación del incremento tensional ($\sigma'_r/\sigma'_u = 1,11$ y 2) y la presión final aplicada ($\sigma'_r = 20, 100$ y 500 kPa). Todos los casos que se consideran en la figura 11 corresponden a $OCR \geq 1,5$. La concordancia, que es satisfactoria, demuestra la capacidad del modelo propuesto para predecir la deformación por compresión secundaria.

4. CONCLUSIONES

Las técnicas de precarga destinadas a mejorar las características de deformabilidad de los suelos blandos a menudo desembocan en un estado de carga a lo largo de la línea de compresión NC, una descarga parcial y finalmente una recarga bajo las cargas de diseño de la cimentación. Esta secuencia se ha simulado en un programa experimental. El propósito de esta investigación consistía en derivar los modelos para el cálculo de las deformaciones por consolidación secundaria. Se ha argumentado que las deformaciones por compresión secundaria a menudo se convierten en un tema

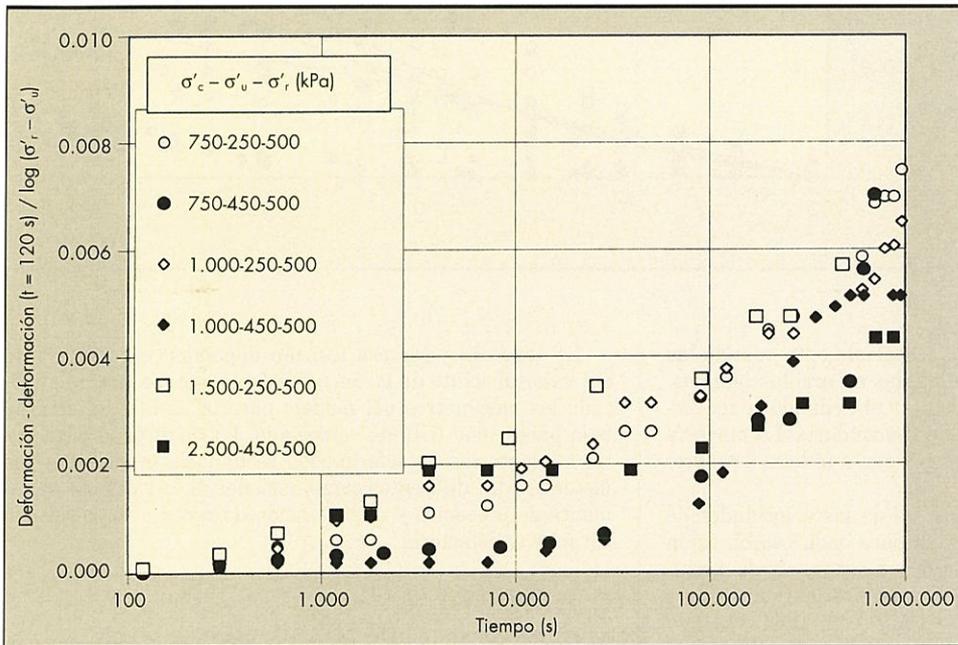


FIGURA 9. Valores normalizados de la compresión secundaria.

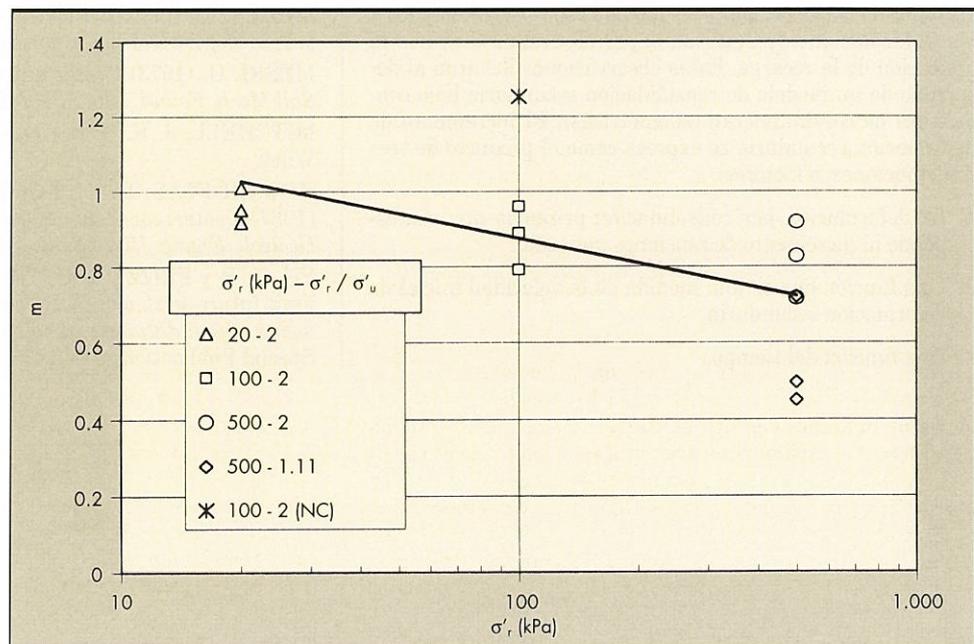


FIGURA 10. Correlación observada entre el parámetro del modelo m y la presión aplicada.

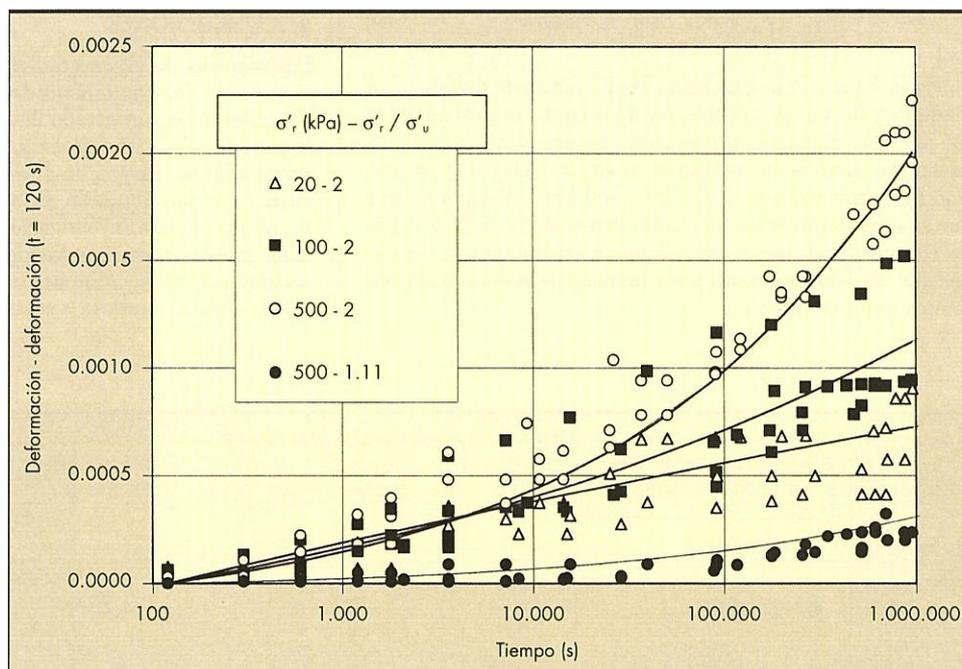


FIGURA 11. Comparación entre los resultados del modelo y las deformaciones de consolidación secundaria medidas en los ensayos.

crítico en el diseño de precargas, especialmente cuando las estructuras sensibles están cimentadas en arcillas blandas. El modelo desarrollado puede resultar útil cuando se requieren modelos precisos de compresión secundaria. La mayoría de los resultados aportados corresponden a índices de sobreconsolidación mayores a 1,5.

Se ha observado que el logaritmo de las velocidades de consolidación secundaria, medidas para cada combinación de presiones de precarga, descarga y recarga, puede expresarse como una función lineal del logaritmo del tiempo. Este resultado ha sido ya analizado en Mitchell, 1981. Sin embargo, los parámetros materiales de esta ley distan mucho de ser constantes y se ha demostrado que varían, de manera significativa, con el valor de la carga final aplicada. Además las deformaciones secundarias medidas son proporcionales a las deformaciones primarias experimentadas durante la aplicación de la recarga. Estas observaciones llevaron al desarrollo de un modelo de consolidación secundaria bajo condiciones de confinamiento (edométricas). El incremento de deformación secundaria se expresa como el producto de tres contribuciones, o factores:

1. La deformación por consolidación primaria que corresponde al incremento de tensiones aplicado.
2. Una función que es una medida de la velocidad inicial de deformación secundaria.
3. Una función del tiempo.

La segunda y tercera función dependen esencialmente del valor absoluto de la tensión de recarga. Se han identificado los parámetros del modelo para la arcilla deltaica de baja plasticidad (CL-ML) ensayada. La correspondencia entre las historias de deformación secundaria predichas y las medidas para diferentes combinaciones de la razón de incremento de presiones y de la tensión de recarga ha resultado ser muy satisfactoria.

5. REFERENCIAS

- ALONSO, E. E.; GENS, A. y LLORET, A. (2000) Precompression design for secondary settlement reduction. *Geotechnique* 50(6): 645-656.
- LADD, C. C. (1971) *Settlement analysis of cohesive soils*. Research Report R71-2. Cambridge, MA: MIT.
- MESRI, G. (1973) Coefficient of secondary compression. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*. 99(1): 123-137.
- MITCHELL, J. K. (1981) *Fundamentals of soil behaviour*. Wiley.
- KOUTSOFTAS, D. C.; FOOTT, R. y HANDFELT, L. D. (1987) Geotechnical investigations offshore Hong Kong. *J. Geotech. Engng. Div. ASCE*. 113(2): 87-105.
- YU, K. P. y FRIZZI, R. P. (1994) Preloading organic soils to limit future settlements. In *Vertical and horizontal displacements of foundations and embankments*. ASCE Geotechnical Special Publication. 40(1): 476-490.