

LA CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA DE LAS ARCILLAS

Fernando MUZÁS LABAD, Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Profesor de Mecánica del Suelo ETSAM

RESUMEN: Se analiza el fenómeno de la consolidación secundaria de las arcillas y la forma de tenerla en cuenta en problemas reales. Se compara el fenómeno con el que se produce en un modelo visco-elástico sencillo, observando cómo la elasticidad diferida sólo se pone de manifiesto cuando la carga se aplica de manera suficientemente rápida y queda enmascarada cuando se hace de manera lenta. Se trasladan los resultados al modelo de Terzaghi-Frölich y se aplican a un ensayo real de laboratorio, ajustando las leyes de la consolidación primaria y de la consolidación secundaria, viendo cómo ésta se aprecia en el ensayo por ser el material bastante permeable y cómo sus deformaciones quedan incorporadas en la consolidación primaria, cuando el espesor de la capa es varias veces superior al de la pastilla utilizada en el edómetro.

PALABRAS CLAVE: CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA, ARCILLAS

SUMMARY: The phenomenon of the secondary consolidation of clays is analyzed and also how it must be considered in real problems. The phenomenon is compared with the results of using a simple visco-elastic model, in which the strains due to differed elasticity only are observed when the stresses are rapidly applied and they are masked when the charge is done at slow rate. The results are transposed to the Terzaghi-Frölich model and are applied to a real laboratory test, adapting two laws for the primary and secondary consolidation and showing how the last process only is noted in the test because the high permeability characteristic of the material and how the visco-elastic strains are incorporated to the primary consolidation when the depth of the layer is several times higher than that of the sample used in the odometer test.

KEYWORDS: SECONDARY CONSOLIDATION, CLAYS

1. INTRODUCCIÓN

El tema de la consolidación secundaria de las arcillas plantea todavía ciertas incógnitas en su aplicación a problemas concretos.

Según se indica en la obra Geotecnia y Cimientos I (J.A.Jiménez Salas, 1971) existen algunos hechos experimentales referentes a la consolidación secundaria que merecen destacarse:

1. La consolidación secundaria es muy importante para razones del incremento de presión pequeñas (Newland y Alley, 1960; Leonards y Girault, 1961; Barden, 1968).
2. La consolidación secundaria es más importante en muestras de pequeño espesor (Barden, 1968).
3. La consolidación secundaria aumenta al aumentar el coeficiente de permeabilidad de suelo (Jiménez Salas y Serratos, 1953).
4. La consolidación secundaria, debido en parte a la propiedad 3, es muy importante en suelos con materia orgánica y especialmente en la turba.

Se ha tratado de estudiar el tema partiendo de un modelo reológico más complejo que el propuesto en la teoría de Terzaghi-Fröhlich, con objeto de tener en cuenta la deformación diferida del material, debiendo destacar el desarrollo matemático presentado por Barden (1968).

En el presente artículo se recogen algunas consideraciones al respecto, saliendo al paso de ciertas prácticas de aplicación de la consolidación a casos reales, exponiendo algunas ideas originales que pueden resultar de utilidad.

2. UN EJEMPLO REAL

A continuación se recogen los principales resultados de un ensayo edométrico real, en el que sometiendo una muestra de 2 cm de espesor a $2,0 \text{ kg/cm}^2$ se obtuvo un asiento igual a 0,77 mm al cabo de 7 días, de los cuales 0,59 mm podían considerarse debidos a la consolidación primaria por expulsión de agua. De esta última, aproximadamente el 90% se produjo en un tiempo del orden de 10 minutos y el resto en el plazo de 1 hora.

La curva de consolidación, que aparece en la Fig.1 en función del $\log(t)$ y $\%i$, presenta un tramo recto de consolidación secundaria que responde aproximadamente a la ley:

$$s \text{ (mm)} = 0,1355 \cdot \log(6 \cdot t)$$

expresando el tiempo "t" en días.

Partiendo de estos datos se puede establecer que cada uno de los dos tipos de asiento equivale a las siguientes deformaciones unitarias:

1. Consolidación primaria:
2,95% de la altura de la muestra.
2. Consolidación secundaria:
0,90% de la altura de la muestra, al cabo de 7 días.
3. Consolidación total:
3,85% de la altura, al cabo de 7 días.

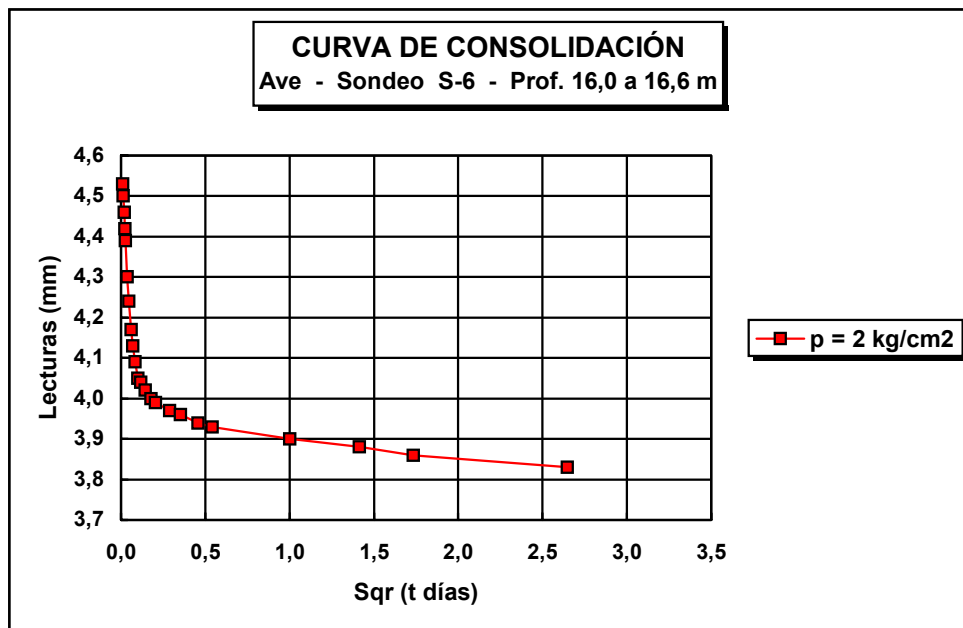
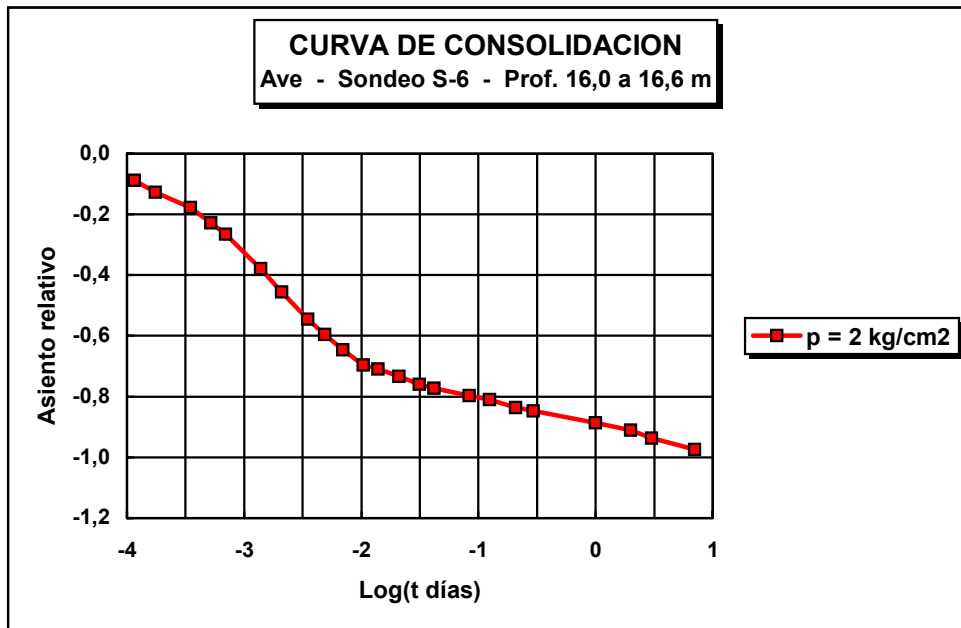


Fig. 1 Ejemplo de una curva de consolidación

Si, como es relativamente frecuente, se utiliza la expresión anterior para determinar el asiento por consolidación secundaria al cabo de un plazo de tiempo igual a 10 años, el asiento debido a ella alcanza un valor de 0,59 mm, lo que representa una deformación del 2,94% de la altura, similar al de la consolidación primaria y bastante mayor que el observado en el edómetro, resultando una deformación total superior a 1,5 veces al valor medido en el edómetro al cabo de 7 días de ensayo.

En nuestra opinión esta manera de proceder es muy pesimista y totalmente alejada de la realidad pues las cosas ocurren de otra manera debido a la naturaleza de las deformaciones visco-elásticas que pueden presentar los materiales. Ya en el libro de Jiménez Salas, citado al comienzo de este artículo, se indica que ***"el hecho de que la consolidación secundaria sea tanto más importante cuanto menor es el espesor de la muestra hará que en muchos casos sea despreciable en el campo, por lo cual podremos prescindir de ella"***.

3. LA ELASTICIDAD DIFERIDA

Con objeto de facilitar el estudio de la consolidación de las arcillas, parece oportuno razonar en primer lugar con un modelo matemático mucho más sencillo que el que se deduce de la teoría de Terzaghi-Frölich.

Para el estudio reológico de materiales dotados de elasticidad diferida existen diversos modelos entre los cuales el más elemental corresponde al de Burgers, en el que, según se refleja en la Fig.2, se disponen en serie los tres elementos siguientes:

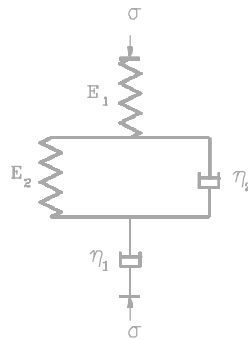


Fig. 2 Modelo Viscoelástico de BURGERS

1. Resorte con módulo de elasticidad o de rigidez E_0 , que obedece a la ley $\sigma = E_1 \cdot \varepsilon$, siendo σ una tensión genérica y ε la deformación asociada con ella.
2. Amortiguador de viscosidad η_1 , que obedece a la ley $\sigma = \eta_1 \cdot \varepsilon'$, siendo ε' la velocidad de deformación asociada con la tensión σ .
3. Modelo de Kelvin-Voigt constituido por dos elementos similares a los anteriores dispuestos en paralelo, de características E_2 y η_2 , que obedece a la ley $\sigma = E_2 \cdot \varepsilon + \eta_2 \cdot \varepsilon'$.

Para una tensión constante $\sigma = \sigma_0$, la deformación a lo largo del tiempo viene dada por la expresión:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t \quad (1)$$

En la expresión anterior cada uno de los sumandos corresponde a los siguientes tipos de deformación:

1. Deformación elástica instantánea permanente, σ_0 / E_1 .

2. Deformación elástica diferida, con un límite cuando el tiempo "t" tiende a infinito, igual a σ_0 / E_2 .
3. Deformación viscosa linealmente creciente con el tiempo.

Parece claro que tanto en el laboratorio como en el terreno los asientos por consolidación secundaria deben tener un límite, por lo que en el modelo de Burgers no cabe considerar el amortiguador aislado, dispuesto en serie con el resto de los componentes del modelo. Queda pues como único modelo posible para representar el comportamiento de la arcilla, una combinación de resortes y elementos de Kelvin-Voigt, todo lo compleja que se quiera, como es en realidad el que se deduce de la teoría de Terzaghi-Frölich.

Parece probable que si al cargar el material no tuviera que expulsar agua de los poros, el comportamiento correspondería a una elasticidad instantánea más una elasticidad diferida, comportamiento que podría estudiarse en ensayos edométricos, utilizando muestras de material lejos de la saturación.

El hecho de la expulsión de agua equivale a una aplicación paulatina de la presión efectiva, cosa que indudablemente ha de repercutir en el proceso de las deformaciones viscoelásticas diferidas.

Volviendo al modelo elemental de Burgers con elasticidad instantánea y diferida, veamos que ocurre si la carga elemental no se aplica instantáneamente sino siguiendo una ley también de tipo exponencial dada por la expresión:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - e^{-a \cdot \tau}) \quad (2)$$

De acuerdo con esta ley, en el instante " τ ", se aplica una tensión de valor:

$$d\sigma = a \cdot \sigma_0 \cdot e^{-a\tau} \cdot d\tau \quad (3)$$

En el instante t, posterior a la aplicación de este elemento diferencial de tensión, la deformación diferida producida por él será la correspondiente al tiempo transcurrido (t-τ) y vendrá dada por la expresión:

$$d\varepsilon_d = \frac{d\sigma}{E_2} \cdot (1 - e^{-b(t-\tau)}) = \frac{a \cdot \sigma_0}{E_2} \cdot e^{-a\tau} \cdot (1 - e^{-b(t-\tau)}) d\tau \quad (4)$$

En esta expresión el parámetro "b" sustituye a la relación " E₂ / η₂ ".

La deformación total experimentada en el instante "t" se obtiene mediante integración de (4) haciendo variar la variable "τ" entre 0 y t, obteniendo el resultado siguiente:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \frac{\sigma_0}{E_1} (1 - e^{-at}) + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-at}) - \frac{\sigma_0}{E_2} \frac{a}{a-b} (e^{-bt} - e^{-at}) \quad (5)$$

En este resultado los dos primeros sumandos equivalen a que tanto la deformación primaria como la secundaria se producen de manera similar al proceso de aplicación de la carga, existiendo un tercer término corrector cuya importancia depende de los valores relativos entre los coeficientes exponenciales "a" y "b". Conviene señalar que un valor alto del coeficiente "a" respecto a "b" equivale a que las deformaciones primarias se producen con mayor rapidez que las deformaciones secundarias viscoelásticas.

En la Fig.3 se han representado dos ejemplos de este modelo elemental, en la hipótesis de que el asiento primario represente el 85% del total y dando valores negativos a los asientos por comodidad de la representación. En el primer caso se han adoptado los valores a = 10 y b = 0,1 pudiendo observar cómo los asientos secundarios aparecen después de los primarios. En el segundo caso se ha adoptado el valor a = 1, lo que

supone que la carga se aplica de manera más lenta, manteniendo $b = 0,1$. Puede verse cómo los asientos secundarios tienen continuidad con los primarios quedando enmascarados dentro de ellos.

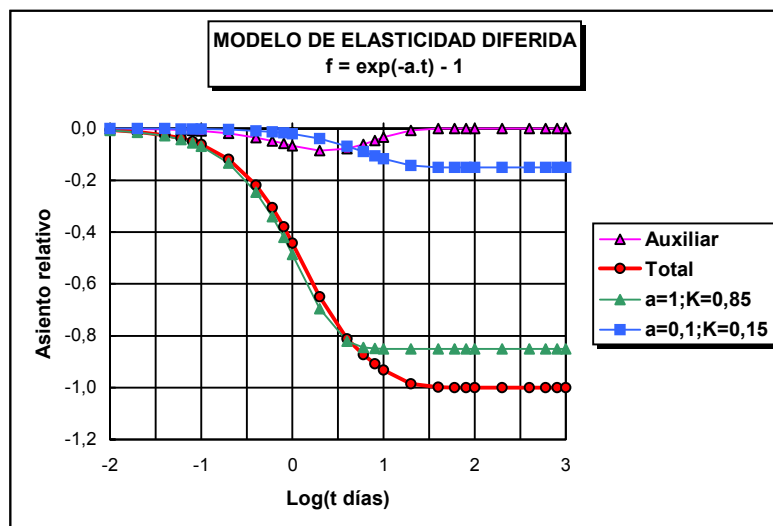
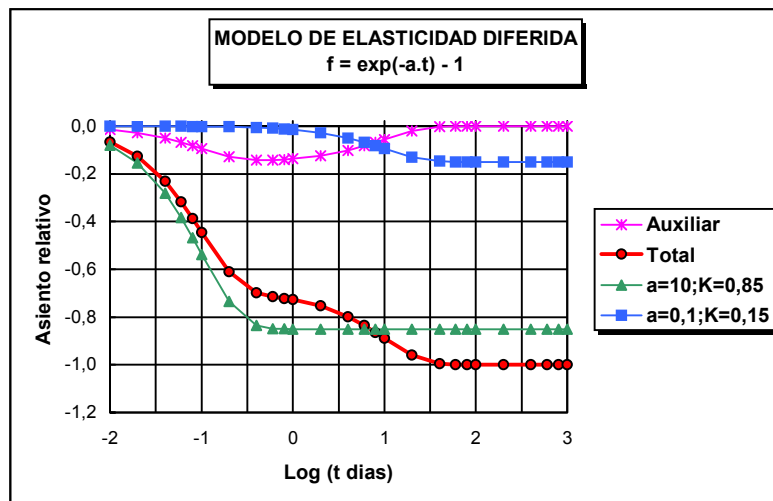


Fig. 3 Ejemplos con un modelo viscoelástico elemental

4. APLICACIÓN A LA TEORÍA DE LA CONSOLIDACIÓN

En la consolidación primaria, el proceso de expulsión de agua, convierte los resortes del modelo original del suelo en elementos de Kelvin-Voigt con comportamiento diferido en el tiempo. De hecho el modelo de la consolidación primaria de Terzaghi-Fröhlich responde a una combinación en serie de un número infinito de estos componentes elementales de Kelvin-Voigt, según puede comprobarse en la expresión del resultado teórico de la formulación y visualizarse comparando las figuras anteriores con la solución que relaciona el factor tiempo T_v con el grado de consolidación $U\%$.

En un modelo complejo que represente el comportamiento reológico de la arcilla, cada unidad elemental de elasticidad diferida que se utilice para representar la consolidación secundaria, únicamente entra en funcionamiento a medida que los resortes que representan la consolidación primaria van entrando en carga, de manera que la forma de producirse esta deformación secundaria tiene que guardar relación con la deformación primaria, alcanzando al cabo de cierto tiempo la estabilización práctica, aunque en teoría haga falta para ello un tiempo infinito.

Comparando la teoría de la consolidación con los resultados del apartado anterior y teniendo en cuenta que el factor tiempo $T_v = \alpha \cdot t$, se ve que éste coeficiente " α " juega el mismo papel que los parámetros " a " y " b " utilizados en el modelo elemental por lo que la solución de la consolidación primaria y secundaria puede escribirse de manera similar a la expresión (5), substituyendo las expresiones exponenciales por las soluciones de la teoría de Terzaghi-Fröhlich $T_v = f(U\%)$. El resultado de ello equivale a que los asientos de consolidación primaria se producen de acuerdo con un parámetro $\alpha_1 = a$, representando una cierta proporción $K_1\%$ del asiento final; a ellos se le añaden otros asientos de consolidación secundaria de acuerdo con otro parámetro $\alpha_2 = b$ y otra proporción $K_2\%$ respecto al asiento final, existiendo además un término corrector que se obtiene como diferencia entre las leyes de ambos tipos de consolidación y afectado de un coeficiente $K_3\% = K_2\% \cdot [a / (a - b)]$.

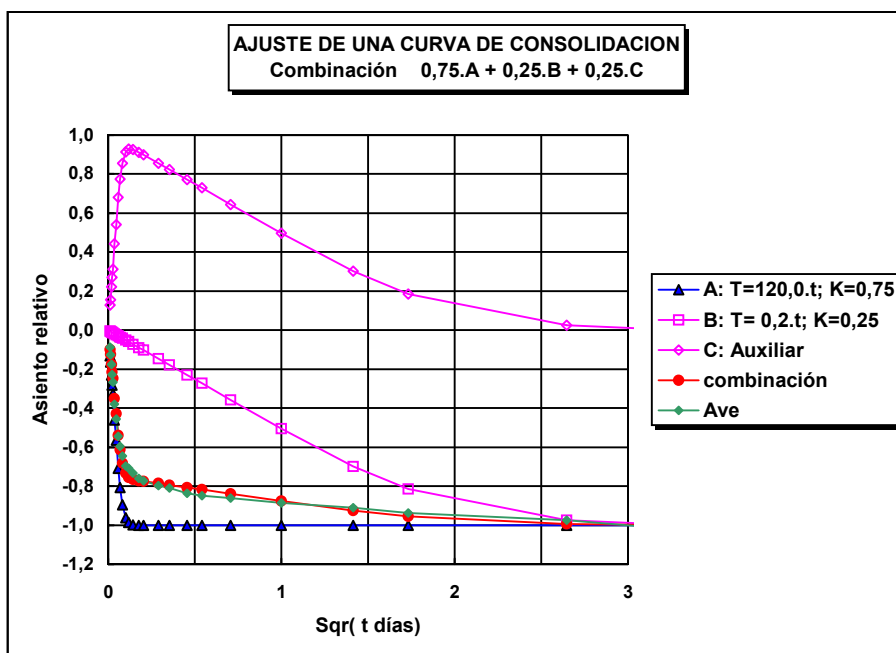
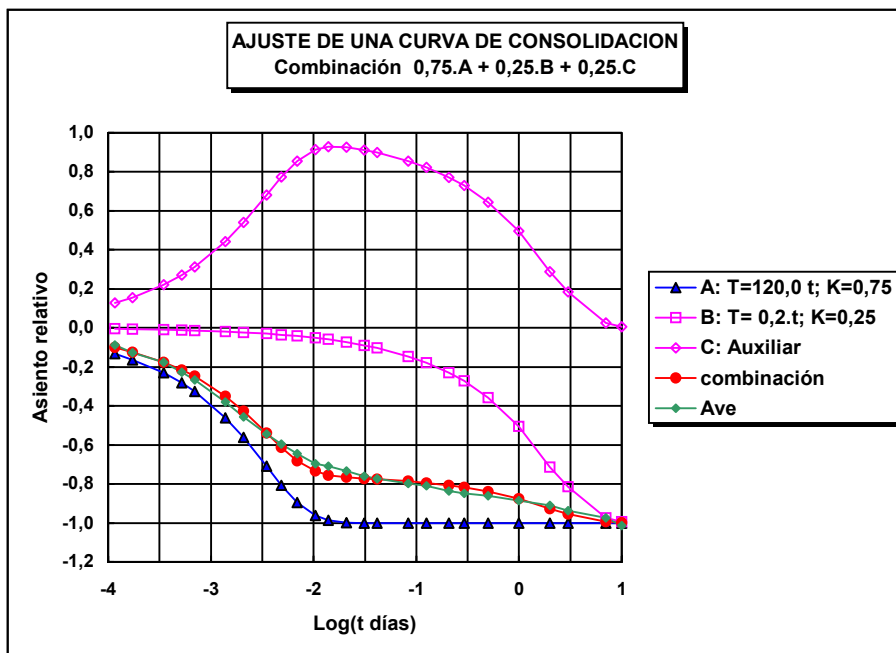


Fig. 4 Ajuste de las curvas de consolidación de la Fig. 1

En la Fig.4 se representa el ajuste efectuado para el ensayo citado en el apartado 2, después de tantear en ordenador diversos valores para el asiento final, así como de los distintos parámetros que intervienen en el proceso y que se acaban de citar.

Estos parámetros han sido los siguientes:

1. Asiento final igual a 0,79 mm
2. Consolidación primaria $K_1 = 75\%$ del asiento final
3. Consolidación secundaria $K_2 = 25\%$ del asiento final
4. Parámetro de consolidación primaria $a = 120$
5. Parámetro de consolidación secundaria $b = 0,2$

En la Fig. 4 puede apreciarse la buena concordancia entre este ajuste y los resultados reales dibujados tanto en escala logarítmica como en raíz cuadrada del tiempo. Una vez efectuado este ajuste, puede verse qué ocurre cuando se trata de estudiar la consolidación de un estrato real de espesor bastante superior al de la muestra utilizada en el ensayo edométrico.

Como es bien sabido el tiempo que se requiere para la consolidación primaria es proporcional, según la teoría de la consolidación, al cuadrado del espesor del estrato sometido a la carga, si sólo está drenado por una cara, o al cuadrado de la mitad del espesor si el drenaje se produce por ambas caras. Esto quiere decir que las presiones efectivas sobre el esqueleto sólido se aplican de una manera bastante más lenta lo que equivale a que en el modelo obtenido en el ajuste efectuado anteriormente habrá que cambiar el parámetro "a", que define la consolidación primaria, por otro menor igual al producto de éste por el cuadrado de la relación entre el espesor de la pastilla del edómetro y de la capa de arcilla a consolidar.

En la Fig. 5 se muestran dos ejemplos suponiendo que la capa de arcilla, en lugar de tener los 2 cm de espesor de la pastilla del edómetro, tenga 20 cm ó 2,0 m lo que supone considerar valores del parámetro $a = 1,2$ ó $a = 0,012$ respectivamente.

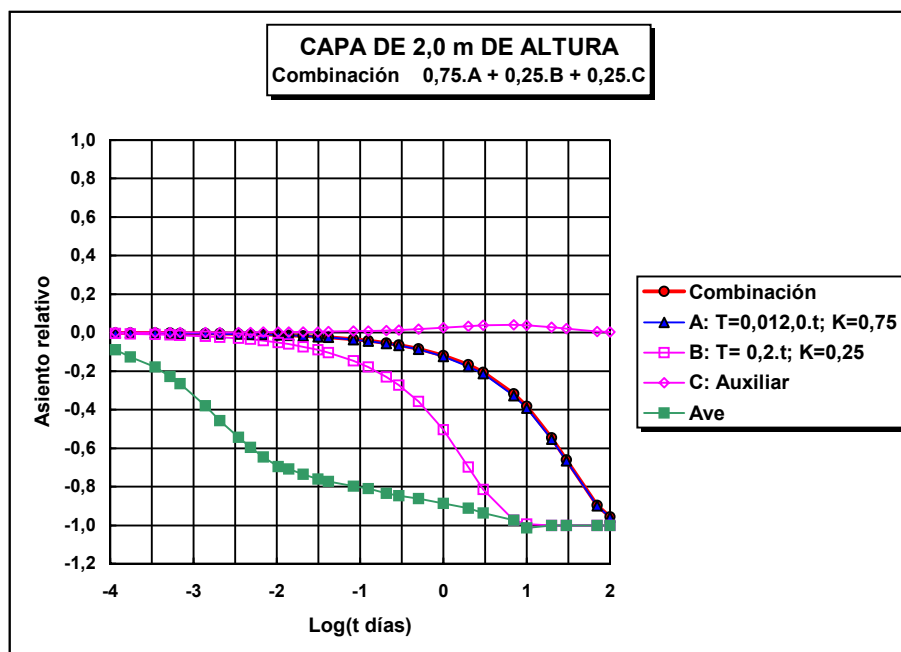
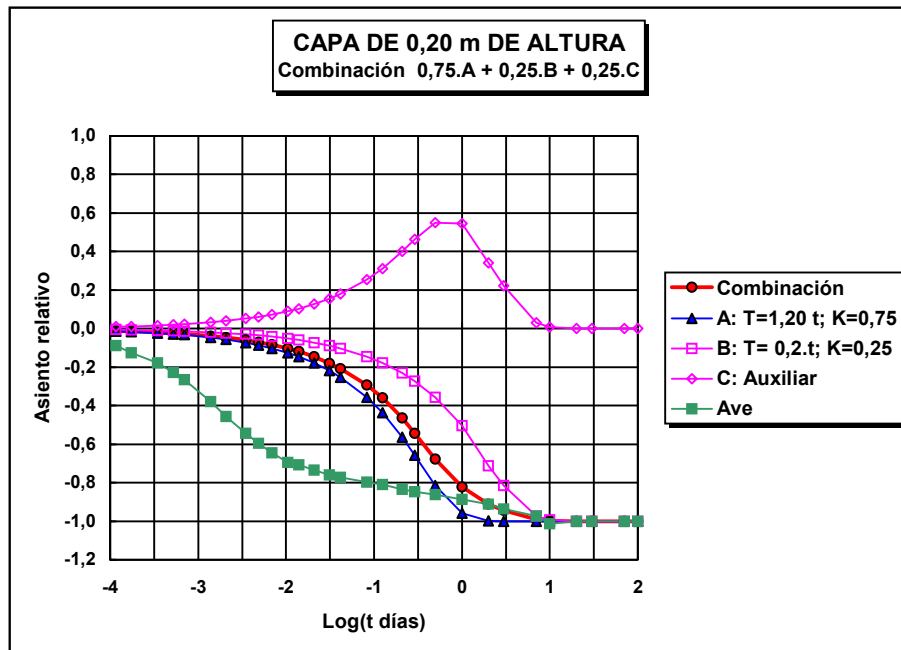


Fig. 5 Ejemplos de consolidación de dos capas de altura distinta

Puede verse en la figura cómo si bien en el primer caso todavía hay alguna diferencia entre los asientos globales y los de la consolidación primaria, en el segundo la concordancia es prácticamente total, obteniendo una curva de deformación equivalente a la consolidación primaria, pero con un asiento total que engloba también el debido a la consolidación secundaria.

5. CONCLUSIONES

En los apartados anteriores se ha tratado de analizar el fenómeno de la consolidación secundaria de las arcillas por comparación de la teoría de Terzaghi-Frölich con un modelo elemental dotado de elasticidad diferida, que tiene distinta respuesta en función de cómo se aplica la carga. En las arcillas las deformaciones visco-elásticas correspondientes a la consolidación secundaria se producen a medida que crecen las tensiones efectivas durante la consolidación primaria y parecen seguir una ley similar a la de éstas.

Se presenta un método para la interpretación de los resultados de laboratorio cuando aparece la consolidación secundaria, si bien el ajuste de parámetros debe realizarse mediante tanteos, que resultan de fácil ejecución si se programa en ordenador.

La consolidación secundaria se detecta en el edómetro cuando la consolidación primaria se produce de manera rápida, lo cual sucede cuando el material es bastante permeable, pero queda englobada con la última en los casos reales, debido a la gran diferencia entre el espesor de los estratos y el de la muestra de ensayo. Por ello en la práctica no es preciso determinar la consolidación secundaria siempre que la curva edométrica se haya dibujado teniendo en cuenta ambos tipos de deformación.

Estas conclusiones están de acuerdo con los comentarios citados en la introducción relativos a que el fenómeno de la consolidación secundaria se aprecia más en materiales muy permeables y en muestras de pequeño espesor.