

CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA BAJO UN TERRAPLÉN. CÓMO ESTIMARLA

1 FUNDAMENTOS

Para predecir el comportamiento de un suelo compresible bajo el peso de un terraplén, generalmente se usa la teoría de la consolidación de Terzaghi y los ensayos de consolidación unidimensional en laboratorio.

Siguiendo a Terzaghi, una vez que las presiones ejercidas sobre el suelo superan la presión de preconsolidación, la relación entre el asiento y el logaritmo de la presión efectiva es lineal; la pendiente de esta recta es el **Índice de Compresibilidad C_c** (Compressibility Index). La diferencia entre las previsiones y la realidad son normalmente achacables a la representatividad de la muestra tanto por tamaño como por la perturbación que tiene al ensayarla. Pero, a largo plazo, las diferencias pueden deberse a lo que se denomina consolidación secundaria mientras que a la de Terzaghi se le denomina primaria. No hay una situación, ni en tiempo ni en condiciones, que permita separar claramente ambas formas de consolidación.

Para los no familiarizados con estas teorías, veamos qué es lo que pasa cuando, sobre un suelo compresible saturado, se ejerce una presión, en este caso la debida a las tierras de un terraplén.

Imaginemos el suelo formado por partículas, sensiblemente planas u hojosas en el caso de las arcillas, que dejan unos huecos (Voids) entre partículas o entre aglomeraciones de partículas, más o menos interconectados entre sí (los huecos), y que estos huecos estén totalmente rellenos de agua. En suelos muy permeables la conexión entre huecos es clara y en los más impermeables la conexión entre huecos se debe – no siempre – a canales entre las partículas cuya dimensión es tan pequeña que se dificulta el flujo del agua por ellos. Quedémonos con el caso de las arcillas, que son bastante impermeables, debido a que estos canales son de ínfimas dimensiones.

En suelos no saturados o secos, la presión ejercida por las tierras se transmite al esqueleto sólido y la forma de reaccionar de éste, deformándose, es la que puede originar los asientos. Cuando hay pocos huecos y muchos contactos entre partículas, el comportamiento se acerca más al de un suelo elástico; cuando hay muchos huecos y los contactos entre partículas permiten una reorganización de la estructura, la deformación tiene una parte importante que no se recupera; es la que da el asiento.

Cuando tenemos un suelo arcilloso saturado en el que hay muchos poros llenos de agua, gran parte de los contactos entre partículas lo son con interposición del agua (Figura 1). La presión ejercida por las tierras, en el instante cero, se transmite íntegramente al agua a través del esqueleto sólido ya que el agua es prácticamente incompresible.

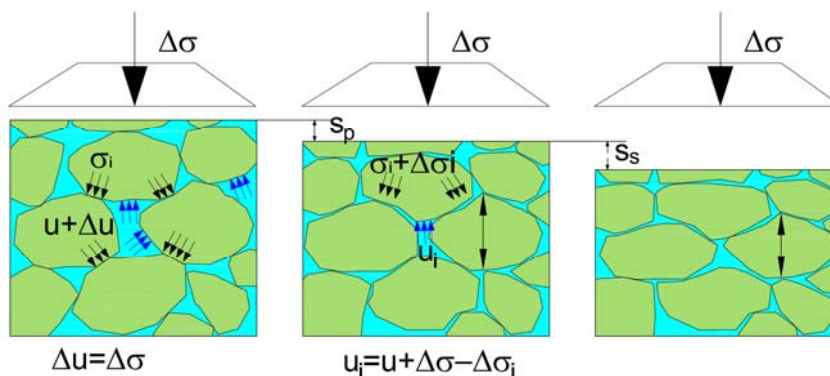


Figura 1.- Esquemas de asientos por disipación de presiones intersticiales

Un instante después, la diferencia entre la presión del agua en los poros bajo el terraplén y la presión del agua en los poros donde no hay terraplén, hace fluir el agua en esa dirección. En otras palabras, drena hacia la zona no cargada. Cuanta más agua drene, mayor es la disipación de la sobrepresión intersticial y más contactos hay entre partículas. Esta disipación de presión de poros es la causante del asiento que llamamos primario (S_p) y es el que recoge la teoría de Terzaghi. La parte de presión de poros disipada es la presión que va transmitiéndose al esqueleto sólido. El proceso continúa durante un tiempo muy largo. Teóricamente, las expresiones de Terzaghi implican que se produce en un tiempo infinito.

Al final del proceso, las partículas están en contacto entre sí y, si la carga es suficiente, se dan también procesos de **reajuste de estructura** e, incluso, de **deformación de las propias partículas**. Los reajustes en la estructura se traducen en nuevas sobrepresiones de poros que irán disipándose después. Estas deformaciones son las causantes de lo que se ha llamado asiento por **consolidación secundaria** (S_s).

Hay una consolidación terciaria y hay algunos autores que hablan de una cuarta. La terciaria recoge las deformaciones en las partículas por cambios físico-químicos y puede ser notable en los suelos orgánicos. Piénsese en las deformaciones debidas a una mayor descomposición de la materia orgánica al cabo de decenas de años y en las variaciones consiguientes en la resistencia de los tallos de los vegetales de un suelo turboso.

No es fácil establecer el momento en que la consolidación primaria acaba y el momento en la secundaria comienza actuar. Durante la primaria, lo que ocurre en la realidad es que, mientras que unas zonas están en el proceso de disipación de presiones de poros, en otras – puede que no muy distantes de aquellas – comienza a haber contactos netos entre partículas. Estos contactos son de tal magnitud que se producen reajustes en la estructura o deformaciones en las propias partículas, prácticamente sin aumento de presión intersticial, al menos medible. Es decir que la llamada consolidación secundaria y la llamada primaria coexisten en un determinado período de tiempo ya cerca del final de la primaria.

En la práctica ingenieril se acepta que, cuando las presiones intersticiales medibles nos dicen que prácticamente se ha disipado la sobrepresión de poros, es decir lo que leemos en nuestros piezómetros es la altura hidrostática en cada punto o la piezométrica, puede decirse que la consolidación primaria ha terminado. Esto se asocia normalmente a un 95% de la disipación de estas sobrepresiones intersticiales que, para alturas de terraplenes normales en carreteras (<10 m = <20 kN/m²), supone que queda por disiparse una presión de 1 kN/m² valor que generalmente no puede apreciarse con la precisión de los equipos de medición instalados.

Hay que decir que cuanto más tiempo tengamos la carga actuando, antes empieza a predominar la consolidación secundaria, pero para una determinada carga actuante, la presión efectiva que – al final – le llega a las partículas es independiente del tiempo actuante una vez superada la consolidación primaria.

Otra cosa es que comparemos la consolidación secundaria en un mismo suelo para dos alturas de terraplén distintas. Al final de la consolidación primaria, bajo el terraplén más alto se ejercen mayores presiones entre partículas más altas debido a que se ha conseguido expulsar más agua; por tanto, la deformación consecuente puede ser mayor, es decir, es mayor el asiento de la llamada consolidación secundaria. Pero, en este caso, también es mayor el de la consolidación primaria.

En la Figura 2 se muestran dos ejemplos de curvas de consolidación en la célula edométrica con diferentes asientos por consolidación secundaria respecto de la primaria. En los suelos muy blandos y, sobre todo, en los que tienen mucha materia orgánica se pueden dar caso como la curva de la derecha y, a veces, apenas se distingue la consolidación primaria.

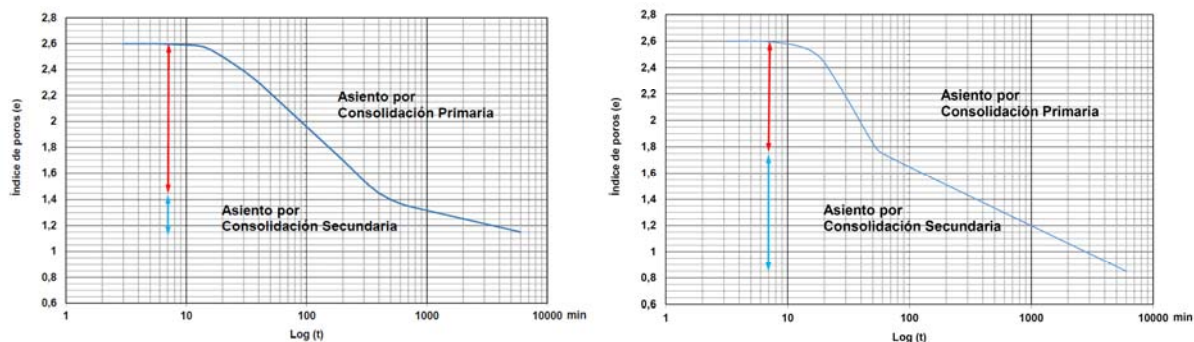


Figura 2.- Dos curvas de consolidación con menor y mayor consolidación secundaria respecto de la primaria

Se ha visto que la consolidación secundaria varía linealmente con el logaritmo del tiempo; y se establece el Índice de Compresibilidad Secundaria C_{α} como la pendiente del tramo rectilíneo de la curva, es decir:

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (1)$$

2 CÓMO ESTIMAR LA CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

Este índice C_{α} , puede medirse en las curvas de consolidación de los ensayos como los de la Figura 2, pero podemos acudir a referencias bibliográficas de autores que lo han estudiado ampliamente. Entre ellos está **Gholamreza Mesri** quien ha dedicado una parte importante de sus investigaciones a esta consolidación secundaria en suelos arcillosos y orgánicos en todo el mundo. Las conclusiones de estas investigaciones son las más utilizadas en el análisis de estos problemas.

Se admite que existe una cierta relación entre el C_c y el C_{α} , es decir, suelos muy compresibles en los primeros años por tener un índice de poros alto (C_c alto) y llenos de agua, también tienen una consolidación secundaria alta, en parte porque la consolidación primaria engloba en su tramo final parte de la secundaria. De hecho, cuando se han realizado ensayos de consolidación de larga duración se ha visto en bastantes casos que el coeficiente C_{α} era mayor cuanto mayor era la presión actuante.

Mesri & Choi (1985) llegan a establecer para la mayor parte de los suelos blandos arcillosos la expresión siguiente:

$$\frac{C_{\alpha}}{C_c} = 0,04 \pm 0,01 \quad (2)$$

Y para los suelos muy orgánicos la siguiente:

$$\frac{C_{\alpha}}{C_c} = 0,05 \pm 0,01 \quad (3)$$

C_c es el índice de compresión primaria determinado anteriormente.

También podemos decir que, tras las experiencias de distintos autores, se admite que la consolidación secundaria puede depender del contenido de agua. Cuanto mayor es W , mayor es C_c y por tanto mayor es C_{α} .

Tras la tesis que leyó el autor en el año 1987 estuvo monitorizando terraplenes sobre suelos compresibles con materia orgánica, y determinó en 2004 unas correlaciones entre Coeficientes de Consolidación secundaria y la humedad de las muestras de los sondeos.

A título ilustrativo la correlación que se estableció fue:

$$C_{\alpha} = \frac{1}{a} (\log W - b) \tag{4}$$

Donde **a** podía variar de 25 a 35 en función del incremento de carga y **b** variaba de 1.5 a 1.6

Las medidas in situ demostraban claramente lo ya escrito antes sobre la variación lineal de los asientos secundarios con el logaritmo del tiempo.

Mesri (1973), nos presenta la Figura 3, de la que se deduce la siguiente correlación para el coeficiente de consolidación secundaria:

$$\frac{C_{\alpha}}{1+e} = \varepsilon_{\alpha} = \frac{W}{100} \cdot 0,01 \tag{5}$$

La expresión anterior se puede escribir como

$$C_{\alpha} = \frac{W}{10.000} \cdot (1+e) \quad \text{en tanto por uno, y } W \text{ en } \% \tag{6}$$

Con lo que, si relacionamos el valor de **W** con el del índice de compresibilidad **C_c**, tenemos

$$C_{\alpha} = \frac{1,5 C_c}{100} \cdot (1+e) = 0,015 \cdot (1+e) \quad \text{para } W < 45 \tag{7}$$

$$C_{\alpha} = \left(\frac{C_c - 0,3}{150} + 0,0045 \right) \cdot (1+e) \quad \text{para } 45 < W < 90 \tag{8}$$

$$C_{\alpha} = \frac{C_c}{100} \cdot (1+e) = 0,01 \cdot C_c \cdot (1+e) \quad \text{para } W > 90 \tag{9}$$

Si nos fijamos en las expresiones anteriores (2) y (3), de **Mesri y Choi**, los valores de **C_α** están en un orden de magnitud similar. Por dicha razón, sugerimos trabajar con las relaciones primeras de **Mesri y Choi**, más sencillas de usar.

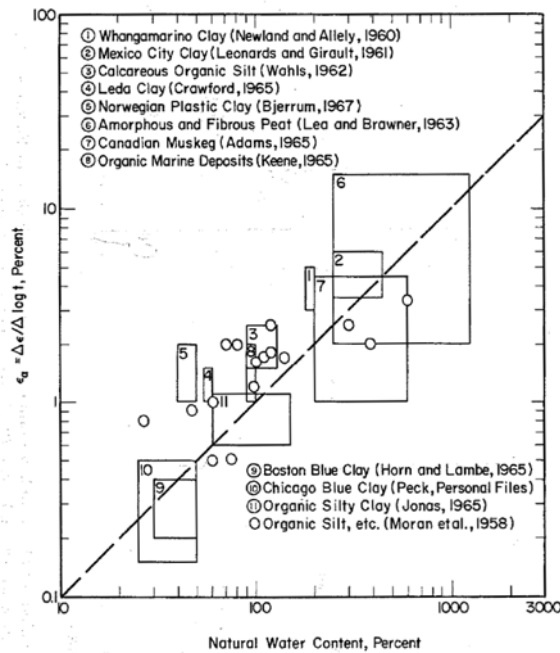


Figura 3.- Correlación entre el Contenido en agua (W) y el Coeficiente de Consolidación secundaria relativo C_{α} (Mesri, 1973)

La velocidad de disipación de presiones de poros, es decir la velocidad con que aparece el denominado asiento por consolidación primaria, es función de la permeabilidad interna del suelo y del nivel de presiones efectivas que le va llegando en cada momento, pues la

permeabilidad disminuye conforme los poros van cerrándose y las partículas se van aproximando entre sí. Las expresiones de la teoría de Terzaghi dan una velocidad de consolidación C_v que es variable teóricamente con el factor T_v el cual varía con el tiempo y con el propio grado de consolidación. Pero la velocidad de la consolidación primaria, sobre todo la del tramo inicial recién aplicadas las cargas, no tiene relación alguna con la velocidad ni con la magnitud de la llamada consolidación secundaria. Lo que ocurre es que cuando el C_v es bajo – consolidación primaria lenta, largo período de espera – hay un mayor tiempo en el tramo final de la primaria para el que la secundaria comience a actuar.

Destaquemos algunas ideas de lo escrito hasta aquí:

- Se llama consolidación primaria a la que se debe a la disipación de sobrepresiones del agua en los poros. Estas son las sobrepresiones originadas por la carga de tierras que se establece encima.
- Se llama consolidación secundaria a la que sigue manifestándose una vez disipadas las presiones intersticiales, pero admitiendo que puede empezar a actuar antes.
- No está claro el momento en que la secundaria empieza a actuar.
- La velocidad de disipación de las presiones de poros es prácticamente independiente de la presión de tierras al menos al comienzo de la consolidación. Es decir que se llega a transmitir una carga a las partículas prácticamente en el mismo tiempo que con una carga menor. A largo plazo, el coeficiente C_v podría tener alguna dependencia de las presiones de tierras.

3 ALGUNOS EJEMPLOS DE ASIENTOS NOTABLES DE CONSOLIDACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA

Nos vamos a ceñir solamente a algunas experiencias nuestras.

En la Autopista de Peaje AP-7 Tarragona-Valencia, en el paso por las marjales antiguas de Benavites y La Llosa se midieron asientos de unos 10 cm tras la terminación de los terraplenes, menos de lo esperado dada la presencia de niveles de turbas en los primeros 3 m, probablemente por algún fenómeno de preconsolidación. Durante los primeros 25 años de explotación se han medido hasta 12 cm más; todos estos debidos a la consolidación secundaria o, quizás, terciaria.

En la AP-7, pero en su tramo cercano a Cullera y Favareta, los asientos medidos han sido la mitad de los anteriores pero con la misma proporción de asiento primario-secundario.

En la Autovía del Cantábrico A-8, en el paso por la marisma de Tina Mayor, en la desembocadura del río Deva, terraplenes de unos 9 m de altura cimentados en parte sobre columnas de grava, en depósitos fluviales de limos algo orgánicos de hasta 18 me de potencia, asentaron prácticamente durante la construcción 2 metros, a los que habría que sumar los asientos casi inmediatos en los procesos de levantamiento de cada nueva tongada. Durante los 18 años transcurridos desde la apertura al tráfico de este tramo, se han tenido que corregir asientos diferenciales con una obra de fábrica del Enlace de Unquera de más de 10 cm. Estos asientos son de consolidación secundaria.

En los terraplenes que forman la segunda pista del aeropuerto El Dorado de Santa Fé de Bogotá construidos sobre potentes depósitos de arcillas plásticas con niveles de limos y turbas, se midieron asientos de unos 4 metros para terraplenes de altura final 5m (altura a la que habría que añadir hasta casi 3 m que fueron asentando a medida que se construía)

Dado que los suelos presentaban preconsolidaciones (OCR) de 3 a 12 veces, a pesar de la magnitud registrada los asientos fueron menores de los esperados y durante la explotación se han medido asientos por consolidación secundaria de algún decímetro que se ha combatido perfectamente con las labores de mantenimiento, como ocurre en los aeropuertos de Méjico o San Francisco.

En una carretera que discurre por el delta del río Fraser, Vancouver, Canadá, los terrenos están constituidos por arenas, limos, alguna arcilla y suelos orgánicos, incluso turbas. Son suelos muy compresibles incluso bajo cargas pequeñas.

Para terraplenes de altura final 3 metros sobre el terreno original, se han medido asientos de hasta 2.80 m al final de la terminación de las tierras, lo que implica que el espesor de tierras colocadas ha podido ser del orden del doble de la finales. Los asientos de consolidación secundaria llegan a 25-30 cm en 10 años.

4 **BIBLIOGRAFIA**

Crawford, B., & Morrison, K.I., (1996). "Case histories illustrate the importance of secondary-type consolidation settlements in the Fraser River delta". Can. Geotech. J. (33) 876-878

Mesri, G. (1973). "Coefficient of secondary compression". J. Soil Mech. & Found. Div., ASCE, 99 (SM1), 123-137

Mesri, G., Choi, Y.K. (1985). "Settlement analysis of embankments on soft clays". J. Geotech. Eng., ASCE, 111 (4), 441-464

Mesri, G., Feng, T.W. (1991). "Surcharging to reduce secondary settlements". Proc., Int. Conf. Geotech. Eng. For Coast. Devel.- Theory to Pract., The Japan Society Of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 1, 359-364.

Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.A, Chen., C.S. (1997). "Secondary compression of Peat with or without surcharging". J. Geotech. Geoenv. Eng., ASCE, 123 (5), 411-421

Román, F. (1977). "Los suelos orgánicos, su origen y propiedades". Sem. Ingeniería Geotécnica. ETS Ing. de Caminos C. y P. Univ. Polit. Valencia.

Román, F. (1986). "Secondary consolidation of some Spanish Soils", 5th International IAEG Congress. Buenos Aires.

Román, F. (1987). "Distribución y propiedades geotécnicas de los suelos cuaternarios de las zonas marismales en el litoral levantino, entre Sollana y Gandía". Univ. Polit. Valencia. Tesis doctoral.

Román Buj, F. (2000). *Auscultación del terraplén de la nueva pista del aeropuerto de El Dorado de Bogotá (Colombia)*. Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. SEMSIG. Barcelona.

Román, F. y Estaca, M. (2004). *Terraplén sobre la marisma de Tina Mayor en la Autovía del Cantábrico*. IV Simposio nacional de Geotecnia vial. Santander.

Román, F. (2004). *Asientos secundarios de terraplenes sobre suelos orgánicos tras 25 años en servicio*. IV Simposio nacional de Geotecnia vial. Santander.