

Sobre el cálculo de asentos edométricos en suelos Normalmente Consolidados

JOAQUÍN CELMA (*)

RESUMEN La estimación del asiento de una estructura con el método edométrico es aceptable cuando la extensión de la carga en superficie es muy grande en comparación con el espesor del estrato, o bien cuando el estrato es delgado y profundo. Para estimar el asiento se parte, normalmente, de los datos obtenidos en un ensayo edométrico realizado en una muestra tomada en la parte central del estrato compresible. Es práctica habitual considerar que este índice de huecos es constante en todo el estrato y determinar el peso específico saturado y por tanto la presión efectiva en el punto en el que se tomó la muestra. Puesto que el índice de huecos depende del nivel de presiones efectivas en cada punto, el peso específico variará con la profundidad a lo largo del estrato y consecuentemente el valor real de la presión efectiva en el punto en el que se tomó la muestra puede diferir del supuesto. Se analiza en esta nota los factores que influyen en la variación del índice de huecos con la profundidad y su importancia relativa en el cálculo de asentos edométricos.

ABOUT THE OEDOMETRIC SETTLEMENT EVALUATION IN NORMALLY CONSOLIDATED SOILS

ABSTRACT Use of oedometer method for the estimation of ground settlement is valid when the thickness of the compressible layer is small in relation to the surface loaded area, or when the layer is deep. Calculations are made according to the data obtained from oedometer test on samples taken on the middle of the layer. It is assumed that the void ratio measured on the sample is constant over the layer and the initial effective stress on the sample is obtained assuming a constant unit weight of soil.

As void ratio is related to effective stress by oedometer curve, both compressibility and unit weight can vary through the layer. Although the influence of the non-linearity of soil properties on oedometer settlement has been analysed by several authors, it is the aim of this note to analyse in a simple way the influence of this simplification for the estimation of oedometer settlements of normally soil layers.

Palabras clave: Análisis; Asientos; Edómetro; Compresibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Distintos autores han estudiado la consolidación en condiciones edométricas adoptando un modelo no lineal. En estos modelos se considera la variación de la permeabilidad, la compresibilidad o el coeficiente de consolidación con el nivel de tensiones o el índice de huecos, (Davis & Raymond, 1965; Raymond, 1969; Poskitt, 1969; Olson & Ladd, 1979; Cargill, 1984;) o se introduce la hipótesis de deformaciones finitas (Gibson et al., 1967; Monte & Krizek, 1976; Gibson et al. 1981; Schiffman & Cargill, 1981). En estos artículos, entre otros, se valora la influencia de la no linealidad en la magnitud de los asentos, la evolución de la consolidación y la disipación de las sobrepresiones intersticiales.

En la presente nota se pretende analizar el error que se comete al adoptar un procedimiento convencional de cálculo de asentos en condiciones edométricas.

2. ANÁLISIS DEL MODELO

Supongamos una situación como la señalada en la figura 1, en la que el terreno es N.C. y la muestra se ha tomado en el centro del estrato. En el ensayo edométrico se determina el índice de huecos e_0 y el peso específico relativo de las partículas G_s que permite calcular el peso específico del terreno y por tanto la presión efectiva en el centro del estrato compresible, supuesto el índice de huecos constante. Con estos datos es posible realizar las correcciones de Schmertmann y Casagrande para determinar la curva de compresión en el terreno que permite obtener los valores de la presión de preconsolidación, Índice de Compresión C_c y de Hinchamiento C_s .

Si $v_0=1+e_0$ es el volumen específico, la curva edométrica se puede expresar como:

$$v + \lambda \ln \sigma' = C_0 \quad \sigma' = \sigma'_n \exp(-v / \lambda) \quad [1]$$
$$\sigma'_n = \exp(C_0 / \lambda)$$

donde $\lambda=C_c/Ln10$.

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Valencia.

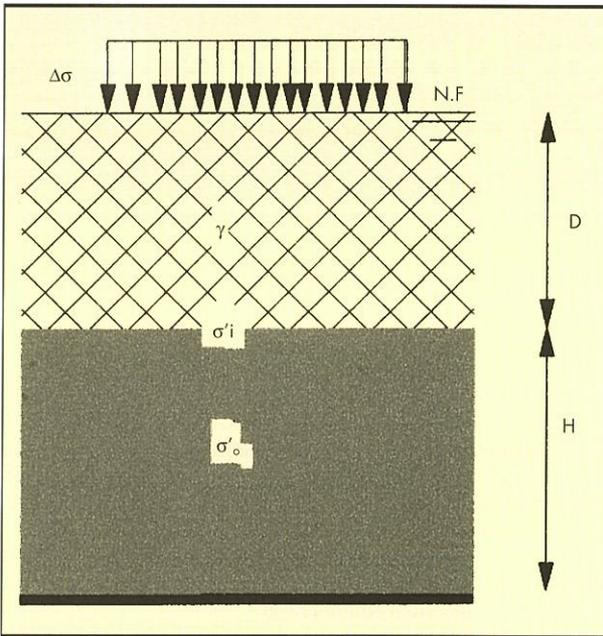


FIGURA 1. Definición geométrica del problema.

El procedimiento convencional suponiendo el índice de huecos constante, estimaría la presión efectiva en el centro del estrato como:

$$\begin{aligned} \sigma'_o &= \sigma'_i + \gamma' H / 2 \\ \gamma' &= \gamma - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{V_o} \end{aligned} \quad [2]$$

siendo σ'_i la presión efectiva en la parte superior del estrato compresible, H el espesor del estrato compresible y $\gamma_s = G_s \gamma_w$.

Definimos los siguientes parámetros adimensionales:

$$\Omega = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)H}{\lambda \sigma'_i}; \quad \xi = \frac{z}{\lambda}; \quad \eta = \frac{z}{H}; \quad w = \frac{\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad [3]$$

siendo z la profundidad en el estrato.

En un elemento diferencial dz, la variación de presión efectiva será, teniendo en cuenta (1):

$$d\sigma' = \gamma' dz = -\frac{\sigma'}{\lambda} dv \quad [4]$$

que reordenado proporciona la variación de ξ con η :

$$-\xi \exp(-\xi) d\xi = \Omega \exp(-\xi_i) d\eta \quad [5]$$

La ecuación anterior se puede integrar con las condiciones $(\xi, \eta) = (\xi_i, 0)$; $(\xi_o, 0.5)$ correspondientes al techo y centro del estrato, obteniéndose:

$$\begin{aligned} (1 + \xi_o) \exp(-\xi_o) &= 0.5 \Omega \exp(-\xi_i) + \\ &+ (1 + \xi_i) \exp(-\xi_i) \end{aligned} \quad [6]$$

De la expresión (6) puede obtenerse ξ_i .

El valor de la presión efectiva en el centro del estrato, σ'_o^* , se obtiene en el caso convencional a partir de (2) como:

$$w_o^* = \frac{\sigma'_o^*}{\sigma'_i} = 1 + \frac{\Omega}{2\xi_o} \quad [7]$$

en la solución actual, σ'_o , se obtiene como:

$$w_o = \frac{\sigma'_o}{\sigma'_i} = \exp(\xi_i - \xi_o) \quad [8]$$

donde w es un parámetro adimensional que define el nivel de tensiones efectivas.

De (6) se obtiene que :

$$\begin{aligned} \exp(\xi_i - \xi_o) &= \frac{\xi_o + 0.5\Omega + 1 + \xi_i - \xi_o}{1 + \xi_o} = \\ &= 1 + \frac{\Omega}{2\xi_o} \end{aligned} \quad [9]$$

Si en (7) se acepta la simplificación $\ln(1+x) \approx x$, entonces $\xi_i - \xi_o \approx 0.5 \Omega / \xi_o$ y substituyendo este valor en (9) y (8) se obtiene que las dos soluciones coinciden.

Por tanto para valores pequeños de $0.5 \Omega / \xi_o$ la corrección no debe ser importante. Esto ocurre con espesores pequeños, estratos profundos, índices de huecos altos o compresibilidades altas.

Obsérvese que el valor de ξ_o está relacionado con CR (Compression Ratio): definido como el cociente entre el índice de compresión C_c y el volumen específico v ; $\xi_o = \ln(10)/CR$.

De (9) se deduce que el valor de ξ_i será menor que el supuesto convencionalmente por la ecuación (7).

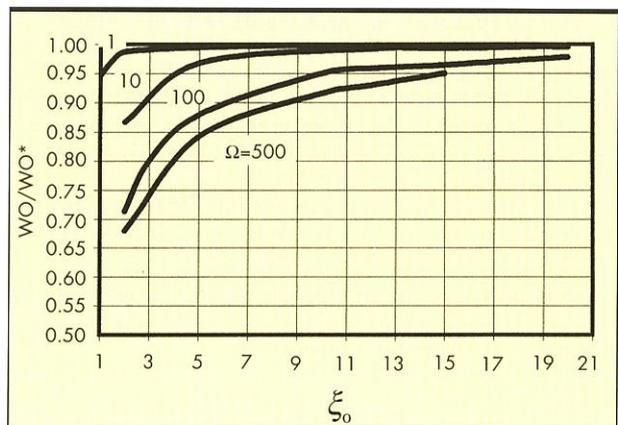


FIGURA 2. Error cometido en la determinación de la presión efectiva en el centro del estrato compresible. W_o^* = Valor adimensional de la tensión efectiva determinada por el método convencional.

En la figura 2 se representa w_o/w_o^* frente a ξ_o para distintos valores de Ω , indicando que el error es mayor para valores altos de Ω y pequeños de ξ_o .

Las consideraciones anteriores sugieren que la curva en el terreno se debe obtener por aproximaciones sucesivas. En efecto, si se parte del procedimiento convencional, se obtendrá un valor de C_c en el terreno de acuerdo con el valor de σ_o^* supuesto a priori. Con el método propuesto se corrige el valor de σ_o^* y se recalcula el valor de C_c hasta que el proceso converja.

3. CÁLCULO DE ASIENTOS

Si se asumen condiciones edométricas, el incremento de tensión vertical $\Delta\sigma$ es constante con la profundidad. El asiento se estimaría a partir de la ecuación (1) como:

$$s = \int_0^H \varepsilon_z dz = \int_0^H \frac{1}{\xi} \text{Ln} \left[1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma'} \right] dz = \frac{H}{\Omega} \int_1^{w_b} \text{Ln} \left[1 + \frac{\alpha}{w} \right] dw \quad [10]$$

Donde el parámetro α define la magnitud relativa de la carga exterior: $\alpha = \Delta\sigma/\sigma'_i$ y w_b define la tensión efectiva en la base del estrato en forma adimensional:

$$w_b = \frac{\sigma'_b}{\sigma'_i} = \exp(\xi_i - \xi_b) \quad [11]$$

donde ξ_b es el valor de ξ en $z=H$ y que se obtiene a partir de (5) y (6) resolviendo la ecuación (12):

$$(1 + \xi_b) \exp(-\xi_b) = \Omega \exp(-\xi_i) + (1 + \xi_i) \exp(-\xi_i) \quad [12]$$

El procedimiento convencional habría proporcionado un asiento dado por (13)

$$s^* = \frac{H}{\xi_o} \text{Ln} \left[1 + \frac{\alpha}{w_o^*} \right] \quad [13]$$

La ecuación (10) puede integrarse directamente obteniéndose que:

$$s = \frac{H}{\Omega} F(\alpha, w_b) \quad [14]$$

$$F(\alpha, w_b) = w_b \text{Ln} \left[1 + \frac{\alpha}{w_b} \right] + \alpha \text{Ln} \left[\frac{w_b + \alpha}{1 + \alpha} \right] - \text{Ln} [1 + \alpha]$$

En las figuras 3 a 5 se representa el cociente s^*/s , entre el asiento convencional y el propuesto para distintos valores de Ω en función de ξ_o . Para $\Omega < 10$ el error es menor del 10%.

Estas figuras indican que el error cometido no es importante para los casos convencionales. En efecto, la combina-

ción de valores bajos de α y ξ_o , y valores altos de Ω , se produce en situaciones extremas, con espesores importantes y cargas exteriores reducidas. Estos casos no suponen problema pues o bien el asiento es pequeño o las condiciones edométricas no son de aplicación.

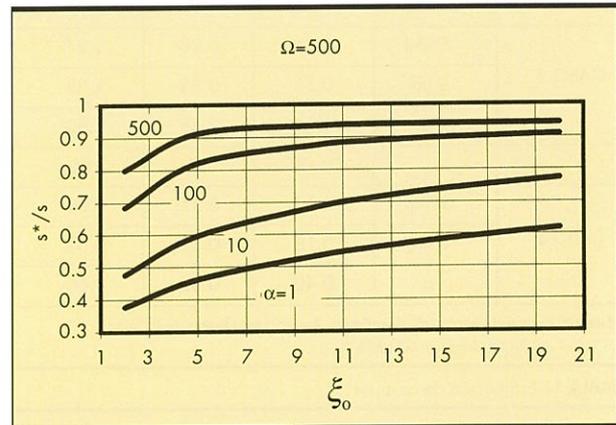


FIGURA 3. Error cometido en la estimación del asiento. $\Omega=500$. S^* = asiento convencional. S = asiento corregido.

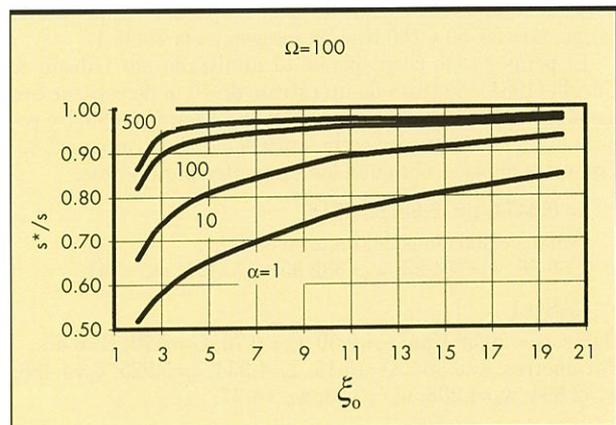


FIGURA 4. Error cometido en la estimación del asiento. $\Omega=100$. S^* = asiento convencional. S = asiento corregido.

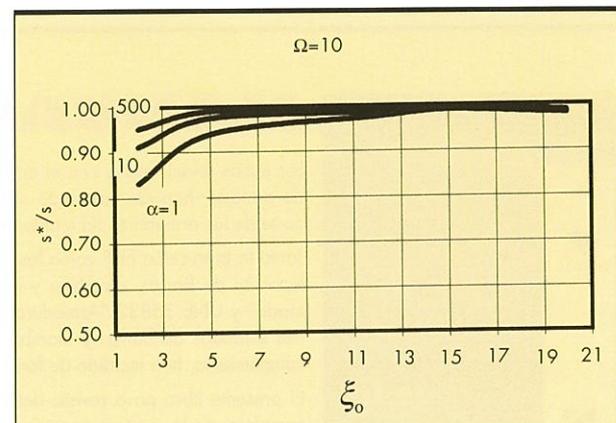


FIGURA 5. Error cometido en la estimación del asiento. $\Omega=10$. S^* = asiento convencional. S = asiento corregido.

		$\Delta\sigma=25$	50	100
Gibson	S*(m)	0.73	1.15	1.72
	S (m)	0.99	1.44	2.01
	α	156.25	306.56	613.120
		$\Delta\sigma=25$	50	100
CASO 1	S*(m)	0.46	0.80	1.27
	S (m)	0.51	0.85	1.33
	α	1.22	2.45	4.90
		$D\sigma=25$	50	100
CASO 2	S*(m)	0.17	0.31	0.51
	S (m)	0.18	0.32	0.53
	α	0.40	0.80	1.60

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Anuario estadístico de la Zona del Protectorado. Año 1955

TABLA 1. Estimación de asientos.

4. APLICACIÓN

Para visualizar la influencia relativa de los distintos factores se han considerado tres casos con la estratigrafía de la figura 1. Los resultados del cálculo de asientos para incrementos de carga, $\Delta\sigma = 25, 50$ y 100 Kpa, se recogen en la Tabla 1.

El primer caso corresponde al analizado por Gibson & Cargill (1981). Se trata de un estrato de 10 m de espesor con los siguientes datos: $G_s=2.74$; $\sigma'_i=0.163$ Kpa; $C_c=0.80$. Se conoce el índice de huecos en la superficie del estrato: $e_i=3.83$. Con estos datos se obtienen los siguientes parámetros:

$$\lambda = 0.3474; \xi_i = 13.90; \Omega = 3012.$$

Con las ecuaciones del texto se obtiene:

$$\xi_o = 8.86; w_o = 154.23; w_b = 332.95; w_o^* = 171; w_b^* = 341.$$

CASO 1:

Datos: $\sigma'_i = 20.38$ Kpa; $e_o = 0.50$; $C_c = 0.70$; $G_s = 2.70$; $H = 6$ m.

Parámetros: $\lambda = 0.304$; $\Omega = 16.15$; $\xi_o = 4.934$; $\xi_i = 5.925$; $\xi_b = 4.488$; $w_o = 2.694$; $w_b = 4.208$; $w_o^* = 2.63$; $w_b^* = 4.27$.

CASO 2:

Datos: $\sigma'_i = 61.94$ Kpa; $e_o = 7$; $C_c = 1.75$; $G_s = 2.70$; $H = 6$ m.

Parámetros: $\lambda = 0.76$; $\Omega = 2.12$; $\xi_o = 10.52$; $\xi_i = 10.61$; $\xi_b = 10.42$; $w_o = 1.09$; $w_b = 1.209$; $w_o^* = 1.10$; $w_b^* = 1.20$.

5. CONCLUSIONES

Se ha analizado la influencia que tiene en la determinación de la presión efectiva inicial y en el cálculo de asientos la suposición de que en un estrato de arcilla N.C. el índice de huecos y por tanto el peso específico permanece constante con la profundidad.

Se han definido unos parámetros adimensionales que definen el problema en función de los datos de partida.

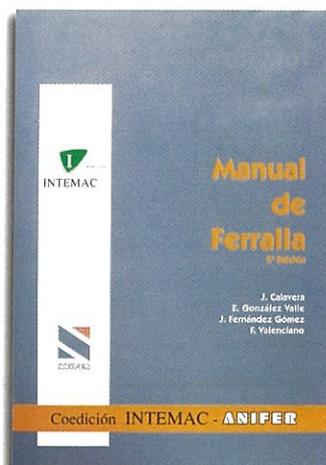
Se desprende del análisis realizado que la influencia en la presión efectiva es más importante cuanto menor es el índice de huecos o mayor la compresibilidad del estrato, para cargas reducidas y espesores importantes.

Con respecto a los asientos estimados, el asiento calculado por el método convencional en condiciones edométricas, infravalora el asiento real, si bien, en condiciones normales el error cometido es inferior al 30%.

El método propuesto es fácilmente programable en una calculadora de bolsillo y permite evaluar para cada caso el error cometido.

6. REFERENCIAS

- CARGILL, K.W. (1984): Prediction of consolidation of very soft soil. *J. Geotech. Eng. Div. A.S.C.E.* Vol. 110, No. 6, 775-795
- DAVIS, E.H.; RAYMOND, G.P. (1965): A non-linear theory of consolidation. *Geotechnique*, Vol. 15. 161-173.
- GIBSON, R.E.; ENGLAND, G.I.; HUSSEY, M.J.; (1967): The Theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. 1. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. *Geotechnique*, Vol. 17, 261-273.
- GIBSON, R.E.; SCHIFFMAN, R.L.; CARGILL, K.W. (1981) : The Theory of one dimensional consolidation of saturated clays, II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. *Can. Geotech. J.*, Vol.18, 280-293.
- MONTE, J.L.; KRIZEK, R.J. (1976): One-dimensional mathematical model for large strain consolidation. *Geotechnique*, Vol. 26, No. 3, 495-510.
- OLSON, R.E.; LADD, CH.C. (1979) : One-dimensional consolidation problems. *J. Geotech. Eng. Div. A.S.C.E.* Vol. 105, No. GT1. , 11-30.
- POSKITT, T.J. (1969): The consolidation of saturated clay with variable permeability and compressibility. *Geotechnique*, Vol. 19, No. 2, 234-252
- RAYMOND, G.P. (1969): Consolidation of deep deposits of homogeneous clay. *Geotechnique*, Vol. 19, No. 4, 478-494.
- SCHIFFMAN, R.L.; CARGILL, K.W. (1981): Finite strain consolidation of sedimenting clay deposits. *Proc. 10th. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Stocolm.* Vol. 1, 239-242.



MANUAL DE FERRALLA (2ª Edición)

Los temas relacionados con el corte, doblado y colocación de las armaduras, incluidas sus formas preferenciales de armado, han ido cobrando una gran importancia en los últimos años. Este crecimiento es paralelo al que el coste de las armaduras ha tenido en el coste de la estructura.

Tanto la Instrucción EHE como las Normas UNE 36831 "Armaduras pasivas para hormigón - Corte, doblado y colocación de barras, alambres y mallas para estructuras de hormigón. Tolerancias. Formas recomendadas de armado" y UNE 36832 "Armaduras pasivas de acero para hormigón - Especificaciones para la ejecución de uniones soldadas de barras y alambres para estructuras de hormigón", recogidas por EHE y por tanto de obligado cumplimiento, han incidido de forma decisiva en los nuevos planteamientos tecnológicos de la ferralla.

El presente libro pasa revista detalladamente a todos los temas que componen el proceso, hoy extremadamente complejo, de la concepción y ejecución de la ferralla. Como el tema de los Detalles Constructivos es esencial en el conjunto de lo tratado, el libro se acompaña de un Paquete Informático con los Detalles Constructivos más usuales en ficheros para AutoCAD versión 10 (compatible con las versiones AutoCAD 11, 12, 13 y 14).

Para más información: **INTEMAC EDICIONES, S.L. c/ Monte Esquinza, 28, 2ª Planta.**
Teléfono 913 10 51 58. Fax: 913 08 36 09. 28018 Madrid