

Predicción de deformaciones a largo plazo en arcillas sensitivas

Agustín Deméneghi
Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D F, México



RESUMEN

Se presenta un procedimiento para la predicción de deformaciones a largo plazo en arcillas sensitivas. Se consideran tres clases de curvas de consolidación (tipo I, tipo II y suelos con cavidades) y se proponen métodos de cálculo de deformaciones para cada una de ellas. Se incluyen al final del artículo ejemplos de aplicación.

ABSTRACT

A procedure for the prediction of long term deformations in sensitive clays is presented. We consider three types of consolidation curves (type I, type II and soils with cavities), and methods for the calculation of deformations in each of them. We include practical examples at the end of this paper.

1 INTRODUCCIÓN

Las arcillas sensitivas se forman en cuerpos de agua salada, y, por esta razón, poseen una estructura floculenta, lo que ocasiona que su comportamiento sea muy diferente a las arcillas que se producen en cuerpos de agua dulce.

La estructura floculenta da lugar a que en una arcilla sensitiva sus partículas queden unidas entre sí, y, por lo tanto, su rigidez no dependa de manera significativa de la presión vertical efectiva en el campo; es decir, su rigidez (o deformabilidad) está supeditada más al pegamento entre partículas que a la presión vertical efectiva.

Por otra parte, la adhesión entre los granos es relativamente débil, lo que ocasiona que, además de la deformación por consolidación primaria, en estos suelos se manifieste en forma notable el fenómeno de deformación por consolidación secundaria. Así, las arcillas sensitivas exhiben diversas clases de curvas de consolidación, siendo tres de ellas típicas: (a) curvas tipo I, (b) curvas tipo II, y (c) suelos con cavidades (Zeevaert, 1986).

En este trabajo se presenta un procedimiento para la predicción de las deformaciones a largo plazo de las arcillas sensitivas, que toma en cuenta su estructura floculenta, su rigidez debida al pegamento y los fenómenos de compresión por consolidación primaria y consolidación secundaria.

Se incluyen al final del artículo dos ejemplos de aplicación.

2 CARACTERÍSTICAS DE LAS ARCILLAS SENSITIVAS

Las arcillas que se forman por sedimentación en cuerpos de agua se pueden dividir en dos grupos: (a) aquellas que se depositan en agua salada, y (b) aquellas que se sedimentan en agua dulce. En las primeras los cationes del agua reducen la carga eléctrica negativa de la

superficie de las partículas del suelo, y favorecen la unión de dichas partículas; este fenómeno da lugar a una estructura "floculenta" (o estructura en "castillo de naipes") del suelo, el cual queda formado por "cadenas", cuyos eslabones son los propios granos del mismo. A estos sedimentos los denominamos "arcillas sensitivas".

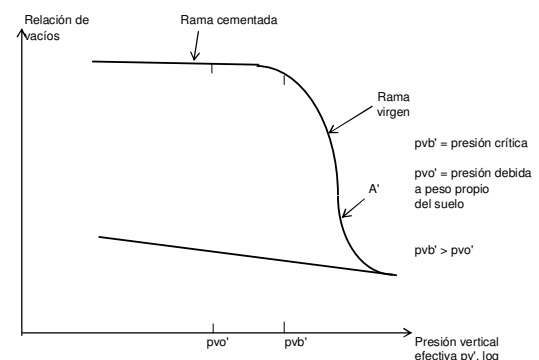


Figura 1. Curva de compresibilidad. Arcilla sensitiva

Por el contrario, las partículas que se depositan en agua dulce no se unen entre sí, formando una estructura "dispersa". A estos suelos los llamamos "arcillas no sensitivas".

Las partículas de las arcillas sensitivas quedan unidas por un "pegamento" (pegamento que por cierto es de baja magnitud). Si el incremento de carga sobre este suelo es pequeño y no rompe la liga entre partículas, la deformación del mismo suele ser pequeña, mientras que si el incremento es de magnitud tal que destruye dicha liga, la deformación del suelo es muy grande, lo que conduce a fuertes asentamientos de las obras construidas sobre él.

Consideremos la curva de compresibilidad de una arcilla sensitiva mostrada en la figura 1. Sea p_{v0}' la presión

vertical efectiva inicial, y p_{vb}' la presión para la cual se rompe la unión entre partículas, a la cual denominamos presión crítica. Esta presión crítica p_{vb}' define, en estos sedimentos, una perturbación del esqueleto estructural que cambia considerablemente las propiedades de compresibilidad del material (Zeevaert, 1973). Al intervalo de presión efectiva comprendido entre la presión inicial p_{vo}' y la presión crítica p_{vb}' le llamamos rigidez por fuerzas electromagnéticas, o simplemente rigidez electromagnética $\Delta p_{vb}'$:

$$\Delta p_{vb}' = p_{vb}' - p_{vo}' \quad (1)$$

Como hemos comentado, las arcillas de origen marino son del tipo sensitivo.

Terzaghi y Peck (1967) comentan que si una arcilla tiene un límite líquido mayor que 100% y si su contenido natural de agua a una profundidad mayor que 6 ó 9 m bajo la superficie es mayor que el límite líquido, o si presenta un alto contenido de materia orgánica, es probable que se comporte como arcilla sensitiva (a estos materiales estos autores los denominan arcillas *extrasensitivas*). Señalan que la arcilla de la ciudad de México, ciertas arcillas marinas del sureste de Canadá y de los países escandinavos, y varios suelos finos con alto contenido de sustancia orgánica, son del tipo sensitivo.

Una vez que se forma un estrato de arcilla sensitiva, con el tiempo se van sedimentando sobre él otros suelos. Con el incremento de carga, y con el tiempo, las partículas sufren un asentamiento por consolidación primaria, el cual en general es de pequeña magnitud, porque los granos están unidos entre sí. Adicionalmente, las partículas del suelo se acomodan entre ellas, y debido a la naturaleza viscosa del agua que rodea a dichas partículas, éstas “resbalan” unas sobre otras, dando lugar al fenómeno de consolidación secundaria, el cual se manifiesta de manera explícita cuando ya se ha disipado el incremento de presión de poro por la aplicación de la carga (es decir, cuando ha terminado la consolidación primaria).

La reducción de la relación de vacíos de la arcilla hace que se acreciente la conexión entre las partículas, lo que ocasiona un aumento de la rigidez de la masa de suelo. Este incremento del pegamento depende de la edad del depósito y de la magnitud de la carga aplicada (Bjerrum, 1973).

Por ejemplo, la arcilla sensitiva de Drammen ha ganado rigidez durante 3000 años que ha soportado la presión vertical efectiva que tiene actualmente. La arcilla de la ciudad de México, a 3.5 m de profundidad, tiene una edad de 33500 años (Reséndiz y coautores, 1970), lapso en que ha ganado rigidez por carga vertical efectiva. Aun sometida a esfuerzos cortantes de magnitud significativa, las arcillas muestran una preconsolidación aparente por el efecto de la edad (Tavenas y Leroueil, 1987).

Sea p_{vb}' la presión vertical efectiva para la cual se rompe el enlace entre partículas, y p_{vo}' la presión vertical efectiva inicial debida a peso propio del suelo a la profundidad z . Por lo comentado en los párrafos

anteriores, en arcillas sensitivas siempre se cumple que $(p_{vb}' - p_{vo}') > 0$. Como dijimos antes, a la diferencia $(p_{vb}' - p_{vo}')$ se le denomina rigidez de liga entre partículas (*bond strength*; Terzaghi y Peck, 1967). Cabe señalar que en las arcillas marinas de Noruega se ha encontrado que el cociente $p_{vb}'/p_{vo}' \cong 1.6$ (Bjerrum, 1967). Es interesante notar que, tomando datos de la arcilla de la ciudad de México, resulta también que el cociente $p_{vb}'/p_{vo}' \cong 1.6$.

Por lo tanto, para que los asentamientos no sean excesivos, podemos adoptar para fines prácticos $p_{vb}'/p_{vo}' = 1.5$, y verificar que el incremento de esfuerzo normal vertical no sobrepase la cantidad $(p_{vb}' - p_{vo}')$, es decir

$$\sigma_z \leq (p_{vb}' - p_{vo}') = 1.5p_{vo}' - p_{vo}' = 0.5 p_{vo}' \quad (2)$$

En el caso de una cimentación parcialmente compensada, el incremento neto de presión no debe exceder $(p_{vb}' - p_{vo}')$.

Se pueden usar valores mayores de $\Delta p_{vb}'$ (ecuación 1), en caso de que la arcilla exhiba un grado adicional de rigidez. Para esto, se pueden emplear resultados de pruebas de consolidación, o de ensayos de campo de tipo eléctrico (Santoyo y coautores, 1989).

Por otra parte, en vista de que el pegamento entre partículas es débil, éstas “resbalan” entre sí, lo que conduce a que, como señalamos antes, además de la compresión por consolidación primaria, ocurra una compresión adicional por consolidación secundaria en esta clase de suelos, la cual es del mismo orden de magnitud que la primaria.

3 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Consideremos un elemento de suelo sometido a carga vertical (figura 2). Si aplicamos un incremento diferencial de esfuerzo $d\sigma_z$, la deformación unitaria vale

$$d\varepsilon_z = \frac{1}{A} \frac{d\sigma_z}{\left(\frac{p_{veo} + \sigma_z}{p_a} \right)^s} \quad (3)$$

siendo

$$p_{veo} = p_{cie} + p_{vo}'$$

p_{cie} = presión de confinamiento interno equivalente

p_{vo}' = presión vertical efectiva sobre el elemento

Pero

$$d\varepsilon_z = - \frac{d(\Delta z)}{\Delta z} \quad (4)$$

Es decir

$$\frac{d(\Delta z)}{\Delta z} = -\frac{1}{A} \frac{\frac{d\sigma_z}{p_a}}{\left(\frac{p_{veo} + \sigma_z}{p_a}\right)^s} \quad (5)$$

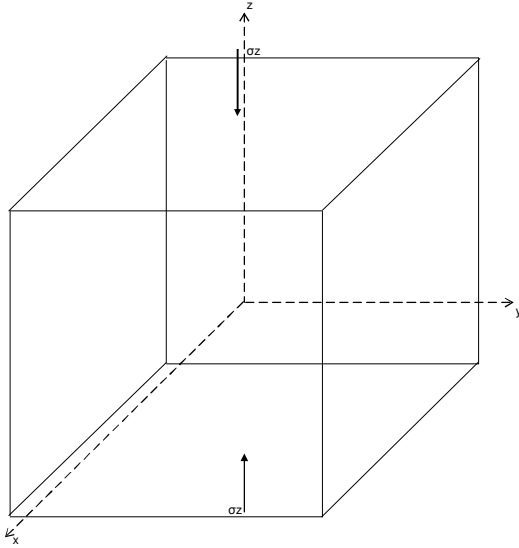


Figura 2. Incremento de esfuerzo vertical por una obra de ingeniería

Como mencionamos antes, las arcillas sensitivas tienen una estructura floculenta, lo que hace que su rigidez se mantenga aproximadamente constante, y no dependa, de manera significativa, de la magnitud de la presión vertical efectiva. Podemos usar entonces $s = 0$ en la ecuación 5. Así

$$\frac{d(\Delta z)}{\Delta z} = -\frac{1}{A} \frac{d\sigma_z}{p_a}$$

$$\int_{\Delta z_o}^{\Delta z_f} \frac{d(\Delta z)}{\Delta z} = -\frac{1}{Ap_a} \int_0^{\sigma_z} d\sigma_z$$

$$\ln\left(\frac{\Delta z_f}{\Delta z_o}\right) = -\frac{\sigma_z}{Ap_a}$$

$$\frac{\Delta z_f}{\Delta z_o} = \exp\left(-\frac{\sigma_z}{Ap_a}\right)$$

Pero (figura 3)

$$\Delta z_f = \Delta z_o + \Delta w$$

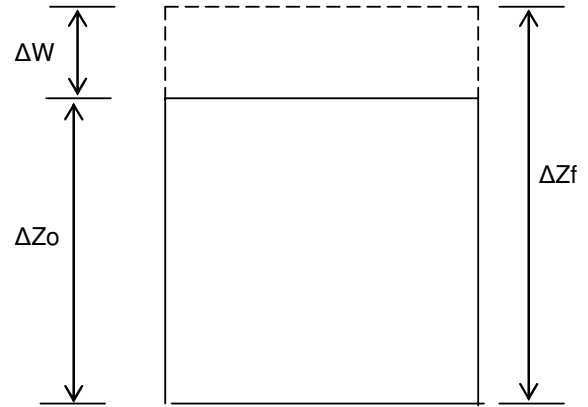


Figura 3. Deformación de un elemento de suelo de espesor inicial Δz_o

$$\frac{\Delta z_f}{\Delta z_o} = \frac{\Delta z_o}{\Delta z_o} + \frac{\Delta w}{\Delta z_o}$$

$$\Delta w = \left[\frac{\Delta z_f}{\Delta z_o} - 1 \right] (\Delta z_o)$$

Hagamos $\delta_z = -\Delta w$

$$\delta_z = \left[1 - \frac{\Delta z_f}{\Delta z_o} \right] (\Delta z_o)$$

$$\delta_z = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_z}{Ap_a}\right) \right] (\Delta z_o) \quad (6)$$

Por otra parte, la ley de Hooke establece que

$$d\varepsilon_z = \frac{1}{E} d\sigma_z \quad (7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \sigma_z$$

$$-\frac{\Delta w}{\Delta z_o} = \frac{1}{E} \sigma_z$$

$$\delta_z = \frac{\Delta z_o}{E} \sigma_z \quad (8)$$

Si hacemos $s = 0$ en la ecuación 4 y la comparamos con la ecuación 7

$$E \approx A p_a \quad (9)$$

La deformación vertical δ_z de un elemento de suelo de espesor inicial Δz_o , sometido a un incremento de esfuerzo vertical σ_z , la podemos calcular usando la ecuación 6 ó la ecuación 8. Por otra parte, la relación entre los módulos A y E viene dada por la ecuación 9.

4 EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES

4.1 Nota preliminar

La compresión a largo plazo de una arcilla sensitiva, en la rama "cementada" de la curva de compresibilidad (figura 1), se debe a la suma de las deformaciones por consolidación primaria y por consolidación secundaria

$$\delta_t = \delta_{Pt} + \delta_{St} \quad (10)$$

δ_{Pt} = deformación por consolidación primaria
 δ_{St} = deformación por consolidación secundaria

4.2 Consolidación primaria

La compresión por consolidación primaria se obtiene con las siguientes expresiones:

Deformación al término de la consolidación primaria

$$\delta_p = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_z}{A_p p_a}\right) \right] (\Delta z_o) \quad (11)$$

O bien

$$\delta_p = \frac{\Delta z_o}{E_p} \sigma_z \quad (12)$$

$$E_p = A_p p_a \quad (13)$$

Deformación para un tiempo t (Juárez Badillo y Rico, 1976)

$$\delta_{Pt} = U \delta_p \quad (14)$$

U = grado o porcentaje de consolidación primaria

U = F (T)

$$T = \frac{C_v t}{(\Delta z_e)^2} \quad (15)$$

T = factor tiempo

C_v = coeficiente de consolidación

Δz_e = espesor efectivo del estrato que se está consolidando

4.3 Consolidación secundaria

Consideremos el modelo de viscosidad intergranular de la figura 4 (unidad Z; Zeevaert, 1986), que consiste en un amortiguador N con coeficiente de fluidez Φ_N y otro amortiguador 2 cuya fluidez disminuye con el tiempo.

En el amortiguador N

$$\dot{\epsilon}_N = \Phi_N \sigma_N \quad (16)$$

En el amortiguador 2

$$\dot{\epsilon}_2 = \frac{a}{b+t} \sigma_2$$

Por equilibrio

$$\sigma_z = \sigma_N + \sigma_2 \quad (17)$$

Como los amortiguadores están en paralelo

$$\dot{\epsilon}_{St} = \dot{\epsilon}_N = \dot{\epsilon}_2 \quad (18)$$

Sustituyendo en la ecuación 17

$$\sigma_z = \frac{1}{\Phi_N} \dot{\epsilon}_N + \frac{b+t}{a} \dot{\epsilon}_2$$

$$\sigma_z = \left(\frac{1}{\Phi_N} + \frac{b+t}{a} \right) \dot{\epsilon}_{St}$$

$$\dot{\epsilon}_{St} = \frac{a}{\frac{a}{\Phi_N} + b+t} \sigma_z \quad (19)$$

Considerando $\sigma_z = \text{constante}$, integramos la ecuación 19

$$\epsilon_{St} = a \sigma_z \ln \left(b+t + \frac{a}{\Phi_N} \right) \Big|_0^t$$

$$\varepsilon_{St} = a\sigma_z \ln \left(\frac{b+t + \frac{a}{\Phi_N}}{b + \frac{a}{\Phi_N}} \right) \quad (20)$$

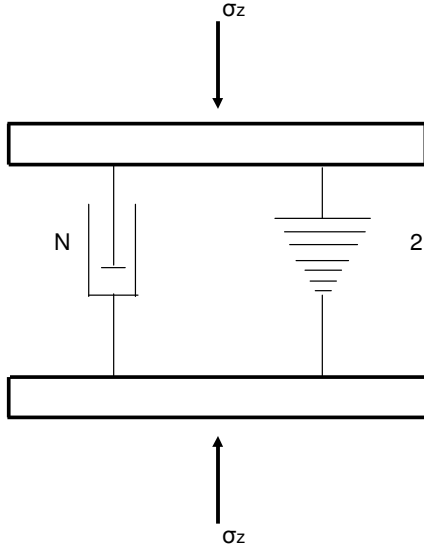


Figura 4. Modelo de viscosidad intergranular. Unidad Z (Zeevaert, 1986)

En el modelo de Newton, de acuerdo con las ecuaciones 16 y 19

$$\sigma_N = \frac{1}{\Phi_N} \dot{\varepsilon}_{St} = \frac{\frac{a}{\Phi_N} \sigma_z}{\frac{a}{\Phi_N} + b + t}$$

Para $t = 0 \rightarrow \sigma_N = \sigma_z$, de donde $b = 0$

Reemplazando en la ecuación 20

$$\varepsilon_{St} = a\sigma_z \ln \left(\frac{t + \frac{a}{\Phi_N}}{\frac{a}{\Phi_N}} \right) \quad (21)$$

Por otra parte $\ln x = 2.31 \log_{10} x = 2.31 \log x$

Tomando en cuenta un gran número de modelos Z en serie

$$\varepsilon_{St} = 2.31 \bar{a} \sigma_z \log \left(1 + \frac{\bar{\Phi}_N}{a} t \right) \quad (22)$$

Pero

$$\varepsilon_{St} = \frac{\delta_{St}}{\Delta z_o}$$

Por lo tanto

$$\delta_{St} = 2.31 \bar{a} \sigma_z (\Delta z_o) \log \left(1 + \frac{\bar{\Phi}_N}{a} t \right) \quad (23)$$

$$\bar{\delta}_{St} = C_t \log [1 + \lambda t] \quad (24)$$

siendo

$$C_t = 2.31 \bar{a} (\Delta z_o) \sigma_z \quad (25)$$

$$\lambda = \frac{\bar{\Phi}_N}{a} \quad (26)$$

La ecuación 23 la podemos poner de la siguiente forma

$$\delta_{St} = C_t \log \left(1 + \frac{\Phi_N}{a} \frac{C_v}{(\Delta z_e)^2} \frac{(\Delta z_e)^2}{C_v} t \right)$$

Pero (ecuación 14)

$$T = \frac{C_v t}{(\Delta z_e)^2}$$

$$\delta_{St} = C_t \log \left(1 + \frac{\Phi_N}{a} \frac{(\Delta z_e)^2}{C_v} T \right)$$

$$\delta_{St} = C_t \log(1 + \xi T) \quad (27)$$

donde

$$\xi = \frac{\bar{\Phi}_N}{a} \frac{(\Delta z_e)^2}{C_v} \quad (28)$$

Por otra parte, de la ecuación 6 despejamos A

$$A = - \frac{\sigma_z}{p_a \ln \left(1 - \frac{\delta_z}{\Delta z_o} \right)} \quad (29)$$

Definimos A_{cs} de la siguiente forma

$$A_{cs} = -\frac{\sigma_z}{p_a \ln\left(1 - \frac{C_t}{\Delta z_o}\right)} \quad (30)$$

O bien

$$C_t = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_z}{A_{cs} p_a}\right)\right] (\Delta z_o) \quad (31)$$

También

$$E_{cs} = \frac{\sigma_z (\Delta z_o)}{C_t} \quad (32)$$

$$C_t = \frac{\sigma_z (\Delta z_o)}{E_{cs}} \quad (33)$$

$$E_{cs} = A_{cs} p_a \quad (34)$$

5 EVOLUCIÓN DE LAS DEFORMACIONES

5.1 Nota preliminar

Como señalamos antes, la deformación de un elemento de suelo, en el tramo "cementado" de la curva de compresibilidad (figura 1), está dada por la ecuación 10

$$\delta_t = \delta_{pt} + \delta_{st} \quad (35)$$

$$\delta_t = \delta_p U + C_t \log(1 + \xi T) \quad (36)$$

La compresión por consolidación primaria la calculamos usando las ecuaciones 11 ó 12 y la ecuación 14. La deformación por consolidación secundaria la obtenemos utilizando las ecuaciones 27 y 31.

5.2 Determinación de propiedades

Desde el punto de vista práctico, distinguimos tres formas de curvas de consolidación: tipo I, tipo II y suelos con cavidades, las cuales se exhiben en las figuras 5, 6 y 7, respectivamente. Por razones de espacio, veremos como ilustración únicamente la determinación de propiedades para curvas tipo I (figura 5). En esta clase de curvas el módulo $\xi = 5$ (Zeevaert, 1986). En la curva de consolidación se toman dos puntos para tiempos grandes. En la recta de consolidación secundaria

$$\delta_{t_2} - \delta_{t_1} = C_t \log\left(\frac{1 + \xi T_2}{1 + \xi T_1}\right)$$

$$\delta_{t_2} - \delta_{t_1} \cong C_t \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = C_t \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (37)$$

Desde el punto de vista práctico, distinguimos tres formas de curvas de consolidación: tipo I, tipo II y suelos con cavidades, las cuales se exhiben en las figuras 5, 6 y 7, respectivamente. Por razones de espacio, veremos como ilustración únicamente la determinación de propiedades para curvas tipo I (figura 5). En esta clase de propiedades el módulo $\xi = 5$ (Zeevaert, 1986). En la curva de consolidación se toman dos puntos para tiempos grandes. En la recta de consolidación secundaria

$$\delta_{t_2} - \delta_{t_1} = C_t \log\left(\frac{1 + \xi T_2}{1 + \xi T_1}\right)$$

$$\delta_{t_2} - \delta_{t_1} \cong C_t \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = C_t \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (37)$$

$$C_t \cong \frac{\delta_{t_2} - \delta_{t_1}}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (38)$$

Por otra parte, para $U = 100\%$, $T \approx 2$

Sea δ_B = deformación correspondiente al 100% de consolidación primaria. Reemplazando en la ecuación 36

$$\delta_B = \delta_p + C_t \log[1 + 5(2)]$$

$$\delta_p = \delta_B - 1.04 C_t \quad (39)$$

A_p se obtiene de la ecuación 11

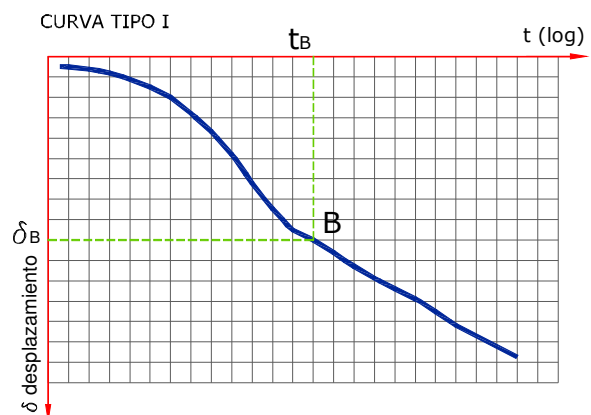


Figura 5. Curva de consolidación tipo I

$$A_p = - \frac{\sigma_z}{p_a \ln \left(1 - \frac{\delta_p}{\Delta z_o} \right)} \quad (40)$$

Para $U = 50\%$, $T = 0.197$

$$\bar{\delta}_{50} = \bar{\delta}_p/2 + C_t \log [1 + 5(0.197)]$$

$$\bar{\delta}_{50} = \bar{\delta}_p/2 + 0.298 C_t \quad (41)$$

Haciendo $U = 50\%$ en la ecuación 15, $T = 0.197$

$$C_v = \frac{0.197(\Delta z_e)^2}{t_{50}} \quad (42)$$

t_{50} lo medimos directamente en la curva de consolidación con $\bar{\delta}_{50}$.

5.3 Ejemplos

Ejemplo 1

Sea la curva de consolidación de la figura E-1 (Zeevaert, 1973), para la cual: $p_{v0}' = 0.8 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_z = 0.3 \text{ kg/cm}^2$, $\Delta z_o = 1.675 \text{ cm}$. Determinar las propiedades A_p , A_{cs} y C_v .

Solución

En la curva de la figura E-1 medimos

$$\bar{\delta}_B = 0.0185 \text{ cm}$$

$$t_B = 750 \text{ s}$$

$$\bar{\delta}_{t1} = 0.025 \text{ cm}, t_1 = 17\,000 \text{ s}$$

$$\bar{\delta}_{t2} = 0.028 \text{ cm}, t_2 = 80\,000 \text{ s}$$

Reemplazando en las ecuaciones 38 y 30

$$C_t \cong \frac{0.028 - 0.025}{\log \left(\frac{80000}{17000} \right)} = 0.00446 \text{ cm}$$

$$A_{cs} = - \frac{0.3}{1.03 \ln \left(1 - \frac{0.00446}{1.675} \right)} = 109.2$$

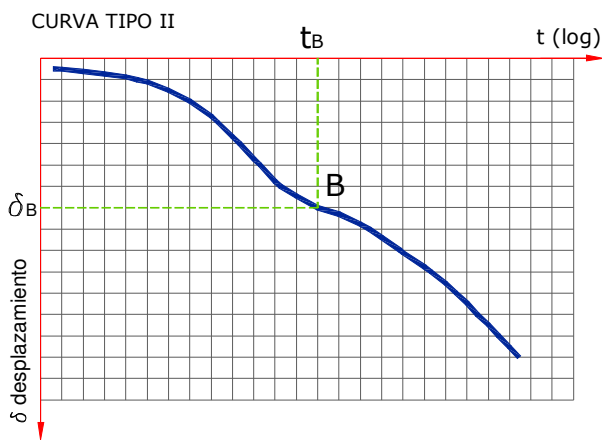


Figura 6. Curva de consolidación tipo II

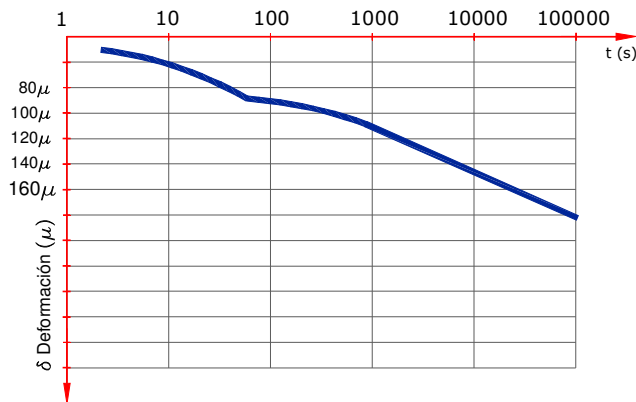


Figura 7. Curva de consolidación. Suelo con cavidades

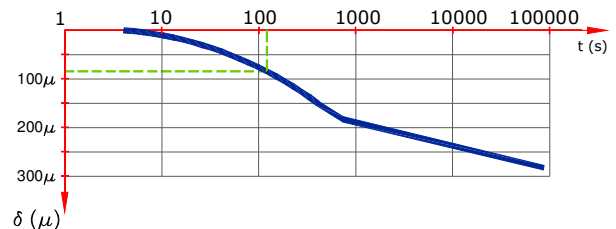


Figura E-1. Curva de consolidación. Ejemplo 1

Reemplazamos en las ecuaciones 39 y 40
 $\delta_p = 0.0185 - 1.04(0.00446) = 0.01386 \text{ cm}$

$$A_p = -\frac{0.3}{1.03 \ln\left(1 - \frac{0.01386}{1.675}\right)} = 35.1$$

Sustituyendo en las ecuaciones 41 y 42
 $\delta_{50} = 0.00693 + 0.298(0.00446) = 0.00826 \text{ cm}$
 En la curva de consolidación medimos: $t_{50} = 130 \text{ s}$

$$C_v = \frac{0.197(0.8375)^2}{130} = 0.001063 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Ejemplo 2

Para el cajón de cimentación mostrado en la figura E-2, calcular los asentamientos diferidos a 6 meses y a un año, después de construido el inmueble, debidos a la consolidación del estrato de arcilla sensitiva.

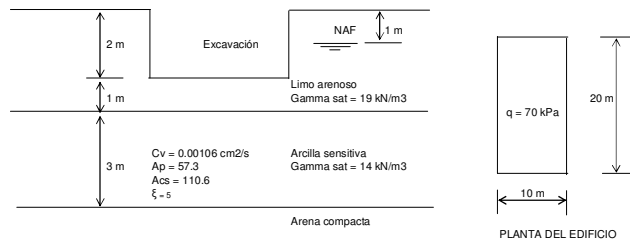


Figura E-2. Estratigrafía y propiedades. Ejemplo 2

El incremento neto de carga vale: $q_n = 70 - 19(2) = 32 \text{ kPa}$. El incremento de esfuerzo normal vertical a la mitad del estrato es
 $\sigma_z = 30.607 \text{ kPa}$

Tiempo igual a 6 meses
 $t = 6 \text{ meses} = 6(30)(86400) = 15\,552\,000 \text{ s}$
 Cálculo del asentamiento total por consolidación primaria. Usamos la ecuación 11

$$\delta_p = \left[1 - \exp\left(-\frac{30.607}{57.3(101.3)}\right)\right](3) = 0.0158 \text{ m}$$

$$\delta_p = 1.58 \text{ cm}$$

Utilizamos la ecuación 15

$$T = \frac{0.00106(15552000)}{(150)^2} = 0.7327$$

$U = 86.5\%$
 Sustituimos en la ecuación 14
 $\delta_{pt} = \delta_6 \text{ meses} = 1.58(86.5/100) = 1.36 \text{ cm}$
 Consolidación secundaria
 Usamos la ecuación 31

$$C_t = \left[1 - \exp\left(-\frac{30.607}{110.6(101.3)}\right)\right](3) = 0.00818 \text{ m}$$

$C_t = 0.818 \text{ cm}$
 Reemplazamos en la ecuación 27

$$\delta_{st} = 0.818 \log(1 + 5(0.7327)) = 0.547 \text{ cm}$$

$\delta_t = 1.36 + 0.547 = 1.907 \text{ cm}$
 Tiempo igual a un año:
 $t = 365.25(86400) = 31\,557\,600 \text{ s}$

$$T = \frac{0.00106(31557600)}{(150)^2} = 1.487$$

$U = 100\%$ (tabla 1)
 Sustituimos en la ecuación 14
 $\delta_{pt} = \delta_1 \text{ año} = 1.58(1) = 1.58 \text{ cm}$
 $\delta_{st} = 0.818 \log(1 + 5(1.487)) = 0.758 \text{ cm}$
 $\delta_t = 1.58 + 0.758 = 2.34 \text{ cm}$

6 CONCLUSIONES

La estructura floclulenta de las arcillas sensitivas da lugar a que su rigidez, en la rama "cementada" de la curva de compresibilidad (figura 1), dependa más del pegamento entre las partículas que de la presión vertical efectiva en el lugar.

La deformación a largo plazo de un estrato de arcilla sensitiva, en el tramo "cementado", se debe tanto al fenómeno de consolidación primaria como al fenómeno de consolidación secundaria. La magnitud de esta última es del mismo orden que la magnitud de la consolidación primaria.

En este trabajo se presentó un procedimiento para la predicción de las deformaciones a largo plazo de las arcillas sensitivas (como la arcilla de la ciudad de México), en la rama "cementada", que toma en cuenta la estructura floclulenta del suelo, los fenómenos de consolidación primaria y secundaria, así como las diferentes curvas de consolidación de la arcilla (tipo I, tipo II y suelos con cavidades).

REFERENCIAS

Bjerrum, L (1967). "Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings", *Géotechnique*, 17: 81-118

- Bjerrum, L (1973). "Problems of soil mechanics and construction on soft clays", *Proc VIII Int Conf Soil Mech Found Eng*: 111-159, Moscú
- Reséndiz, D, Springall, G, Rodríguez, J M y Esquivel, R (1970). "Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la ciudad de México", *V Reunión Nacional Mec Suelos*: IV-1 a IV-59, Soc Mex Mec Suelos, México, D F
- Santoyo, E, Riqing, L X y Ovando, E (1989). *El Cono en la Exploración Geotécnica*, TGC Geotecnia
- Tavenas, F y Leroueil, S (1987). "Laboratory and in-situ stress-strain-time behavior of soft clays: a state-of-the-art", *Proc Int Symp Geot Eng on Soft Soils*, vol 2: 3-48, Soc Mex Mec Suelos, México, D F
- Terzaghi, K y Peck, R B (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed, Wiley
- Zeevaert, L (1973). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, Van Nostrand Reinhold
- Zeevaert, L (1986). "Consolidation in the intergranular viscosity of highly compressible soils", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM, STP 892: 257-281, R N Yong y F C Townsend eds, Filadelfia