



# CURSO DE GEOTECNIA I

(Código: 236161)

M. Sc. Carlos Medina  
Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Sucre

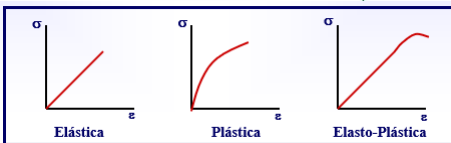


1



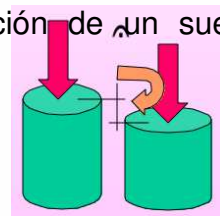
## CONSOLIDACIÓN

- Todos los materiales experimentales se los somete a esfuerzos



- Las características de esfuerzo-deformación de un suelo dependerá de:

1. Tipo de suelo
2. De la forma en la que es cargado

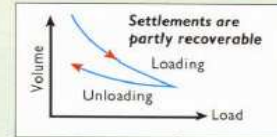
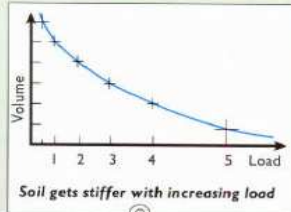
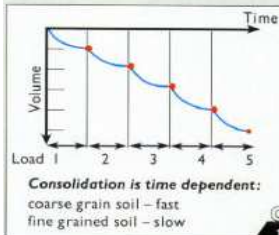
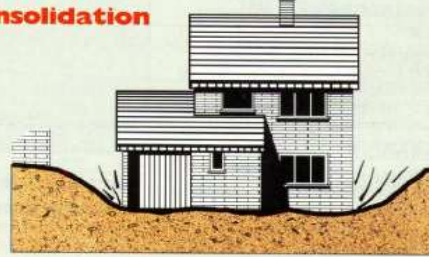
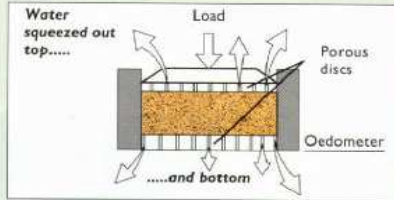


- Estas deformaciones no siempre se producen instantáneamente ante la aplicación de las cargas, sino a lo largo del tiempo

2

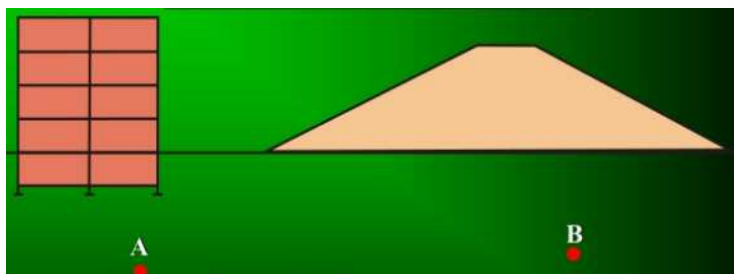


## The Theory of Consolidation



## CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

Cuando un depósito de suelo saturado es sometido a un incremento de los esfuerzos totales, como un resultado de las cargas aplicadas por la construcción de un edificio o un terraplén, se produce en el suelo un exceso de presión intersticial.



$$\sigma = \sigma' + \mu$$

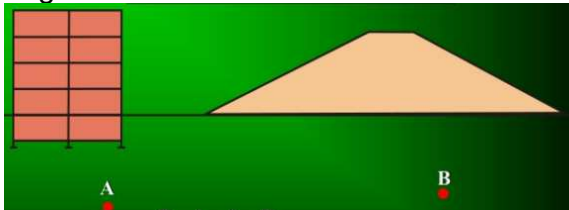
$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu$$





## CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

Puesto que el agua no puede resistir esfuerzos cortantes, este exceso de presión intersticial se disipará mediante un flujo de agua hacia el exterior.



$$\sigma = \sigma' + \mu$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu$$

donde

$\Delta\sigma'$  = incremento en el esfuerzo efectivo

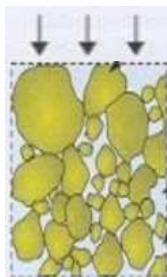
$\Delta\mu$  = incremento en la presión del agua en los poros



5



## CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS



$$\sigma = \sigma' + \mu$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu$$

Como el agua es incompresible comparada con el esqueleto del suelo (partículas sólidas)

en el tiempo  $t = 0$   $\Delta\sigma' = 0$   $\Delta\sigma = \Delta\mu$

En el tiempo  $0 < t < \infty$ , el exceso de presión de poros se va disipando (disminuyendo) en la medida que el agua sale del suelo

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu \quad (\Delta\sigma' > 0 \text{ y } \Delta\mu < \Delta\sigma)$$

En el tiempo  $t = \infty$ , el exceso de presión de poro se disipará por completa al drenar el agua del suelo, por lo que

$$\Delta\mu = 0$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma'$$



6



### CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

Esta disipación de la presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior es lo que se denomina consolidación, proceso que tiene dos consecuencias principales:

- Conduce a una reducción del volumen de los poros, y por lo tanto, a una reducción del volumen total de la masa de suelo. Esta disminución del volumen total se manifiesta con el asentamiento de la superficie del terreno lo cual genera un asentamiento de la estructura.

- Durante la disipación de la presión intersticial se produce un aumento del esfuerzo efectivo, incrementando con ello su resistencia al corte.



7



### ¿Qué suelos experimentan consolidación?

El proceso de consolidación es aplicable a todos los suelos, pero en la práctica sólo tiene interés en el caso de estructuras cimentadas en depósitos de arcilla.

Ya que en un suelo granular, tal como una arena, la permeabilidad es relativamente alta y por ello el exceso de presión de poros puede disiparse al instante. En consecuencia, el asentamiento de la estructura por lo general se termina antes de finalizar la construcción.



8



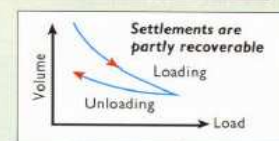
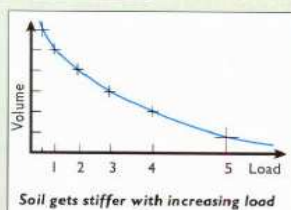
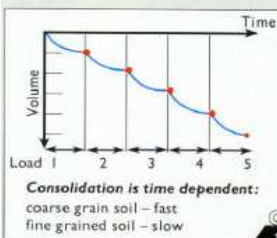
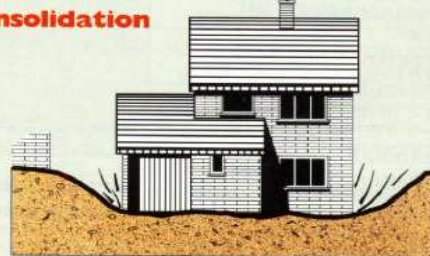
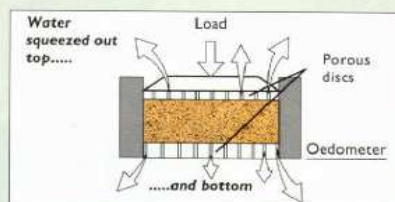
### ¿Qué suelos experimentan consolidación?

Por el contrario, los depósitos de arcilla a menudo tienen una permeabilidad muy baja y por ello la disipación del exceso de presión intersticial es un proceso muy lento. En consecuencia, una estructura puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.

La consolidación es un proceso que está en función del tiempo y del exceso de presión de poros.



### The Theory of Consolidation





## TIPOS DE ASENTAMIENTOS DE UN SUELO

$$S = S_i + S_c$$

$$S_c = S_{cp} + S_{cs}$$

$$S = S_i + S_{cp} + S_{cs}$$

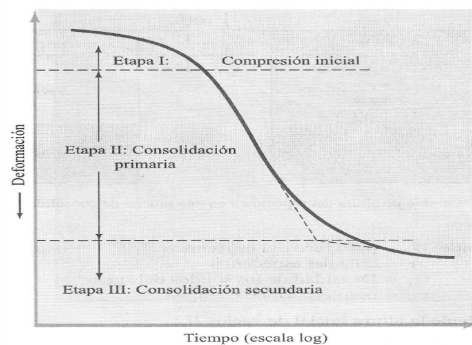


11



## CONSOLIDACIÓN

### Asentamientos relacionados con la consolidación



La consolidación es un proceso que está en función del tiempo y del exceso de presión de poros.

El proceso de extrusión del agua y la disipación del exceso de presión de poros se denomina *consolidación primaria* y los asentamientos relacionados con este se denominan *asentamientos por consolidación primaria*.



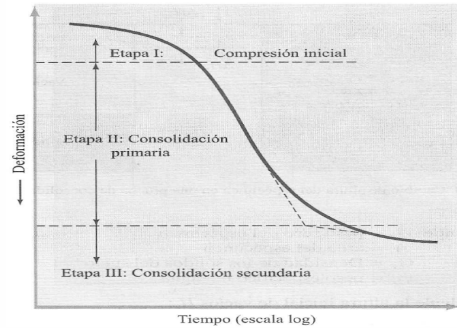
12





## CONSOLIDACIÓN

### Asentamientos relacionados con la consolidación



Después que la consolidación primaria a finalizado, la compresión adicional del suelo y los asentamientos asociados continúan a una razón muy lenta.

Como el resultado del reajuste plástico de los granos del suelo debido a nuevos cambios en los esfuerzos del suelo y al progresivo rompimiento de las partículas de arcilla y de sus lazos.



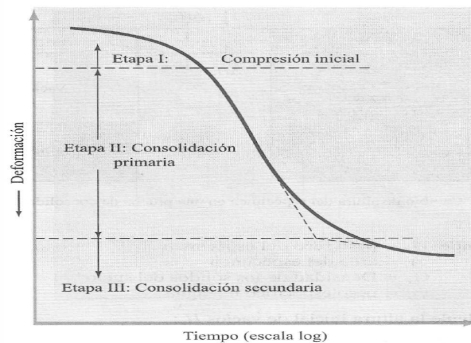
13



## CONSOLIDACIÓN

### Asentamientos relacionados con la consolidación

Este fenómeno es conocido como *compresión secundaria* y los asentamientos asociados con él son llamados *asentamientos por compresión secundaria*.



14



## TIPOS DE ASENTAMIENTOS DE UN SUELO

### a. Instantáneo

Instantáneo ( $S_i$ )

- se produce simultáneamente a la carga por un aumento de las tensiones totales en el suelo. Ocurre por el peso de la estructura, sin que tenga que ver nada con el desplazamiento del agua (sin drenaje). Domina en suelos granulares



15



## TIPOS DE ASENTAMIENTOS DE UN SUELO

### b. Consolidación primaria ( $S_c$ )



- asentamiento diferido en el tiempo causado por el drenaje de la humedad del suelo lo que produce cambios en las tensiones efectivas. La expulsión de humedad del suelo generalmente es un proceso a largo plazo que puede llevar de semanas a años.

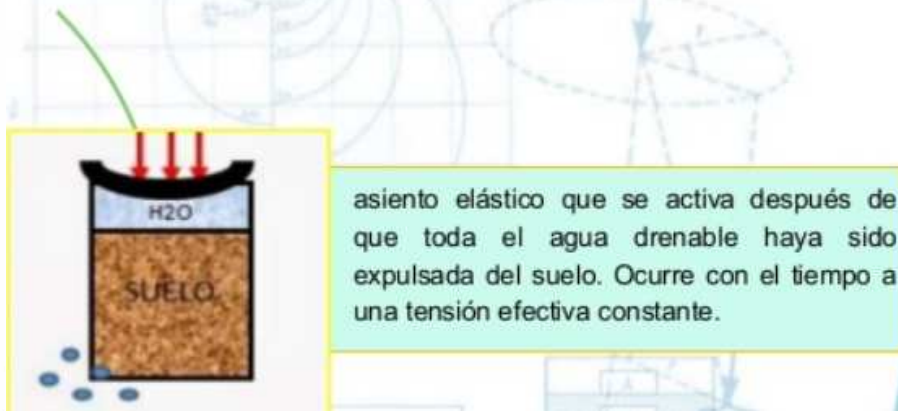






## TIPOS DE ASENTAMIENTOS DE UN SUELO

### c. Consolidación secundaria (Sc)



## CONSOLIDACIÓN

### CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

El proceso de consolidación involucra en tres dimensiones el flujo de agua intersticial y por consiguiente las deformaciones dentro de la masa de suelo.

Sin embargo, las teorías tridimensionales son muy complejas y difíciles de aplicar en la práctica. El caso más simple que puede tratarse matemáticamente es el caso unidimensional.

Esta es la teoría que se utiliza con mayor frecuencia en la práctica y es la base de la casi totalidad de los cálculos de asentamientos.

Por qué es importante el cálculo de los asentamientos de una estructura?





## CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

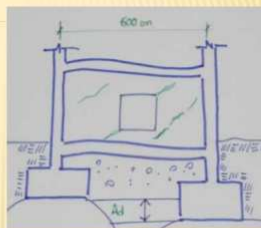
- ❑ ¿Por qué es necesario estudiar la consolidación?
- ❑ La teoría de consolidación nos permite estimar (o predecir) la magnitud de los asentamientos y la velocidad (tiempo) en que ellos se producirán.
- ❑ Asentamientos diferenciales pueden ocasionar el colapso de la estructura.



## CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

### ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

El asentamiento diferencial se refiere a la colocación desigual de las columnas de un edificio o de las cimentaciones que puede ocasionar daños a la estructura. El daño ocurre cuando la cimentación se hunde en las diferentes áreas en tiempos diferentes.





## CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

En el año de 1925, Terzaghi presentó su ecuación de la consolidación unidimensional de los suelos

### Hipótesis de la Teoría de Consolidación Unidimensional

- Suelo está totalmente saturado y es homogéneo.
- Tanto el agua como las partículas de suelo son incompresibles.
- La Ley de Darcy aplica para el flujo de agua.
- La variación de volumen es unidimensional en la dirección del esfuerzo aplicado.
- El coeficiente de permeabilidad en esta dirección permanece constante.
- La variación de volumen corresponde al cambio en la relación de vacíos.



21



## CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

La teoría de Terzaghi es una teoría de pequeñas deformaciones, en las que el incremento de la carga aplicada produce sólo pequeñas deformaciones en el suelo, por lo que el coeficiente de compresibilidad  $a_v$  y el coeficiente de permeabilidad de Darcy,  $k$ , permanecen constantes durante el proceso de consolidación.

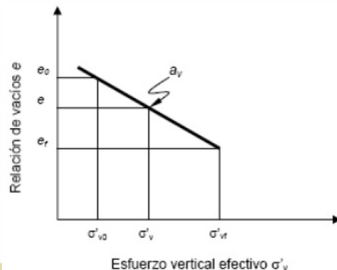
El coeficiente de compresibilidad  $a_v$  está dado por:

$$a_v = - \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}$$

Mide la razón de la variación de la relación de vacíos con los esfuerzos aplicados.



22





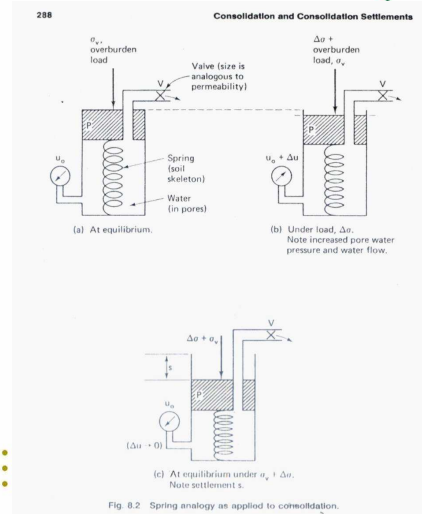
## CONSOLIDACIÓN

### CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

La ecuación del comportamiento de la consolidación unidimensional obtenida por Terzaghi es:

$$C_v \frac{\partial^2 U_e}{\partial z^2} = \frac{\partial U_e}{\partial t}$$

Define que la variación de la presión intersticial ( $u$ ) en el tiempo es una función de una valor constante  $C_v$  (Coeficiente de compresibilidad) afectado de la variación de segundo orden de la presión intersticial con respecto a la profundidad del estrato compresible



## CONSOLIDACIÓN

### CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

$$C_v = \frac{K_v (1 + e)}{\rho_w g a_v}$$

Coeficiente de consolidación vertical

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e}$$

Coeficiente de compresibilidad volumétrica

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

Factor de tiempo vertical

$$U_v = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_f}$$

Grado de consolidación

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log(p_2/p_1)}$$

Índice de compresión





### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

El ensayo de consolidación simula los principales hipótesis de Terzaghi, las cuales son la deformación vertical y el flujo vertical del agua intersticial.

- Para comenzar se coloca una muestra inalterada de suelo en un anillo metálico.



25

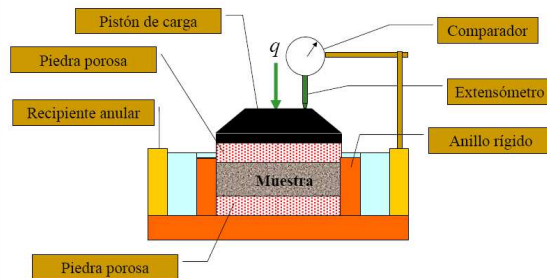


### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- La muestra de suelo por lo general es circular, con un diámetro de 60 mm y una altura de 20 mm.
- Se le colocan piedras porosas arriba y debajo de la muestra.



PIEDRA POROSA



26





## ENSAYO DE CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL



Anillo flotante



Anillo fijo



27



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- Se coloca la muestra con el anillo en la cámara de consolidación, y llevamos la cámara de consolidación hacia el cabezal de carga







### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- Se le aplica una carga al suelo por medio de una platina superior, una barra de carga, un brazo de palanca y pesas.



29



### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- Se nivela el brazo de palanca y se satura la muestra vertiéndole agua a la cámara de consolidación.



30



### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- Ajustamos el deformímetro en cero y se le aplica una carga al suelo por medio de una platina superior, una barra de carga, un brazo de palanca y pesas.



31



### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

- Se miden las deformaciones experimentadas por la muestra en los tiempos recomendados, estos son: 5 seg, 10 seg, 15 seg, 30 seg, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min, 480 min, 900 min. y 1440 min

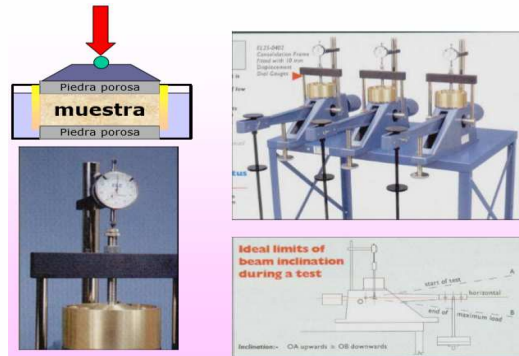


32



### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

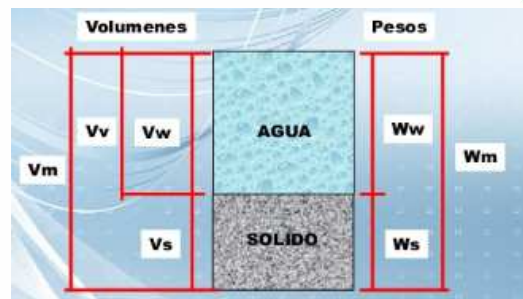
- Se repite el proceso para otra carga (2kg, 4 kg, 8kg, 16kg y 32kg) hasta que el esfuerzo aplicado exceda la presión total a la cual se piensa someter el suelo en el campo.



33



### ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL



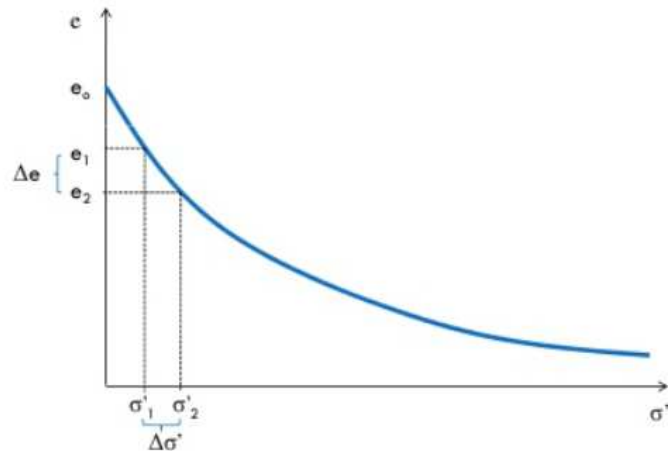
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

34



## ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

### Curva de Compresibilidad (Escala Natural)

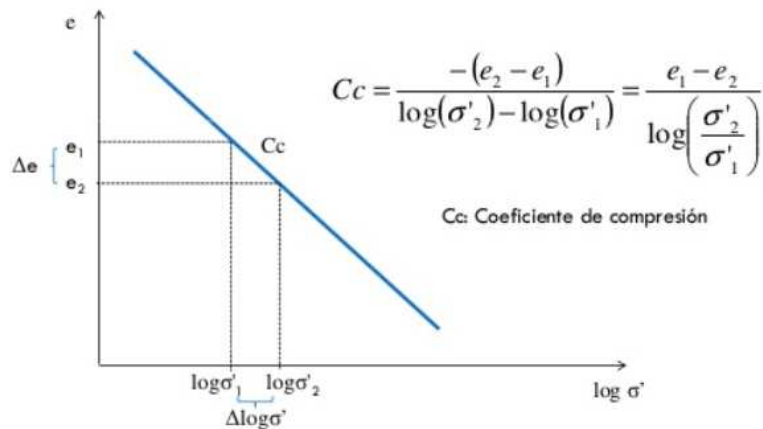


35



## ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

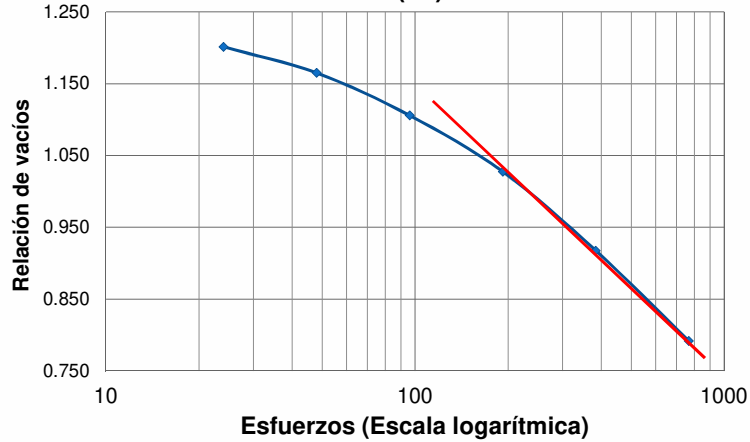
### Curva de Compresibilidad (Escala Semi-Logarítmica)



16



### Relac. vacíos (vs) esfuerzo



$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma} = \frac{e_1 - e_2}{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}$$

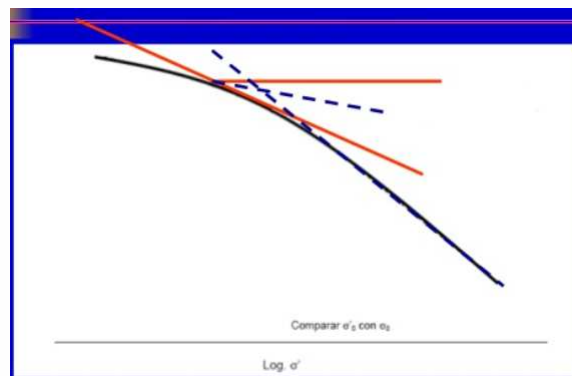
37



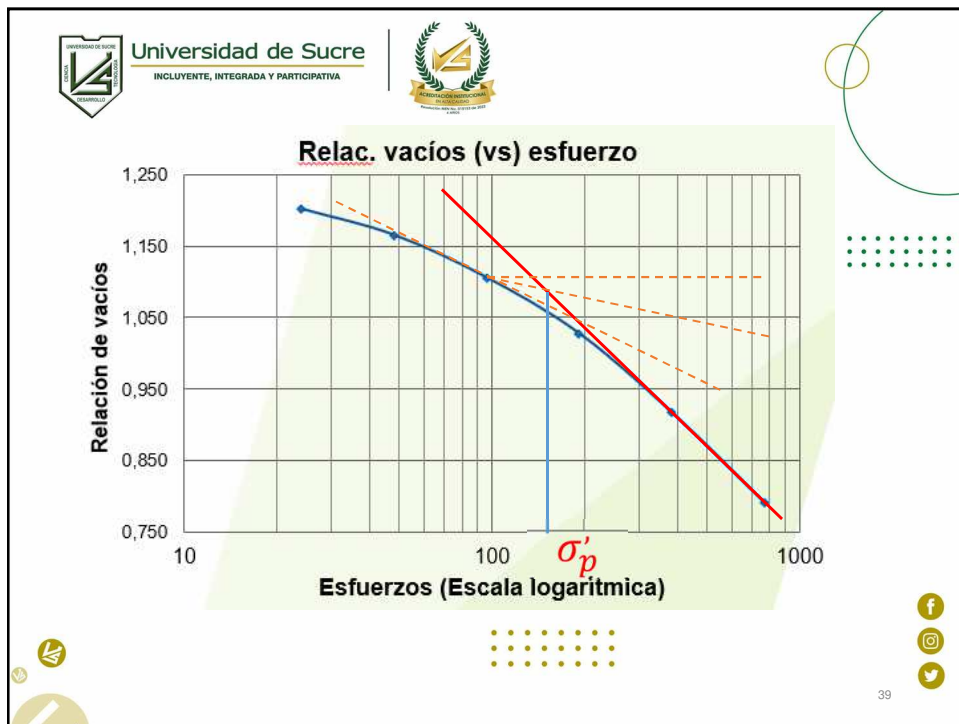
## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS


### ESFUERZO DE PRECONSOLIDACION


El esfuerzo de **preconsolidación** ( $\sigma'_p$ ), también llamado esfuerzo de precarga o esfuerzo de sobrecarga, es el máximo esfuerzo al que se ha visto sometido un suelo a lo largo de su historia geológica.



38

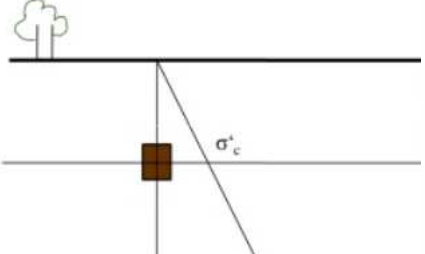



**Universidad de Sucre**  
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


**Facultad de Ingeniería**  
 1969

## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ARCILLAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS



$\sigma'_p = \sigma'_0$

$\sigma'_c$

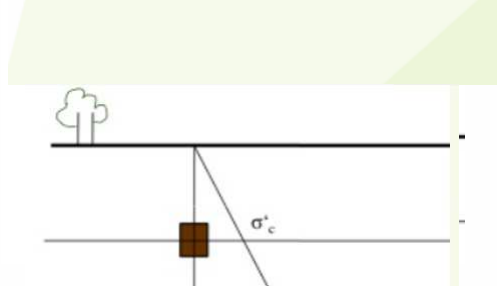
Esta condición de los suelos arcillosos se da cuando la formación de arcilla nunca ha sido sometida a cualquier carga mayor que la presión efectiva de sobrecarga. Este será el caso siempre que la altura del suelo sobre la formación de arcilla (y por lo tanto el peso del suelo sobre el estrato que causa la presión) ha sido más o menos constante a través del tiempo.

40





### ARCILLAS SOBRECONSOLIDADAS



$$\sigma'_p > \sigma'_0$$

Esta condición de los suelos arcillosos se obtiene cuando la formación de arcilla ha sido sometida en algún tiempo a una carga mayor que el esfuerzo efectivo de sobrecarga actual.

Esto ocurre siempre que la altura actual del suelo sobre la formación de arcilla es menor que la que ha tenido en algún tiempo en el pasado.

41



### ARCILLAS SOBRECONSOLIDADAS

Tal situación podría existir si una erosión significativa ocurrió sobre la superficie del terreno.

Un suelo puede ser consolidado debido a cambios en los esfuerzos totales o a cambios en la presión del agua en los poros. Estos dos cambios pueden alterar los esfuerzos efectivos de la masa de suelo. Dando como resultado que las arcillas sobreconsolidadas sean menos compresibles.

42



## RELACIÓN DE SOBRECONSOLIDACIÓN

Es la relación existente entre el esfuerzo de sobreconsolidación ( $\sigma'_p$ ) y el esfuerzo efectivo de sobrecarga actual ( $\sigma'_0$ ).

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}$$

Los suelos con un  $OCR = 1$  son Normalmente Consolidados

Los suelos con un  $OCR > 1$  son sobreconsolidados



43



## □ Coeficiente de Preconsolidación (OCR: Overconsolidation Ratio)

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o}$$

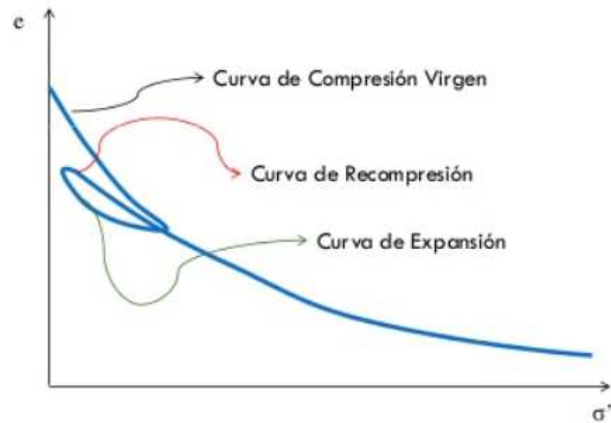
- $OCR = 1$ . Normalmente Consolidado
- $OCR > 1$ . Preconsolidado
- $2 < OCR < 3$  Ligeramente Preconsolidado
- $7 < OCR < 10$  Altamente Preconsolidado
- $OCR < 1$ . Imposible



44



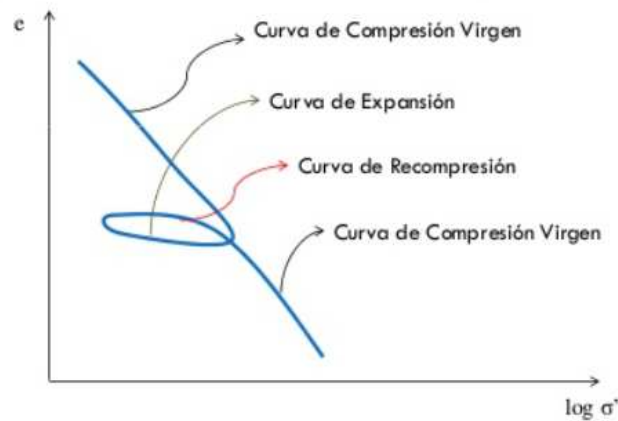
- Si se somete a incrementos-decrementos de carga :



45



- Representándola en escala Semi-logaritmica

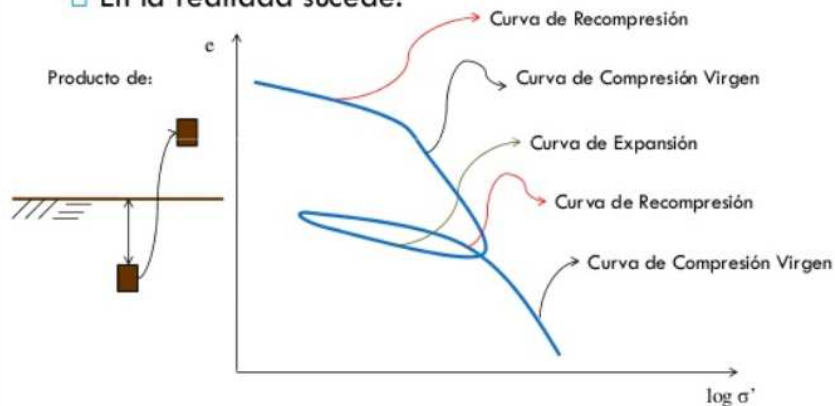


46



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

□ En la realidad sucede:



47



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### MÉTODOS APROXIMADOS Y VALORES DE $C_c$

En vista que los ensayos de consolidación son costosos y requieren de mucho tiempo, algunas veces es deseable relacionar los índices de compresión con las propiedades de clasificación de los suelos.

TABLE 8-2 Some Empirical Equations for  $C_c$  and  $C_{cc}$ \*

Equation	Regions of Applicability
$C_c = 0.007 (LL - 7)$	Remolded clays
$C_{cc} = 0.208 e_o + 0.0083$	Chicago clays
$C_c = 17.66 \times 10^{-5} w_n^2 + 5.93 \times 10^{-3} w_n - 1.35 \times 10^{-1}$	Chicago clays
$C_c = 1.15(e_o - 0.35)$	All clays
$C_c = 0.30(e_o - 0.27)$	
$C_c = 1.15 \times 10^{-2} w_n$	Inorganic, cohesive soil; silt, some clay; silty clay; clay
$C_c = 0.75(e_o - 0.50)$	Organic soils—meadow mats, peats, and organic silt and clay
$C_{cc} = 0.156 e_o + 0.0107$	Soils of very low plasticity
$C_c = 0.01 w_n$	All clays
	Chicago clays

\*As summarized by Azzouz, Krizek, and Corotis (1976).



48



## MÉTODOS APROXIMADOS Y VALORES DE $C_c$

Los valores típicos de  $C_c$  para algunos tipos de suelos están entre estos márgenes:

**TABLE 8-3** Typical Values of the Compression Index  $C_c$

Soil	$C_c$
Normally consolidated medium sensitive clays	0.2 to 0.5
Chicago silty clay (CL)	0.15 to 0.3
Boston blue clay (CL)	0.3 to 0.5
Vicksburg buckshot clay (CH)	0.5 to 0.6
Swedish medium sensitive clays (CL-CH)	1 to 3
Canadian Leda clays (CL-CH)	1 to 4
Mexico City clay (MH)	7 to 10
Organic clays (OH)	4 and up
Peats (Pt)	10 to 15
Organic silt and clayey silts (ML-MH)	1.5 to 4.0
San Francisco Bay Mud (CL)	0.4 to 1.2
San Francisco Old Bay clays (CH)	0.7 to 0.9
Bangkok clay (CH)	0.4

49



## MÉTODOS APROXIMADOS Y VALORES DE $C_c$

Estas relaciones son comúnmente usadas para diseños preliminares y para la estimación y el chequeo de los resultados obtenidos en los ensayos.

Terzaghi y Peck (1967) propusieron la siguiente ecuación basados en el análisis de arcillas inalteradas de baja a media sensibilidad.

$$C_c = 0.009(LL - 10)$$

Y para arcillas remoldadas

$$C_c = 0.007(LL - 10)$$

50



### Ejemplo :

Una muestra de suelo obtenida en campo y sometida a un ensayo de consolidación. Los datos fueron los siguientes:

Diámetro de la muestra= 6.35 cm

Altura inicial de la muestra= 2.54 cm

Gravedad sólidos= 2.72

Masa de la muestra seca= 116.74 gr

Esfuerzo, $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Lect. Inic deform (mm)	Lect. Final deform (mm)
0	0	0
50	0	0,21
100	0,21	0,4
200	0,4	1,11
400	1,11	2,18
800	2,18	3,34

Calcular:

-Relación de vacíos inicial ( $e_0$ )

-Graficar la curva  $e$  (vs)  $\log \sigma$

-Índice de compresibilidad ( $c_c$ )

-Hallar esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_p$ )

-Si la muestra es NC o SC, asumiendo que fue sacada a una prof de 6 m en un suelo con  $\gamma_{sat}=23 \text{ kN/m}^3$



Diámetro muestra (cm)= 6,35 Gravedad esp. solidos= 2,72

Altura muestra (cm)= 2,54 Masa muestra seca (gr)= 116,74

$$\text{Area muestra} = 0.25 * \pi * (6.35)^2 = 31.66 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen muestra} = 2,54 \text{ cm} * 31,66 \text{ cm}^2 = 80,44 \text{ cm}^3$$

1) Cálculo de la altura de los sólidos  $H_s$

$$H_s = \frac{W_s}{AG_s \gamma_w} = \frac{M_s g}{AG_s \rho_w g} = \frac{M_s}{AG_s \rho_w}$$

$$H_s = \frac{116,74 \text{ gr}}{31,66 \text{ cm}^2 * 2,72 * 1 \text{ gr/cm}^3} = 1,355 \text{ cm}$$







2) Cálculo de la altura de la altura de vacíos inicial,  $H_v$

$$H = H_s + H_v$$

$$H_v = 2,54\text{cm} - 1,355\text{cm} = 1,184\text{cm}$$

3) Cálculo de la relación de vacíos,  $e_0$  de la muestra

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v A}{H_s A} = \frac{H_v}{H_s} \quad e_0 = \frac{1,184}{1,355} = 0,874$$

4) Cálculo del cambio en la relación de vacíos,  $\Delta e_1$ , para la primera carga incrementada  $\sigma_1$

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s} \quad \Delta e_1 = \frac{0,021 - 0}{1,355} \quad \Delta e_1 = 0,0155$$

53



5) Cálculo de la nueva relación de vacíos,  $e_1$ , después de la consolidación causada por el incremento de la presión  $\sigma_1$

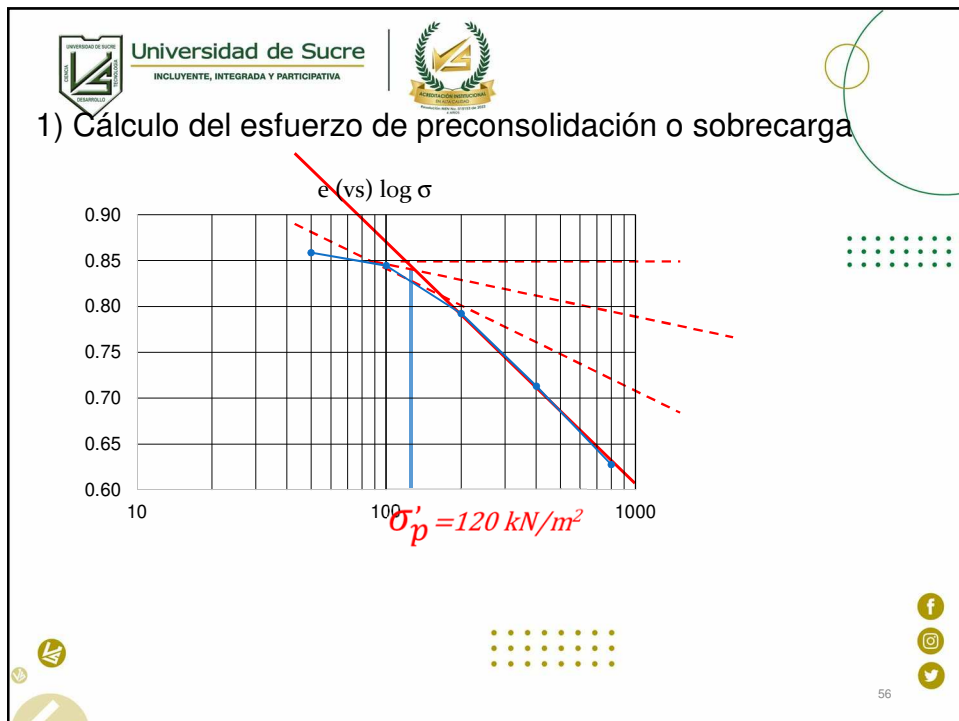
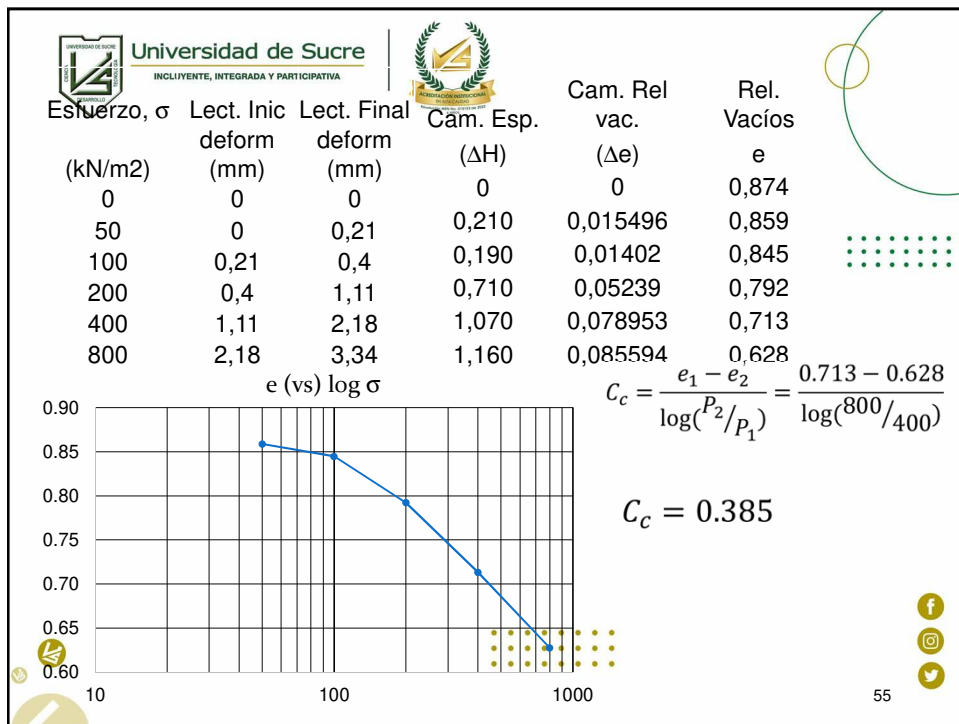
$$e_1 = e_0 - \Delta e_1 \quad e_1 = 0,874 - 0,0155 = 0,859$$

Para la siguiente carga  $\sigma_2$ , que causa la deformación adicional  $\Delta H_2$ , la relación de vacíos  $e_2$  se calcula como

$$\Delta e_2 = \frac{\Delta H_2}{H_c} \quad \Delta e_2 = \frac{0,04 - 0,021}{1,355} \quad \Delta e_2 = 0,014$$

$$e_2 = e_0 - \Delta e_2 \quad e_2 = 0,874 - 0,014 = 0,845$$

54





Si se asume que la muestra fue sacada de un estrato de arcilla saturada ( $\gamma_{\text{sat}}=23\text{kN/m}^3$ ) a una profundidad de 6 mts

Determine si la arcilla es normalmente consolidada o sobreconsolidada

$$\sigma'_p = 120 \text{ kN/m}^2$$

Cálculo del esfuerzo de sobrecarga actual,  $\sigma'_0$

$$\sigma'_0 = 6(23 - 9.81) \quad \sigma'_0 = 79.14 \text{ kN/m}^2$$

$$OCR = \frac{120 \text{ kN/m}^2}{79.14 \text{ kN/m}^2}$$

$$OCR = 1.51$$

El suelo es ligeramente sobreconsolidado



57



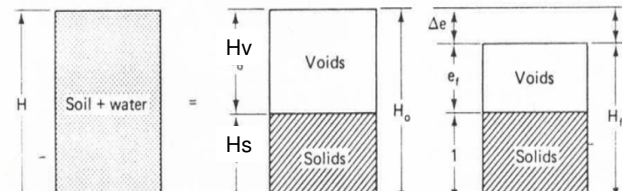
## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Una vez definida la línea de consolidación de campo para el suelo, se pueden calcular el total de los asentamientos por consolidación primaria esperados en la arcilla.

Haciendo una relación entre la cantidad de asentamiento en la arcilla ( $\Delta H$ ) y la altura de la muestra ( $H$ ).

Teniendo en cuenta que la altura de la muestra es igual a la altura de los sólidos ( $H_s$ ) más la altura de vacíos inicial ( $H_v$ )<sub>0</sub>.



$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H_v}{H_v}$$

$$H = H_s + H_{v(0)}$$

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H_v}{H_s + (H_v)_0}$$



58



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Pero teniendo en cuenta que la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ) es igual a:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H}{H_s + (H_v)_0} \quad e_0 = \frac{(V_v)_0}{V_s} = \frac{(H_v)_0}{H_s}$$

Y también que:  $\Delta e = \frac{\Delta H}{H_s}$

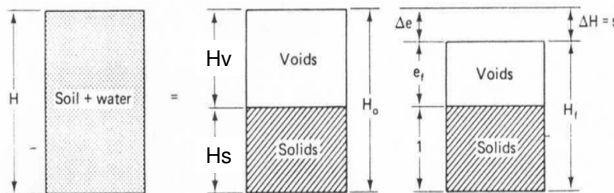
Donde  $\Delta e$  representa el cambio en la relación de vacíos como resultado del asentamiento por consolidación

Si hacemos  $H_s=1$ , tenemos:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H}{1 + (H_v)_0}$$

$$e_0 = (H_v)_0 \quad \Delta e = \Delta H$$

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

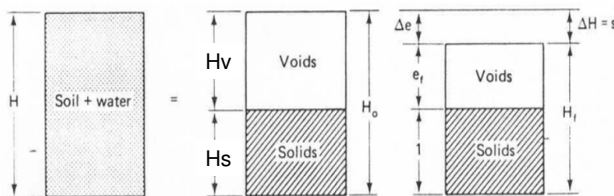


59



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA



$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Entonces

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$

Debido a que  $\Delta H$  = asentamiento, tenemos:

$\Delta e$  = cambio en la relación de vacíos

$e_0$  = relación de vacíos inicial in situ

$H$  = espesor del estrato

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$



60



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

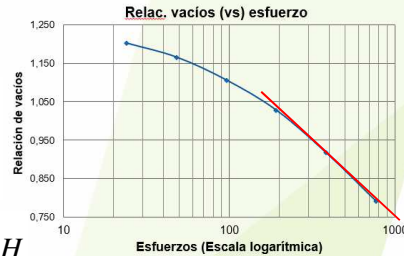
### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Para arcillas Normalmente consolidadas tenemos que:

$$\sigma'_0 = \sigma'_p \quad C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}$$

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)} \quad C_c = \frac{\Delta e}{\log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right)}$$

$$\Delta e = C_c \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right) \quad S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H$$



Reemplazando  $\Delta e$ , tenemos que:

$$S = C_c \left( \frac{H}{1 + e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right)$$

Asentamientos expresados en términos del índice de compresión de la curva de consolidación



61



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Para una capa de arcilla más gruesa, se puede hacer una medición más precisa del asentamiento si la capa se divide en una serie de subcapas y los cálculos se realizan para cada subcapa.

Por lo tanto, la solución total para toda la capa se puede dar como

$$S = \sum \left[ \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_{o(i)} + \Delta \sigma_{(i)}}{\sigma'_{o(i)}} \right) \right]$$

$H_i$  = espesor de la subcapa  $i$

$\sigma'_{o(i)}$  = presión de sobrecarga efectiva promedio inicial de la subcapa  $i$

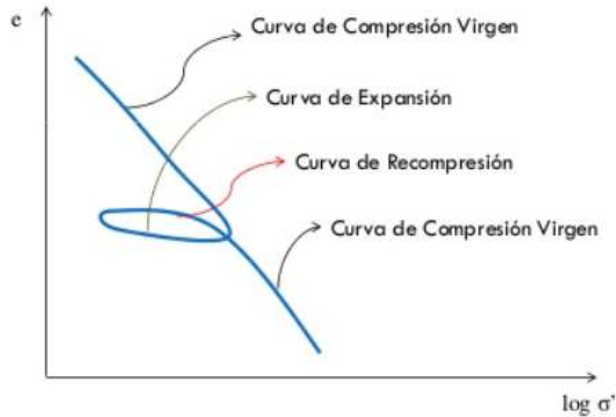
$\Delta \sigma'_{(i)}$  = aumento de la presión vertical para la subcapa  $i$



62



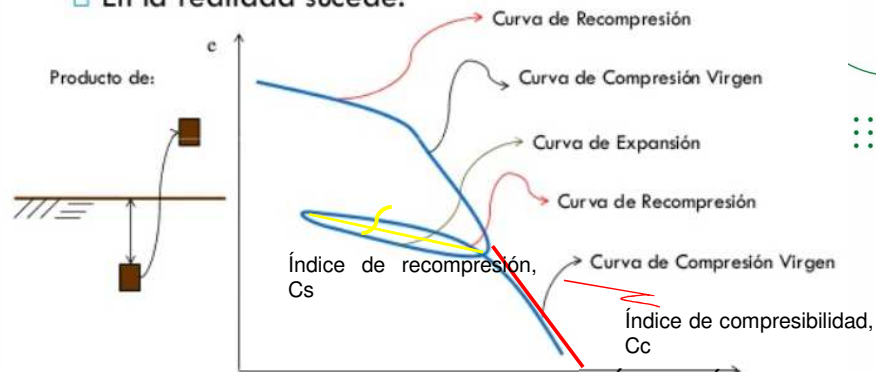
## Representándola en escala Semi-logarítmica



63



## En la realidad sucede:



Suelo Normalmente consolidado

$$\sigma_0 = \sigma_p$$

Suelo sobre consolidado

$$\sigma'_0 < \sigma'_p$$



64





### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Si el suelo es sobre consolidado, para  $\sigma_0' + \Delta\sigma \leq \sigma_p'$

$$S = C_s \left( \frac{H}{1+e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \right)$$

Cuando  $\sigma_0' + \Delta\sigma > \sigma_p'$

$$S = C_s \left( \frac{H}{1+e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma_p'}{\sigma_0'} \right) + C_c \left( \frac{H}{1+e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_p'} \right)$$



65



### ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

El índice de abultamiento ( $C_s$ ) es sensiblemente menor en magnitud que el índice de compresión, y por lo general puede ser determinado a partir de pruebas de laboratorio.

$$\frac{1}{10} C_c \leq C_s \leq \frac{1}{5} C_c$$



66

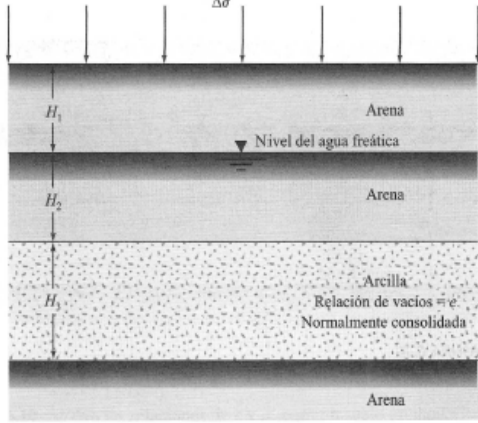



FIGURA 6.29

6.2 Resuelva el problema 6.1 con los siguientes valores:


$H_1 = 1.5 \text{ m}, H_2 = 2 \text{ m}, H_3 = 2 \text{ m}$   
 Arena:  $e = 0.55, G_s = 2.67$   
 Arcilla:  $e = 1.1, G_s = 2.73, LL = 45$   
 $\Delta\sigma = 120 \text{ kN/m}^2$

$\gamma = 16,89 \text{ kN/m}^3$   
 $\gamma_{sat} = 20,379 \text{ kN/m}^3$   
 $\gamma_{sat} = 17.89 \text{ kN/m}^3$

Calcular el asentamiento por consolidación primaria del estrato de arcilla



**Universidad de Sucre**  
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



Calculamos el esfuerzo vertical efectivo en la de arcilla

$$\sigma'_0 = 16.89(1.5) + 20.379(2) + 17.89(1) - 9.81(3) \quad \sigma'_0 = 54.55 \text{ kN/m}^2$$

El esfuerzo total aplicado en la mitad del estrato de arcilla

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' = 54.55 \text{ kN/m}^2 + 120 \text{ kN/m}^2 \quad \sigma'_0 + \Delta\sigma' = 174.55 \text{ kN/m}^2$$

Calculamos el Índice de compresión  $C_c$

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad C_c = 0.009(45 - 10) = 0,315$$

Reemplazando los valores en la ecuación, tenemos

$$S = C_c \left( \frac{H}{1 + e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad S = \frac{0,315 * 2}{1 + 1,1} \log \left( \frac{174,55}{54,55} \right)$$

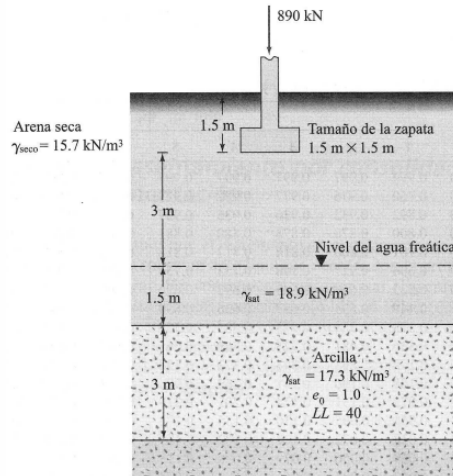
$$S = 0,1515 \text{ m}$$

6.2 Resuelva el problema 6.1 con los siguientes valores:

$H_1 = 1.5 \text{ m}, H_2 = 2 \text{ m}, H_3 = 2 \text{ m}$   
 Arena:  $e = 0.55, G_s = 2.67$   
 Arcilla:  $e = 1.1, G_s = 2.73, LL = 45$   
 $\Delta\sigma = 120 \text{ kN/m}^2$



Calcular el asentamiento por consolidación primaria del estrato de arcilla



69



Para una arcilla Normalmente consolidada  $s = C_c \left( \frac{H}{1+e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)$

Calculamos el Índice de compresión  $C_c$

$$C_c = 0.009(LL - 10) \quad C_c = 0.009(40 - 10) = 0.27$$

El esfuerzo total aplicado en la mitad del estrato es:

$$\sigma'_0 = 4.5(15.7) + 1.5(18.9) + 1.5(17.3) - 9.8(1.5 + 1.5)$$

$$\sigma'_0 = 95.55 \text{ kN/m}^2$$

Calculamos el Incremento de esfuerzos  $\Delta\sigma$

$$L=0.75; B=0.75 \quad m=0.75/6=0.125 \quad I=4(0.0073)=0.0292$$

$$Z=6\text{m} \quad n=0.75/6=0.125$$

$$\Delta\sigma = q \cdot I = (890/1.5^2) \cdot 0.0292 = 11.55 \text{ kN/m}^2$$

70



Reemplazando los valores en la ecuación, tenemos

$$S = C_c \left( \frac{H}{1+e_0} \right) \log \left( \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \right)$$

$$S = 0,27 \left( \frac{3000}{1+1} \right) \log \left( \frac{95,55 + 11,55}{95,55} \right)$$

$$S = 20,07 \text{ mm}$$



71



## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Uno de los datos que le interesa saber al ingeniero geotecnista es la velocidad con la cual se está dando el proceso de consolidación primaria en un estrato de arcilla.



Entre las suposiciones de Terzaghi (1925) para su teoría para considerar la velocidad de consolidación unidimensional están:

- El suelo es un material homogéneo (sistema arcilla-agua).
- El suelo está totalmente saturado
- Los granos de suelo y el agua en los poros son completamente incompresibles
- El suelo drena en una sola dirección
- La ley de Darcy es válida



72



## VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

La ecuación planteada por Terzaghi para la velocidad del flujo es:

$$C_v \frac{\partial^2 U_e}{\partial z^2} = \frac{\partial U_e}{\partial t}$$

Donde:  $C_v$  = Coeficiente de consolidación

$U_e$  = Presión de poros

$z$  = distancia vertical del estrato, profundidad

$t$  = Tiempo

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

Factor de tiempo vertical, es un número adimensional que depende del porcentaje de consolidación

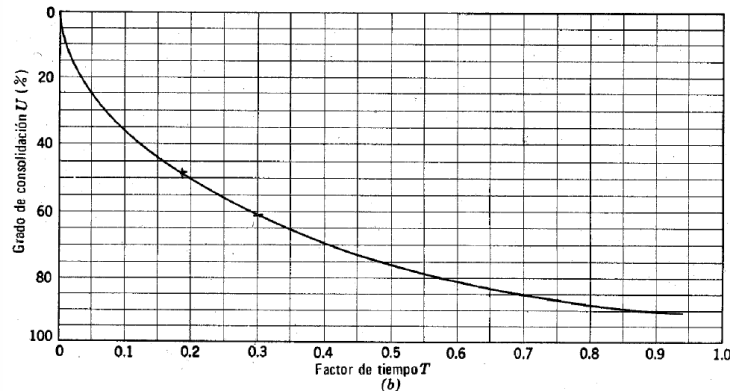


73



## VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

En la practica, el valor de  $T_v$  se determina de la siguiente gráfica:



Basados en el porcentaje de consolidación deseado ( $U$ )

El valor de  $C_v$  se determina de la gráfica  $C_v - \log P$ , basados en la presión que actúa en la mitad del estrato



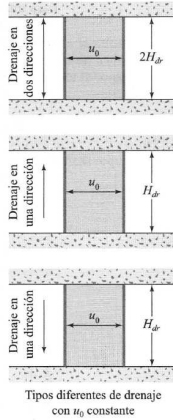
74



## VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Tabla 6.2 Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación\*.

U (%)	T <sub>v</sub>	U (%)	T <sub>v</sub>	U (%)	T <sub>v</sub>
0	0	34	0.0907	68	0.377
1	0.0008	35	0.0962	69	0.390
2	0.0003	36	0.102	70	0.403
3	0.00071	37	0.107	71	0.417
4	0.00126	38	0.113	72	0.431
5	0.00196	39	0.119	73	0.446
6	0.00283	40	0.126	74	0.461
7	0.00385	41	0.132	75	0.477
8	0.00502	42	0.138	76	0.493
9	0.00636	43	0.145	77	0.511
10	0.00785	44	0.152	78	0.529
11	0.0095	45	0.159	79	0.547
12	0.0113	46	0.166	80	0.567
13	0.0133	47	0.173	81	0.588
14	0.0154	48	0.181	82	0.610
15	0.0177	49	0.188	83	0.633
16	0.0201	50	0.197	84	0.658
17	0.0227	51	0.204	85	0.684
18	0.0254	52	0.212	86	0.712
19	0.0283	53	0.221	87	0.742
20	0.0314	54	0.230	88	0.774
21	0.0346	55	0.239	89	0.809
22	0.0380	56	0.248	90	0.848
23	0.0415	57	0.257	91	0.891
24	0.0452	58	0.267	92	0.938
25	0.0491	59	0.276	93	0.993
26	0.0531	60	0.286	94	1.055
27	0.0572	61	0.297	95	1.129
28	0.0615	62	0.307	96	1.219
29	0.0660	63	0.318	97	1.336
30	0.0707	64	0.329	98	1.500
31	0.0754	65	0.340	99	1.781
32	0.0803	66	0.352	100	∞
33	0.0855	67	0.364		



75



## VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Para  $0\% \leq U \leq 60\%$

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{100} \right)^2$$

Para  $U > 60\%$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U \%)$$

76



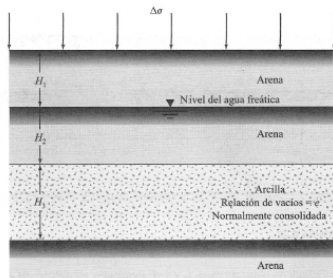


FIGURA 6.29

6.2 Resuelva el problema 6.1 con los siguientes valores:

$$H_1 = 1.5 \text{ m}, H_2 = 2 \text{ m}, H_3 = 2 \text{ m}$$

$$\text{Arena: } e = 0.55, G_s = 2.67$$

$$\text{Arcilla: } e = 1.1, G_s = 2.73, LL = 45$$

$$\Delta\sigma = 120 \text{ kN/m}^2$$

- Cuántos años se tardará en dar el 99% de los asentamientos por consolidación primaria?
- Calcule la cantidad de asentamiento por consolidación primaria que se darán en el primer año.
- Cuántos años tardará para que se de un asentamiento de 2.5 cm?

Asentamiento total de  $S=0,1515\text{m}$ ,  
 $H=3\text{m}$

El coeficiente de consolidación  $C_v$  es  
de  $0.0176 \text{ cm}^2/\text{min}$ .

77



Universidad de Sucre  
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



Cuántos años se tardará en dar el 99% de los asentamientos  
por consolidación primaria?

Para el valor de un grado de consolidación  $U=99\%$ , calculamos el  
Factor de tiempo vertical,  $T_v$

78

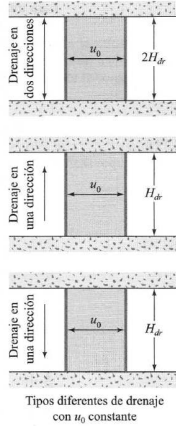


## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Tabla 6.2 Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación.

U (%)	$T_v$	U (%)	$T_v$	U (%)	$T_v$
0	0	34	0.0907	68	0.377
1	0.0008	35	0.0962	69	0.390
2	0.0003	36	0.102	70	0.403
3	0.00071	37	0.107	71	0.417
4	0.00126	38	0.113	72	0.431
5	0.00196	39	0.119	73	0.446
6	0.00283	40	0.126	74	0.461
7	0.00385	41	0.132	75	0.477
8	0.00502	42	0.138	76	0.493
9	0.00636	43	0.145	77	0.511
10	0.00785	44	0.152	78	0.529
11	0.0095	45	0.159	79	0.547
12	0.0113	46	0.166	80	0.567
13	0.0133	47	0.173	81	0.588
14	0.0154	48	0.181	82	0.610
15	0.0177	49	0.188	83	0.633
16	0.0201	50	0.197	84	0.658
17	0.0227	51	0.204	85	0.684
18	0.0254	52	0.212	86	0.712
19	0.0283	53	0.221	87	0.742
20	0.0314	54	0.230	88	0.774
21	0.0346	55	0.239	89	0.809
22	0.0380	56	0.248	90	0.848
23	0.0415	57	0.257	91	0.891
24	0.0452	58	0.267	92	0.938
25	0.0491	59	0.276	93	0.993
26	0.0531	60	0.286	94	1.055
27	0.0572	61	0.297	95	1.129
28	0.0615	62	0.307	96	1.219
29	0.0660	63	0.318	97	1.336
30	0.0707	64	0.329	98	1.500
31	0.0754	65	0.340	99	1.781
32	0.0803	66	0.352	100	∞
33	0.0855	67	0.364		



Para  $U > 60\%$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - 99)$$

$$T_v = 1.781$$



79



Cuántos años se tardará en dar el 99% de los asentamientos por consolidación primaria?

Para el valor de un grado de consolidación  $U=99\%$ , calculamos el Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = 1.781$$

Calculamos el tiempo para un grado de consolidación del 99%, por la formula del Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad t = \frac{1.781 * \left(\frac{300cm}{2}\right)^2}{0,0176cm^2/min} \quad t = 2,276,846min$$

$$t = 4,332 \text{ años}$$



80



Calcule la cantidad de asentamiento por consolidación primaria que se darán en el primer año.

Para un tiempo de 1 año=525,600 min, calculamos el Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad T_v = \frac{0,0176 * 525600}{\left(\frac{300cm}{2}\right)^2} \quad T_v = 0,411$$

Para este Factor de tiempo vertical, calculamos el grado de consolidación



81

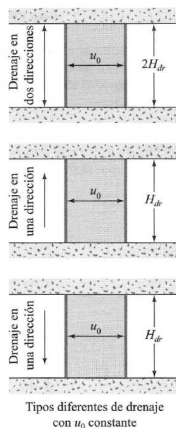


## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Tabla 6.2 Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación\*.

$U(\%)$	$T_v$	$U(\%)$	$T_v$	$U(\%)$	$T_v$
0	0	34	0.0907	68	0.377
1	0.0008	35	0.0962	69	0.390
2	0.0003	36	0.102	70	0.403
3	0.00071	37	0.107	71	0.417
4	0.00126	38	0.113	72	0.431
5	0.00196	39	0.119	73	0.446
6	0.00283	40	0.126	74	0.461
7	0.00385	41	0.132	75	0.477
8	0.00502	42	0.138	76	0.493
9	0.00636	43	0.145	77	0.511
10	0.00785	44	0.152	78	0.529
11	0.0095	45	0.159	79	0.547
12	0.0113	46	0.166	80	0.567
13	0.0133	47	0.173	81	0.588
14	0.0154	48	0.181	82	0.610
15	0.0177	49	0.188	83	0.633
16	0.0201	50	0.197	84	0.658
17	0.0227	51	0.204	85	0.684
18	0.0254	52	0.212	86	0.712
19	0.0283	53	0.221	87	0.742
20	0.0314	54	0.230	88	0.774
21	0.0346	55	0.239	89	0.809
22	0.0380	56	0.248	90	0.848
23	0.0415	57	0.257	91	0.891
24	0.0452	58	0.267	92	0.938
25	0.0491	59	0.276	93	0.993
26	0.0531	60	0.286	94	1.055
27	0.0572	61	0.297	95	1.129
28	0.0615	62	0.307	96	1.219
29	0.0660	63	0.318	97	1.336
30	0.0707	64	0.329	98	1.500
31	0.0754	65	0.340	99	1.781
32	0.0803	66	0.352	100	∞
33	0.0855	67	0.364		



Para  $U > 60\%$

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

$$0.411 = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

$$U(\%) = 70.59\%$$



82



Calcule la cantidad de asentamiento por consolidación primaria que se darán en el primer año.

Para un tiempo de 1 año=525,600 min, calculamos el Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad T_v = \frac{0,0176 * 525600}{\left(\frac{300cm}{2}\right)^2} \quad T_v = 0,411$$

Para este Factor de tiempo vertical, calculamos el grado de consolidación

$$U = 70,59\%$$

Con este grado de consolidación, calculamos el asentamiento experimentado

$$S = 0,7059(0,1515m) = 0,1069m$$



83



Calcule la cantidad de asentamiento por consolidación primaria que se darán en el segundo año.

Para un tiempo de 2 años=1,051,200 min, calculamos el Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad T_v = \frac{0,0176 * 1,051,200}{\left(\frac{300cm}{2}\right)^2} \quad T_v = 0,8222$$

Para este Factor de tiempo vertical, calculamos el grado de consolidación



84

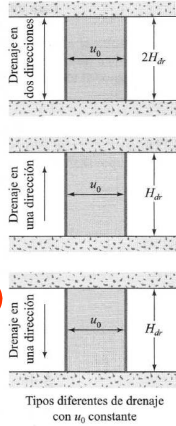


## COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

### VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

Tabla 6.2 Variación del factor de tiempo con el grado de consolidación.

U (%)	T <sub>v</sub>	U (%)	T <sub>v</sub>	U (%)	T <sub>v</sub>
0	0	34	0.0907	68	0.377
1	0.0008	35	0.0962	69	0.390
2	0.0003	36	0.102	70	0.403
3	0.00071	37	0.107	71	0.417
4	0.00126	38	0.113	72	0.431
5	0.00196	39	0.119	73	0.446
6	0.00283	40	0.126	74	0.461
7	0.00385	41	0.132	75	0.477
8	0.00502	42	0.138	76	0.493
9	0.00636	43	0.145	77	0.511
10	0.00785	44	0.152	78	0.529
11	0.0095	45	0.159	79	0.547
12	0.0113	46	0.166	80	0.567
13	0.0133	47	0.173	81	0.588
14	0.0154	48	0.181	82	0.610
15	0.0177	49	0.188	83	0.633
16	0.0201	50	0.197	84	0.658
17	0.0227	51	0.204	85	0.684
18	0.0254	52	0.212	86	0.712
19	0.0283	53	0.221	87	0.742
20	0.0314	54	0.230	88	0.774
21	0.0346	55	0.239	89	0.809
22	0.0380	56	0.248	90	0.848
23	0.0415	57	0.257	91	0.891
24	0.0452	58	0.267	92	0.938
25	0.0491	59	0.276	93	0.993
26	0.0531	60	0.286	94	1.055
27	0.0572	61	0.297	95	1.129
28	0.0615	62	0.307	96	1.219
29	0.0660	63	0.318	97	1.336
30	0.0707	64	0.329	98	1.500
31	0.0754	65	0.340	99	1.781
32	0.0803	66	0.352	100	∞
33	0.0855	67	0.364		



Para U > 60%

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U_{\%})$$

$$0.822 = 1.781 - 0.933 \log(100 - U_{\%})$$

$$U_{(\%)} = 89.34\%$$



85



Calcule la cantidad de asentamiento por consolidación primaria que se darán en el segundo año.

Para un tiempo de 2 años=1,051,200 min, calculamos el Factor de tiempo vertical, T<sub>v</sub>

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad T_v = \frac{0,0176 * 1,051,200}{\left(\frac{300cm}{2}\right)^2} \quad T_v = 0,8222$$

Para este Factor de tiempo vertical, calculamos el grado de consolidación

$$U = 89,34\%$$

Con este grado de consolidación, calculamos el asentamiento experimentado

$$S = (0,8934 - 0,7059)(0,1515m) = 0,0284m$$



86



Cuántos años tardará para que se de un asentamiento de 2.5 cm?

Con este asentamiento calculamos el grado de consolidación

$$U_{\%} = \frac{0,025m}{0,1515m} * 100$$

$$U_{\%} = 16,66\%$$



Para este grado de consolidación, calculamos el Factor de tiempo vertical

$$T_v = 0,0218$$

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left( \frac{U_{\%}}{100} \right)^2$$

Para este Factor de tiempo vertical Calculamos el tiempo

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

$$t = \frac{0,0218 * \left( \frac{300cm}{2} \right)^2}{0,0176cm^2/min}$$

$$t = 27,869,31min$$

$$t = 0,053 \text{ años} = 0,636 \text{ meses} = 19,14 \text{ días}$$



87



El tiempo requerido para el 50% de la consolidación de un muestra de arcilla de 20 mm de espesor (drenada arriba y abajo) en el laboratorio es de 5 minutos.



Si se sabe que en el campo se tiene un estrato de roca en el fondo de la arcilla.

¿Qué tiempo le tomará (en días) a un estrato de arcilla de 3m de espesor de la misma arcilla, en el campo y bajo el mismo incremento de presión, alcanzar 50% de consolidación?



88





$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

### Laboratorio

U=50%

H=20mm=2cm

Drena en 2 direcciones

t=5min=300seg

### Campo

U=50%

H=3m=300cm

Drena en 1 dirección

t=?

Para el grado de consolidación U=50%, calculamos el Factor de tiempo vertical,  $T_v$

$$T_v = 0,197$$

Calculamos el coeficiente de consolidación vertical ( $C_v$ ) para la muestra en el laboratorio

$$C_v = \frac{0,197 \left( \frac{2cm}{2} \right)^2}{300seg} = 0,0006566cm^2/seg$$



89



Calculamos el tiempo para que el estrato de suelo en campo se consolide el 50%

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2}$$

$$t = \frac{0,197 * (300cm)^2}{0,0006566cm^2/seg}$$

$$t = 27.002.741,4seg$$

$$t = 312.53 días$$



90