



CURSO DE GEOTECNIA I

(Código: 236161)

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

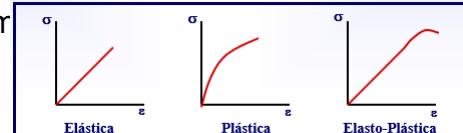


1



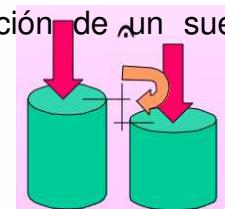
CONSOLIDACIÓN

- Todos los materiales experimentan deformación cuando se les somete a esfuerzos



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

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

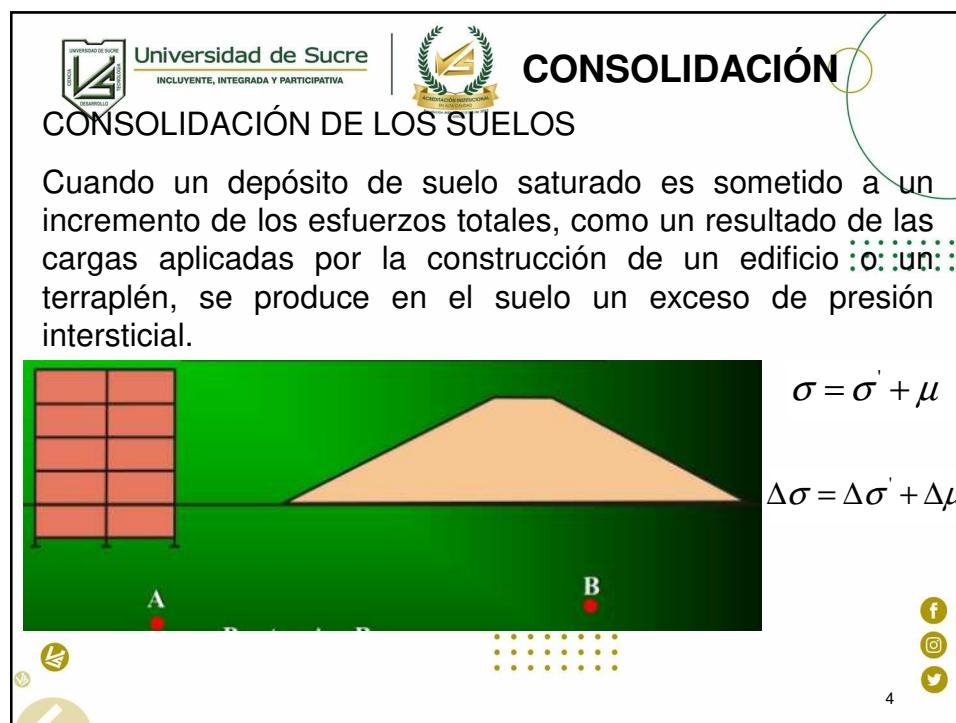
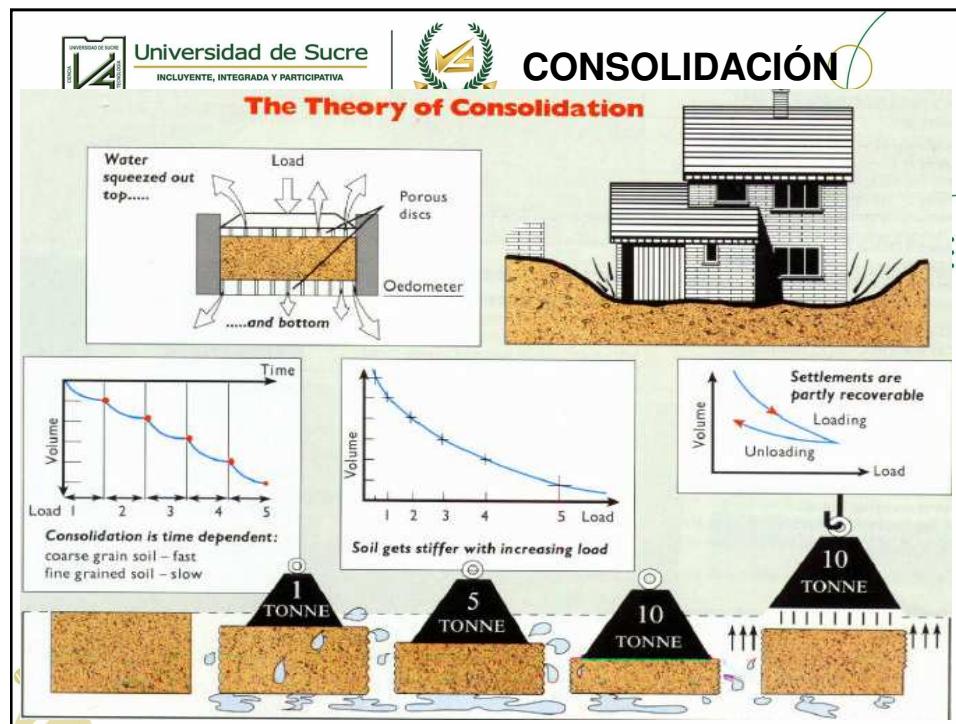


- Estas deformaciones no siempre se producen instantáneamente ante la aplicación de las cargas, sino a lo largo del tiempo



2

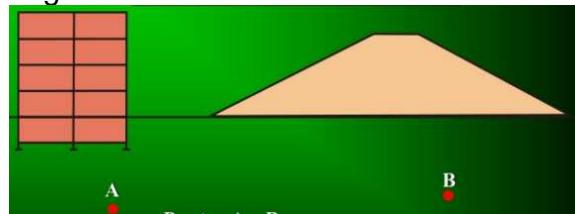






CONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS

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

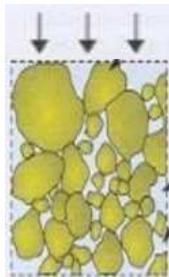
$\Delta\mu$ = incremento en la presión del agua en los poros



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.

9

The Theory of Consolidation

Water squeezed out top.....
Load
Porous discs
Oedometer
.....and bottom

Settlements are partly recoverable
Loading
Unloading

Volume

Time

Load

1 2 3 4 5

Consolidation is time dependent:
coarse grain soil - fast
fine grained soil - slow

Soil gets stiffer with increasing load

1 TONNE 5 TONNE 10 TONNE 10 TONNE



TIPOS DE ASENTAMIENTOS DE UN SUELO

$$S = S_i + S_c$$



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

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

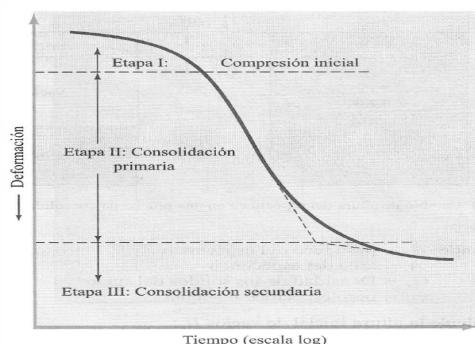


11



CONSOLIDACIÓN

Asentamientos relacionados con la consolidación



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

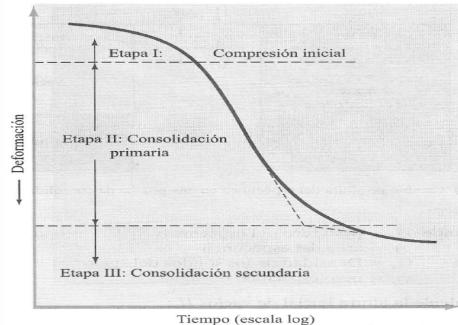
El proceso de extrusión del agua y la disipación del exceso de presión de poros se denomina *consolidación primaria* y los asentamientos relacionados con este se denominan *asentamientos por consolidación primaria*.



12



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



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 (Si)

- 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 (Sc)



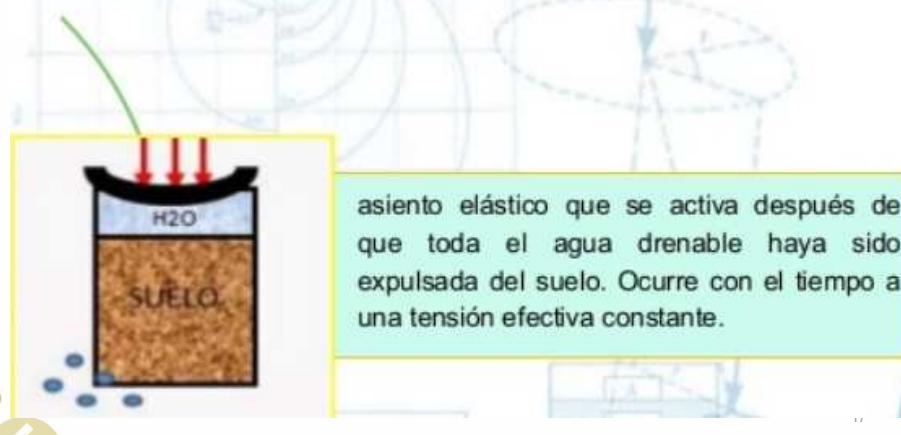
- asentamiento diferido en el tiempo causado por el drenaje de la humedad del suelo lo que produce cambios en las tensiones efectivas. La expulsión de humedad del suelo generalmente es un proceso a largo plazo que puede llevar de semanas a años.





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

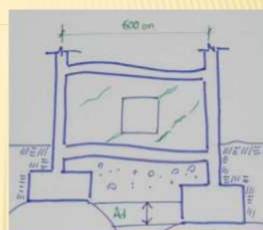
- **¿Por qué es necesario estudiar la consolidación?**
- La teoría de consolidación nos permite estimar (o predecir) la magnitud de los asentamientos y la velocidad (tiempo) en que ellos se producirán.
- Asentamientos diferenciales pueden ocasionar el colapso de la estructura.



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.




Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
2013-2017**
Resolución MEC No. 001010 de 2013

CONSOLIDACIÓN

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


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

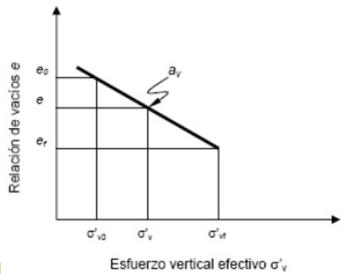

**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
2013-2017**
Resolución MEC No. 001010 de 2013

CONSOLIDACIÓN

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

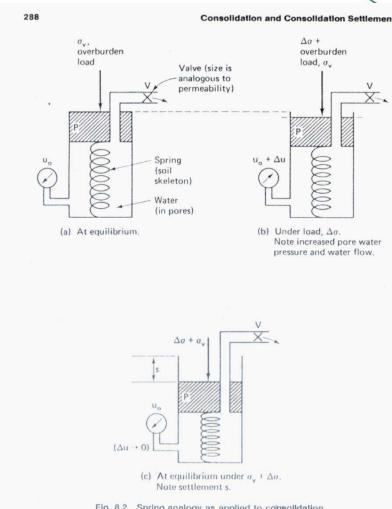


CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

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 (μ) 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 comprimible



CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

$$C_v = \frac{K_v (1 + e)}{\rho_w g a_v} \quad \text{Coeficiente de consolidación vertical}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e} \quad \text{Coeficiente de compresibilidad volumétrica}$$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad \text{Factor de tiempo vertical}$$

$$U_v = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_f} \quad \text{Grado de consolidación}$$

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log(p_2/p_1)} \quad \text{Índice de compresión}$$





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.



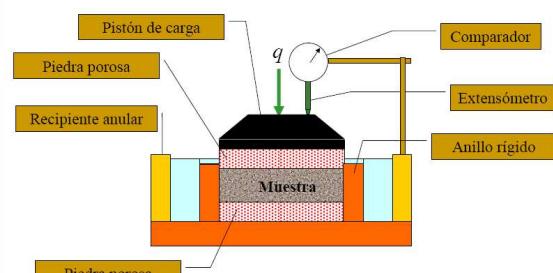
25



ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

• La muestra de suelo por lo general es circular, con un diámetro de 60 mm y una altura de 20mm.

• Se le colocan piedras porosas arriba y debajo de la muestra.



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.

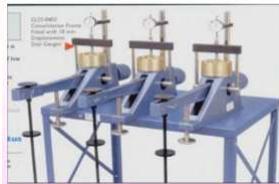


30



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

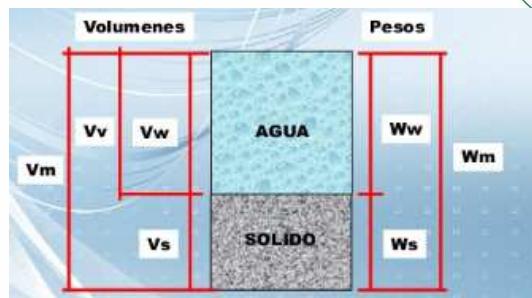
- Se repite el proceso para otra carga (2kg, 4 kg, 8kg, 16kg y 32kg) hasta que el esfuerzo aplicado exceda la presión total a la cual se piensa someter el suelo en el campo.



33



ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL



$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

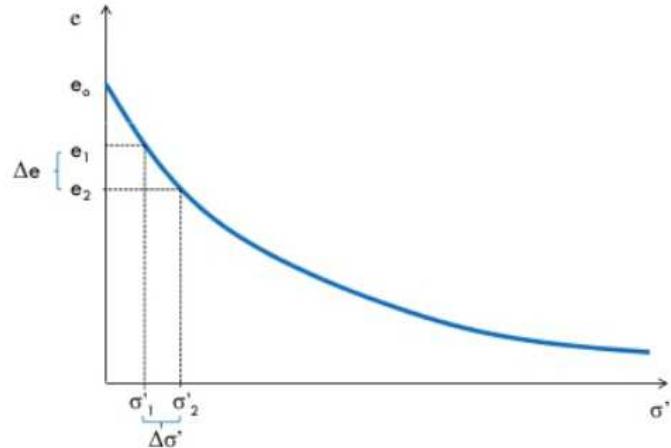


34



ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

□ Curva de Compresibilidad (Escala Natural)

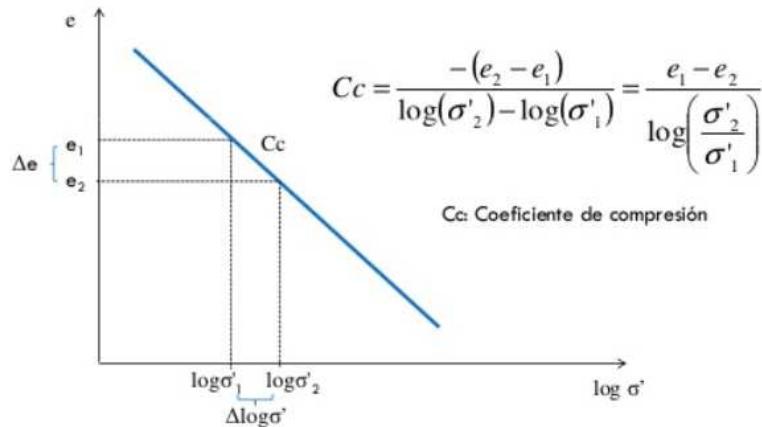


35



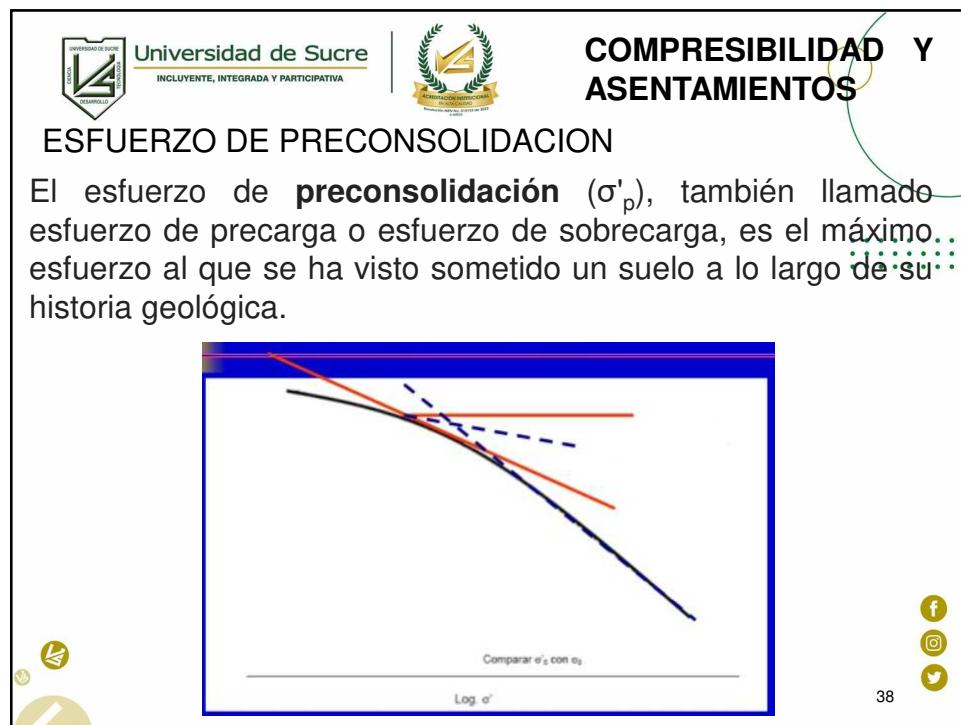
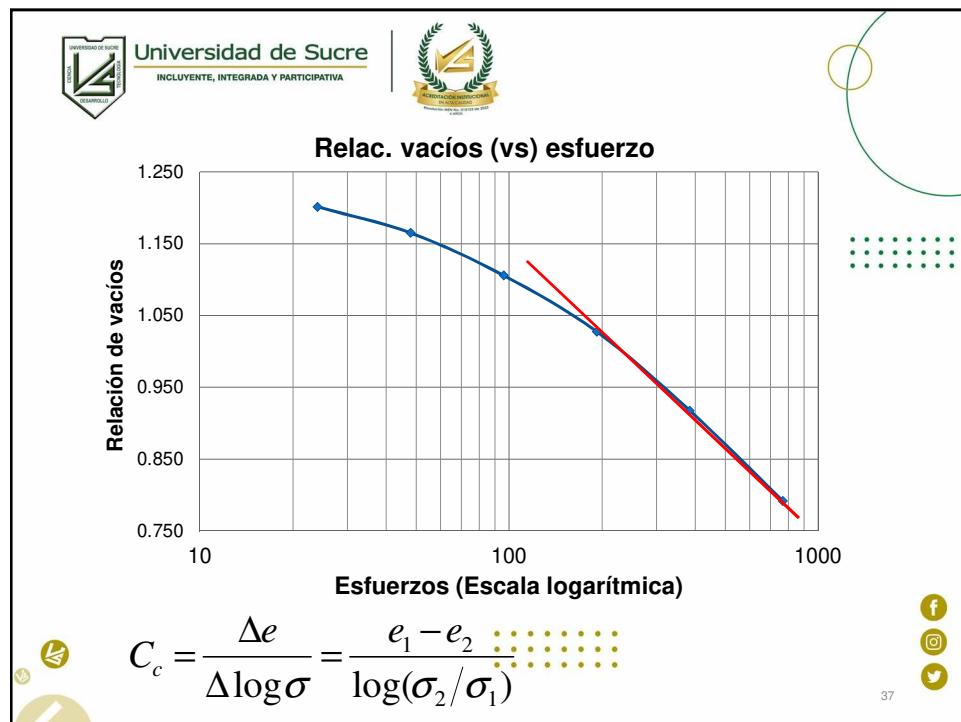
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

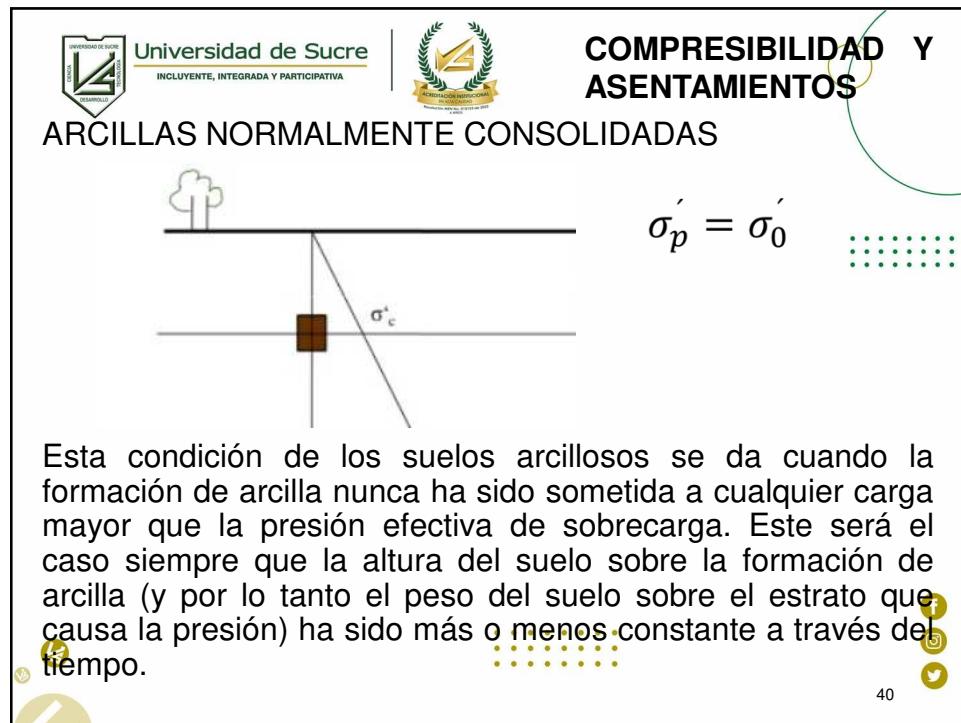
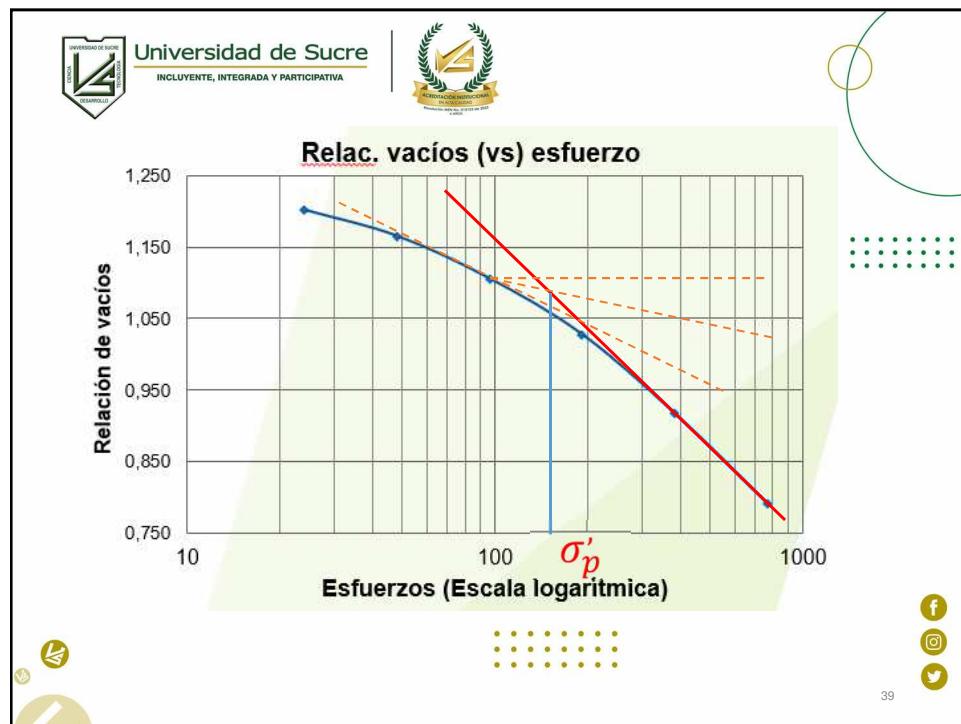
□ Curva de Compresibilidad (Escala Semi-Logarítmica)



36







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.


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
2013-2017**
Resolución M.E. 001010 del 2013

COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

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


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


**ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL
2013-2017**
Resolución M.E. 001010 del 2013

COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

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 (σ'_p) y el esfuerzo efectivo de sobrecarga actual (σ'_o).

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

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

Los suelos con un $OCR > 1$ son sobreconsolidados



43



Coeficiente de Preconsolidación (OCR: Overconsolidation Ratio)

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

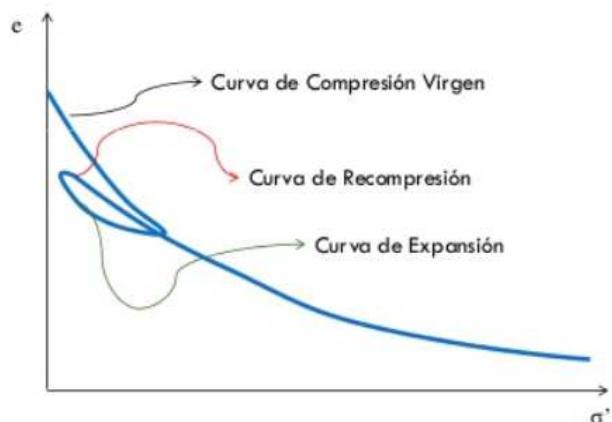
- $OCR = 1$. Normalmente Consolidado
- $OCR > 1$. Preconsolidado
- $2 < OCR < 3$ Ligeramente Preconsolidado
- $7 < OCR < 10$ Altamente Preconsolidado
- $OCR < 1$. Imposible



44



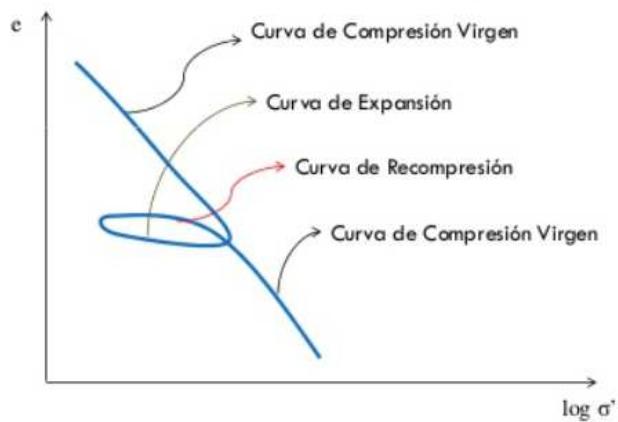
- Si se somete a incrementos-decrementos de carga :



45



- Representándola en escala Semi-logarítmica



46



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**ACREDITACIÓN NACIONAL
Resolución M.E. No. 0017 de 2012**

COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

□ En la realidad sucede:

Curva de Recompresión

Curva de Compresión Virgen

Curva de Expansión

Curva de Recompresión

Curva de Compresión Virgen

Producto de:

log σ'

47

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**ACREDITACIÓN NACIONAL
Resolución M.E. No. 0017 de 2012**

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.

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

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

48



COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

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



COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

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 sensitividad.

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

Y para arcillas remoldadas

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

50



Ejemplo :

Universidad de Sucre | INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

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, σ (kN/m ²)	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 σ
- Índice de compresibilidad (c_c)
- Hallar esfuerzo de preconsolidación (σ'_p)
- Si la muestra es NC o SC, asumiendo que fue sacada a una prof de 6 m en un suelo con $\gamma_{sat}=23 \text{ kN/m}^3$

Universidad de Sucre | INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

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

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

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

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

1) Cálculo de la altura de los sólidos Hs

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

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



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, Δe_1 , para la primera carga incrementada σ_1

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

$$\Delta e_1 = \frac{0,021 - 0}{1,355}$$

$$\Delta e_1 = 0,0155$$



53



5) Cálculo de la nueva relación de vacíos, e_1 , después de la consolidación causada por el incremento de la presión σ_1

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

$$e_1 = 0,874 - 0,0155 = 0,859$$



Para la siguiente carga σ_2 , que causa la deformación adicional ΔH_2 , la relación de vacíos e_2 se calcula como

$$\Delta e_2 = \frac{\Delta H_2}{H_c}$$

$$\Delta e_2 = \frac{0,04 - 0,021}{1,355}$$

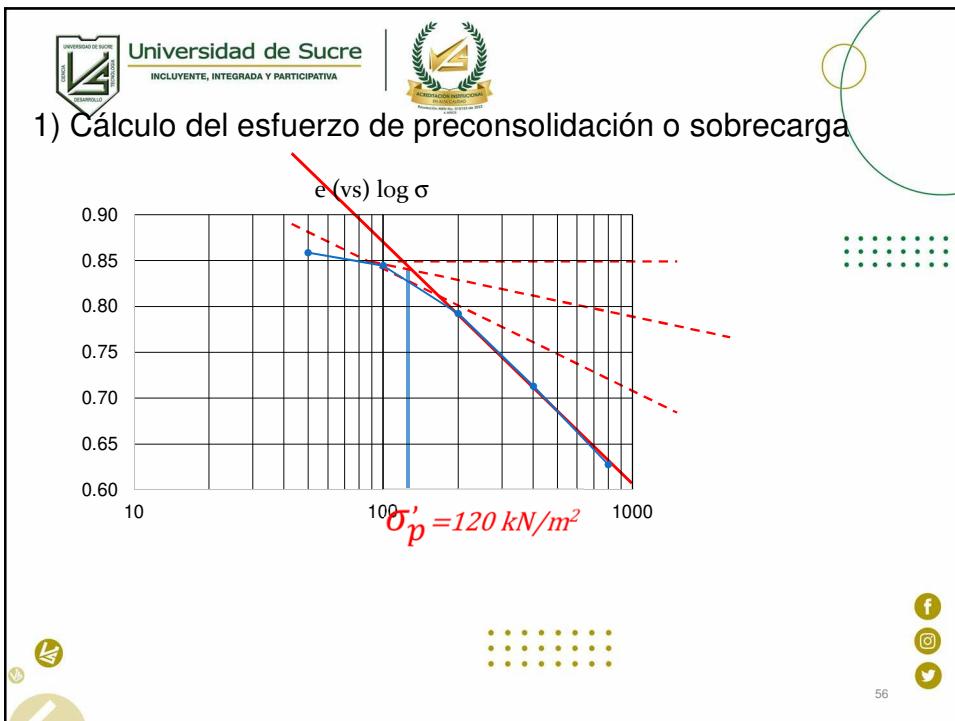
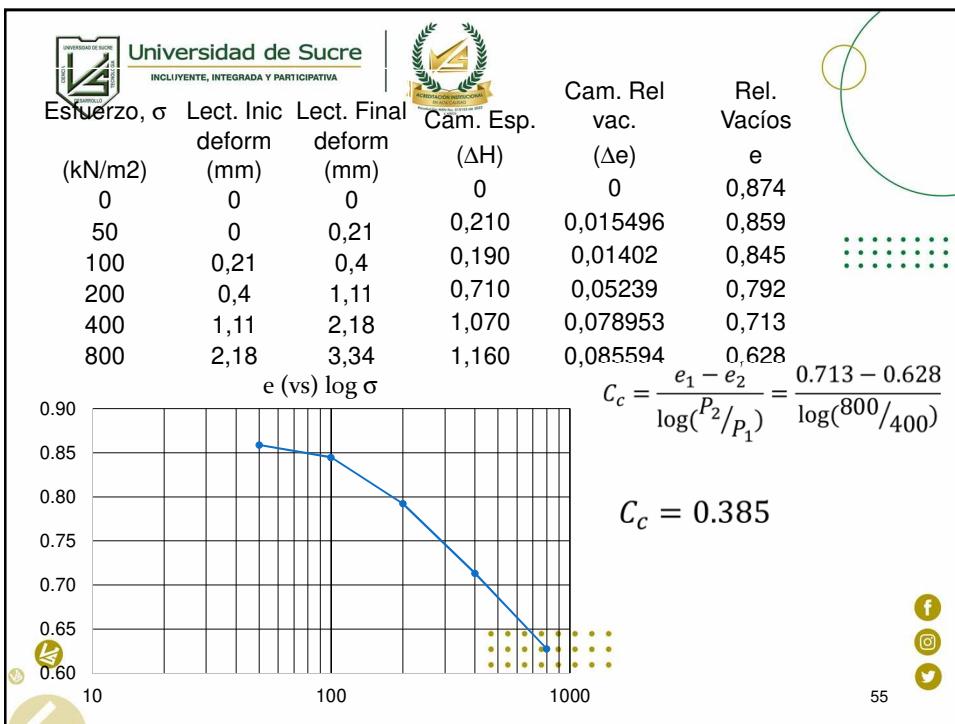
$$\Delta e_2 = 0,014$$

$$e_2 = e_0 - \Delta e_2$$

$$e_2 = 0,874 - 0,014 = 0,845$$



54





Si se asume que la muestra fue sacada de un estrato de arcilla saturada ($\gamma_{sat}=23\text{kN/m}^3$) 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, σ'_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

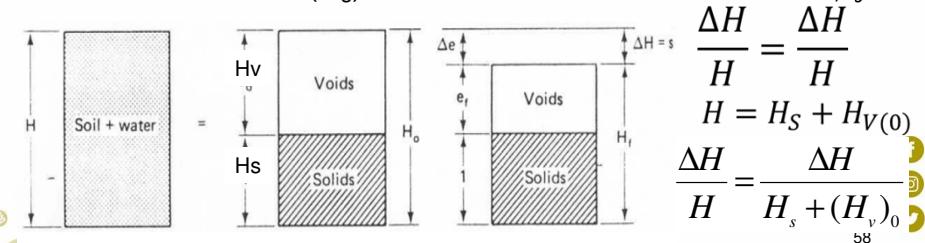
ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

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 (ΔH) 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 ($H_{v(0)}$).



58



COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Pero teniendo en cuenta que la relación de vacíos inicial (e_0) es igual a: $\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta H}{H_s + (H_v)_0}$

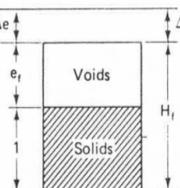
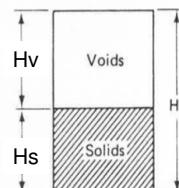
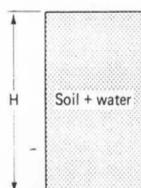
$$e_0 = \frac{(V_v)_0}{V_s} = \frac{(H_v)_0}{H_s}$$

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

Donde Δe representa el cambio en la relación de vacíos como resultado del asentamiento por consolidación

Si hacemos $H_s=1$, tenemos:

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



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

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

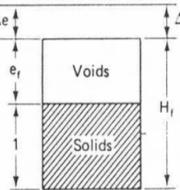
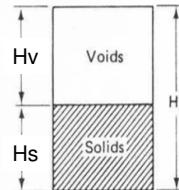
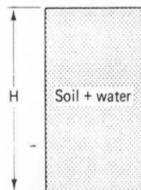


59



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 ΔH = asentamiento, tenemos:

Δe =cambio en la relación de vacíos

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

e_0 =relación de vacíos inicial in situ

H =espesor del estrato



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 Δe , 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

$$S = \sum \left[\frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{0(i)} + \Delta \sigma_{(i)}}{\sigma'_{0(i)}} \right) \right]$$

H_i = espesor de la subcapa i

$\sigma'_{0(i)}$ = presión de sobrecarga efectiva promedio inicial de la subcapa i

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



62

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**COMPRESIBILIDAD Y
ASENTAMIENTOS**

□ Representándola en escala Semi-logarítmica

Curva de Compresión Virgen

Curva de Expansión

Curva de Recompresión

Curva de Compresión Virgen

e

log σ'

63

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

**COMPRESIBILIDAD Y
ASENTAMIENTOS**

□ En la realidad sucede:

Producto de:

Curva de Recompresión

Curva de Compresión Virgen

Curva de Expansión

Curva de Recompresión

Índice de recompresión, Cs

Índice de compresibilidad, Cc

e

$\sigma_0 = \sigma_p^{\log \sigma'}$

Suelo Normalmente consolidado

Suelo sobre consolidado

$\sigma'_0 < \sigma'_p$

64



ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Si el suelo es sobre consolidado, para $\sigma'_0 + \Delta\sigma \leq \sigma'_p$

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



Cuando $\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_p$

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



65



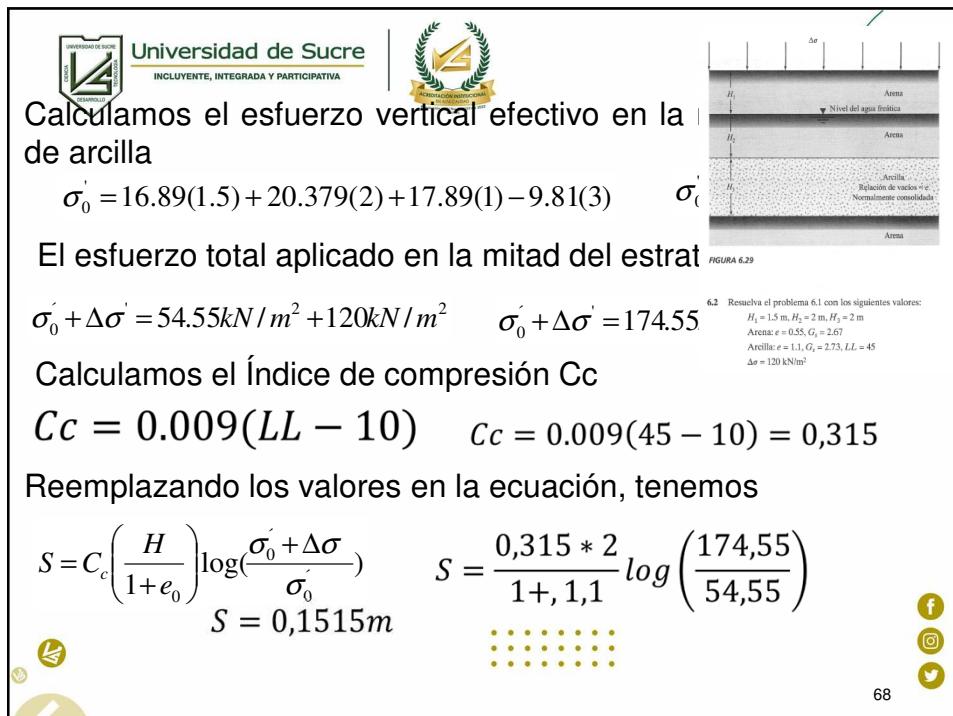
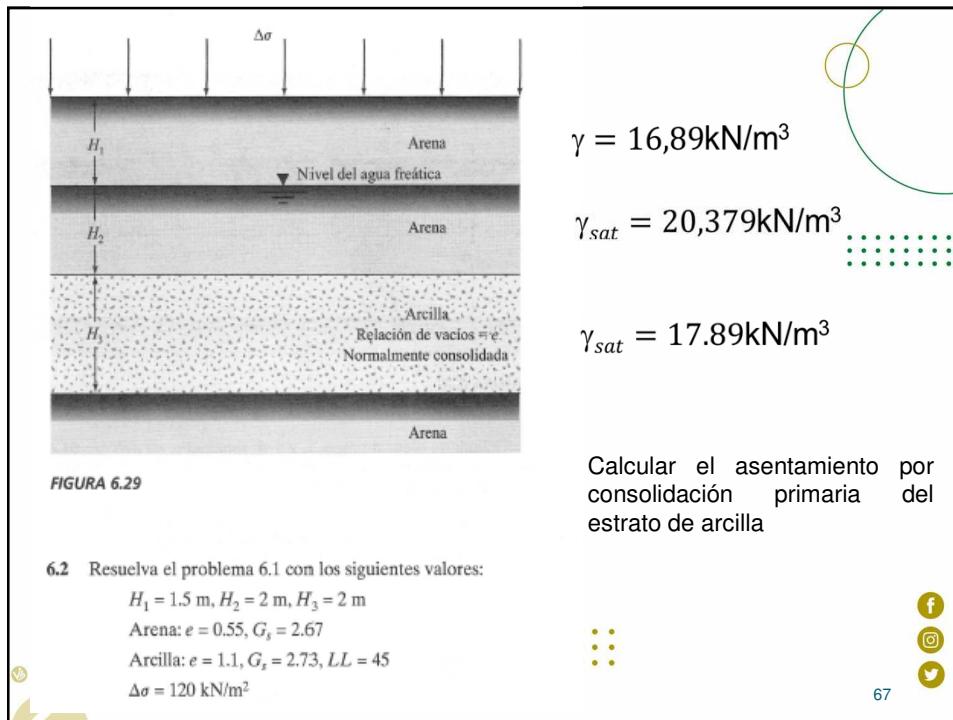
ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

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.

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



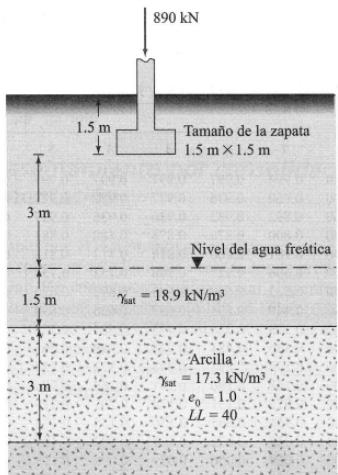
66




Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


 FACULTAD DE INGENIERÍA
 INGENIERÍA CIVIL

Calcular el asentamiento por consolidación primaria del estrato de arcilla



Arena seca
 $\gamma_{seco} = 15.7 \text{ kN/m}^3$

1.5 m Tamaño de la zapata
 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$

3 m

Nivel del agua freática

1.5 m

Arcilla
 $\gamma_{sat} = 18.9 \text{ kN/m}^3$
 $e_0 = 1.0$
 $LL = 40$

69


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA


 FACULTAD DE INGENIERÍA
 INGENIERÍA CIVIL

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 $\Delta\sigma$

$$L=0,75; B=0,75 \quad m=0,75/6 = 0,125 \quad I= 4(0,0073)=0,0292$$

$$Z=6\text{m} \quad n=0,75/6 = 0,125$$

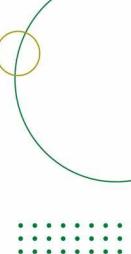
$$\Delta\sigma=q*I=(890/1,5^2)*0,0292=11,55\text{kN/m}^2$$

70



Reemplazando los valores en la ecuación, tenemos

$$S = C_c \left(\frac{H}{1+e_0} \right) \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)$$
$$S = 0,27 \left(\frac{3000}{1+1} \right) \log \left(\frac{95,55 + 11,55}{95,55} \right)$$
$$S = 20,07 \text{ mm}$$



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





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

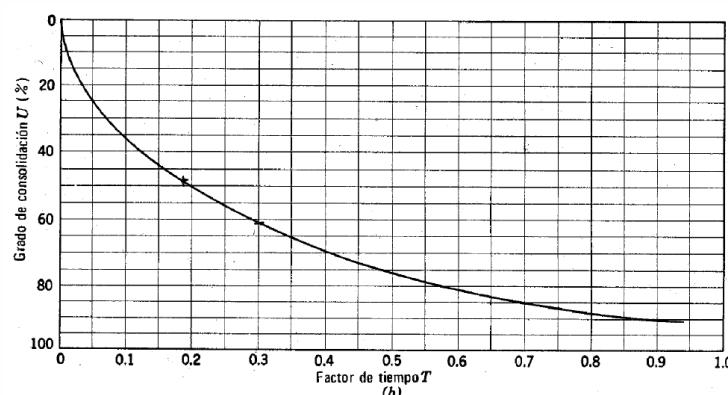


73



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

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

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	0.00008	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	0.656
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		

* Tabla tomada de Terzaghi, Peck y Mesri, 1991.

75

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

VELOCIDAD DE CONSOLIDACION

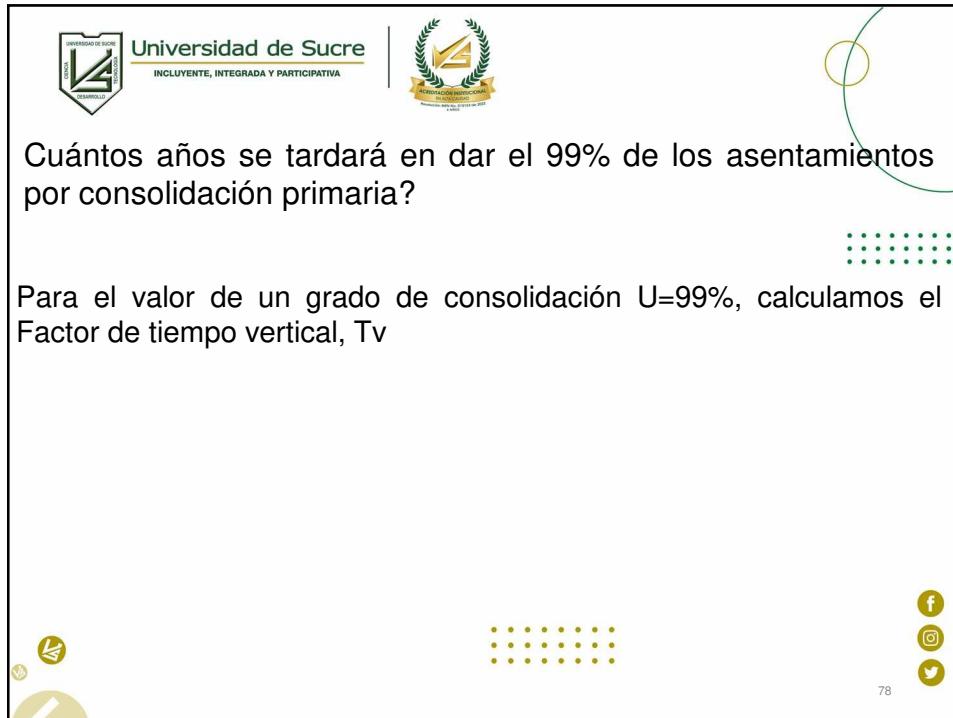
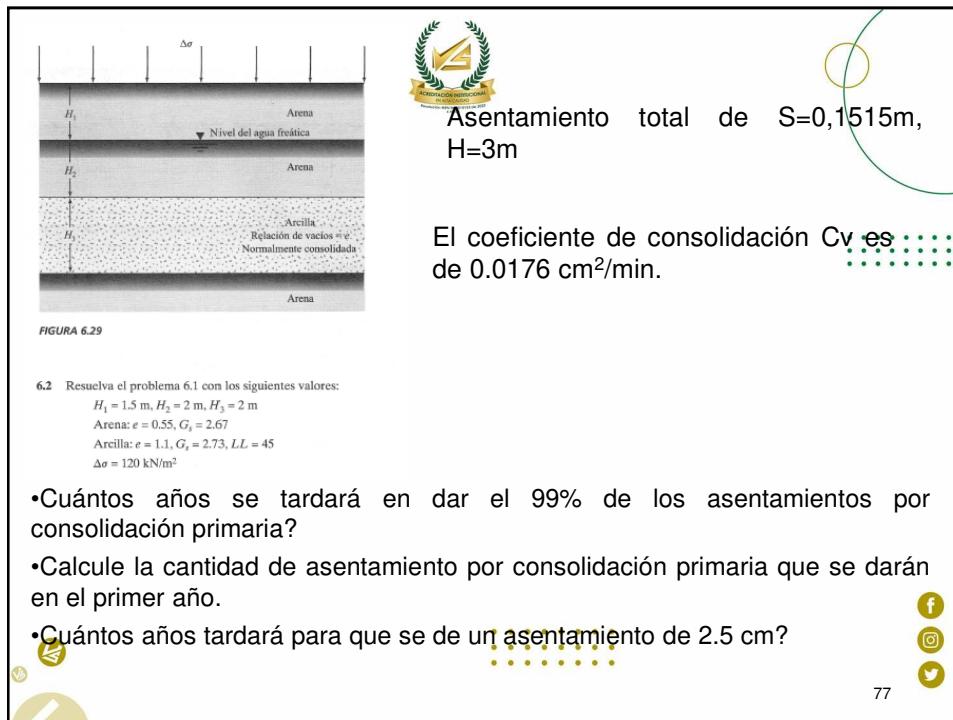
Para $0\% \leq U \leq 60\%$

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

Para $U > 60\%$

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

76



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

ACREDITACIÓN INTERNACIONAL

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	0.00008	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	oo
33	0.0855	67	0.364		

Para $U > 60\%$

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

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

$$T_v = 1.781$$

Tipos diferentes de drenaje con u_0 constante

79

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

ACREDITACIÓN INTERNACIONAL

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

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

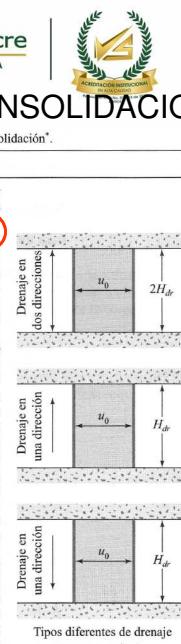
Para este Factor de tiempo vertical, calculamos el grado de consolidación



COMPRESIBILIDAD Y ASENTAMIENTOS

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	0.00008	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	1.209
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 $U > 60\%$

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

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

$$U\% = 70.59\%$$





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

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



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



Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

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	0.00008	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

Universidad de Sucre
INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

Calecle 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 $U = 89,34\%$

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 dé 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


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA

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

Laboratorio	Campo
U=50%	U=50%
H=20mm=2cm	H=3m=300cm
Drena en 2 direcciones	Drena en 1 dirección
t=5min=300seg	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

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

89


Universidad de Sucre
 INCLUYENTE, INTEGRADA Y PARTICIPATIVA



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

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

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

$$t = 27.002.741,4\text{seg}$$

$$t = 312.531\text{días}$$

90