



CARTILLA DE MECÁNICA DE SUELOS

Juan Manuel Salgado Díaz

Jessica María Ramírez Cuello

Paula Alejandra Torres Guarín

Juan Sebastián Valbuena García



CARTILLA DE MECÁNICA DE SUELOS

CARTILLA DE MECÁNICA DE SUELOS

Juan Manuel Salgado Díaz
Jessica María Ramírez Cuello
Paula Alejandra Torres Guarín
Juan Sebastián Valbuena García



Salgado Díaz, Juan Manuel

Cartilla de mecánica de suelos / Juan Manuel Salgado Díaz; Jessica María Ramírez Cuello; Paula Alejandra Torres Guarín; Juan Sebastián Valbuena García. - Villavicencio, Universidad Santo Tomás, 2022.

68 páginas (Colección Modular).

ISBN: 978-958-782-574-9

e-ISBN: 978-958-782-573-2

1. Mecánica de suelos - 2. Compatación de suelos. 3. Cimentaciones - 4. Suelos - Ingeniería. I Torres Guarín, Paula Alejandra. II. Valbuena García, Juan Sebastian. III. Universidad Santo Tomás (Colombia)

SCDD 23

624.15136

CO-ViUST

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación CRAI, Universidad Santo Tomás, Villavicencio.

© Juan Manuel Salgado Díaz, Jessica María Ramírez Cuello, Paula Alejandra Torres Guarín, Juan Sebastián Valbuena García, autores, 2022
© Universidad Santo Tomás, 2022

Ediciones USTA
Bogotá, D. C., Colombia
Carrera 9 n.º 51-11
Teléfono: (+601) 587 8797, ext. 2991
editorial@usantotomas.edu.co
<http://ediciones.usta.edu.co>

Carrera 22 con calle 1 vía Puerto López
Villavicencio, Meta. Colombia
Teléfono: (+608) 6784260, ext. 4078
coord.editorialvillavo@usantotomas.edu.co
<http://www.ediciones.usta.edu.co>
<https://www.ustavillavicencio.edu.co/investigacion-publicaciones>

Universidad Santo Tomás,
Sede de Villavicencio
Director Dirección Investigación e Innovación:
Jorge Enrique Ramírez Martínez Coordinación editorial:
Nicolás Sepúlveda Perdomo
Corrección de estilo:
Karen Gonzalez Castiblanco

Diagramación y diseño de cubierta: Alexandra Romero Cortina
Imágenes: Freepik

Esta obra tiene una versión de acceso abierto disponible en el Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás: <https://repository.usta.edu.co/>

Las imágenes incluidas en esta publicación son gratis para usos comerciales, tomadas de Freepik.com

ISBN: 978-958-782-574-9
e-ISBN: 978-958-782-573-2

Hecho el depósito que establece la ley
Primera edición, 2022

Universidad Santo Tomás
Vigilada Mineducación
Reconocimiento personería jurídica:
Resolución 3645 del 6 de agosto de 1965,
Minjusticia
Acreditación Institucional de Alta Calidad
Multicampus: Resolución 014525 del 28 de julio de 2022, 8 años, Mineducación

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin la autorización expresa del titular de los derechos.

Impreso en Colombia • *Printed in Colombia*

CONTENIDO

Presentación	7
Organización de los ejercicios	9
Relaciones volumétricas y gaviométricas	11
Permeabilidad	19
Redes de flujo	25
Compactación	33
Esfuerzos	41
Incremento de esfuerzos	51
Consolidación	59
Referencias	65
Respecto a los autores	67

Presentación

El apropiado desempeño de la práctica profesional de la ingeniería civil, en el área de geotecnia, requiere entre otras cosas, entender las características químicas, físicas y mecánicas que controlan el comportamiento de los suelos. Por ello, esta cartilla describe los fundamentos teóricos que explican esos fenómenos y desarrolla los principios básicos de la mecánica de suelos.

Los estudios de suelos son indispensables para iniciar cualquier tipo de obra civil, pues gracias a estos se puede conocer las condiciones del terreno en donde se realizará la construcción, con base a esto, se determinará la profundidad a la que se deben realizar las cimentaciones en una construcción o el tipo de mejoramiento adecuado para la subrasante de una estructura de pavimento.

Esta cartilla está orientada a estudiantes y docentes interesados en profundizar en las áreas de geotecnia, estructuras y construcción.

7

Por último, se le agradece al docente Sergio Arguello Vera por haber tenido la iniciativa de comenzar la cartilla. Su contribución ha sido valiosa y apreciamos su esfuerzo en la creación de algunos ejercicios que aportan a este recurso educativo. Gracias por su dedicación y compromiso con la enseñanza.

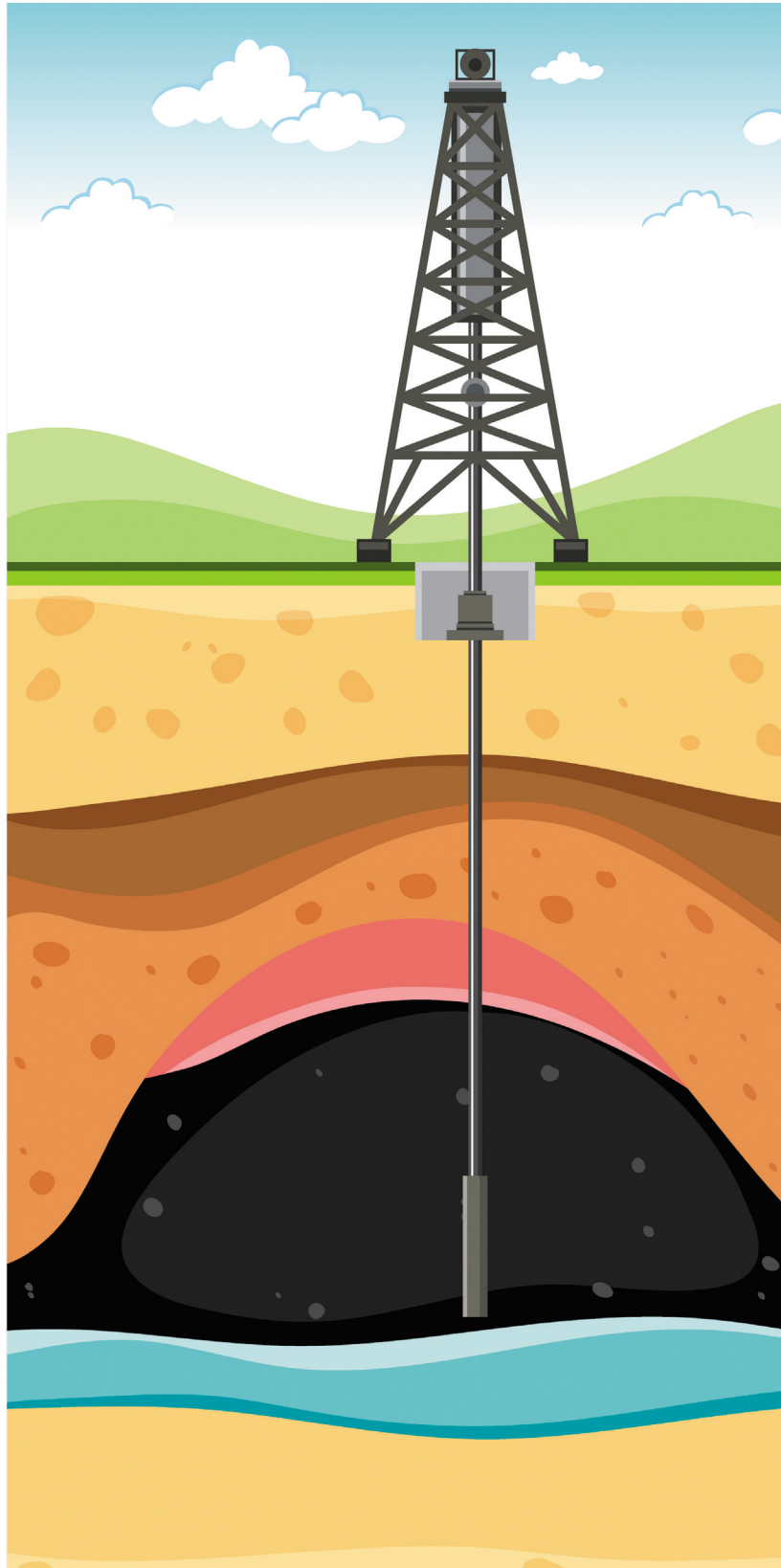
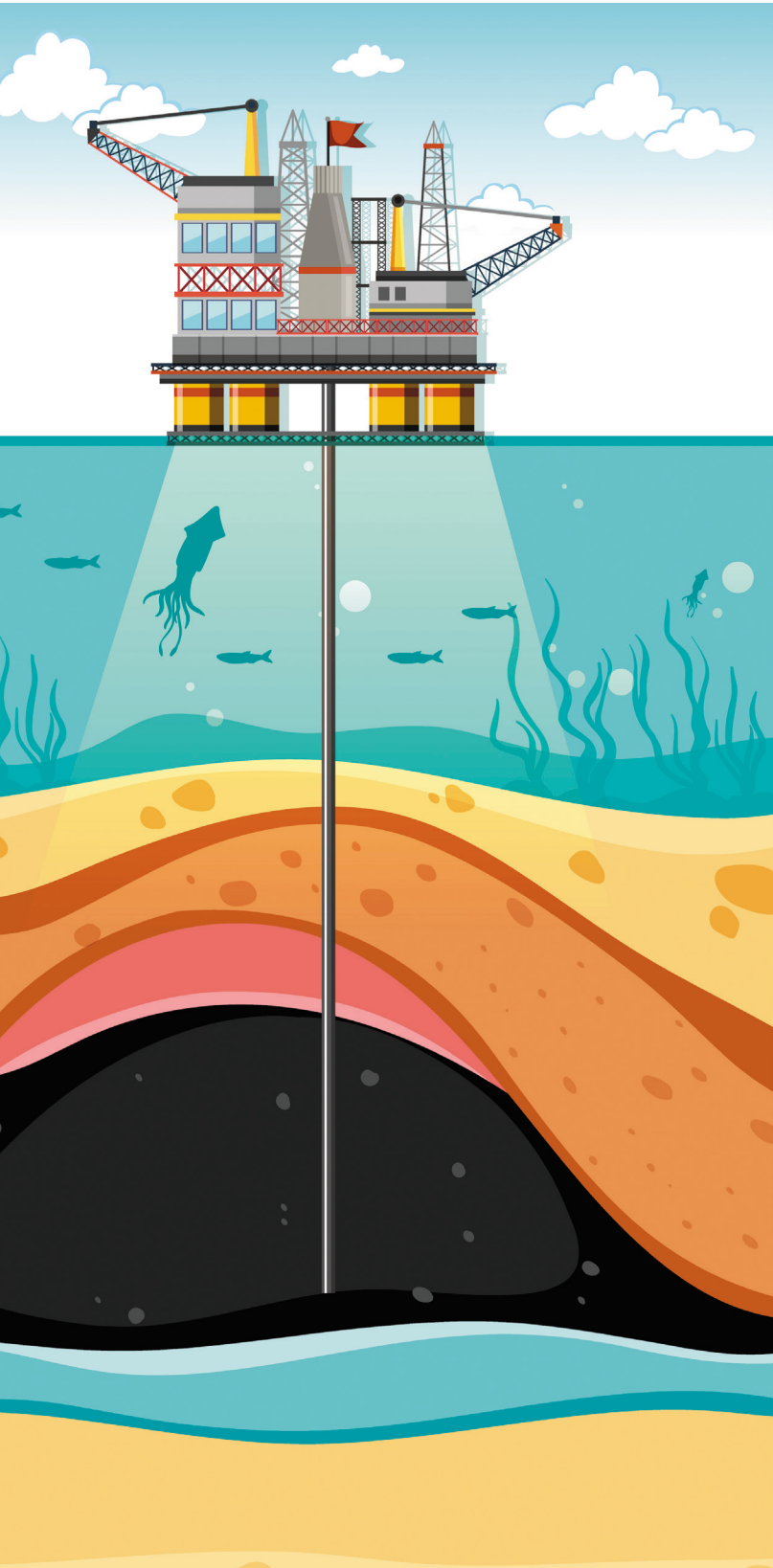
Organización de los ejercicios

Los contenidos de la cartilla siguen un orden similar al curso de Mecánica de Suelos de la Universidad Santo Tomás. Se espera que los estudiantes hayan cursado fundamentos matemáticos, debido a que las demostraciones de las fórmulas requieren un conocimiento previo de las ciencias exactas.

El docente puede hacer que esta cartilla se convierta en una guía para que los estudiantes de pregrado tengan una información sintetizada y puedan despejar dudas de forma más práctica al revisar los ejercicios resueltos para los temas abordados.

Esta cartilla tiene el potencial para convertirse en una referencia a nivel regional y nacional, por la calidad y organización de su contenido.

Relaciones volumétricas y gavimétricas



Las siguientes ecuaciones son demostraciones de las relaciones gravimétricas y volumétricas más comunes:

$$1. \quad n = \frac{e}{1+e}$$

Solución

$$n = \frac{V_v}{V} \cdot \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}}$$

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$2. \quad e = \frac{n}{1-n}$$

Solución

$$e = \frac{V_v}{V_s} \cdot \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V}}{\frac{V}{V} - \frac{V_v}{V}}$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$3. \quad w = \frac{\gamma_w Sr \cdot e}{\gamma_s}$$

Solución

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\gamma_w V_w}{\gamma_s V_s}$$

$$w = \frac{\gamma_w V_w}{\gamma_s V_s} \cdot \frac{V_v}{V_v}$$

$$w = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \cdot \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_s}$$

$$w = \frac{\gamma_w Sr \cdot e}{\gamma_s}$$

$$4. \quad n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

Solución

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}$$

$$n = 1 - \frac{W_s / \gamma_s}{V} = 1 - \frac{W_s}{\gamma_s \cdot V}$$

$$n = 1 - \frac{V \cdot \gamma_d}{\gamma_s \cdot V}$$

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$5. \quad e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

Solución

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

$$e = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{V}{\frac{W_s}{\gamma_s}} - 1$$

$$e = \frac{V \gamma_s}{W_s} - 1 = \frac{V \gamma_s}{\gamma_d V} - 1$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$6. \quad w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$$

Solución

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W - W_s}{W_s}$$

$$w = \frac{W}{W_s} - 1 = \frac{W}{\gamma_d V} - 1$$

$$w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$$

$$7. \quad n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w}$$

Solución

$$\begin{aligned} \gamma_{sat} &= \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w}{(1 + e)} \rightarrow \gamma_{sat}(1 + e) = \gamma_s + e\gamma_w \rightarrow \dots \\ &\rightarrow \gamma_{sat} + e\gamma_{sat} = \gamma_s + e\gamma_w \rightarrow \dots \\ &\rightarrow e\gamma_{sat} - e\gamma_w = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow \left(\frac{n}{1 - n}\right)(\gamma_{sat} - \gamma_w) = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow n(\gamma_{sat} - \gamma_w) = (1 - n)\gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow n\gamma_{sat} - n\gamma_w = \gamma_s - \gamma_{sat} - n\gamma_s + n\gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow n\gamma_{sat} - n\gamma_w + n\gamma_s - n\gamma_{sat} = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow -n\gamma_w + n\gamma_s = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow n(-\gamma_w + \gamma_s) = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w} \end{aligned}$$

$$8. \quad e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$$

Solución

$$\begin{aligned} \gamma_{sat} &= \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w}{(1 + e)} \rightarrow \gamma_{sat}(1 + e) = \gamma_s + e \cdot \gamma_w \rightarrow \dots \\ &\rightarrow \gamma_{sat} + \gamma_{sat}e = \gamma_s + e \cdot \gamma_w \rightarrow \dots \\ &\rightarrow e\gamma_{sat} - e\gamma_w = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow e(\gamma_{sat} - \gamma_w) = \gamma_s - \gamma_{sat} \rightarrow \dots \\ &\rightarrow e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \end{aligned}$$

$$9. \quad w = Sr \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

Solución

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\gamma_w V_w}{W_s} = \frac{\gamma_w V_w}{W_s} \cdot \frac{V_v}{V_v}$$

$$w = \frac{\gamma_w V_v Sr}{W_s} = Sr \gamma_w \frac{V - V_s}{W_s}$$

$$w = Sr \gamma_w \left(\frac{V}{W_s} - \frac{V_s}{W_s} \right)$$

$$w = Sr \gamma_w \left(\frac{V}{\gamma_d \cdot V} - \frac{V_s}{\lambda_s \cdot V_s} \right)$$

$$w = Sr \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

$$10. \quad Sr = \frac{\gamma_s \cdot w}{\gamma_w \cdot e}$$

Solución

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W_w}{V_v \gamma_w}$$

$$Sr = \frac{W_w}{V_v \cdot \gamma_w \frac{V_s}{V_s}}$$

$$Sr = \frac{W_w}{\gamma_w \cdot e V_s} = \frac{W_w}{\gamma_w \cdot e \frac{W_s}{\gamma_s}}$$

$$Sr = \frac{\gamma_s W_w}{\gamma_w \cdot e \cdot W_s}$$

$$Sr = \frac{\gamma_s \cdot w}{\gamma_w \cdot e}$$

$$11. \quad Sr = \frac{w}{W_{sat}}$$

$$W_{sat} \rightarrow Sr = 100\%$$

$$\gamma_d \rightarrow \text{Constante}$$

Solución

$$\rightarrow W_{sat} = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \cdot \frac{V_v}{V_s} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \frac{V_s \gamma_s W_{sat}}{\gamma_w} = V_v \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \frac{V_s \gamma_s W_{sat}}{\gamma_w} = \frac{V_w}{Sr} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow Sr = \frac{V_w \gamma_w}{V_s \gamma_s W_{sat}} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow Sr = \frac{W_w}{W_s W_{sat}} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow Sr = \frac{W}{W_{sat}}$$

15

$$12. \quad \gamma = \gamma_s (1 + w)(1 - n)$$

Solución

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_s + V_v} = \frac{W_s + w \cdot W_s}{V_s + e \cdot V_s}$$

$$\gamma = \frac{W_s (1 + w)}{V_s (1 + e)} = \gamma_s \frac{(1 + w)}{(1 + e)} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma = \gamma_s \frac{(1 + w)}{\left(1 + \frac{n}{1 - n}\right)} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma \left(1 + \frac{n}{1 - n}\right) = \gamma_s (1 + w) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma \left(\frac{1 - n + n}{1 - n}\right) = \gamma_s (1 + w) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma \left(\frac{1}{1 - n}\right) = \gamma_s (1 + w) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma = \gamma_s (1 + w)(1 - n)$$

$$13. \quad \gamma = \gamma_s \frac{(1+w)}{(1+e)}$$

Solución

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_s + V_v}$$

$$\gamma = \frac{W_w + w \cdot W_s}{V_s + e \cdot V_v}$$

$$\gamma = \frac{W_s(1+w)}{V_s(1+e)}$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{(1+w)}{(1+e)}$$

$$14. \quad \gamma = \frac{W_s}{V}(w+1)$$

Solución

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = (W_w + W_s) \cdot \frac{W_s}{W_s} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = (wW_s + W_s) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = W_s(w+1) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma = \frac{W_s}{V}(w+1)$$

$$15. \quad \gamma = \gamma_d + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

Solución

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = (W_w + W_s) \cdot \frac{W_s}{W_s} \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = \left(\frac{W_s^2}{W_s} + W_w \frac{W_s}{W_s} \right) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma V = W_s \left(\frac{W_w}{W_s} + 1 \right) \rightarrow \dots$$

$$\rightarrow \gamma = \frac{W_s}{V} \left(\frac{W_w}{W_s} + 1 \right)$$

$$\gamma = \gamma_d + \left(1 + \frac{W_w}{W_s} \right)$$

$$\gamma = \gamma_d + \frac{W_w}{W_s} \frac{W_s}{V}$$

$$\gamma = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{W_s} \frac{W_s V_v}{V V_v}$$

$$\gamma = \gamma_d + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

$$16. \quad \gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1+e}$$

Solución

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_w + W_s}{V_s + V_v}$$

$$\gamma = \frac{W_s + w \cdot W_s}{V_s + e \cdot V_s}$$

$$\gamma = \frac{W_s(1+w)}{V_s(1+e)}$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{(1+w)}{(1+e)}$$

$$\gamma = \frac{\left(\gamma_s + \gamma_s \cdot \frac{W_w}{W_s} \right)}{(1+e)}$$

$$\gamma = \frac{\left(\gamma_s + \frac{\gamma_w V_w}{W_s} \frac{W_s}{V_s} \right)}{(1+e)}$$

$$\gamma = \frac{\left(\gamma_s + \frac{\gamma_w V_w}{W_s} \frac{W_s}{V_s} \frac{V_v}{V_v} \right)}{(1+e)}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1+e}$$

$$17. \gamma = (1 - n)\gamma_s + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

Solución

$$\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s + \left(\frac{n}{1-n}\right) \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1 + \frac{n}{1-n}}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s + \left(\frac{n}{1-n}\right) \cdot Sr \cdot \gamma_w}{\frac{1-n+n}{1-n}}$$

$$\gamma = \frac{(1-n)\left(\gamma_s + \left(\frac{n}{1-n}\right) \cdot Sr \cdot \gamma_w\right)}{1}$$

$$\gamma = (1-n)\gamma_s + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

$$19. \gamma_d = \frac{\gamma_s}{(1+e)}$$

Solución

$$\gamma_d = \frac{W}{V} = \frac{\gamma_s V_s}{V_v + V_s}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{V_v + V_s}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{eV_s + V_s}$$

$$\gamma_d = \frac{V_s \gamma_s}{V_s(1+e)}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{(1+e)}$$

$$18. \gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

Solución

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s V_s}{V}$$

$$\gamma_d = \gamma_s \frac{(V - V_v)}{V}$$

$$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

$$20. \gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$$

Solución

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w}{(1+e)} - \gamma_w$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w - \gamma_w(1+e)}{(1+e)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e\gamma_w - \gamma_w - \gamma_w e}{(1+e)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{(1+e)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\left(1 + \frac{n}{1-n}\right)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\left(\frac{1-n+n}{1-n}\right)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\left(\frac{1}{1-n}\right)}$$

$$\gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$21. \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{(1 + e)}$$

Solución

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e \cdot \gamma_w}{(1 + e)} - \gamma_w$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s (+ e \cdot \gamma_w - \gamma_w 1 + e)}{(1 + e)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s + e\gamma_w - \gamma_w - \gamma_w e}{(1 + e)}$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{(1 + e)}$$

$$22. \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \gamma_d$$

Solución

$$\gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \left(1 - \frac{V_v}{V}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \left(\frac{(V - V_v)}{V}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \left(\frac{V_s}{V}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

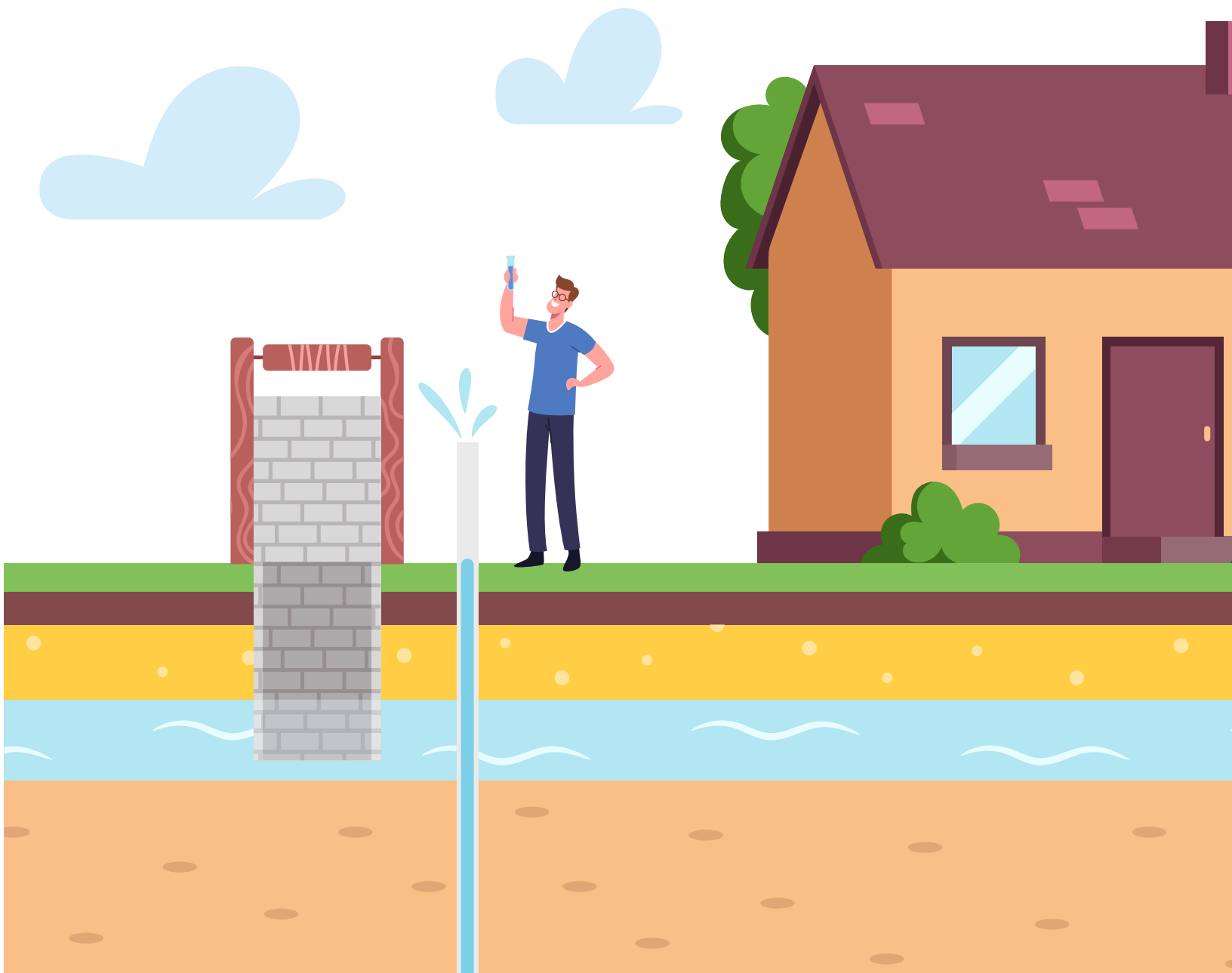
$$\gamma' = \left(\frac{\frac{W_s}{\gamma_s}}{\frac{V}{1}}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \left(\frac{W_s}{\gamma_s V}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right)(\gamma_s - \gamma_w)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \gamma_d$$

Permeabilidad



- I. Con los siguientes datos obtenga el coeficiente de permeabilidad **k**.

Longitud de la muestra del suelo	381 mm
Área de la muestra de suelo	19.4 cm ²
Área de la bureta	0.97 cm ²
La diferencia de carga en el tiempo t= 0	635 mm
La diferencia de carga en el tiempo t= 8 min	305 mm

Solución

1. Para poder hallar el coeficiente **k** utilizamos la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2.303 * \log_{10} \frac{h_1}{h_2} * a * L}{A(t_2 - t_1)}$$

2. Con los datos dados, reemplazamos en la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2.303 * \log_{10} \frac{635}{302} * 0.97 \text{ cm}^2 * 38.1 \text{ cm}}{19.4 \text{ cm}^2 (480 - 0) \text{ s}}$$

$$k = 2.91086 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

- II. Para una prueba de laboratorio de permeabilidad de carga constante sobre arena fina, se dan los siguientes valores:

21

Longitud de la muestra del suelo	30 cm
Diámetro de la muestra de suelo:	15 cm
Diferencia de carga	50 cm
Agua recolectada en 5 min	350 cm ³
Reducción de vacíos	0.46

Determine:

- Conductividad hidráulica, **k**, del suelo (cm/s).
- Velocidad de descarga (cm/s).
- Velocidad de filtración (cm/s).

Solución

1. Para el inciso **a** hallamos el componente **k** utilizando la siguiente ecuación:

$$k = \frac{350 \text{ cm}^3}{\frac{50}{30} * \left(\frac{\pi (15)^2}{4} \right) * (300 \text{ s})}$$

$$k = 3.96 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

2. Para hallar la velocidad de descarga, utilizamos la ecuación de la **Ley de Darcy**:

$$v = k * i$$

$$v = 3.96 \times 10^{-3} \frac{cm}{s} * \left(\frac{50}{30} \right)$$

$$v = 6.6 \times 10^{-3} \frac{cm}{s}$$

3. Para hallar la velocidad de infiltración, utilizamos la siguiente ecuación:

$$v_i = \frac{v}{n}$$

$$v_i = \frac{6.6 \times 10^{-3}}{0.46}$$

$$v_i = 0.0143 \frac{cm}{s}$$

III. Estime la conductividad hidráulica equivalente (cm/s), para el flujo en la dirección horizontal. También, calcule la relación de **Kv** y **Kh**.

22

$k = 2 \times 10^{-3} \frac{cm}{s}$	1,5 m
$k = 2 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}$	1 m
$k = 10^{-4} \frac{cm}{s}$	1,5 m
$k = 3 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}$	1 m

Solución

1. Para poder hallar el flujo horizontal utilizamos la siguiente ecuación:

$$k_{eqh} = \left[\frac{(2 \times 10^{-3} * 150 \text{ cm}) + (2 \times 10^{-4} * 100 \text{ cm}) + (10^{-4} * 150 \text{ cm}) + (3 \times 10^{-4} * 100)}{500} \right]$$

$$k_{eq} = 7.3 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}$$

2. Para calcular el flujo vertical utilizamos la siguiente ecuación:

$$k_{eqv} = \frac{500}{\frac{2 \times 10^{-3}}{150} + \frac{2 \times 10^{-4}}{100} + \frac{10^{-4}}{150} + \frac{3 \times 10^{-3}}{150}}$$
$$k_{eq} = 2.076 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}$$

3. Para hallar la relación de **Kv** y **Kh** realizamos una división entre el **Kv** sobre el **Kh**.

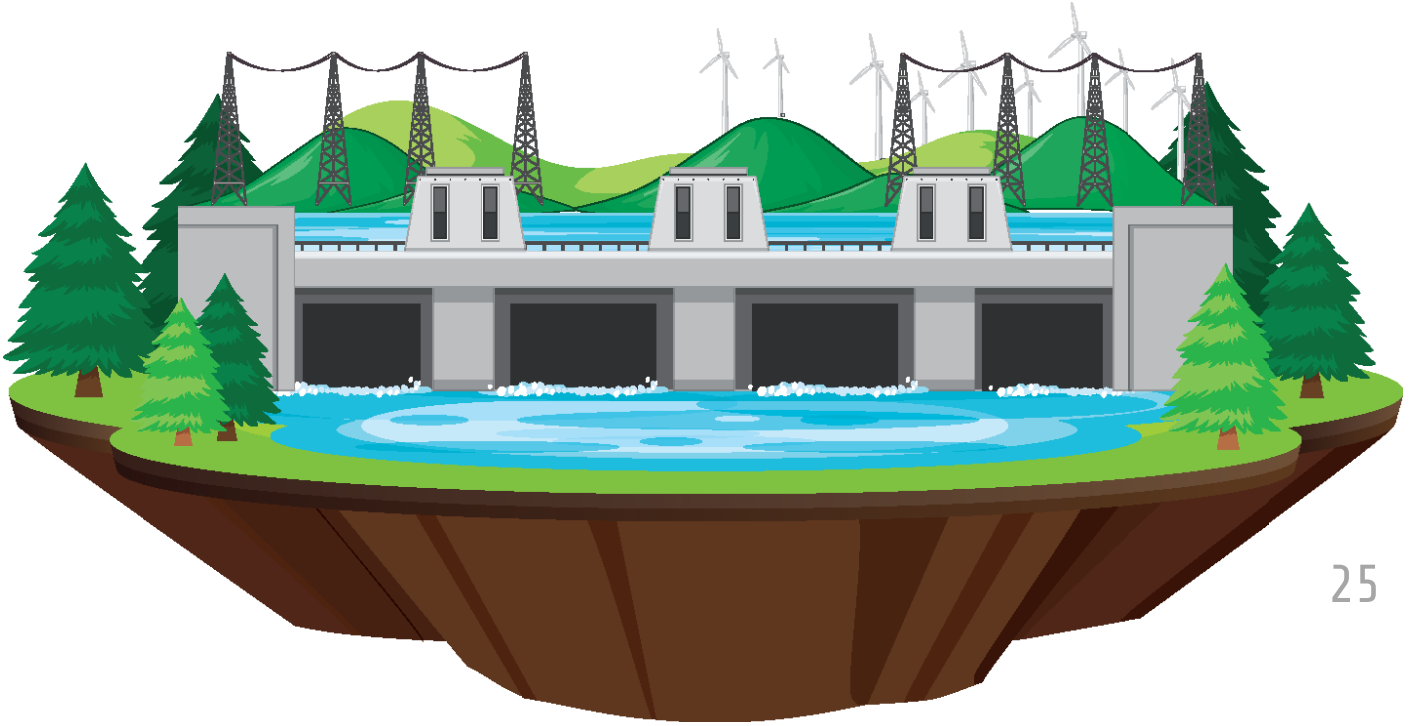
$$\frac{K_{veq}}{K_{heq}} = \frac{2.076 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}}{7.3 \times 10^{-4} \frac{cm}{s}} = 0.28$$

IV. Explique, ¿qué factores pueden afectar el coeficiente hidráulico o de permeabilidad (**K**)? y ¿este qué significa?

Solución

K es la facilidad con la que el agua se puede ver en el suelo y los factores que influyen son **Cc**, **Cu**, la forma y orientación de las partículas, volumen de vacíos, porosidad del suelo, granulometría y volumen de sólidos.

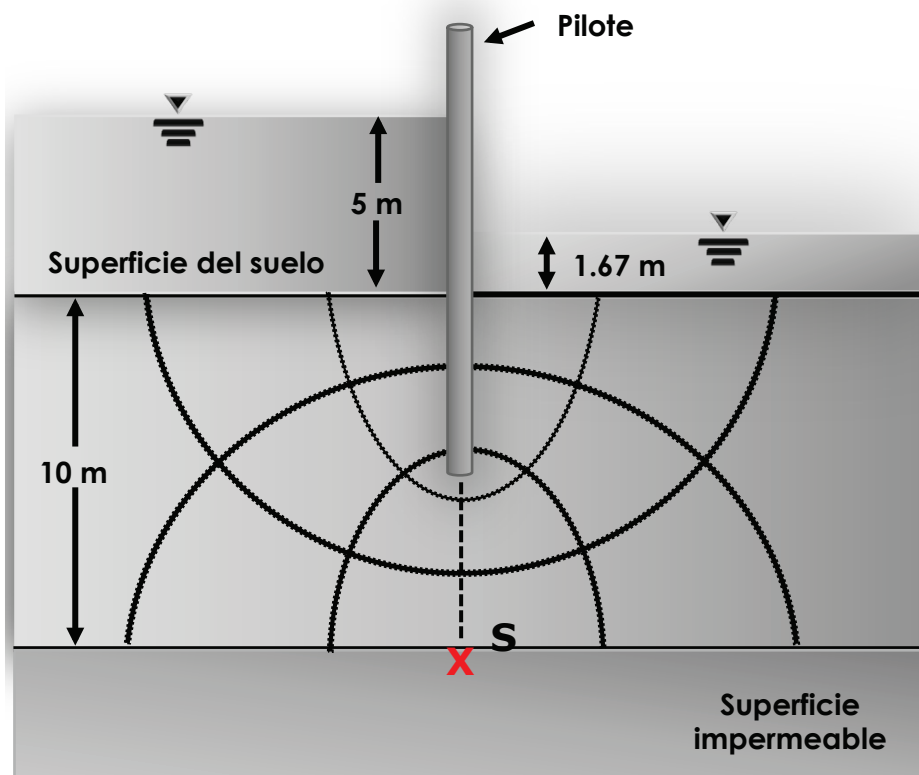
Redes de flujo



25

- I. Se muestra una red de flujo (ver figura 1.) en torno de una estructura de contención compuesta por una fila de 50 pilotes de diámetro 0.8 m en una capa de suelo permeable. Si se asume que el suelo es isotrópico y que el coeficiente de permeabilidad es de 3.96×10^{-5} m/s, calcular:
- Caudal de infiltración. El caudal total de infiltración será calculado, de acuerdo a lo aprendido en la clase, si multiplicamos por el ancho de la estructura de contención.
 - Presión hidrostática en la punta del pilote.
 - Carga hidráulica en el punto marcado con una x y denotado como **S** mostrado en la figura 1.

Figura 1. Red de flujo.



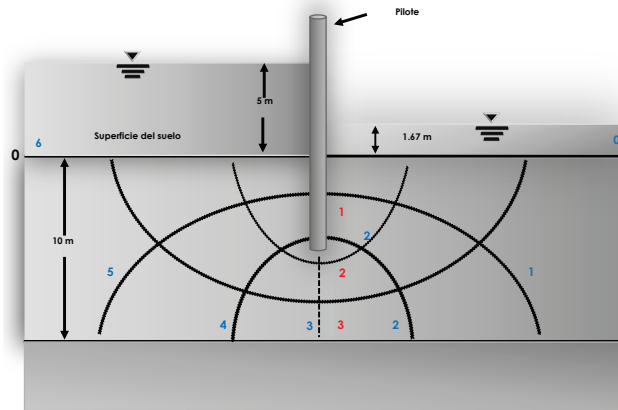
Fuente: elaboración propia a partir de Braja M. Das. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning Editores, S. A.

Solución

- Contamos la cantidad de Líneas Equipotenciales (**ND**) y Líneas de Flujo (**NF**) (ver figura 2).

Figura 2. Red de flujo.

NF= 3
ND= 6



Fuente: elaboración propia a partir de Braja M. Das. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning Editores, S. A.

- Para solucionar el inciso **a** usaremos la siguiente ecuación y reemplazamos con los datos dados.

$$Q = \frac{K * \Delta h}{ND} * NF * l_{transversal}$$

$$Q = 3.96 \times 10^{-5} \frac{m}{s} * \frac{(5 - 1.67)m}{6} * 30 * 40 m$$

$$Q = 2.64 \times 10^{-2} \frac{m^3}{s}$$

- Para solucionar el inciso **c** debemos hallar la carga hidráulica (**h**) mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{\Delta h}{ND}$$

$$h = \frac{(5 - 1.67)m}{6}$$

$$h = 0.555 m$$

- Una vez obtenida la carga hidráulica (**h**), hallamos la carga hidráulica en el punto **S**.

$$h_s = \text{cargas aguas abajo} + (h * \# \text{Equipotencial})$$

$$h_s = 1.67 m + (0.555 m * 3)$$

$$h_s = 3.335 m$$

- Para obtener la presión hidrostática del inciso **b** usamos la siguiente ecuación:

$$\mu_n = Y'w(h_s - Z_n)$$

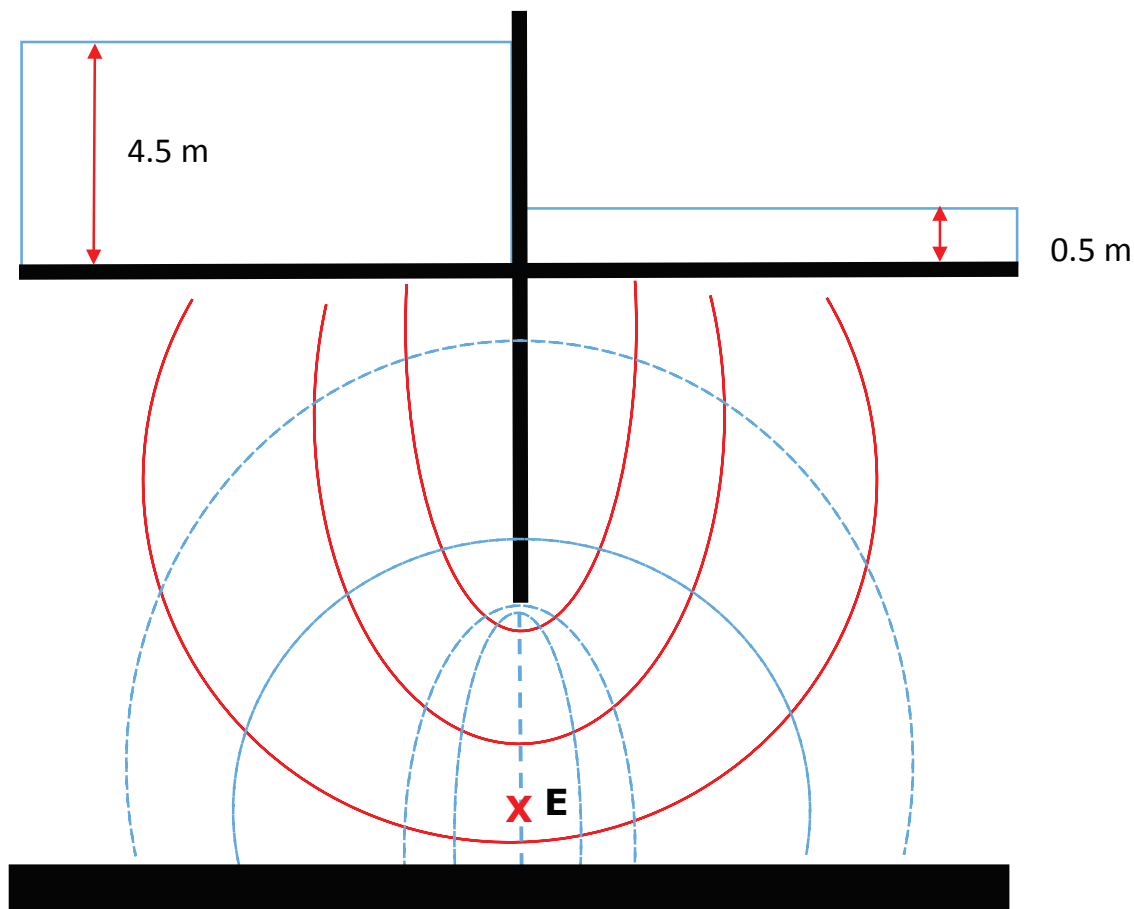
$$\mu_n = 9.81(3.335 - (-5.26))$$

$$\mu_n = 84.32 KPa$$

II. La siguiente red de flujo (ver figura 3) tiene un coeficiente de permeabilidad k de $1 \times 10^{-8} \frac{m}{s}$ y tiene 50 pilotes con un diámetro de 60 cm. Calcular:

- El caudal.
- Hallar la presión en el punto **E** y el peso mínimo de cada cilindro.

Figura 3. Red de Flujo en pilotes.



Fuente: Arguello Vera (2021).

Solución

A. $\Delta h = \text{Agua arriba} - \text{Aguas abajo}$

$$\Delta h = 4.5 \text{ m} - 0.5 \text{ m}$$

$$\Delta h = 4 \text{ m}$$

$$Q = k * \frac{\Delta h}{ND} * NF * L$$

$$Q = 1 \times 10^{-8} \frac{m}{s} * \frac{4 \text{ m}}{10} * 4 * (50 * 0.6 \text{ m})$$

$$Q = 4.8 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

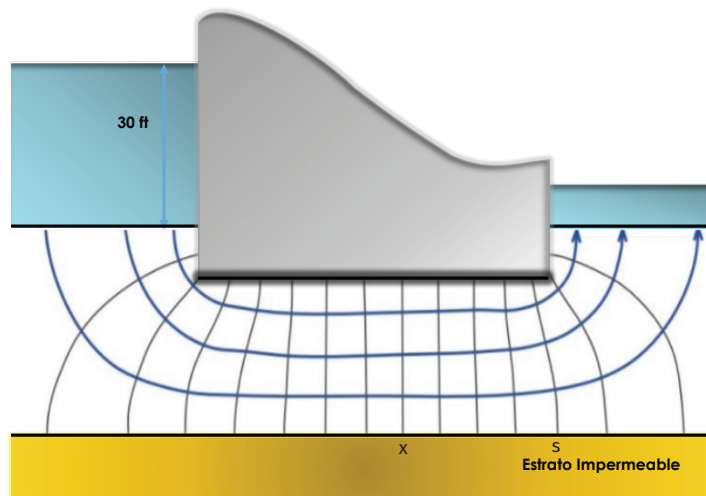
B. $H_e = 0.5 + (0.4(5))$
 $H_e = 2.5 \text{ m}$
 $H_e = \frac{\mu_E}{\gamma'_s} + Z_E$
 $2,5 \text{ m} = \frac{\mu_E}{10 \text{ kN}} - 6$
 $\mu_E = (2.5 - (-6))(10)$
 $\mu_E = 85 \text{ KPa}$
 $w = \rho * A$
 $w = 85 \text{ KPa} * 0.28 \text{ m}^2$
 $w = 23.8 \text{ kN}$

III. Se muestra una red de flujo (ver figura 4) en torno de una estructura de contención que tiene una lámina de agua de 30 pies aguas arriba y 1 pie aguas abajo en una capa de suelo permeable. Si se asume que el suelo es isotrópico, y el coeficiente de permeabilidad es $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, calcular:

- Caudal de infiltración. El caudal total de infiltración será calculado, de acuerdo a lo aprendido en la clase, al multiplicar por el ancho de la estructura de contención que, para el caso, será de 0.1 millas.
- Carga hidráulica en el punto marcado con una x y denotado como **S** mostrado en la figura 4.

30

Figura 4. Ejemplo red de flujo bajo una presa



Fuente: Víctor Yepes Piqueras. (2020). Conceptos básicos del agua en medio poroso. Poli blogs. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/03/22/conceptos-basicos-del-agua-en-medio-poroso/>

Solución

a.
$$q = k * \frac{\Delta h * NF * L}{ND}$$

$$q = \frac{\frac{1 \times 10^{-5} m}{s} * \left[23 * \frac{1}{3.28084} \right] * 4 * \left[528 * \frac{1}{3.28084} \right]}{15}$$

$$q = 3.009 \times 10^{-3} m^3/s$$

b.
$$h_s = \text{cargas aguas abajo} + \left(\frac{\Delta h}{ND} * \#Equipotencial \right)$$

$$h_s = 7 \text{ ft} + \left(\frac{23}{15} * 5 \right)$$

$$h_s = 14,7 \text{ ft}$$

$$\mu_s = Y' (h_s - Z)$$

$$\mu_s = 10 \text{ kN}/m^2 (25 - 14.7) \text{ ft}$$

$$\mu_s = 31.4 \frac{kN}{m^2}$$

Compactación



33

- I. La densidad seca máxima a la que se debe compactar un terraplén sobre la vía a Cáqueza es 1.876 kg/m^3 . Después de varias horas de vibro compactador, el grado de compactación no alcanzó los niveles exigidos, y en un acto desesperado y no ético, el ingeniero residente decide manipular los ensayos para alcanzar el valor de la densidad seca solicitada. Dados los valores del ensayo, ¿cuál será el valor de la densidad de la arena de Ottawa que debe escribir el ingeniero residente para alcanzar el valor solicitado?

Masa de la jarra + cono + arena (antes de su uso)	7.59 kg
Masa de la jarra + cono + arena (después de su uso)	4.78 kg
Calibrada masa de arena de Ottawa para llenar el cono	0.545 kg
Masa de suelo húmedo del agujero	3.007 kg
Contenido de humedad del suelo húmedo	10.2

Solución

1. Masa de arena de Ottawa que se gastó en el cono.

$$\begin{aligned}
 m_{4(\text{cono})} &= m_1 - m_2 \\
 m_{4(\text{cono})} &= 7.59 - 4.78 \\
 m_{4(\text{cono})} &= 2.81 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2. Masa de arena de Ottawa que se gastó en el agujero

$$\begin{aligned}
 m_{5(\text{agujero})} &= m_4 - m_3 \\
 m_{5(\text{agujero})} &= 2.81 - 0.545 \\
 m_{5(\text{agujero})} &= 2.265 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

3. Densidad máxima a la que debe estar el suelo natural

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{suelo natural}} &= \rho_d(1 + w) \\
 \rho_{\text{suelo natural}} &= 1876(1 + 0.102) \\
 \rho_{\text{suelo natural}} &= 2067.352 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

4. Volumen del agujero

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \\
 V_{\text{agujero}} &= \frac{m_{\text{suelo húmedo}}}{\rho_{\text{suelo natural}}} \\
 V_{\text{agujero}} &= \frac{3.007}{2067.352} \\
 V_{\text{agujero}} &= 0.001454
 \end{aligned}$$

5. Densidad de la arena de Ottawa

$$\rho_{arena\ Ottawa} = \frac{m_{5(agujero)}}{V_{agujero}}$$

$$\rho_{arena\ Ottawa} = \frac{2.265}{0.001454}$$

$$\rho_{arena\ Ottawa} = 1557.2\ kg/m^3$$

II. De acuerdo con las medidas presentadas a continuación y los datos dados en el aula, calcular la energía de compactación de los ensayos de **Proctor estándar** y **Proctor modificado**.

CÓDIGO DEL PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	DIÁMETRO INTERNO	ALTURA DEL CUERPO
UTS-0600	Molde Proctor Estándar	101.6± 0.4 mm	116.4± 0.4 mm
UTS-0604	Molde Proctor Modificado	152.4 ± 0.7 mm	116.4± 0.5 mm

Solución

1. Modelo de Proctor estándar

$$K_c = \frac{W_m * h_c + N_c}{\nabla_{ol}}$$

$$\emptyset = (101.6\ mm) \left(\frac{1\ cm}{10\ mm} \right) \left(\frac{1\ ft}{30.48} \right)$$

$$K_c = \frac{5.5\ lb * 1\ ft * 3 * 25}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{1}{3} \right)^2 * \frac{97}{254}}$$

$$K_c = 12377.66\ lb/ft^3$$

2. Modelo de Proctor modificado

$$K_c = \frac{10\ lb * 1.5\ ft * 56 * 5}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{1}{2} \right)^2 * \frac{97}{254}}$$

$$K_c = 56012.04\ lb/ft^3$$

III. El residente de una obra busca compactar una carpeta granular. Recibe tres volquetas doble-troques (volumen por volqueta 17 m3) que juntas traen 96.9 (toneladas) en total de material de cantera, con un Gs= 2.65 y una humedad del 4 %. Posteriormente, al interpretar el ensayo de Proctor modificado del material, se concluye que debe compactarse a una humedad del 13 % para alcanzar su máxima

densidad seca. De acuerdo a estos valores, qué cantidad de agua en litros deberá ser agregada (tomar densidad del agua 1gr/cm³).

Solución

$$1. \quad w = \frac{mw}{ms} \rightarrow mw = wms$$

$$m_{Total} = ms + mw$$

$$m_{Total} = ms + wms$$

$$2. \quad m_d = \frac{m}{1+w}$$

$$\Delta Agua = m_2 - m_1$$

$$m_1 = m_d \cdot (1 + w_1)$$

$$m_2 = m_d \cdot (1 + w_2)$$

$$3. \quad \Delta Agua = m_d \cdot (1 + w_2) - m_d \cdot (1 + w_1)$$

$$\Delta Agua = m_d \cdot (1 + w_2 - 1 - w_1)$$

$$\Delta Agua = M_d \cdot (w_2 - w_1)$$

$$\Delta Agua = \frac{m}{1+w} \cdot (w_2 - w_1)$$

$$\Delta Agua = \frac{96900}{1 + 0.04} \cdot 0.13$$

$$\Delta Agua = 8386 \text{ Kg}$$

$$4. \quad \rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{agua} = \frac{8386000 \text{ gr}}{1 \text{ gr/cm}^3}$$

$$V_{agua} = 8386000 \text{ cm}^3 \cdot \frac{1L}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V_{agua} = 8386 \text{ L}$$

IV. El material utilizado en la corona del terraplén de la Vía Villavicencio- Acacias fue sometido a un Proctor modificado, los resultados son expuestos en la siguiente ecuación:

$$\rho d = -0.0116 w^2 + 0.4084 w - 1.6334$$

La ecuación está escrita para las humedades como porcentaje y ρd en g/cm³; asumir g=9.81 m/s². Con los datos anteriores, calcule el peso específico máximo en (kN/m³) y la humedad óptima.

Además, los resultados de los ensayos de cono y arena usados para evaluar el **GC** del terraplén arrojaron los siguientes datos con respecto al valor de peso específico seco:

Prueba 1	17.87 kN/m ³
Prueba 2	16.65 kN/m ³
Prueba 3	17.17 kN/m ³
Prueba 4	15.99 kN/m ³
Prueba 5	17.00 kN/m ³

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, evalúe como interventor si aceptaría o no el lote compactado. Emita un concepto a través del cálculo del **GC**.

Solución

1. Hallamos el peso específico seco máximo y la humedad óptima.

$$W \text{ Óptima } (\%) = \frac{-b}{2a}$$

$$W \text{ Óptima } (\%) = \frac{-0.4084}{2(-0.0116)}$$

$$W \text{ Óptima } (\%) = 17.603$$

$$\rho d = -0.0116 w^2 + 0.4084 w - 1.6334$$

$$\rho d = -0.0116 (17.603)^2 + 0.4084 (17.603) - 1.6334$$

$$\rho d = 1.961 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho d = 19.240 \text{ kN/m}^3$$

2. Valor medio de la muestra

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n}$$

$$V_m = \frac{17.87 + 16.65 + 17.17 + 15.99 + 17.00}{5}$$

$$V_m = 16.936 \text{ kN/m}^3$$

3. Desviación estándar de la muestra

$$S = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_m)^2}{n - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(17.87 - 16.94)^2 + (16.65 - 16.94)^2 + (17.17 - 16.94)^2 + (15.99 - 16.94)^2 + (17.00 - 16.94)^2}{5 - 1}}$$

$$S = 0.691 \text{ kN/m}^3$$

4. Tabla de factor que establece los límites del intervalo de confianza **k**

PROBABILIDAD, p(%)	NÚMERO DE RESULTADOS, n									
	P	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	60	0.138	0.121	0.109	0.100	0.093	0.087	0.083	0.078	0.075
	70	0.292	0.254	0.228	0.209	0.194	0.182	0.172	0.163	0.156
	75	0.382	0.331	0.297	0.271	0.251	0.235	0.222	0.211	0.201
	80	0.489	0.421	0.375	0.342	0.317	0.296	0.279	0.265	0.253
	85	0.625	0.532	0.472	0.429	0.396	0.369	0.348	0.330	0.314
	90	0.819	0.686	0.603	0.544	0.500	0.466	0.437	0.414	0.394
	95	1.177	0.953	0.823	0.734	0.670	0.620	0.580	0.546	0.518
	99	2.270	1.676	1.374	1.188	1.060	0.965	0.892	0.833	0.785

Fuente: INVIAS (2013). Normativa técnica para el diseño de carreteras.

$$GC_1(90) \geq 90.0\% \text{ (Cimiento y núcleo)}$$

$$GC_1(90) \geq 95.0\% \text{ (Corona)}$$

Teniendo en cuenta una probabilidad del 90%, el tamaño de la muestra (5), y la tabla mostrada anteriormente se determina el factor **k=0.686**.

5. Límite inferior y Límite superior

Límite inferior

$$Vi(p) = Vm - k(p)xs$$

$$Vi(p) = 16.936 - 0.686 * 0.691$$

$$Vi(p) = \mathbf{16.462 \text{ kN/m}^3}$$

Límite superior

$$Vi_{sup}(p) = Vm + k(p)xs$$

$$Vi_{sup}(p) = 16.936 + 0.686 * 0.691$$

$$Vi_{sup}(p) = \mathbf{17.410 \text{ kN/m}^3}$$

6. Grado de compactación inferior

$$GC_i = \frac{\gamma_{d,i}}{\gamma_{d,m\grave{a}x}} \times 100$$

$$GC_i = \frac{16.462}{19.24} \times 100$$

$$GC_i = \mathbf{85.56 \%}$$

7. Criterio de aceptación **e**

$$GC_i(90) \geq 95.0 \%$$

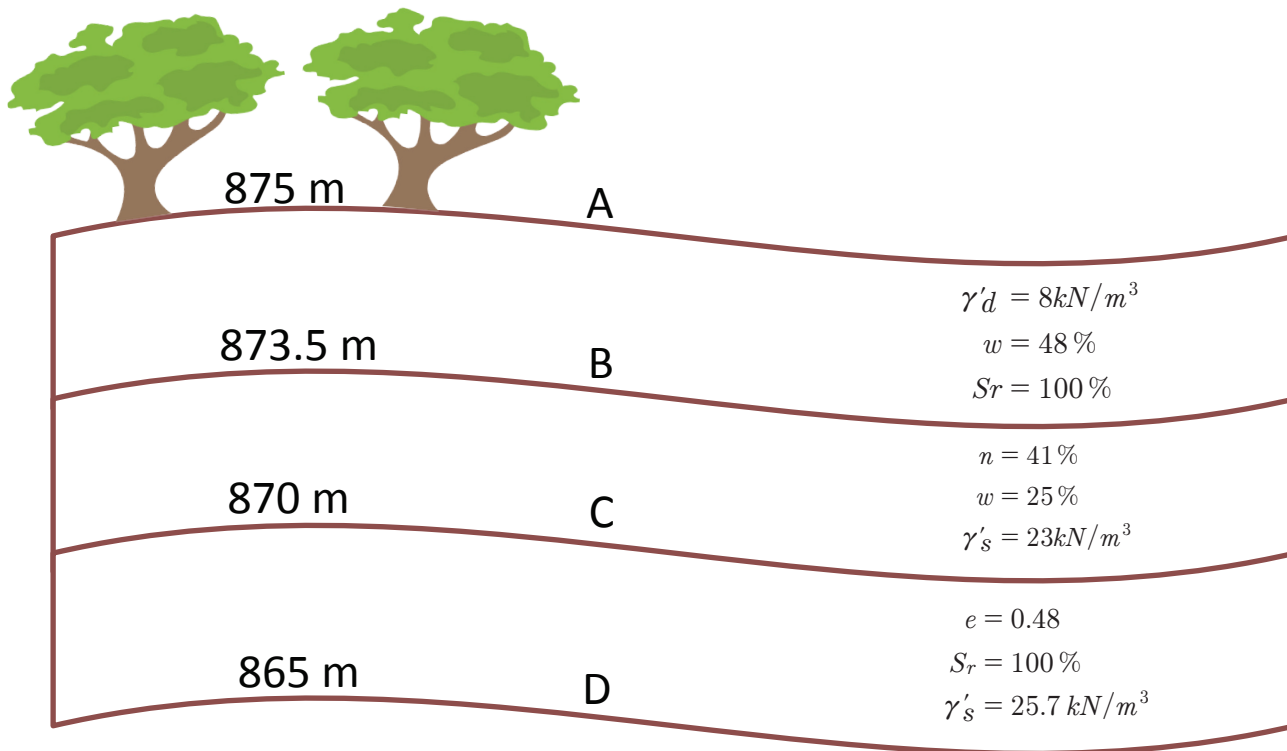
* No aceptaría ese lote compactado teniendo en cuenta que el grado de compactación es aproximadamente 10% menor al esperado.

Esfuerzos



- I. Calcule el esfuerzo total, la presión de agua intersticial y el esfuerzo efectivo en los puntos A, B, C, D.

Figura 5. Estratigrafía del suelo para determinar el esfuerzo total y presión de agua intersticial



Fuente: elaboración propia.

Solución

Primer estrato

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma'_d (1 + w) \\ \gamma' &= 8 \text{ kN/m}^3 (1 + 0.48) \\ \gamma' &= 11.48 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_B &= \gamma' * Z \\ \sigma_B &= 11.48 * 1.5 \\ \sigma_B &= 17.16 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_B &= 1.5 * 9.81 \\ \mu_B &= 14.715 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

Segundo estrato

$$\begin{aligned}\sigma_C &= 16.96 \text{ kN/m}^3 * 3.5 \text{ m} \\ \sigma_C &= 59.369 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_C &= 59.369 \text{ kN/m}^2 + 17.16 \text{ kN/m}^2 \\ \sigma_C &= 70.849 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_C &= 5 * 9.81 \\ \mu_C &= 49.05\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma'_s \left(\frac{1 + w}{1 + e} \right) \\ \gamma' &= 23 \text{ kN/m}^3 \left(\frac{1 + 0.25}{1 + 0.695} \right) \\ \gamma' &= 16.96 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

Tercer Estrato

$$\gamma' = \frac{\gamma'_s + e * \gamma'_w * S_R}{1 + e}$$

$$\gamma' = 20.546 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_D = 20.546 * 5 + \sigma_C$$

$$\sigma_D = 102.732 + 70.849$$

$$\sigma_D = 173.581 \text{ kN/m}^2$$

$$\mu_C = 10 * 9.81$$

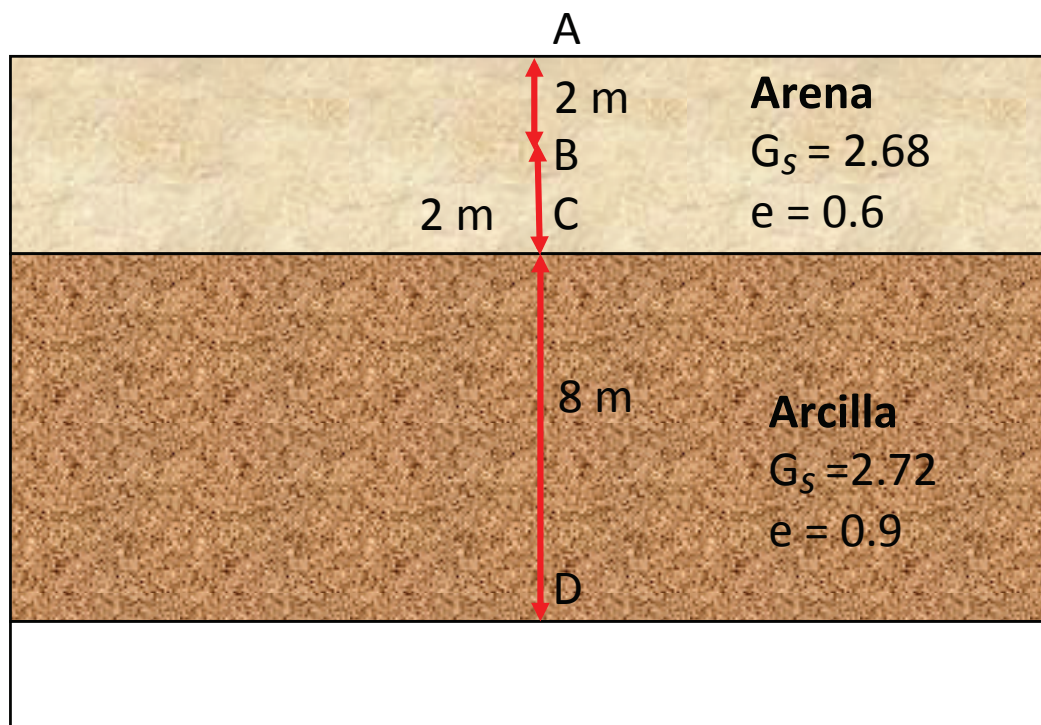
$$\mu_C = 98.1 \text{ kN/m}^2$$

	σ	μ	σ'
A	0	0	0
B	17.76	14.715	3.045
C	70.849	49.05	21.799
D	173.581	98.1	75.481

II. Calcule el esfuerzo total, presión de poros y el esfuerzo efectivo.

Figura 6. Perfil de suelo para el cálculo de esfuerzos.

44



Fuente: elaboración propia.

Solución

$$\gamma'_D = \frac{\gamma'_W * G_S}{1 + e}$$

$$\gamma'_D = \frac{2.68 * 9.81}{1 + 0.6}$$

$$\gamma'_D = 16.43 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma'_{Sat} = \frac{(G_S + e)\gamma'_W}{1 + e}$$

$$\gamma'_{Sat} = \frac{(2.72 + 0.9) * 9.81}{1 + 0.9}$$

$$\gamma'_{Sat} = 18.69 \text{ kN/m}^3$$

Primer estrato

$$\sigma_B = \gamma_1 Z_1$$

$$\sigma_B = 2(16.43)$$

$$\sigma_B = 32.86 \text{ kN/m}^2$$

Segundo estrato

$$\sigma_C = \gamma_1 Z_2$$

$$\sigma_C = 4(16.43)$$

$$\sigma_C = 65.72 \text{ kN/m}^2$$

Tercer estrato

$$\sigma = 4(16.43) + 8(18.69)$$

$$\sigma = 215.24 \text{ kN/m}^2$$

$$U = 9.81(8)$$

$$U = 78.48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma' = \sigma - U$$

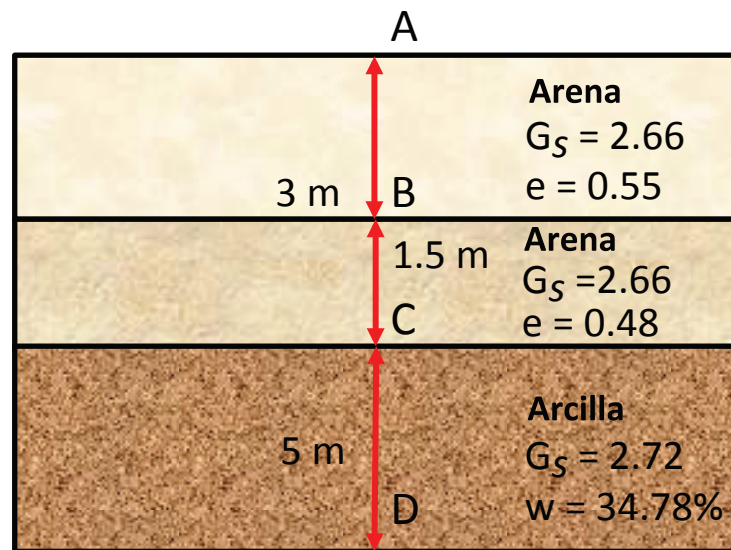
$$\sigma' = 136.76 \text{ kN/m}^2$$

45

	σ	U	σ'
A	0	0	0
B	32.86	0	32.86
C	65.72	0	65.72
D	215.24	78.48	136.76

III. Calcule el esfuerzo total, presión de poro y el esfuerzo efectivo.

Figura 7. Perfil de suelo para el cálculo de esfuerzos.



Fuente: elaboración propia.

Solución

Primer estrato

$$\begin{aligned} V_s &= 1 \text{ m}^3 \\ V_v &= 0.55 \text{ m}^3 \\ V_m &= 1.55 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma'_D &= \frac{W_s}{V_m} \\ \gamma'_D &= \frac{26.09 \text{ kN}}{1.55 \text{ m}^3} \\ \gamma'_D &= 16.83 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

$$V_s = \frac{W_s}{V_s * \gamma'_w}$$

$$W_s = G_s * V_s * \gamma'_w$$

$$W_s = 2.66 * 1 \text{ m}^3 * 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$W_s = 26.09 \text{ kN}$$

Segundo estrato

$$\begin{aligned} V_s &= 1 \text{ m}^3 \\ V_v &= 0.48 \text{ m}^3 \\ V_m &= 1.48 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$W_s = G_s * V_s * \gamma'_w$$

$$W_s = 2.66 * 1 \text{ m}^3 * 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$W_s = 26.09 \text{ kN}$$

$$\gamma'_w = \frac{W_w}{V_m}$$

$$W_w = V_w * \gamma'_w$$

$$W_w = 0.48 * 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$W_w = 4.71 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma'_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_m}$$

$$\gamma'_{sat} = \frac{26.09 + 4.71}{1.48}$$

$$\gamma'_{sat} = 20.81 \text{ kN/m}^3$$

Tercer estrato

$$W_s = 1 \text{ kN}$$

$$W_w = w * W_s$$

$$W_w = 0.3478 \text{ kN}$$

$$V_s = \frac{W_s}{G_s * \gamma'_w}$$

$$V_s = \frac{1 \text{ kN}}{2.72 \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$V_s = 0.0374 \text{ m}^3$$

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma'_w}$$

$$V_w = \frac{0.3478 \text{ kN}}{9.81 \text{ kN/m}^3}$$

$$V_w = 0.0355 \text{ m}^3$$

$$\gamma'_{sat} = \frac{W_s + W_w}{V_m + V_s}$$

$$\gamma'_{sat} = \frac{1 \text{ kN} + 0.3478 \text{ kN}}{0.0374 \text{ m}^3 + 0.0355 \text{ m}^3}$$

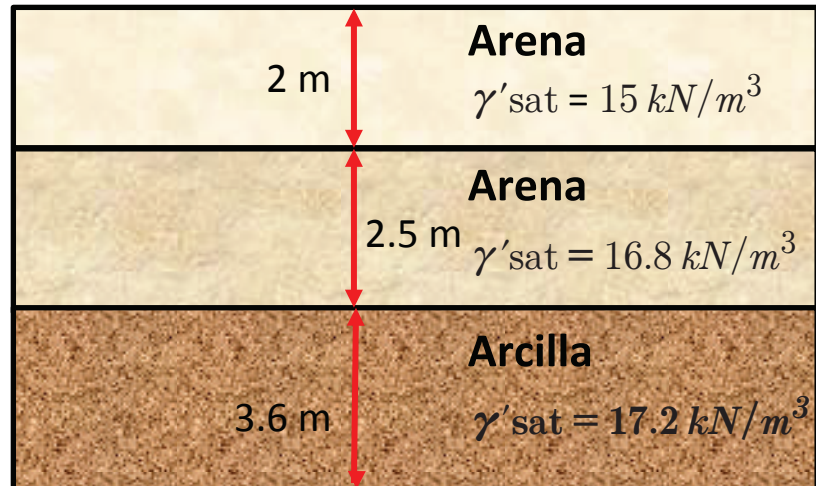
$$\gamma'_{sat} = 18.48 \text{ kN/m}^3$$

47

	σ	U	σ'
A	0	0	0
B	50.49	0	50.49
C	81.71	14.72	66.99
D	174.11	63.77	110.34

- IV. Determine la magnitud del esfuerzo efectivo en los puntos A, B y C para el perfil dado. Los puntos A y B se encuentran a 0.8 m y 3.3 m desde superficie respectivamente. El nivel freático está a 2.0 m desde la superficie.

Figura 8. Perfil estratigráfico para determinar magnitud de esfuerzo



Fuente: elaboración propia.

48

Solución

Primer estrato

$$\sigma = \gamma'_{sat} * Z_A$$

$$\sigma = 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,8 \text{ m}$$

$$\sigma = 12 \text{ KPa}$$

$$U = \gamma'_w - Z_{WA}$$

$$U = 0 \text{ KPa}$$

$$\sigma' = \sigma - U$$

$$\sigma' = 12 \text{ KPa}$$

Segundo estrato

$$\sigma = 15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 2 \text{ m} + 16.8 \text{ kN/m}^3 * 1.3 \text{ m}$$

$$\sigma = 51.84 \text{ KPa}$$

$$U = \gamma'_w - Z_{WB}$$

$$U = 9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 1.3 \text{ m}$$

$$U = 12.8 \text{ KPa}$$

$$\sigma' = \sigma - U$$

$$\sigma' = 39.1 \text{ KPa}$$

Tercer estrato

$$\sigma = 15 \frac{kN}{m^3} * 2m + 16.8 \frac{kN}{m^3} * 2.5 m + 17.2 \frac{kN}{m^3} * 3.6m$$

$$\sigma = 133.92 \text{ KPa}$$

$$U = \gamma'_w - Z_{wc}$$

$$U = 9.81 \frac{kN}{m^3} * 6,1 m$$

$$U = 59.84 \text{ KPa}$$

$$\sigma' = \sigma - U$$

$$\sigma' = 74.08 \text{ KPa}$$

	σ	U	σ'
A	12	0	12
B	51.84	12.8	39.04
C	133.92	59.8	74.08

Incremento de esfuerzos



- I. El edificio Llano Alto fue construido sobre una extensa llanura que tiene depósitos de suelo residual y arena limosa hasta los 20m; además, es importante destacar que el nivel freático se encuentra a 2m de profundidad. La distancia entre la zapata más próxima a la vía y el borde de la vía Catama es de, aproximadamente, 5m y el ingeniero calculista indicó que a una profundidad de 3m el incremento de esfuerzo efectivo es de 3.825 KPa.

Con los datos dados, indique la carga en toneladas que recibe la zapata (escriba únicamente la cifra sin unidades y tome la gravedad como 10 m/s²):

DATOS GENERALES	
h	20 m
NF	2 m
r	8 m
Z	6 m
$\Delta\sigma$	2.06 KPa

Solución

$$Q = \frac{2\pi * z^2 * \Delta\sigma}{3 * \left(\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right)^{5/2}} \right)}$$

$$Q = \frac{2\pi * 6^2 * 2.06 \text{ KPa}}{3 * \left(\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{8}{6} \right)^2 \right)^{5/2}} \right)}$$

$$Q = (1997.432 \text{ kN}) * \left(\frac{1 \text{ Ton}}{10 \text{ kN}} \right)$$

$$Q = 199.74 \text{ Ton}$$

- II. El perfil estratigráfico de un lote está compuesto por una arena saturada con porosidad del 48 % y un índice Gs = 2.65 de 3 m de espesor sobre una arena limosa más densa. El peso específico es de 23.5 kN/m³. Halle el $\Delta\sigma$ y índice h teniendo en cuenta la relación de Poisson de 0.3 para los dos suelos y el esfuerzo total horizontal de 6 m de profundidad. (Tome g como 10 m/sg²)

DATOS ESPECÍFICOS		
Arena Saturada	n	0.48
	Gs	2.65
	h	3 m
Arena Limosa	γ_2	23.5 kN/m ³
	$\Delta\sigma$	Hallar

DATOS GENERALES	
v	0.3
z	6 m
w	10 kN/m ³

Solución

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$$e = \frac{0.48}{1 - 0.48}$$

$$e = 0.923$$

$$w = \frac{e}{G_s}$$

$$w = \frac{0.923}{2.65}$$

$$w = 0.348$$

$$\gamma'_1 = \gamma'_w * G_s * \frac{1 + w}{1 + e}$$

$$\gamma'_1 = 10 \text{ kN/m}^3 * 2.65 * \frac{1 + 0.348}{1 + 0.923}$$

$$\gamma'_1 = 18.58 \text{ kN/m}^3$$

$$\Delta\sigma = \gamma'_1 + (\gamma'_1 * (z - h))$$

$$\Delta\sigma = 18.58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 3\text{m} + 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * (6\text{m} - 3\text{m})$$

$$\Delta\sigma = 126.24 \text{ KPa}$$

54

- III. El perfil estratigráfico de un lote contiene una arena saturada cuya porosidad es del 48% y un $G_s = 2.65$ de 3 m de espesor que yace sobre una arena limosa más densa. El peso específico es de 23.5 kN/m^3 . Si la relación de Poisson para los dos suelos es de 0.3 y el esfuerzo total está a una profundidad de 6m. (Tome g como 10 m/s^2). Determinar $\Delta\sigma_h$.

Solución

DATOS ESPECÍFICOS			DATOS GENERALES	
Arena Saturada	n	0.48	v	0.3
	G_s	2.65	z	6 m
	h	3 m	w	10 kN/m^3
Arena Limosa	γ_2	23.5 kN/m^3		
	$\Delta\sigma$	126.24 KPa		

$$e = \frac{n}{1-n}$$

$$e = \frac{0.48}{1-0.48}$$

$$e = 0.923$$

$$w = \frac{e}{G_s}$$

$$w = \frac{0.923}{2.65}$$

$$w = 0.348$$

$$\gamma'_1 = \gamma'_w * G_s * \frac{1+w}{1+e}$$

$$\gamma'_1 = 10 \text{ kN/m}^3 * 2.65 * \frac{1+0.348}{1+0.923}$$

$$\gamma'_1 = 18.58 \text{ kN/m}^3$$

$$\Delta\sigma = \gamma'_1 + (\gamma'_1 * (z-h))$$

$$\Delta\sigma = 18.58 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 3\text{m} + 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * (6\text{m} - 3\text{m})$$

$$\Delta\sigma = 126.24 \text{ KPa}$$

$$K_o = \frac{v}{1-v}$$

$$K_o = \frac{0.3}{1-0.3}$$

$$K_o = 0.43$$

$$\Delta\sigma_h = \Delta\sigma_v * K_o$$

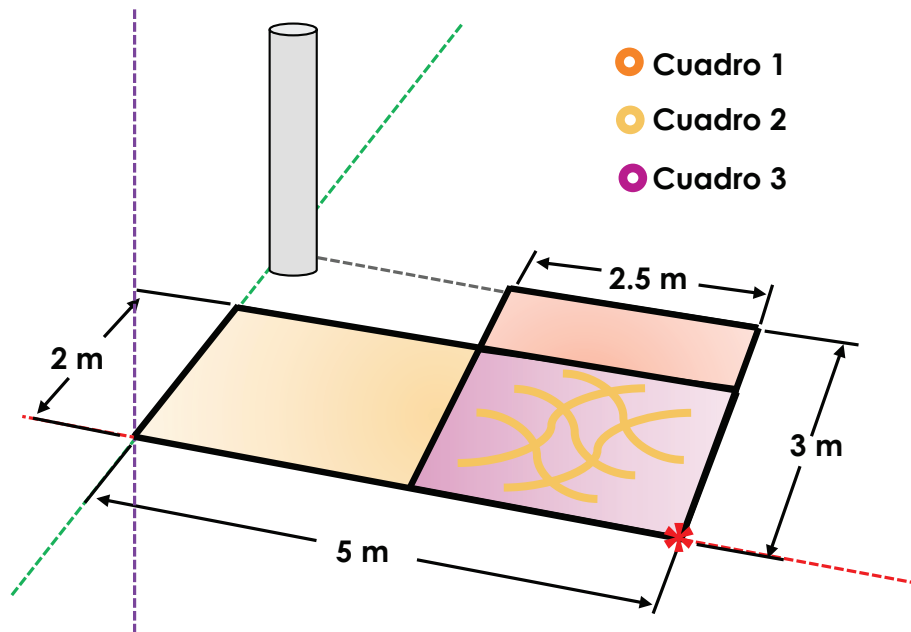
$$\Delta\sigma_h = 126.24 \text{ KPa} * 0.43$$

$$\Delta\sigma_h = 54.103 \text{ KPa}$$

IV. De acuerdo con la siguiente figura (ver figura 9), calcule el incremento de esfuerzos producidos por una carga de 5kg/cm² en la placa de cimentación, 700kN en la columna dibujada y a una profundidad de 6 m en el punto A.

DATOS GENERALES	
Carga Rectangular	500 KPa
Carga Puntual	700 kN
Profundidad	6 m

Figura 9. Esfuerzos en una placa de cimentación.



Fuente: elaboración propia.

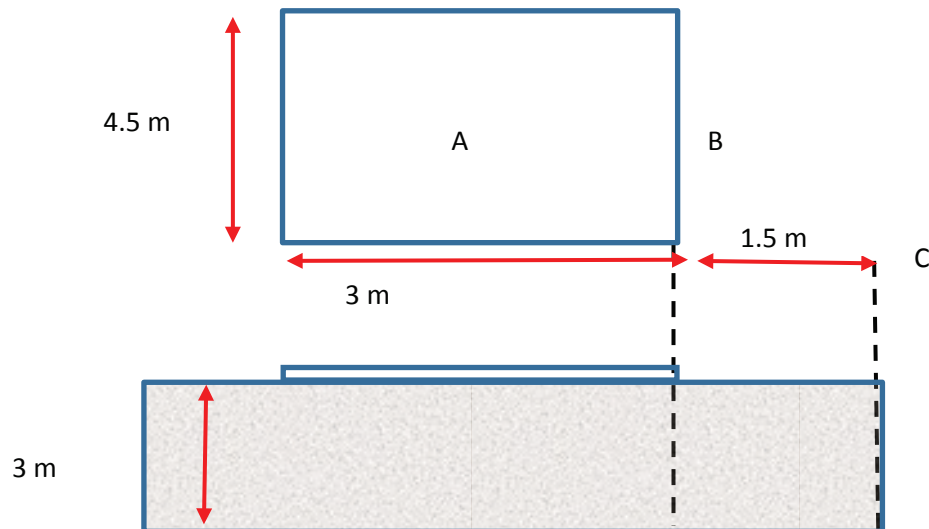
Solución

NO ELEMENTO	M	N	I _o	Δσ
CUADRO 1	$\frac{2.5}{6} = 0.42$	$\frac{3}{6} = 0.42$	0.073	$0.073 * 500 \text{ KPa} = 36.711 \text{ KPa}$
CUADRO 2	$\frac{5}{6} = 0.83$	$\frac{2}{6} = 0.33$	0.081	$0.081 - 500 \text{ KPa} = 40.74 \text{ KPa}$
CUADRO 3	$\frac{2.5}{6} = 0.42$	$\frac{2}{6} = 0.33$	0.054	$0.054 - 500 \text{ KPa} = 26.79 \text{ KPa}$
Puntual	$\frac{3 * 700 \text{ kN}}{2\pi * (6 \text{ m})^2} * \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\sqrt{34}}{6} \right)^2} \right]^{\frac{5}{2}} = 1.8 \text{ kN}$			

$$\Delta\sigma = 36.711 \text{ KPa} + 67.524 \text{ KPa} + 1.8 \text{ KPa}$$

$$\Delta\sigma = 54.421 \text{ KPa}$$

- V. Una losa rectangular de 3 m x 4.5 m descansa sobre una masa de suelo. La carga de la losa es 2025 kN. Determine el incremento de esfuerzo vertical a una profundidad de 3m.



- a. Bajo el centro de la losa
a. En el punto B

57

Solución

$$q_s = \frac{Q}{A}$$

$$q_s = \frac{2025 \text{ kN}}{(3 * 4.5) \text{ m}}$$

$$q_s = 150 \text{ KPa}$$

$$\Delta\sigma_z = q_s * I_z$$

$$I_z = 0.107$$

$$\Delta\sigma_z = 150 \text{ KPa} * 0.107$$

$$\Delta\sigma_z = 16.05 \text{ KPa}$$

$$\Delta\sigma_z = 16.05 * 4$$

$$\Delta\sigma_z = 64.2 \text{ KPa}$$

Consolidación



- I. En el perfil de un suelo, donde será construido un edificio, está conformado por una camada de arena fina de 10.4 m de espesor sobre una camada de arcilla blanda normalmente consolidada con 2 m de espesor. Debajo de la camada de arcilla existe un depósito de arena gruesa. El nivel freático se encuentra localizado a 3 m de la superficie. El índice de vacíos de la arcilla es de 0.76 y su coeficiente de compresibilidad volumétrica es de $1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$. El peso del edificio aumentará el valor del esfuerzo vertical en 140 KPa. Sabiendo que el **K** de permeabilidad es igual a 10^{-8} m/s el tiempo estimado para obtener el 1 cm de asentamiento es:

DATOS ESPECÍFICOS		
Arena Fina	h	10.4 m
	h	2 m
	e	0.76
Arcilla Blanda	Mv	$1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$
	Sp	1 cm
	k	$1 \times 10^{-8} \text{ m/sg}$
Datos Generales		
Q	140 KPa	
W	9.81 kN/m^3	
nf	3 m	

Solución

61

$$1. S_p = Q * h_{\text{espesor}} * M_v$$

$$S_p = 140 \text{ KPa} * 2 \text{ m} * 1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$$

$$S_p = 2.912 \text{ cm}$$

$$\% = \frac{S_{p-\text{inicial}}}{S_{p-\text{final}}}$$

$$\% = \frac{1 \text{ cm}}{2.912 \text{ cm}} \times 100$$

$$\% = 34.34$$

$$2. C_v = \frac{k}{Y_w * M_z}$$

$$C_v = \frac{1 \times 10^{-8} \text{ m/s}}{\frac{9.81 \text{ kN}}{\text{m}^3} * \frac{1.04 \times 10^{-8} \text{ m}^2}{\text{kN}}}$$

$$C_v = 9.8016 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$3. \quad T_v = \frac{\pi}{4} x \frac{\left(\frac{34.34\%}{100}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{34.34\%}{100}\right)^{5.6}\right)^{0.357}}$$

$$T_v = 0.0927$$

$$4. \quad d = 2m$$

$$t = \frac{0.0927x \frac{2m}{9.80169x10^{-6} m^2/s}}{3600 s}$$

$$t = 10.712 \text{ hrs}$$

- II. Un estrato de arcilla normalmente consolidada en el campo tiene un espesor de 3.2 m con un esfuerzo efectivo promedio de 70 kN/m². Si un ensayo en laboratorio de la consolidación de la arcilla dio los resultados siguientes:

62

PRESIÓN (kN/M ²)	RELACIÓN DE VACÍOS
100	0.905
200	0.815

- Determine el índice de compresión, C_c
- Si el esfuerzo efectivo promedio sobre la capa de arcilla de $(\sigma'_o + \Delta\sigma')$ se incrementa a 115 kN/m², ¿cuál será el asentamiento total por consolidación?

Solución

a.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{\sigma'_{12}}{\sigma'_{11}}\right)}$$

$$C_c = \frac{0.905 - 0.815}{\log\left(\frac{200}{100}\right)}$$

$$C_c = 0.299$$

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_o} * H_c$$

$$\Delta e = C_c * \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\Delta\sigma'}\right)$$

$$\Delta e = 0.299 * \log\left(\frac{115}{70}\right)$$

$$\Delta e = 0.064$$

b.

$$e_o = C_c * \log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right) + e_2$$

$$e_o = 0.299 * \log\left(\frac{200}{70}\right) + 0.815$$

$$S_c = \frac{0.064}{1.951} * 3.2 \text{ m}$$

$$S_c = 105 \text{ mm}$$

III. Un estrato arcilloso de 6 m, doblemente drenado, con un coeficiente de consolidación $C_v = 0.5 \frac{m^2}{mes}$ recibe una carga. ¿Cuánto tiempo tardará en asentarse 500 cm si dicha carga producirá un asentamiento de 60 cm?

Solución

$$C_v = 0.5 \frac{m^2}{mes}$$

$$U(\%) = 60 \text{ cm} = 100\%$$

$$U = \frac{50}{60} * 100$$

$$U = 83.33\%$$

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

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - 83.33)$$

$$T_v = 0.641$$

$$C_v = \frac{T_v * H_{dr}^2}{t}$$

$$t = \frac{T_v * H_{dr}^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0.641 * (3m)^2}{0.5 m^2 / mes}$$

$$t = 11.538 \text{ meses}$$

IV. El coeficiente de consolidación de una arcilla es $4.92 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. El estrato en cuestión tiene un espesor de 6m y está situado entre 2 capas de arena bajo la carga impuesta por un edificio. Diga en cuanto tiempo (en días) la arcilla alcanzará el 50 % de consolidación primaria.

$$T = \frac{C_s * t}{H^2}$$

$$t = \frac{(300 \text{ cm})^2 * 0.197}{4.92 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$t = 417 \text{ días}$$

Referencias

- Arguello Vera, S. (2021). *Mecánica de Suelos* [Documento de trabajo]. <http://hdl.handle.net/11634/50647>
- Campos Rodríguez, J. y Guardia Niño, G. (2005). *Apoyo didáctico al aprendizaje de la Mecánica de Suelos mediante problemas resueltos* [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Simón].
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4 ed.). Cengage Learning.
- Delgado, C. (2019). *Parcial 1: Mecánica de Suelos* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/document/476602947/Parcial-sb>
- Deny (2021). *Esfuerzo Total, Presión de Poros y Esfuerzo Efectivo* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/document/507765400/Esfuerzo-total-presión-de-poros-y-esfuerzo-efectivo>
- Efrenn Valdezz. (2011). *Factores Que Influyen en El Tipo de Consolidación* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/doc/75163244/Factores-Que-Influyen-en-El-Tipo-de-Consolidacion>
- Fuentes, J.M. (2019). *Ejercicios Esfuerzos Suelo* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/document/410010991/Ejercicios-Esfuerzos-Suelo>
- Jack Gomez (2021). *Solución B* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/document/523750633/Solución-B>
- JorgeReluz (2021). *Asentamiento* [documento de trabajo]. <https://es.scribd.com/presentation/504393534/Asentamiento>
- Mecánica de suelos II. Práctica dirigida Nº 02– Curso de nivelación 2018*. <https://vsip.info/practica-dirigida-2-8-pdf-free.html>
- Yepes, V. (2019). *Conceptos basicos del agua en medio poroso*. Poli blogs. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/03/22/conceptos-basicos-del-agua-en-medio-poroso/>

Respecto a los autores

Juan Manuel Salgado Díaz

Correo Institucional: juansalgado@ustavillavicencio.edu.co

Docente del área de suelos

USTA Villavicencio

Jessica María Ramírez Cuello

Correo institucional: jessicaramirez@ustavillavicencio.edu.co

Docente del área de suelos y vías

USTA Villavicencio

67

Paula Alejandra Torres Guarín

Correo Institucional: paulatorres@ustavillavo.edu.co

Estudiante Facultad de Ingeniería Civil

USTA Villavicencio

Juan Sebastián Valbuena García

Correo Institucional: juanvalbuena@ustavillavo.edu.co

Estudiante Facultad de Ingeniería Civil

USTA Villavicencio

Esta obra se editó en Ediciones USTA.
Tipografías de la familia Fira Sans y
Share Tech. 2022

Modular

La *Cartilla de mecánica de suelos* es el producto de la lectura de abundante bibliografía, la cual se sintetiza en una cartilla que enmarca lo más importante y útil para el desarrollo profesional de la ingeniería civil en las áreas de la geotecnia, estructuras y construcción. El lector encontrará ejercicios académicos sobre relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos, permeabilidad, redes de flujos, ejercicios de compactación para su uso en obras civiles, esfuerzos en los suelos, el incremento de estos y la consolidación.