




TEORÍA DE CONSOLIDACIÓN, UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA

CONSOLIDATION THEORY, A REVIEW OF THE LITERATURE

 Sócrates Pedro Muñoz Pérez^{1a}
 Wendy Analí Sánchez Monja^{1b}
 García Chumacero Juan Martín^{1c}



Fecha de recepción : 09 de Octubre del 2020
Fecha de aprobación : 29 de Noviembre del 2020
DOI : <https://doi.org/>

Resumen

El objetivo de esta presente investigación, es una revisión literaria de 60 referencias bibliográficas de las cuales 46 son artículo de revistas indexadas en la base de datos Scopus y Scielo, 13 libros y 01 tesis que sustentan la evolución de la teoría de la consolidación unidimensional propuesta por Terzaghi en 1925 para predecir los asentamientos producto de la disminución de los vacíos debido a la expulsión parcial y total del agua. A través del tiempo esta teoría tomó mayor soporte teórico y es usada en muchos proyectos geotécnicos y civiles para el cálculo de asentamientos a través de programas de elementos finitos como PLAXIS y FLAC 3D. Se concluye que se ha logrado grandes avances de modelar el comportamiento hidromecánico de suelo en programas de elementos finitos para poder explicar la heterogeneidad del suelo y explicar la interacción que debe de tener con la superestructura.

Palabras clave: consolidación unidimensional; Teoría de Boussinesq, asentamientos por consolidación.

Abstract

The objective of this present research is a literary review of 60 bibliographic references of which 46 are articles from journals indexed in the Scopus and Scielo databases, 13 books and 01 theses that support the evolution of the proposed one-dimensional consolidation theory. by Terzaghi in 1925 to predict the settlements resulting from the decrease in voids due to the partial and total expulsion of water. Over time, this theory took greater theoretical support and is used in many geotechnical and civil projects for the calculation of settlements through finite element programs such as PLAXIS and FLAC 3D. It is concluded that great advances have been made in modeling the hydromechanical behavior of the soil in finite element programs in order to explain the heterogeneity of the soil and explain the interaction it must have with the superstructure.

Keywords: one-dimensional consolidation; Boussinesq theory, consolidation settlements

1. Introducción

Durante la ejecución de obras civiles es común encontrarse con una variedad de problemas en terrenos sobre el que se construye, más aún si se construye en zonas difíciles teniendo el suelo un comportamiento heterogéneo (Lambe & Whitman, 2004). Los suelos igual que otros materiales sufren deformaciones debido al esfuerzo aplicado sobre ellos que transcurre en un periodo más largo, ya que antes de que las partículas se reacomoden necesita eliminar el fluido contenido en el suelo (Crespo, 2004). Por lo tanto, cuando el suelo se comprime por causa del aumento de esfuerzo de carga, se

¹ Universidad Señor de Sipan, Pimentel – Chiclayo – Perú

^a Maestro en Ciencias de la Tierra con mención en Geotecnia, msocrates@crece.uss.edu.pe.

^b Bachiller en Ingeniería Civil, smonjawendy@crece.uss.edu.pe

^c Bachiller en Ingeniería Civil, gchumacerojuanm@crece.uss.edu.pe

genera lo llamados asentamientos, que puede ser asentamiento elástico o asentamiento por consolidación unidimensional determinada por Karl Von Terzaghi (Das, 2015). El asentamiento por consolidación se presenta en arcillas saturadas, un caso sobresaliente es la Torre inclinada Pisa, en Italia, generando debates de la fluencia en la arcilla marina blanda subyacente, (Tewatia, 2012). Asimismo, los suelos no saturados sujetos a cargas de servicios sufren deformaciones dependiendo de la mineralogía, la relación de vacíos, de la historia esfuerzos y de la manera cómo se aplican los esfuerzos. El tiempo de consolidación del suelo no saturado decrece a medida que incrementa la succión en el suelo provocando una disminución en la permeabilidad del suelo no saturado, (García, et al., 2016, Yang, et al., 2015). Los suelos normalmente consolidados (NC) pueden definirse como suelos que nunca han experimentado tensiones mayores que la tensión efectiva actual. Suelen presentar asentamientos excesivos bajo tensiones adicionales, siendo asentamientos de consolidación debido a construcciones sobre ellos, disminución de la capa freática, etc. (Saikia, 2011). Actualmente se aplican diversos métodos, teorías y herramientas informáticas para estimar la magnitud y distribución de los asientos; lo cual se ha convertido en una solución más simple y práctica, (Gutierrez & Alvarez, 2019).

2. Avances en la actualización de la teoría de la consolidación en el cálculo de asentamientos

En 1925 Terzaghi, incorpora con su libro *Erdbaumechanik* la Mecánica de Suelos y con ella La teoría de consolidación (Terzaghi, 1943), que vincula el comportamiento hidráulico y mecánico de los suelos saturados para modelar el alivio de los poros durante su deformación, y desde entonces las investigaciones han ido evolucionando con el transcurrir de los años, La consolidación unidimensional consta de tres fases consolidación inicial, primaria y secundaria que se puede observar en la curva teórica de consolidación, la cual se obtiene a través del edómetro (Terzaghi, 1955) (Davis & Raymond, 1965), estudiaron la relación no lineal entre los coeficientes de consolidación con la relación de vacíos, obteniendo curvas de consolidación y (MacFarlane, 1969) afirmó que a pesar que terminó la consolidación al final de la construcción, en la estructura se produce una compresión secundaria. (Yen & Scalon, 1975) descubren a través de pruebas en campo que la tasa de asentamiento del terreno recuperado disminuye a medida que aumenta el tiempo transcurrido para converger a un valor constante después de aproximadamente 6 años., (Cater, et al., 1977) inserta por primera vez la gran deformación del mecanismo continuo no lineal en el análisis de consolidación y estableció la ecuación de consolidación de gran deformación unidimensional, con el desplazamiento como la variable de control. (Asaoka, 1978) propone un nuevo método para la predicción de asentamiento través de la observación, basado en el registro de lecturas de tiempo y magnitud de asentamientos medidos en campo en un tiempo determinado hasta que las magnitudes sean mínimas de las anteriores (Tavenas, et al., 1979) considera que la variabilidad del coeficiente de consolidación vertical (C_v) se debe a las propiedades químicas del suelo, como son los minerales. (Zhu & Yin, 2001, Rani, et al., 2011) plantean métodos y tasas de asentamiento (tasa de deformación) para evaluar los resultados de las pruebas de consolidación. (Yin & Graham, 1994, Zhu & Yin, 1999, Kim & Mission, 2011) el tiempo y los efectos de la tasa de deformación sobre el comportamiento de las arcillas en capas con permeabilidad anisotrópicas utilizando métodos numéricos de elementos finitos y modelado constitutivo de viscoplastico elástico. (Tewakia, 1998, Xie, et al., 1999), proponen una solución analítica para el suelo de dos capas con límites parcialmente drenados. (Seah, et al., 2004) evalúan resultados del coeficiente de consolidación en la dirección horizontal a través de experimentos de campo y laboratorio, junto con el análisis posterior de los resultados de medición de asentamientos para un terraplén. (Zhu & Yin, 2005) presentaron una solución analítica y gráficos de solución para capas de doble suelo bajo la carga de la rampa con diferentes profundidades, demostrando diversos comportamientos de consolidación en capas dobles de suelo, y la simplificación de una sola capa de suelo. Los avances continúan con la medición de las propiedades del suelo y estructura, gracias a herramientas que hacen posible el desarrollo de investigaciones y aplicación en obras civiles para caracterizar escenarios de consolidación en suelos 3D de geometría rectangular, multicapa, con propiedades anisótropas y con la existencia de mechas parcial o totalmente penetrantes, uno de éstos programas es el SICOMED_3D. (García & Alhama, 2017); otro de ellos son el ROSCIENCE (Settle 3D) programa que recrea perfiles complejos de suelos y condiciones de carga en 3 dimensiones y

desarrollar etapas de consolidación como la primaria y secundaria, por otro lado el PLAXIS es la herramienta computacional emplean el método numérico de elementos finitos, los cuales a través de un interfaz realiza rápidamente la geometría de los problemas, (Gutierrez & Alvarez, 2019) propone para los estudios de suelos basados en calas y pruebas experimentales que caracterizan tenso deformaciones el suelos, el libro Excel DISBAL el cual permite una valoración más completa de la consolidación primaria pues posibilita comparar resultados del método clásico con los métodos de la sumatoria de Capas en la norma cubana.

3. Casos de aplicación en la actualización teoría de consolidación para cálculo de asentamiento en obras civiles y geotécnicas

Según (Weidong et al., 2012) diferentes trabajos de investigación en diferentes perspectivas hace que la teoría de consolidación de drenaje de arena en este caso se desarrolle y mejore, según los autores analizaron el impacto de los cambios en el nivel del agua subterránea del suelo de drenaje de arena consolidación, compararon la curva de liquidación y a curva de asentamiento medida bajo las mismas condiciones, la teoría se aplica para predecir con precisión el proceso de asentamiento por consolidación de fundaciones. También, (Sun et al., 2015) desde principios del siglo XXI por escasez de recursos de tierra principales factores que frenan el crecimiento urbano, los suelos blandos de Tianjin Área Económica Marina se realizaron pruebas de consolidación secundaria en el suelo según el método Singh-Mitchell y fueron utilizados en la mejora de Terzaghi teniendo en cuenta la deformación secundaria de consolidación, ya que ocurrió en la fase de hundimiento, y pues así predecir el asentamiento del suelo blando en dicha Área y poder reflejar la relación esfuerzo-deformación-tiempo del suelo blando. Así también, (Shahin et al., 2011) comentan que la teoría convencional de consolidación propuesta por Terzhahi exhiben discrepancias entre la teoría y los resultados. Estas discrepancias generalmente se atribuyen a los efectos secundarios que ocurren durante la consolidación primaria, pues esta teoría presume la constancia de la permeabilidad y comprensibilidad del suelo, en la investigación propusieron la variabilidad de la permeabilidad y comprensibilidad. Así mismo, (Binli et al., 2020) mencionan la relación de estrés de pila – suelo (PSSR) es la llave para el diseño y construcción de geo sintéticos terraplenes reforzados con pilotes (GRPS), sin embargo, los modelos para calcular el PSSR que tiene en cuenta el efecto de la consolidación de asentamiento del suelo entre pilas (SAP) no es compactible, el método de cálculo para la interacción pila-suelo fue mejorando por el método no lineal 1D de Davis, teoría de la consolidación y el modelo de transferencia de carga hiperbólica de la interfaz pila-suelo propuesta por Wong y Teh. También, (Zuo et al., 2018) mencionan la descripción de la conversión del drenaje por consolidación a la base compuesta basada en la función de distribución Ascend Semi-cauchy de la teoría de las Matemáticas Fuzzy, presenta la expresión de tiempo del grado de consolidación, pues verifica la precisión computacional de la expresión mediante datos medidos y confirma asentamiento total de la precarga secundaria después de la comparación y el cálculo por este método curva e-lop, que considera la influencia histórica del esfuerzo del suelo es más preciso al calcular el total asentamiento de la precarga secundaria, este método puede lograr la precisión de cálculo del asentamiento la postconstrucción con la expresión de grado de consolidación mencionado anteriormente. (Jie et al., 2017) comentan en un proyecto de construcción de una isla artificial basado en la recuperación de tierra marina a gran escala, el asentamiento del suelo es clave para afectar la operación. El asentamiento del suelo se obtiene observando las cartas del microscopio electrónico de escaneo- SEM, escanea la superficie de las muestras tratadas con un enfoque de haz de electrones y genera varias señales a diferentes profundidades, algunas fotos SEM reflejan lo esencial de la microestructura que influyen en la deformación y esfuerzo del suelo., mediante la combinación de cálculo numérico de la teoría de consolidación unidimensional de Terzhaghi y bidimensional de Biot. De otro lado, (Yang et al., 2013) mencionan la teoría de la precarga de vacío se centró principalmente en los cálculos de asentamiento y grado de consolidación, pero no en la mejora de la capacidad de carga bajo precarga de vacío, establecido sobre el criterio de falla de Mohr- Coulomb y la teoría elasto-plástico, se obtuvo una fórmula con menos parámetros utilizando el índice de resistencia al corte (CU), una fórmula que se deriva el incremento de la capacidad de carga del suelo blando bajo precarga de vacío, considera el grado de consolidación y tasa de amortiguamiento del grado de vacío.

(Loáiciga, & Asce, 2013) mencionan que las ecuaciones de asentamiento de integración numérica requieren implementación de un modelo de simulación de aguas subterráneas para calcular la disminución de la presión de poro de las capas del acuífero, seguido del cálculo del aumento de la tensión efectiva vertical y la reducción del volumen de poros, un ejemplo numérico confirma la precisión del enfoque de este dato sobre la consolidación de acuíferos comprando con la solución obtenida con la teoría tridimensional elástica. Según, (Wang et al., 2012) comentan que el asentamiento de terraplenes en regiones frías se debe principalmente a la consolidación por descongelación del permafrost y la fluencia de capa caliente y congelada, para estimar el asentamiento de terraplenes, se propuso un modelo para describir la fluencia de suelos congelados con un criterio de rendimiento de Drucker Prager, y el código del programa se compiló en el lenguaje FISH en FLAC 3D para el cálculo en vivo de la consolidación de descongelación y arrastrase en los dominios correspondientes que cambian bajo congelación-descongelación estacional, concluyendo los resultados mostraron que el asentamiento simulado concuerdan bien con los datos monitoreados in situ. Desde el punto de vista, (Cappa et al., 2015) dada la alta comprensibilidad de la turba, es crucial estimar el asentamiento esperado durante la construcción del modelo y la rotación debido al aumento de las tensiones efectivas, el comportamiento de consolidación no lineal a bajo esfuerzos efectivo, y los cálculos tradicionales suponiendo una relación lineal entre la relación de vacío y el logaritmo de tensión efectiva no proporciona predicciones razonables., los modelos encontrados en la literatura predijeron los asentamientos en confinamientos bajo presiones, pero mostraron índices de consolidación similares a niveles de estrés mayores. También, (Panagiotis & Vassilis, 2014) comentan que la técnica de mejora del suelo de las columnas de piedra se ha utilizado eficazmente en las últimas décadas, para acelerar la tasa de consolidación de suelos blandos, al proporcionar un camino de drenaje, reducir los asentamientos de cimientos, mejorar la capacidad de soporte del suelo y limitar el riesgo de licuefacción debido a la actividad sísmicas, debido al consumo de tiempo de un cálculo tridimensional 3D, la mayoría de los proyectos de columnas de piedra se estudian actualmente mediante cálculos de elementos finitos axisimétricos, es el método de Priebe, que se usa comúnmente para predecir los asentamientos finales de una sola columna de piedra y el correspondiente asentamiento factor de reducción. De otro lado, (Yongqiang et al., 2015) mencionan que las características de los cimientos de suelos blandos mejorados se analizan desde una perspectiva numérica; se hacen modelos para evaluar sus efectos, bajo la especificación de la teoría de consolidación unidimensional. También, (Feng & Yin, 2019) proponen un método simplificado para calcular el asentamiento de una capa gruesa de suelo con fluencia, esto evita tediosos métodos numéricos para obtener el asentamiento total, se basa en una solución matemática para el análisis de consolidación de una capa de suelo para considerar la comprensibilidad no lineal, concluyendo que fue consistente con los datos medidos. Posteriormente, (Qi & Simms, 2019) proponen nuevos enfoques para determinar de manera robusta las funciones de comprensibilidad y permeabilidad, para el gran esfuerzo de consolidación, utilizando mediciones limitadas de pruebas unidimensionales, como experimentos de columnas o centrífuga. Desde el punto de vista, (Rastegar et al., 2019) la complejidad del comportamiento del suelo y geometría de sus capas; e introducen un método aproximado para resolver la ecuación de consolidación usando las funciones racionalizadas de Haar, basada en matriz, este método se aplica para encontrar la solución numérica para este tipo de ecuación.

4. La Teoría de Terzaghi – Consolidación Unidimensional

Según, (Feng & Yin, 2019) la consolidación de los suelos arcillosos se ve directamente afectada por el suelo compresible, en la teoría de Terzaghi la relación esfuerzo a tensión de los suelos es lineal, lo que significa que la comprensibilidad del suelo es una constante, sin embargo, la comprensibilidad de los suelos blandos es estrechamente relacionado con las tensiones efectivas iniciales y finales a lo largo de la profundidad. (Olek, 2019) la teoría de consolidación 1-D de Terzhahi se usa comúnmente para predicción de asentamiento de taludes en suelos blandos de grano fino, sin embargo, esta teoría no siempre es efectiva debido a las simplificaciones asumidas en el comportamiento del suelo bajo carga, Considerando el asentamiento por consolidación de un suelo arcilloso que calcula normalmente consolidada basado en la condición 1D dada en la ecuación (1). (Yune & Olgun, 2015)

$$S = \frac{H_0 C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}}\right) \quad (1)$$

Donde S es asentamiento; H_0 es espesor inicial de la capa de arcilla; C_c índice de compresión; $\Delta\sigma'_v$ = incremento de esfuerzo efectivo vertical y σ'_{v0} es tensión efectiva vertical inicial. (Yune & Olgun, 2015)

4.1. Índice de compresión (C_c)

Skempton (1944) dio la correlación de expresiones empíricas para arcillas inalteradas:

$$C_c = 0.009 [LL - 10] \quad (2)$$

Para arcilla remoldeadas:

$$C_c = 0.007 [LL - 10] \quad (3)$$

En la expresión del índice de compresión de Nagaj y Murty (1985) como

$$C_c = 0.2343 \left[\frac{LL(\%)}{100}\right] G_s \quad (4)$$

donde LL= límite líquido (%)

4.2. Índice de hinchamiento (C_s)

También se le refiere como un índice de recompresión, es determinado mediante pruebas en laboratorio donde es notable que es numéricamente menor que el índice de compresión. (Braja D., 2012)

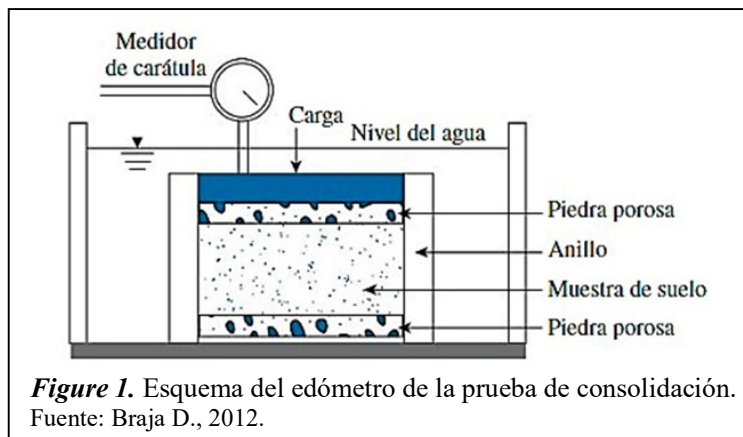
$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ a } \frac{1}{8} C_c \quad (5)$$

El índice de hinchamiento fue expresado por Nagaraj y Murty (1985) como:

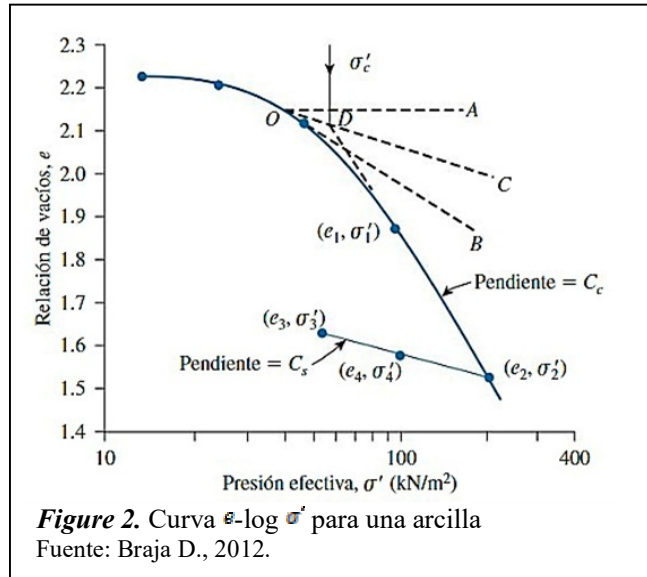
$$C_s = 0.0463 \left[\frac{LL(\%)}{100}\right] G_s \quad (6)$$

4.3. Prueba de consolidación

Las muestras se colocan dentro de un anillo, se coloca en la parte inferior y superior una piedra porosa de la muestra como en la Figura 1, se procede a usar una carga que representa el esfuerzo vertical total se iguala a σ . Se toman lecturas periódicas del asentamiento de las muestras durante 24 horas. (Braja D., 2012)



(Braja D., 2012) Se realiza una gráfica el cual muestra una variación consolidación del esfuerzo vertical efectivo y su relación de vacíos σ' , con las muestras de laboratorio, en papel logarítmico, e se traza en la escala aritmética y σ' en la escala logarítmica, como en la figura 2 que se presenta: La presión de preconsolidación (σ'_c) de una arcilla viene a ser como el suelo fue sometida con una sobrecarga efectiva máxima el cual fue sometida en el pasado. (Radhika et al., 2017). Una arcilla Preconsolidada: es cuando un suelo es sometido en el pasado por un esfuerzo de sobrecarga efectiva menor. Este esfuerzo efectivo máximo se le denomina presión de preconsolidación. (Radhika et al., 2017) Las soluciones están disponibles para el problema de consolidación, la dificultad es la estructura compleja del suelo, su comportamiento no lineal y varias instancias que no se pueden modelar con precisión (Radhika, Krishnamoorthy, & Rao, 2017).

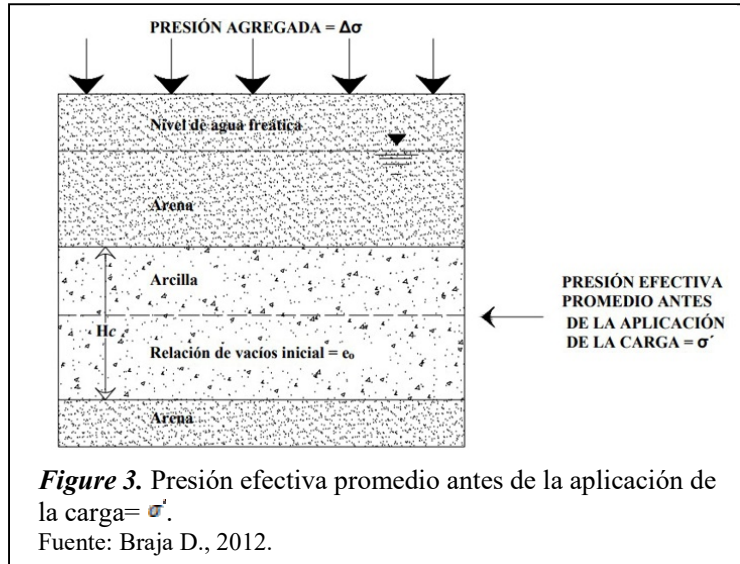


4.4. Coeficiente de consolidación (C_v)

(Braja D., 2012) Con el método del logaritmo del tiempo propuesto por Casagrande para obtener C_v , generalmente este dato baja su valor en cuanto el límite líquido del suelo asciende.

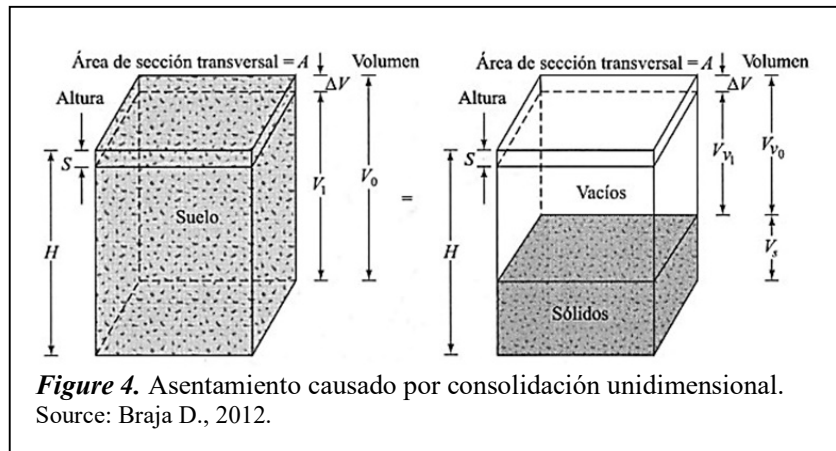
4.5. Cálculo del asentamiento por la consolidación unidimensional

(Braja D., 2012) Se representa H o H_c que es el espesor de arcilla saturada y A es área de sección transversal con una fuerza de presión σ con sobrecarga promedio efectiva. Con un incremento de presión Δ , con el asentamiento primario S . Con la consolidación al final de $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$. Se presenta en la figura 3 un esquema de una arcilla y los valores para tener más en claro los valores en la formulas siguientes.



$$\Delta v = V_0 - V_1 = HA - (H - S)A = SA \quad (8)$$

Donde los volúmenes iniciales de vacíos son V_{v0} y V_{v1} y vacíos finales, de la relación de vacíos se tiene.



$$S = H \frac{\Delta e}{1+e} \quad (9)$$

En arcillas consolidadas naturalmente muestra una relación Curva $e - \log u'$ lineal, presentada en la Figura 4, Nota $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$ al final de la consolidación

$$\Delta e = C_c [\log(\Delta\sigma' + \sigma'_0) - \log \sigma'_0] \quad (10)$$

Donde C_c es una pendiente de la gráfica $e - \log \sigma'_0$ y se conceptualiza como un índice de la fuerza de compresión, σ'_0 = esfuerzo vertical efectivo promedio sobre la capa de arcilla, $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$ (es decir, presión agregada); sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 9 se llega al resultado:

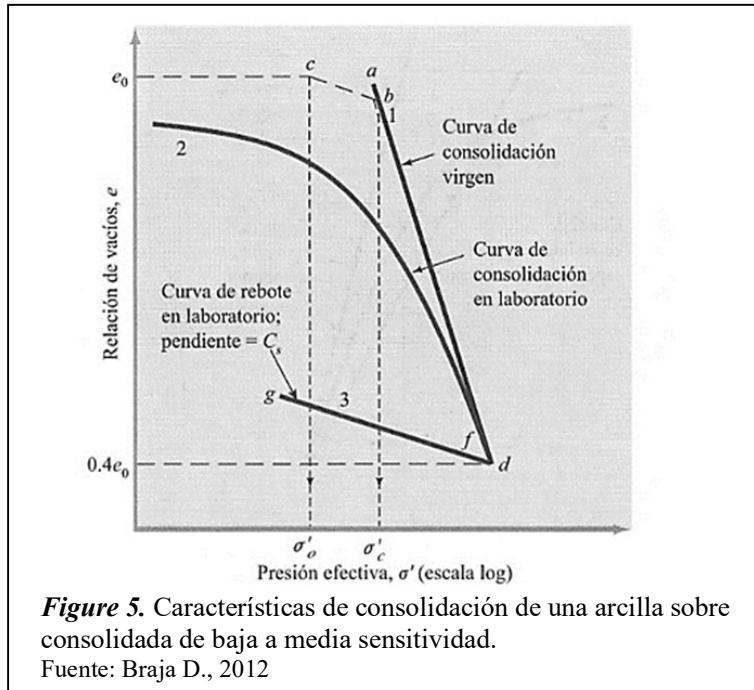
$$S = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) \quad (11)$$

(Braja D., 2012) Donde S= asentamiento por consolidación primario, e_0 = la aplicación de la carga antes de la relación de vacíos. Si el estrato se divide en substratos y se hace los cálculos, esto se hace al estrato de arcilla con mayor espesor, el asentamiento total para todo el estrato es

$$S = \Sigma \left[\frac{C_c + H_i}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{a(i)} + \Delta\sigma'_{(i)}}{\sigma'_{a(i)}} \right) \right] \quad (12)$$

Donde H_i = espesor del subestrato i $\sigma'_{a(i)}$ = es para el subestrato una presión efectiva de sobrecarga i $\Delta\sigma'_{(i)}$ = es el aumento de su presión vertical para cada subestrato i. (Braja D., 2012) En la figura 5 para arcillas preconsolidadas, para $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$, una variación en campo e- $\log \sigma'$ a lo largo de la línea cb, donde la pendiente es igual aproximadamente a la de la curva de rebote hecho en laboratorio. La pendiente de la curva de expansión C_s se llama índice de expansión, es:

$$\Delta e = C_s [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log \sigma'_0] \quad (13)$$



De las ecuaciones 9 y 13 tenemos:

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right) \quad (14)$$

Si $\sigma'_0 + \Delta\sigma > \sigma'_c$, entonces:

$$S = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right) \quad (15)$$

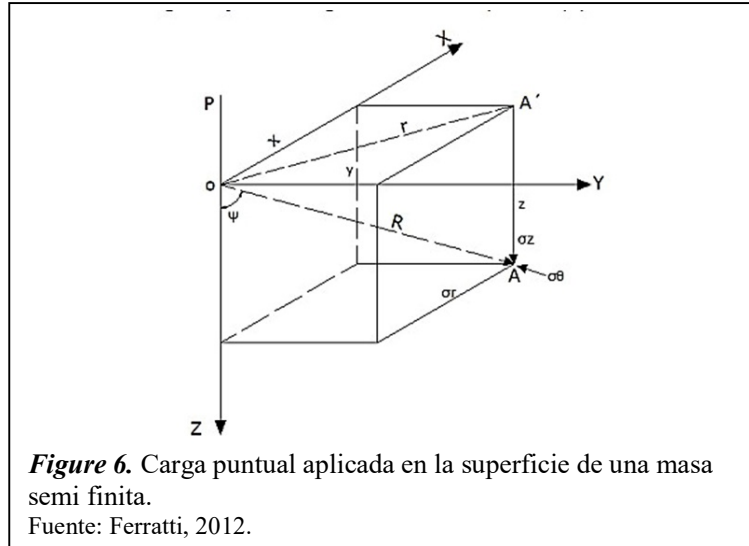
5. Teoría de Boussinesq

Boussinesq calculo que mediante los esfuerzos de una carga vertical que actúa en una superficie horizontal en un medio homogéneo, linealmente elástico, iso-tropo y semi-finito, introduce puntos en cualquier vertical trazada (Juárez y Rico, 1973).

En la figura 6 se puede notar el gráfico de esfuerzos provocados en un punto de masa del suelo, en la siguiente ecuación 16 se determina el incremento en el esfuerzo vertical, donde las carga puntual P actúa verticalmente; (x, y, z) que son las coordenadas en la cual el punto se calculan los esfuerzos, en un sistema ortogonal cartesiano el cual el origen coincide con un punto P de aplicación. Si "r" es una

radial en distancia de "A" a 0 y el "φ" es un ángulo entre el vector del eje Z y de A (R). (Ferretti, 2012).

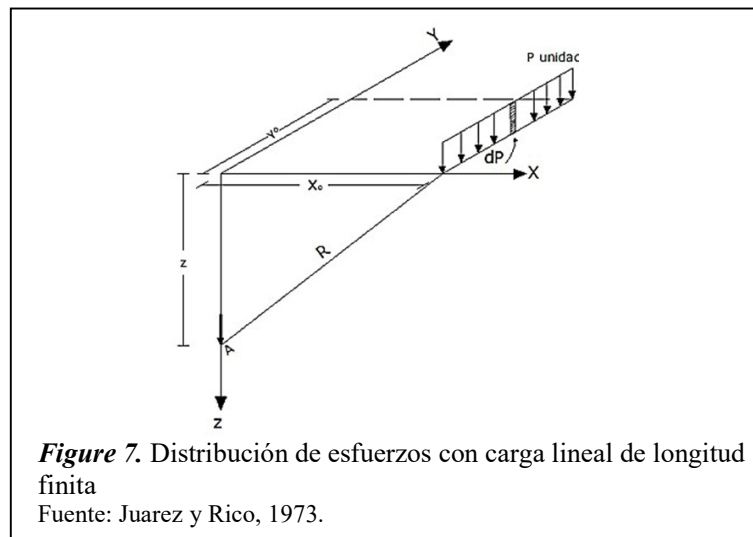
$$\Delta\sigma_z = \frac{3F \cos \varphi^5}{2\pi Z^2} = \frac{3F z^3}{2\pi R^5} \quad (16)$$



La teoría de Boussinesq tiene una extensión de su fórmula a otras cargas comunes como: En la figura 7 muestra una carga lineal y uniforme que se distribuye en una longitud "y" de "p" unidades de longitud por unidades de carga, (x, y, z) son las coordenadas del punto en que se calculan los esfuerzos. En la ecuación 17 nos muestra la fórmula del esfuerzo por una carga lineal de longitud finita. (Juárez y Rico, 1973)

$$\Delta\sigma_z \frac{z}{P} = \frac{1}{2\pi} \frac{n}{(m^2 + 1) \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \left(\frac{1}{m^2 + n^2 + 1} + \frac{2}{m^2 + 1} \right) \quad (17)$$

$m = \frac{x}{z}; n = \frac{y}{z}$



La solución de Boussinesq para una masa de suelo sometida a una carga distribuida uniformemente se compara con los análisis de elementos finitos elastoplásticos realizados para suelos cohesivos y de fricción. Las pruebas de elementos finitos el cual se utilizó el programa de elementos

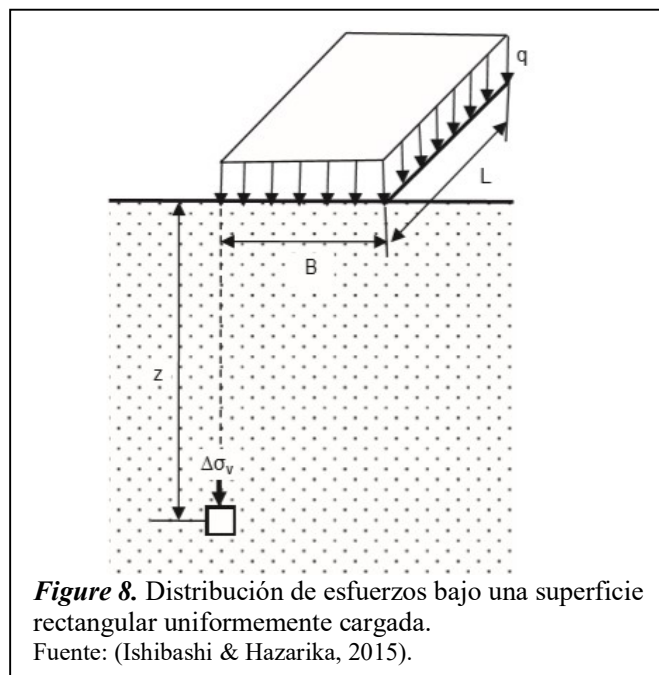
finitos ABAQUS. dando la validez de la solución Boussinesq para la distribución de tensiones en suelos elasto-plásticos. Los resultados muestran que la plasticidad produce una disminución de la atenuación de la tensión vertical en la masa del suelo bajo la carga, lo que significa que la solución de Boussinesq subestima las tensiones en una región que tiene un efecto importante en el asentamiento del suelo. (Sadek y Shahrour, 2007)

En la figura 8 que representan el caso de condición de carga, que se analiza la masa del continuo isótropo elástico y homogéneo con la presencia de la masa en una superficie rectangular cargada de forma uniforme, con unidades w de carga por unidad de área (x, y, z) son las coordenadas del punto en que se calculan los esfuerzos. En la ecuación 18 nos muestra la fórmula de esfuerzos bajo una superficie rectangular uniformemente cargada. (Ishibashi & Hazarika, 2015)

$$m = \frac{x}{z}; n = \frac{y}{z}$$

Reemplazando los parámetros ya mencionados se obtendrá la ecuación 18:

$$\frac{\Delta\sigma_z}{w} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{(m^2 + n^2 + 1) + m^2n^2} \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \operatorname{tg} \left(\frac{2mn(m^2 + n^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{(m^2 + n^2 + 1) - m^2n^2} \right) \right) \quad (18)$$



El cálculo de un esfuerzo de una normal en el centro de un círculo uniformemente cargada (w – presión uniforme). Un proceso se realiza según la figura 9, detallando en su ecuación 19, producida a una profundidad “Z” en un punto “A”, (x, y, z) son las coordenadas del punto en que se calculan los esfuerzos. (Juárez y Rico, 1973)

$$\Delta\sigma_z = \frac{3w}{2\pi} \frac{P}{z^3} \frac{P}{(P^2 + z^2)^{5/2}} \Delta P \Delta \theta \quad (19)$$

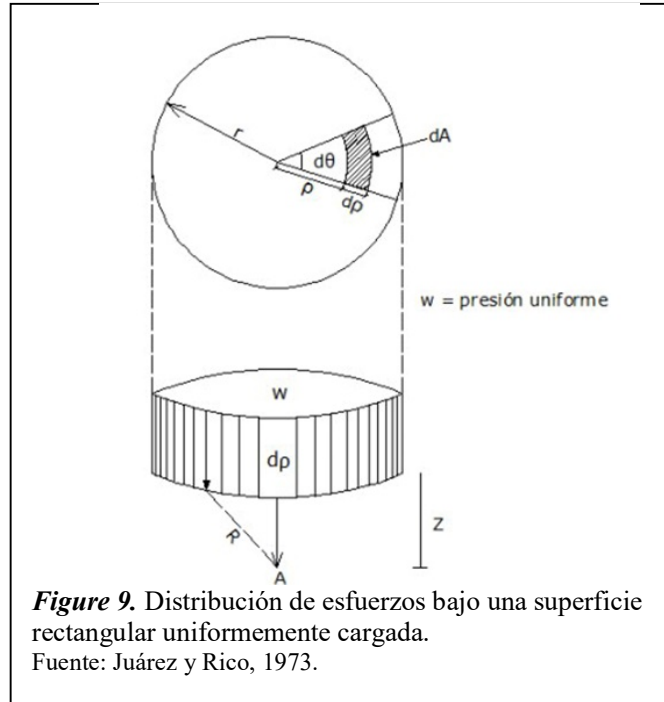


Figure 9. Distribución de esfuerzos bajo una superficie rectangular uniformemente cargada.
Fuente: Juárez y Rico, 1973.

6. Carta de Newmark

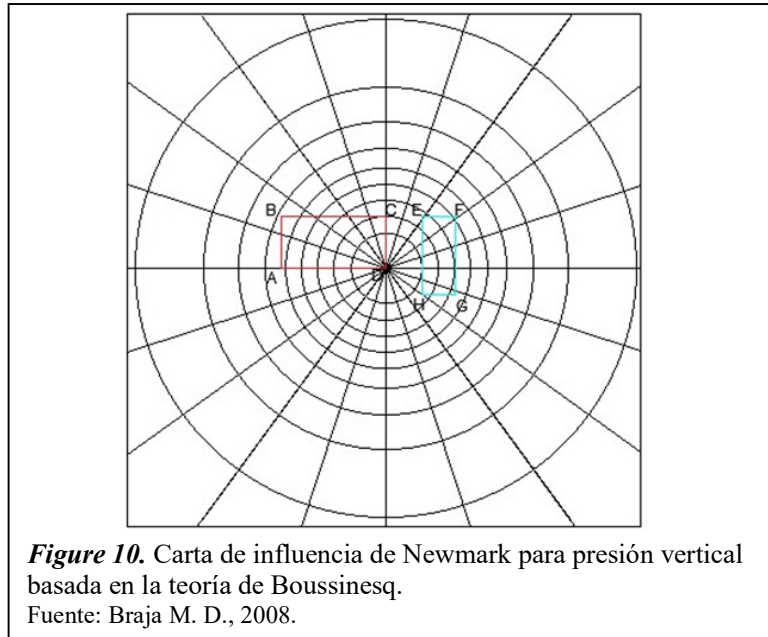
Se usa para hallar una presión vertical en un punto debajo del área uniforme flexible (Braja M. D., 2008)

La ecuación 20 se reformula y ordena en:

$$\frac{R}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{-2/3} - 1} \quad (20)$$

La carta de Newmark es útil para áreas de formas irregulares que son cargadas uniformemente, este cálculo es gráfico. Donde el Abaco es una red de cuadros anular o radial o mallas donde en el centro esta N. Al conocer el efecto del punto N que se coloca en una carga q en el área del terreno "A", se realizan las mismas escalas AB del Abaco con la profundidad Z en el punto (AB = Z). Donde sus radios parte del origen y forman, con los anillos, cuadrilongos, áreas de influencia, cargados con el mismo incremento de carga. Si esta área total del Abaco equivale a q , son 200 cuadrilongos, donde esta área representa el incremento del esfuerzo de $0.005q=q/200$. (Escobar y Escobar, 2016)

La planta dibujada a escala, con $Z = AB$, y N puesto en su origen, se cuenta la cantidad total de áreas influencia n , cada valor de influencia I_0 , ocupadas a escala en la planta, sobre le ábaco. (Escobar y Escobar, 2016)



El incremento en la presión en el punto bajo está dado en la ecuación 21, donde “q” viene hacer la presión sobre el área cargada y I₀ el valor de influencia. (Escobar y Escobar, 2016)

$$\Delta\sigma_z = qxI_0 \quad (21)$$

7. Conclusiones

Con la implementación de la teoría de consolidación unidimensional propuesta por Karl Von Terzaghi en 1925 nació la mecánica de suelos tradicional que generó un giro de la perspectiva de ver al suelo como terreno de fundación.

Para poder calcular el asentamiento no sólo se necesita realizar el ensayo de consolidación sino también conocer el tipo de carga que va a actuar en el suelo, la geometría de la cimentación y la ubicación de las columnas para poder aplicar una teoría complementaria que es la Teoría de Boussinesq y definir el diferencial de esfuerzo vertical causado por las cargas externas en un determinado punto.

La Teoría de consolidación y la de Boussinesq, son teorías que se basan en la elasticidad del suelo, que asumen hipótesis no reales pero que sirve para modelar, entender y resolver matemáticamente el fenómeno físico que origina los asentamientos en los suelos.

De la Teoría de Boussinesq surgieron diferentes teorías para determinar el diferencial de esfuerzos producidos por las cargas externas, como la Carta de Newmark, y otras.

La Teoría de la consolidación unidimensional ha motivado a muchos investigadores aplicarla en diferentes softwares como modelarla a través de los métodos numérico de elementos finitos, como es el Software Plaxis y FLAC 3D, que son los más usados en la actualidad y también tenemos el el libro Excel DISBAL.

8. Referencias

- Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, 87-101.
- Binli, L., Jin, Y., Yitao, Z., Yanyan, C., Shiyu, L., & Bingxiong, T. (2020). A computation model for pile-soil stress ratio of geosynthetic-reinforced pile-supported embankments based on soil consolidation settlement. *Alexandria Engineering Journal*, 1110-0168. doi:10.1016/j.aej.2020.04.034

- Braja, D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7 ed.). México: CENGAGE Learning. Obtenido de <https://es.pdfdrive.com/ing-cimentaciones-braja-das-7ma-ed-e33998997.html>
- Braja, M. D. (2008). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: CENGAGE Learning.
- Cappa, R., Yniesta, S., Lemnitzer, A., Brandenburg, S., & Shafiee, A. (2015). Settlement Estimations of Peat during Centrifuge Experiments. *ASCE*, 152-160.
- Cater, J. P., Small, J. C., & Booker, J. R. (1977). A theory of finite elastic consolidation. *International Journal of Solids and Structures*, 467-478.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones- 5a ed.* México: Limusa S.A.
- Das, B. M. (2015). *Fundamentals of Geotechnical Engineering, 4th Edition*. México, D.F: Cengage Learning Editores, S.A.
- Davis, E. H., & Raymond, G. P. (1965). A non-linear theory of consolidation. *G'eotechnique*, 161-173.
- Escobar, D, G; Escobar, P, C, E. (2016). *GEOMECAÁNICA*. Colombia: Universidad nacional de Colombia.
- Feng, W.-Q., & Yin, J.-H. (2019). Development and Verification of a New Simplified Method for Calculating Settlement of a Thick Soil Layer with Nonlinear Compressibility and Creep. *International Journal of Geomechanics*, 20(3), 04019184. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001562.
- Ferretti, E. (2012). A Higher Order Solution of the Elastic Problem for a Homogeneous, Linear-Elastic and Isotropic Half-Space Subjected to a Point-Load Perpendicular to the Surface. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 35.
- García, G., & Alhama, I. (2017). *Sicomed_3D Simulación y Diseño de Problemas de Consolidación de Suelos con mechas drenantes*. Cartagena: CRAI Biblioteca.
- García, J., Cobelo, W. D., & Quevedo, G. J. (2016). Relación entre tiempo de consolidación y permeabilidad no saturada en presas de tierra. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 94-107.
- Gutierrez, J. A., & Alvarez, N. C. (2019). *Estudio experimental del efecto mecánico de un suelo arcilloso al adicionar polvo de caucho para aplicaciones geotécnica*. Lima: Facultad de Ingeniería - Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - UPC.
- Hugo, A., Loáiciga, & Asce, F. (2013). Consolidation Settlement in Aquifers Caused by Pumping. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(7). doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000836
- Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications*. (L. Taylor & Francis Group, Ed.)
- Jie, Z., Lingyun, B., & Guixuan, W. (2017). NUMERICAL ANALYSIS OF SOIL SETTLEMENT PREDICTION AND ITS APPLICATION IN LARGE-SCALE MARINE RECLAMATION ARTIFICIAL ISLAND PROJECT. *POLISH MARITIME RESEARCH*, 4-11. doi:10.1515/pomr-2017-0097
- Juárez, B, E; Rico, R, A. (1973). *Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos* . MEXICO: LIMUSA.

- Kim, H. J., & Mission, J. L. (2011). Numerical analysis of one dimensional consolidation in layered clay using interface boundary relations in terms of infinitesimal strain. *International Journal of Geomechanics*, 72.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2004). *Mecánica de Suelos*. Mexico: Limusa S.A.
- Liyanapathirana, D. S., Carter, J. P., & Airey, D. W. (2005). Numerical Modeling of Nonhomogeneous Behavior of Structured Soils during Triaxial Tests. *International Journal of Geomechanics*, 1532-3641.
- MacFarlane, I. C. (1969). Características de ingeniería de la turba. *Manual de ingeniería de Muskeg*, 3-30.
- Olek, B. S. (2019). Experimental evidence about misconception of Terzaghi's 1-D consolidation theory in terms of degree of consolidation. *E3S Web of Conferences*, 106, 01013. doi:10.1051/e3sconf/201910601013
- Panagiotis, A., & Vassilis, P. (2014). Factors Affecting the Settlement Estimation of Stone Column Reinforced Soils. *Geotech Geol Eng*, 32, 1175-1185. doi:10.1007/s10706-014-9788-x
- Qi, S., & Simms, P. (2019). Robust methods to estimate large strain consolidation parameters from column experiments. *Canadian Geotechnical Journal*, 1-70. doi:10.1139/cgj-2018-0870
- Radhika, B., Krishnamoorthy, A., & Rao, A. U. (2017). A review on consolidation theories and its application. *International Journal of Geotechnical Engineering*. doi:10.1080/19386362.2017.1390899
- Rani, S., Kumar, R., & Singh, S. J. (2011). Consolidation of an Anisotropic Compressible Poroelastic Clay Layer by Axisymmetric Surface Loads. *International Journal of Geomechanics*, 65.
- Rastegar, M., Amir, M., Majid, E., & Bazrafshan, B. (2019). Using matrix-based rationalized Haar wavelet method for solving consolidation equation. *Asian-European Journal of Mathematics*, 12(1), 1950086-1. doi:10.1142/S1793557119500864
- Sadek, M; Shahrour, I. (2007). Use of the Boussinesq solution in geotechnical and road engineering: influence of plasticity. *Comptes Rendus Mécanique*, 6.
- Saikia, A. (2011). Estimación precisa de la liquidación de consolidación primaria de arcillas NC homogéneas con una ecuación alternativa. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 223-227.
- Seah, T. H., Tangthansup, B., & Wongsatian, P. (2004). Horizontal coefficient of consolidation of soft Bangkok clay. *Geotech Test Journal*, 430-440.
- Shahin, A., Asad, E., & Amirali, M. (2011). A Realistic Theory of Soils Consolidation. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 3828-3837. doi:10.1061 / 41165 (397) 391
- Sun, M.-Q., Wang, Q., Yun-Kai, R., Dong, J.-Q., Xiao, G.-P., & Xu, X.-C. (2015). Settlement Prediction of Soft Soil Foundation Based on Consolidation and Creep Theory. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*. doi:10.5013/IJSSST.a.16.2A.02
- Tavenas, F. S., Magnan, J. P., Rochelle, P., & Roy, M. (1979). Analyse critique de la théorie de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi. *Revue Française de Géotechnique*, 29-43.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentos de la mecánica del suelo*. Nueva York: John Wiley.

- Terzaghi, K. (1943). *Mecánica teórica del suelo*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Terzaghi, K. V. (1955). *La mecánica se suelos en la ingeniería practica*. moretto: Ateneo.
- Tewakia, S. K. (1998). Evaluation of true C_v and instantaneous C_v , and isolation of secondary consolidation. *Geotechnical Testing Journal*, 102-108.
- Tewatia, S. K. (2012). Trend of settlement in primary and secondary consolidations. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1-10.
- Wang, S., Jilin, J., Yu, F., & Yao, X. (2012). A novel method for estimating settlement of embankments in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 88, 50-58. doi:10.1016/j.coldregions.2012.12.009
- Xie, K. H., Xie, X. Y., & Gao, X. (1999). Teoría de la consolidación unidimensional del suelo de dos capas con drenaje parcialmente fronteras fronteras fronteras fronteras fronteras fronteras fronteras . *Computadoras y Geotecnia*, 265 - 278.
- Yang, P., Zhang, J., Hu, H., Wu, X., Cao, X., Chang, Y., . . . Xu, J. (2015). Coefficient Analysis of Soft Soil Consolidation Based on Measurement of Stratified Settlement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-8.
- Yang, S., Wenjun, H., Yande, L., & Haidong, X. (2013). Calculation Method of Bearing Capacity Improvement of Soft soil foundation under Vacuum Preloading. *Applied Mechanics and Materials*, 353-356, 352-356. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.352
- Yen, B. C., & Scalon, B. (1975). Tasas de asentamiento de rellenos sanitarios. *Diariode la División de Ingeniería Geotécnica*, 475-487.
- Yin, J. H., & Graham, J. (1994). Equivalent times and elastic viscoplastic modelling of time-dependent stress-strain behaviour of clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 42-52.
- Yongqiang, Y., Chao, X., & Yang, Y. (2015). Numerical analysisi of reclaimed foundation consolidation and settlemen and back-analysis of the soil parameters. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 54(5), 155-160. doi:10.13471/j.enki.acta.anus.2015.05.027
- Yune, C.-Y., & Olgun, G. (2015). Effect of Layering on Total Consolidation Settlement of Normally Consolidated Clay in 1D Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 4, 06015015-2. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001415.
- Zaika, Y., & Suryo, E. A. (2020). The Durability of Lime and rice husk ash improved expansive soil. *International Journal of Geomate*, 171-178.
- Zhu, G. F., & Yin, J. H. (2005). Gráficos de soluciones para la consolidación de capas dobles del suelo. *Revista Geotécnica Canadiense*, 949 - 956.
- Zhu, G. F., & Yin, J. H. (1999). Finite element analysis of consolidation of layered clay soils using an elastic visco-plastic model. *International Journal*, 355-374.
- Zhu, G. F., & Yin, J. H. (2001). Design charts for vertical drains considering construction time. *Canadian Geotechnical Journal*, 1142-1148.
- Zuo, S., Li, J., & Zhang, L. (2018). Study on the Calculation of the Post-construction Settlement after the Secondary Preloading of Sand Pile Composite Foundation of the Highspeed Railway. *MATEC Web of Conferences*, 206(01016). doi:10.1051/mateconf/201820601016