

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS Y APLICABILIDAD EN EL MERCADO PERUANO DE LOS MÉTODOS
MÁS USADOS Y LAS NUEVAS METODOLOGÍAS EN EL CÁLCULO DE
ASENTAMIENTOS DE ZAPATAS EN ARCILLAS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORES

Rodrigo Fernando Guedes Del Pozo
Roberto Manuel Quispe Rojo
Alex Paul Ancajima Bernal
Sebastian Mogollon Jimenez
Kevin Elvis Campos Mallqui

ASESOR

Guillermo Jose Zavala Rosell

Lima, Enero, 2021

RESUMEN

En el presente trabajo se explica los diferentes tipos de asentamientos generados en una zapata sobre arcilla y se resalta las peculiaridades e importancia de cada uno. A su vez, se describen los daños que pueden ejercer estos asentamientos a la estructura y se contextualiza las condiciones sobre las que la respuesta de la arcilla a esta carga de la cimentación es variada. Por ello, se presenta una variada cantidad de fórmulas usadas y propuestas para el cálculo de los asentamientos de zapatas en arcillas. Dichas formulas se detallan y describen identificando sus requerimientos y condiciones bajo las cuales fueron planteadas. Este punto es importante ya que saber los requerimientos que presenten, así como las condiciones bajo las que se diseñaron ayuda a elegir la correcta o más idónea al momento de requerir el cálculo de asentamientos de zapatas en arcillas para algún proyecto. Dentro de los métodos evaluados se verán asentamientos inmediatos, por consolidación primaria y por consolidación secundaria. Sabiendo que estamos evaluando para arcillas se toma en mayor consideración el asentamiento por consolidación primaria. Como una de las principales conclusiones del trabajo se tiene que para elegir el mejor método de cálculo se debe tener en cuenta varios factores técnicos, así como económicos, a su vez se debe tener en cuenta el riesgo del diseño para decidir si los esfuerzos extras requeridos para usar métodos más modernos valdrán la pena para el proyecto. Mediante la masificación y difusión de los nuevos métodos se podrá elevar la calidad de los trabajos, así como generar que se sean económicamente factible su uso y registro de información más detallada.

DEDICATORIA

En el presente trabajo queremos dar un especial agradecimiento y dedicarlo a nuestro asesor por la comprensión, paciencia y apoyo que nos brindó a lo largo de este viaje.



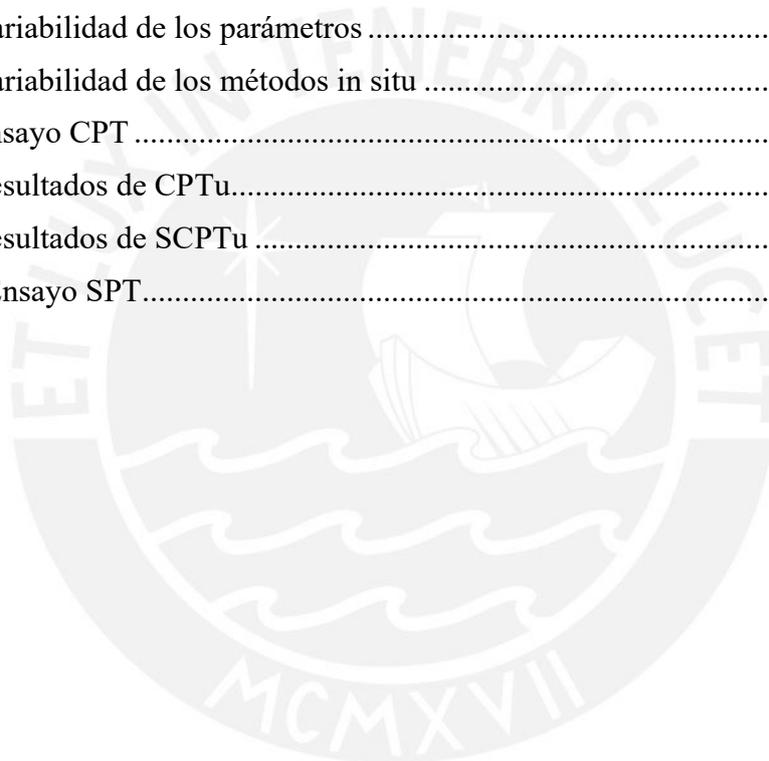
INDICE

1. GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3 ALCANCE.....	2
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.5 METODOLOGÍA.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 ASENTAMIENTOS	4
2.2 TIPOS DE ASENTAMIENTOS GEOTÉCNICOS.....	5
2.2.1 ASENTAMIENTO INMEDIATO.....	6
2.2.2 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIO.....	6
2.2.3 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA	6
2.3 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS.....	7
2.3.1 ASENTAMIENTO INMEDIATO BASADO EN LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD	7
2.3.2 MÉTODO DE BJERRUM.....	8
2.3.3 MÉTODO TRADICIONAL DE TERZAGHI.....	10
2.3.4 MÉTODO DEL EDÓMETRO	12
2.3.5 MÉTODO DE S. BENSALLAM, ET AL (2013)	13
2.3.6 MÉTODO DE ASAOKA (1978).....	16
2.3.7 MODELO LÓGICO.....	16
2.3.8 MODELO DE GOMPERTZ (2005).....	17
2.4 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EN SITU Y ENSAYOS DE LABORATORIO.....	18
2.4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	19
2.4.2 ENSAYOS IN SITU.....	20
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	23
3.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DESCRITO EN LOS DISTINTOS MÉTODOS.....	23
3.2 ANÁLISIS DE CONDICIONES DE SITIO	24
3.3 ANALISIS DE REQUISITOS	25
3.4 IDONEIDAD DE USO.....	27
3.5 DESARROLLO A FUTURO	28
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
4.1 CONCLUSIONES	29

4.2 RECOMENDACIONES.....	30
5. REFERENCIAS.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.- Tipos de asentamiento en las estructuras.....	5
Figura N° 2.- Tipos de asentamientos.....	5
Figura N° 3.- Coeficientes de desplazamiento vertical para cimentaciones en arcillas saturadas.....	9
Figura N° 4.- Curva típica de Gompertz.....	17
Figura N° 5.- Variabilidad de los parámetros.....	18
Figura N° 6.- Variabilidad de los métodos in situ.....	18
Figura N° 7.- Ensayo CPT.....	20
Figura N° 8.- Resultados de CPTu.....	21
Figura N° 9.- Resultados de SCPTu.....	21
Figura N° 10.- Ensayo SPT.....	22



1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación busca explicar el asentamiento de zapatas en arcillas, así como su importancia en el análisis de cimentaciones y la implicancia que tiene para el correcto funcionamiento de las estructuras cimentadas.

Para ello es que en este documento no solo se explican los diferentes tipos de asentamientos que se generan, sino que también se describen un grupo de métodos que nos ayudan a su cálculo. Mediante la descripción de distintos métodos podemos ver los distintos enfoques teóricos que estos presentan, así como las distintas asunciones bajo las que trabajan para poder ejecutar sus cálculos.

La necesidad de un análisis riguroso y lo más aproximado posible a la realidad del asentamiento de zapatas en arcilla motiva a que se presenten los distintos enfoques para su cálculo en distintas partes del mundo. Es por ello por lo que al reconocer su importancia para un correcto diseño y buen funcionamiento de nuestras estructuras proyectadas es que se genera la recopilación de métodos de cálculo y se analiza sus limitaciones de uso para distintos tipos de proyectos ya que estos distintos tipos requieren de mayores grados de certeza en el cálculo y por ende es en donde se destinan mayores presupuestos y esfuerzos en sus correctos cálculos.

En el presente trabajo se logra analizar estos distintos factores para poder generar recomendaciones y que sirva de ayuda para la toma de decisión sobre que método utilizar para los ingenieros que tengan el reto de calcular los asentamientos de zapatas en arcilla en los distintos proyectos que estén realizando.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la práctica actual el ingeniero civil geotécnico se encuentra comúnmente con el reto de calcular el asentamiento de zapatas en arcilla y se ve ante la disyuntiva de que método utilizar. Para entender la importancia de este cálculo y de su precisión para asemejar el comportamiento que se describa en la vida real se tienen que analizar distintos factores y uno de ellos es el tipo de estructura que estamos proyectando.

Cada tipo de proyecto se permite manejar distintos grados de incertidumbre en sus cálculos esto debido a la importancia de la obra en mención. Un factor importante son las condiciones

del lugar en las que está emplazado nuestro proyecto ya que el suelo arcilloso puede estar bajo distintas solicitaciones y peculiaridades. El Perú al ser un país diverso con distintos microclimas en el presenta un abanico de variables en cuanto a las condiciones en las cuales se pueden ejecutar los proyectos, por ejemplo, si nos vamos a la selva del país encontraremos suelos arcillosos con presencia de fuertes lluvias mientras que en la costa del país estos suelos arcillosos están sometidos a climas áridos. Todas estas variables tanto geológicas, geomorfológicas y climáticas, así como el tipo de proyecto y el presupuesto que se maneje delimitarán una mejor elección de distintos métodos para el cálculo de asentamientos de zapatas en arcillas.

El asentamiento en sí es importante ya que la estructura proyectada puede tener daños estructurales si no se hicieron las correctas estimaciones ni se tomaron las medidas necesarias para cada caso es por ello que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018) genera la Norma Técnica Peruana E050 Suelos y Cimentaciones donde nos indica como poder calcular estos asentamientos. Al darse estos daños estructurales producto de no haber analizado correctamente el asentamiento se puede llegar al caso de que la estructura en mención ya no pueda cumplir sus funciones y no presente el desempeño para el que fue construida. Esto puede derivar no solo en pérdidas económicas, sino que también en la pérdida de vidas, por ello el correcto análisis geotécnico se debe ejecutar en el cálculo de los asentamientos ya que si no se entienden los distintos fenómenos que están ocurriendo en cada proyecto y no se toman en cuenta para este cálculo se pueden desencadenar eventos catastróficos.

A su vez, se tiene que recalcar que el compromiso ético del ingeniero no solo es para brindar un correcto diseño desde el punto de vista técnico, sino que se deben tomar medidas para brindar diseños realistas que puedan ser ejecutados contemplando un presupuesto adecuado. Se menciona este último punto ya que hoy en día existen una gran variedad de herramienta, equipos y ensayos que nos sirven para el cálculo, sin embargo, estos deben ser usados correctamente, en un contexto ideal el costo de las opciones más modernas debería ser el mismo que las más tradicionales, pero esperemos que en conocer de los distintos métodos y aplicaciones aporte a que se planteen estos y se puedan equiparar los precios para realizar ingeniería de mejor calidad en el país.

1.3 ALCANCE

El alcance del trabajo es describir en primera instancia la diferencia de los asentamientos inmediatos y de consolidación (tanto los primarios como los secundarios). Se hará un repaso

por distintos métodos para cálculo de asentamiento en arcillas y se analizarán acorde a su aplicabilidad y requerimientos.

1.4 OBJETIVOS

En objetivo principal del trabajo de investigación es presentar la importancia del correcto cálculo de los asentamientos de zapatas en arcilla y mostrar una variedad de métodos para su cálculo.

A su vez, como objetivos específicos a cumplirse en el presente trabajo se presentan los siguientes:

- Analizar los distintos tipos de asentamientos que se suscitan bajo zapatas en arcillas y sus relevancias.
- Recopilar distintos métodos tanto antiguos como nuevos para el cálculo de asentamiento de zapatas en arcillas.
- Analizar los requerimientos e idoneidades de uso de los distintos métodos recopilados y analizar cuando sería idónea su aplicación.

1.5 METODOLOGÍA

En el presente documento se mostrarán los distintos tipos de asentamientos de zapatas en arcillas generados y se discutirá sus consecuencias en las estructuras proyectas. Posterior a ello se mostrarán algunas de las metodologías recopiladas para calcular el asentamiento en arcillas, las cuales son las siguientes:

- Método de la teoría de elasticidad para asentamientos inmediatos.
- Método de Bjerrum (1963) para asentamientos inmediatos.
- Método de Terzaghi y Peck (1996).
 - Método del Índice de compresión C_c para consolidación primaria de de Terzaghi y Peck (1996).
 - Consolidación secundaria de Terzaghi y Peck (1996).
- Método del Edómetro para consolidación primaria de Terzaghi y Peck (1996).
- Método de asentamiento en arcilla de S. Bensallam, et al (2013).
- Método de Asaoka (1978).
- Asentamientos con la curva del modelo de Gompertz.
- Modelo de crecimiento lógico de Xu, H., et al (2005).

Ya con la descripción de los distintos métodos recopilados y con el entendimiento de los distintos fenómenos suscitados se verán las limitaciones y condiciones bajo las que fueron desarrollados los métodos recopilados. Con los análisis de variabilidad de condiciones y aplicaciones, así como de requerimientos identificados para cada método se discutirá su mejor aplicación en distintas condiciones realizando un énfasis en situaciones que se podrán dar en proyectos desarrollados en distintas partes del país.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ASENTAMIENTOS

Se puede definir el asentamiento como un término que describe el desplazamiento vertical generado en una estructura, una cimentación, una presa, etc. Los asentamientos se producen en el suelo debido a que se colocan cargas y están generan una presión que redistribuye el estado de esfuerzos interno del suelo y produce una redistribución de partículas internas que generan cambios volumétricos, los cuales generan desplazamientos verticales que llamamos asentamientos. Desde el punto de vista estructural existen 2 tipos de asentamiento que son los uniformes y los diferenciales.

Los asentamientos uniformes no generan mayores complicaciones en la estructura ya que al ser uniformes toda la estructura describe un mismo desplazamiento, sin embargo, su correcta medición también es importante para no afectar el libre uso de esta y tomar medidas correctivas de ser necesarias. Por ejemplo, una galería de arte que presente asentamientos uniformes de 1 m si bien no compromete la seguridad estructural de la edificación si afecta su funcionalidad ya que no podrá ser usada sin tomar medidas correctivas.

Por otra parte, los asentamientos diferenciales generan daños estructurales en la edificación ya que al asentarse más en ciertas zonas que en otras produce que estos desplazamientos afecten los esfuerzos aplicados produciéndose agrietamientos y pudiendo llegar a comprometer su seguridad al llevarla a niveles de deformaciones que no pueda tolerar. Estos asentamientos generalmente ocurren por diferencias de cargas, diferencias en el estrato resistente, diferencia marcada en tiempos de construcción entre otros. En la Figura 1 podemos observar el efecto de los asentamientos en las estructuras proyectadas descrito en los párrafos anteriores.

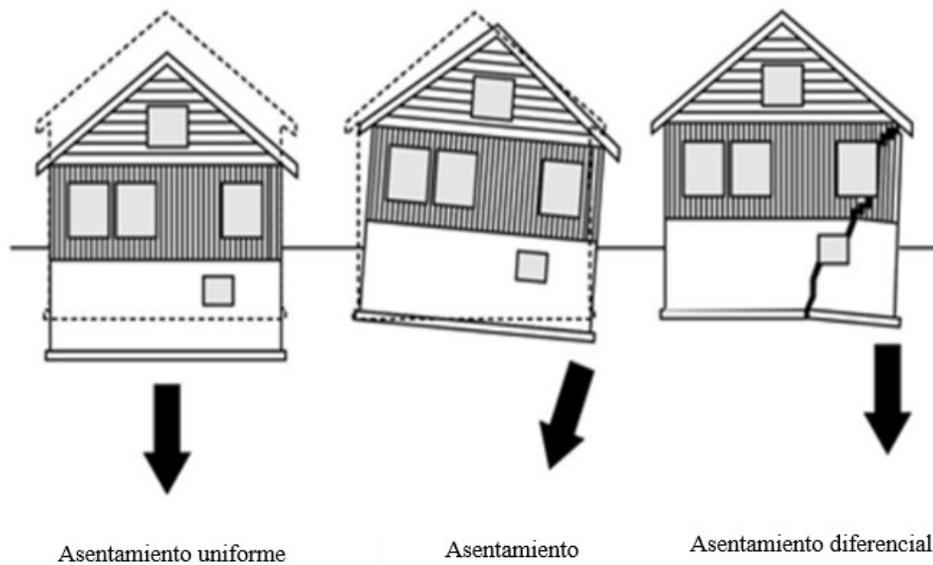


Figura N° 1.- Tipos de asentamiento en las estructuras

Tomado y editado de Civil Engineers Forum (2020) Cracks due to different types of soil settlement.

2.2 TIPOS DE ASENTAMIENTOS GEOTÉCNICOS

Razouki y Al-Zubaidy (2010) describen que en general, el asentamiento total de una cimentación consiste en tres partes: asentamientos inmediatos, asentamiento de consolidación primarios y asentamientos de consolidación secundarios o de creep. Los asentamientos inmediatos también son llamados asentamientos elásticos.

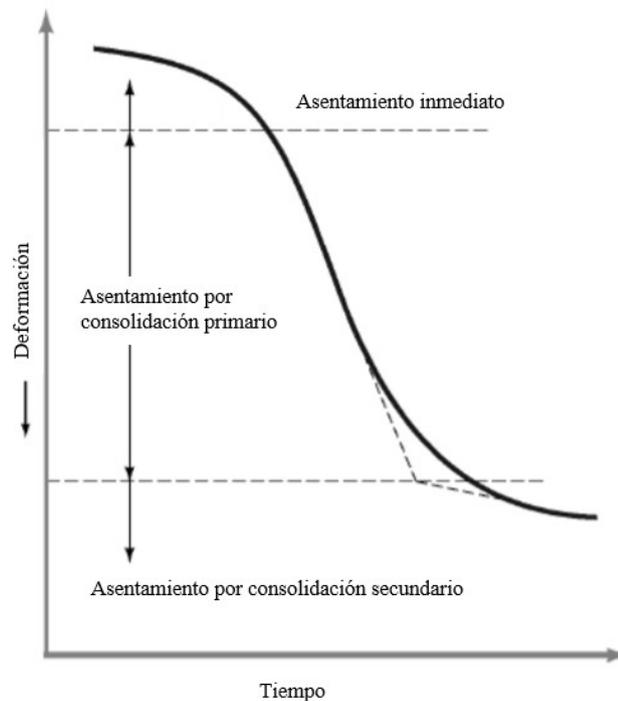


Figura N° 2.- Tipos de asentamientos

Tomado de Das, B.M. (2014) Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones

En la Figura 2 podemos ver los 3 tipos de asentamientos mencionados, a continuación, describiremos a detalle cada uno de ellos y su relevancia en el cálculo de los asentamientos de zapatas en arcilla:

2.2.1 ASENTAMIENTO INMEDIATO

Según Bowles, J. (1997) los asentamientos inmediatos suceden cuando la carga es aplicada o en los siete días siguientes. Estos asentamientos ocurren por la deformación elástica de las partículas del suelo debido a la carga aplicada sin cambios en el contenido de agua. En las arcillas el asentamiento inmediato suele ser muy bajo y casi despreciable.

Según Al-Taire, Al-Ansari y Knutsson (2016) estos asentamientos se suelen estimar por la teoría de elasticidad, esta asume que el suelo se comporta elástico bajo cargas en cualquier masa de suelo. Suelen haber tres tipos de métodos para calcular los asentamientos elásticos.

- Métodos empíricos: Estos dependen de los asentamientos observados de la estructura y prototipos a escala completa. Dependen de correlaciones de los ensayos in-situ tales como el cono de penetración estándar (CPT) y el ensayo de penetración estándar (SPT).
- Métodos semi empíricos: Están basados en estudios teóricos y en observaciones de campo.
- Métodos de relaciones teóricas: Estos están basados en la teoría de elasticidad y los asentamientos se calculan con el módulo de elasticidad del suelo.

2.2.2 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

Según Al-Taire, Al-Ansari y Knutsson (2016) los asentamientos por consolidación primaria resultan del cambio de volumen debido a la expulsión del agua por los vacíos del suelo. Esto ocurre principalmente en suelos cohesivos saturados y el cambio se genera en un largo periodo de tiempo aumentando a un ritmo lento.

2.2.3 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

Según Al-Taire, Al-Ansari y Knutsson (2016) los asentamientos por consolidación secundaria son una deformación extra. En esta parte vemos el asentamiento por creep que es la continua deformación ante cargas constantes que se genera.

2.3 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS

Existen diversos métodos para el cálculo de los asentamientos; en el presente documento se realiza una revisión de algunos de los que se pueden encontrar tales como:

2.3.1 ASENTAMIENTO INMEDIATO BASADO EN LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

El cálculo de los asentamientos por el método de elasticidad se puede aplicar para arcillas parcialmente saturadas y se encuentra regido por la siguiente ecuación:

$$S_i = q_0 \times B' \times \frac{1 - u_s^2}{E_s} \times I_s \times I_d \times C_n$$

Donde:

S_i : Asentamiento inmediato

q_0 : Presión aplicada producto de la cimentación

B' : Para el centro de la cimentación se usa la mitad de B y el valor completo de B para las esquinas.

u_s : Relación de poisson del suelo

E_s : Módulo de elasticidad promedio del suelo dentro de la profundidad de análisis. Una amplia variedad de métodos y valores típicos puede ser encontrado en Brahma, P. and Mukherjee, S.P. (2010).

$$E_{s(\text{promedio})} = \frac{\sum E_s(i) \times H_i}{\sum H_i}$$

Donde H_i y E_i son los espesores y módulos de elasticidad de cada capa i de suelo, a su vez; $\sum H_i = H$ (profundidad del estrato duro) o $5B$ cualquiera sea menor.

I_s, I_d, C_n : Factores de forma, profundidad y de esquinas contribuyentes respectivamente

$$I_s = I_1 + \frac{1 - 2 \times u_s}{1 - u_s} \times I_2$$

Donde I_1 y I_2 dependen del tamaño de la zapata y de la profundidad del estrato duro.

A su vez, el factor de profundidad se puede calcular mediante la siguiente relación:

$$I_d = 0.66 \times \left(\frac{D_f}{B}\right)^{(-0.19)} + 0.025 \times \left(\frac{L}{B} + 12 \times \mu_s - 4.6\right)$$

Cabe resaltar que cuando D_f es 0 el valor de I_d siempre será 1.

Al ver el presente método derivado de la teoría de elasticidad vemos que un factor determinante es el valor del módulo de elasticidad (E). Por ello, la forma que se obtenga este valor determinará el grado de incertidumbre que estemos ingresando al método. El módulo de elasticidad puede ser calculado directa o indirectamente de muchas formas listándose las formas indirectas en Day (2012) o en Look (2007). Estas formas indirectas parten de ensayos clásicos y correlaciones a partir por ejemplo del ensayo de penetración estándar (SPT) y de la clasificación SUCS del suelo (esta clasificación se puede obtener de la norma ASTM D6913 o NTP 339,128).

Por otra parte, entre los métodos más recientes y precisos para calcular el módulo de elasticidad del suelo tenemos al ensayo SCPT (ensayo de penetración estándar de cono sísmico). En el ensayo SCPT se pueden medir la velocidad de ondas de corte de los estratos de suelo por lo que el cono realizó su recorrido vertical. Con estas velocidades de ondas de corte bajo la teoría de elasticidad podemos calcular el módulo de corte bajo la siguiente ecuación:

$$G_o = \rho \times V_s^2$$

Donde V_s representa la velocidad de onda de corte y ρ la densidad de masa del material que nos dan el valor de G_o que es el módulo de corte. Bajo la misma teoría, Este módulo nos dará una relación directa para hallar el valor del módulo de elasticidad que se representa a continuación:

$$E_o = 2 \times (1 + \mu) \times G_o$$

Donde μ es el módulo de poisson y E_o es el módulo de elasticidad del estrato de suelo.

Bajo esta misma teoría de elasticidad tenemos que mencionar a los ensayos geofísicos que mediante el ensayo MASW (ensayo de ondas superficiales nos permite calcular la velocidad de ondas de corte del estrato de suelo.

2.3.2 MÉTODO DE BJERRUM

El cálculo de los asentamientos por este método se puede aplicar para arcillas en condiciones no drenadas y se encuentra regido por la siguiente ecuación:

$$S_i = u_o \times u_1 \times q \times \frac{B}{E_u}$$

Donde:

S_i : Asentamiento inmediato

u_0, u_1 : Factores que dependen de la profundidad y del espesor del estrato debajo de la cimentación

q : Presión aplicada producto de la cimentación

B : Es la dimensión de la cimentación

E_u : Módulo de elasticidad del suelo

Los valores de u_0, u_1 se pueden hallar usando los ábacos mostrados en la siguiente figura:

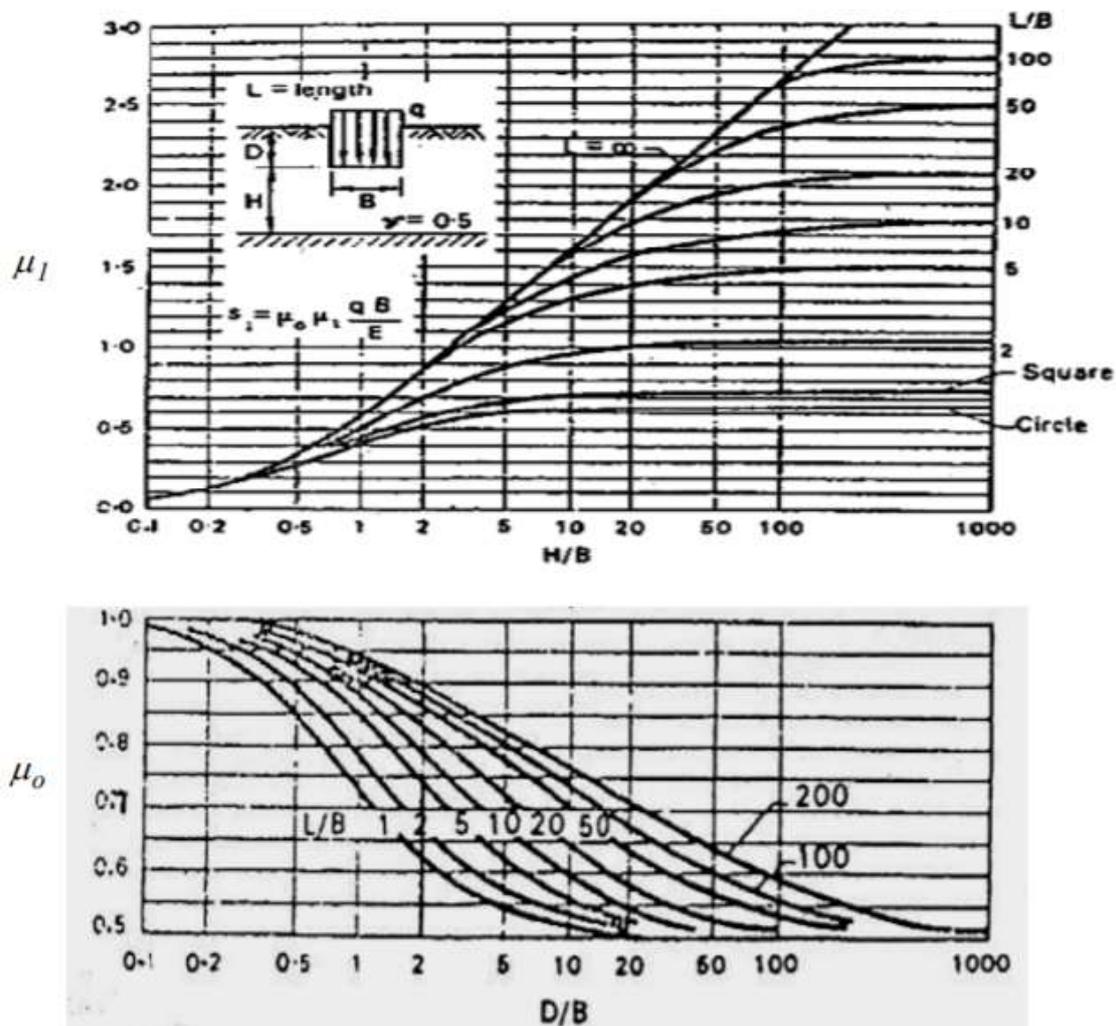


Figura N° 3.- Coeficientes de desplazamiento vertical para cimentaciones en arcillas saturadas

Tomado de Foundation Engineering (2014) Dr. Farouk Majeed Muhauwiss, Tirkrit University.

El método de Bjerrum depende como ya se vio en las formulaciones del valor del módulo de elasticidad y por ende tal cual se dijo en el método anterior la forma en que obtengamos este parámetro será la que defina el grado de incertidumbre que estaremos manejando. Por ello se

describen distintas formas de medición del módulo de elasticidad en el acápite anterior que aplican a su vez para la formula del presente acápite.

Según Robertson y Cabal (2015) los ensayos CPT, SCPT y SCPTu son muy recomendados para calcular los parámetros asociados al asentamiento del suelo.

2.3.3 MÉTODO TRADICIONAL DE TERZAGHI

• MÉTODO DEL INDICE DE COMPRESIÓN CC

Según Majeed Muhawiss, F. (2014) este método es adoptado para arcillas normalmente consolidadas y ligeramente sobre consolidadas. El índice de compresión C_c es la gradiente de e -log P dibujada para arcillas normalmente consolidadas. Mientras que, para arcillas sobre consolidadas, C_c es también la pendiente de e -log P , pero pasando la presión de pre-consolidación P'_c . Los valores de C_c obtenidos del ensayo edométrico tienden a ser subestimados por la disturbancia de la muestra. Sin embargo, hay correlaciones que relacionan C_c con parámetros de composición, estas relaciones se pueden encontrar en Day (2012) o en Look (2007).

El procedimiento para aplicar este método se describe en la siguiente secuencia de paso:

- a) Calcula el esfuerzo efectivo σ'_o en el centro de la capa de arcilla antes de aplicar la carga.
- b) Calcula el incremento de esfuerzo promedio generado en el medio de la capa de arcilla mediante:

$$\Delta\sigma_{promedio} = \frac{(\Delta\sigma_t + 4\Delta\sigma_m + \Delta\sigma_b)}{6}$$

Donde, $\Delta\sigma_t$, $4\Delta\sigma_m$ y $\Delta\sigma_b$ son los incrementos de esfuerzo producto de la carga aplicada en la parte superior de la capa, el medio y en la parte inferior respectivamente.

- c) Usando σ'_p y $\Delta\sigma_{promedio}$, obtenemos Δe de las siguientes ecuaciones según sean aplicables:

- Si $\sigma'_p < \sigma'_o$, el suelo está sub consolidado:

$$\Delta e = C_c \times \log_{10}\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}}{\sigma'_p}\right)$$

- Si $\sigma'_p = \sigma'_o$, (OCR = 1) el suelo está normalmente consolidado:

$$\Delta e = C_c \times \log_{10}\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}}{\sigma'_o}\right)$$

- Si $\sigma'_p > \sigma'_o$, (OCR > 1) el suelo está sobre consolidado:

Si $\sigma'_p > \sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}$:

$$\Delta e = C_s \times \log_{10}\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}}{\sigma'_o}\right)$$

Si $\sigma'_p < \sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}$:

$$\Delta e = C_c \times \log_{10}\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma_{promedio}}{\sigma'_p}\right) + C_s \times \log_{10}\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o}\right)$$

d) Calculamos el asentamiento por consolidación mediante la siguiente relación:

$$S_c = H_t \times \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Donde:

$$e_0 = w_0 \times G_s$$

A su vez, si elegimos dividir todo el espesor de arcilla en varias capas replicamos los pasos mencionados solo q lo hacemos para cada capa y al final para calcular el asentamiento total sumamos los generados en cada capa.

• CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA

Este asentamiento es uno adicional al ya descrito por el índice de Compresión Cc. Este asentamiento se explica debido a la redistribución de fuerzas entre partículas luego de una larga reagrupación estructural producida por los otros asentamientos inmediatos y de consolidación primarios. Este asentamiento puede ser calculado con la siguiente fórmula:

$$S_{cs} = C_\alpha \times H \times \log_{10} \frac{t_2}{t_1}$$

Donde:

S_{cs} : Asentamiento por consolidación secundaria

C_α : Coeficiente de consolidación secundaria

H: Espesor de la capa de arcilla

t_1 y t_2 : Son los tiempos para la consolidación primaria y secundaria respectivamente

Para determinar el valor de t_1 usamos la siguiente relación:

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

De dicha relación podemos tomar T_v igual a 1 y t igual a t_1 para obtener:

$$t_1 = \frac{H^2}{C_v}$$

El espesor de la capa de arcilla se representa como H .

En el método tradicional para el cálculo de asentamientos descrito por Terzaghi tenemos un mayor número de variables dependientes que con los métodos derivados de la elasticidad. Para el presente método dependemos de parámetros de consolidación por lo que es muy común realizar ensayos de consolidación con la finalidad de graficar la curva de consolidación del material y poder calcular los valores de parámetros como el índice de compresión, el índice de compresión secundaria, el OCR (índice de sobre-consolidación), el esfuerzo de pre-consolidación entre otros.

A su vez como ya se mencionó se pueden recurrir a relaciones indirectas que se presentan en Day (2012) o en Look (2007). Estas relaciones indirectas se relacionan a valores como como el índice de plasticidad o parámetros similares que pueden ser fácilmente calculados mediante ensayos básicos de laboratorio como el de contenido de humedad, peso específico relativo de los sólidos, entre otros.

2.3.4 MÉTODO DEL EDÓMETRO

En el ensayo edométrico, el valor del volumen cambia con cada incremento de presión y se obtiene con:

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0}, \quad a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}, \quad \Delta H = \frac{\Delta e}{1+e_0} \times H_t, \quad \Delta H = S_c = m_v \times H_t \times \Delta p$$

Donde:

a_v : Coeficiente de compresibilidad del suelo

e_0 : Relación de vacíos inicial

Δe : Variación de la relación de vacíos debido a la variación Δp

Δp : Variación de esfuerzos

H_t : Espesor total de la capa de arcilla

ΔH : Variación en el espesor de la capa de arcilla

m_v : Coeficiente de compresibilidad volumétrica

Se tiene que mencionar que el coeficiente de compresibilidad volumétrica del suelo determinado durante el ensayo edométrico para cada incremento de presión aplicado sobre el esfuerzo vertical efectivo o presión de sobrecarga a la profundidad de la cual fue extraída la muestra. Si el esfuerzo aplicado o el valor de m_v varía con la profundidad, entonces el depósito de suelo debe ser dividido en capas y el cambio en el espesor debe ser determinado para cada capa.

Según Majeed Muhauwiss, F. (2014) se puede decir que para arcillas muy duras se tienen valores de m_v menores a $0.05 \frac{m^2}{MN}$, para arcillas sobre consolidadas este valor varía entre 0.05 y 0.1, para arcillas sobre consolidadas firmes o laminadas este valor puede estar entre 0.1 y 0.3, por su parte para arcillas normalmente consolidadas blandas este valor está entre 0.3 y 1, para arcillas blandas orgánicas este valor está entre 0.5 y 2.

Como su propio nombre describe este método depende del ensayo edométrico. Este método decanta en la obtención de un gráfico que brinda los esfuerzos de pre-consolidación índice de compresión, índice de entumecimiento y el módulo edométrico (un parámetro similar al módulo de elasticidad).

2.3.5 MÉTODO DE S. BENSALLAM, ET AL (2013)

Según Bensallam, S. Bahi, L. Ejjaouani, H. Shakhirev V. Rkha CHaham, K. (2013) este método fue obtenido de ensayos de campo a escala real en procesos de secado de la arcilla. Se genera el cálculo del asentamiento en función del tiempo de acuerdo con las condiciones hidráulicas y mecánicas del estado de la masa de suelo. El método contempla la anisotropía del suelo sin embargo fue generado solo considerando el desplazamiento vertical más no considera un análisis en tres dimensiones. Como se mencionó fue generado para el proceso de secado desde un estado saturado correspondiente a un contenido de humedad (w_m) y el límite de hinchazón (Δh_g).

Para predecir el asentamiento con el modelo, el estado hidráulico en la zona activa en función de la profundidad z es presentado como la ratio:

$$\frac{w_m - w_i}{w_l}$$

Donde:

$w_m - w_i$: Rango de contenido de agua en el estado saturado y el contenido de agua usado

w_l : Límite de contracción

Para el modelo, el esfuerzo generado por la fuerza externa puede ser representado en función de la profundidad con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{external\ load} = \frac{a \times b \times \sigma}{(a + z) \times (b + z)}$$

Siendo a y b los lados de la cimentación, z la profundidad y σ el esfuerzo aplicado en la cimentación.

Según Ejjaouani, H., Magnan, J.P., Shakhirev, V. (2008) se tiene que considerar un ángulo de difusión por lo que se modifica ligeramente la ecuación hallada para el esfuerzo generado por la fuerza externa y se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_{external\ load} = \frac{a \times b \times \sigma}{(a + 2 \times z \times \tan \beta) \times (b + 2 \times z \times \tan \beta)}$$

A su vez para el cálculo del ángulo de difusión Ejjaouani et al. (2008) presentan la siguiente fórmula:

$$\beta = \varphi \times \left(\frac{Z_i}{Z_{pl}}\right)^{e \times \left(1 - \frac{Z_i}{Z_{pl}}\right)^e}$$

Donde φ es el ángulo de fricción interna, “e” es la relación de vacíos; Z_{pl} es la zona plástica debajo de fundación; Z_i es la profundidad de cálculo y “c” es la cohesión del suelo. Para hallar el valor de Z_{pl} se recurre a la siguiente ecuación:

$$Z_{pl} = \left(\frac{\sigma_a \times (1 - \sin \varphi) - 2 \times C \times \cos \varphi}{\rho \times (1 + \sin \varphi)}\right)^{-\pi \times \tan \varphi}$$

A su vez, el peso de la capa superior puede ser definido como una función de su estado hidráulico, esto se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma_{top\ layer\ load} = \frac{w_m - w_l}{w_l} \times z \times \rho$$

Donde:

ρ : Densidad del suelo

Al tener en consideración lo antes mencionado, se puede llegar a que el esfuerzo total estará definido por la suma de esfuerzo externo y del esfuerzo generado por la capa superior de suelo.

Según Berezantsev, V.G., Ksenofontov, A.I., Platonov, E.V., Sidorov, N.N., Yaroshenk, V.A. (1961), La deformabilidad del suelo en la concierne zona activa del suelo puede ser expresado mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1 - \nu^2}{E}$$

En ella se toma a ν como el módulo de Poisson y a E como el módulo de elasticidad. A su vez en este método se considera el tiempo ya que es bien conocido que el cambio volumétrico es un proceso dependiente del tiempo. La dependencia del tiempo en el presente método se expresa mediante la siguiente relación:

$$\frac{t_i}{t_m}$$

Donde, t_m es el tiempo necesario para alcanzar el estado seco y t_i el tiempo considerado para el cálculo.

Por su parte al considerar las expresiones mencionadas, el asentamiento será calculado mediante la siguiente expresión:

$$S_r = (\Delta h_g) - \left(\frac{a \times b \times \sigma}{(a + 2 \times z \times \tan \beta) \times (b + 2 \times z \times \tan \beta)} + \frac{w_m - w_i}{w_l} \times z \times \rho \right) \times \frac{1 - \nu^2}{E} \times z \times \frac{w_m - w_i}{w_l} \times \frac{t_i}{t_m}^{\frac{w_m - w_i}{w_l}}$$

La presente fórmula depende de mayores variables las cuales pueden ser calculadas directa o indirectamente. Vemos que esta fórmula depende de varios estados límite teniendo que realizarse no solo ensayos de límite líquido y plástico, sino que también de hinchazón y contracción. A su vez vemos una dependencia de parámetros de elasticidad como el módulo elástico, dicho módulo ya se describió en acápites anteriores como puede ser calculado para manejar distintos rangos de incertidumbre. A su vez vemos una dependencia de valores de cohesión y ángulo de fricción por lo que estos por excelencia tendrían que ser calculados mediante un ensayo triaxial o en su defecto un ensayo de compresión simple. Ante la cantidad de ensayos y parámetros necesarios para la implementación del presente método se sugiere el uso del ensayo SCPTu que nos permitirá tener una medición continua de los parámetros de entrada y en su defecto de no poder contar con este ensayo recurriremos a diversos ensayos básicos de laboratorio y a correlaciones basadas en el valor N del ensayo SPT. Dichas correlaciones se pueden encontrar en Day (2012) o en Look (2007).

2.3.6 MÉTODO DE ASAOKA (1978)

Según Asaoka, A (1978) la ecuación de consolidación dimensional puede expresarse mediante la siguiente expresión:

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

Según Shi B., Kong X. (2018) Asaoka usa una serie para aproximar la expresión:

$$s + \alpha_1 \times \frac{ds}{dt} + \alpha_2 \times \frac{d^2s}{dt^2} + \dots + \alpha_n \times \frac{d^ns}{dt^n} = b$$

Donde S es el asentamiento por consolidación, α_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) es el coeficiente de consolidación, b es una constante por condiciones de borde.

Según Shi B., Kong X. (2018) Asaoka presentó la siguiente ecuación para definir su cálculo de asentamientos:

$$s(t) = s_\infty - (s_\infty - s_0) \exp\left(-\frac{t}{\alpha_1}\right)$$

Donde s_0 y s_∞ son los asentamientos iniciales y finales respectivamente, a su vez:

$$\alpha_1 = \frac{5 \times h^2}{12 \times C_v}$$

Donde:

C_v : Coeficiente de consolidación

h: Altura de drenaje

2.3.7 MODELO LÓGICO

Según Xu, H., Shi, B., Li, X. (2005) el modelo lógico es una especie de modelo de crecimiento que es muy usado en el campo de la ecología y demografía. La forma diferencial del modelo lógico es la siguiente:

$$\frac{ds}{dt} = r \times s \times \left(1 - \frac{s}{k}\right)$$

Se aprecia que se tiene 3 parámetros que deben ser determinados. Si la información de asentamientos medidos se puede obtener, hay 3 métodos usados para determinar estos tres parámetros: método de tres secciones, modelo gris y el método de regresión lineal.

2.3.8 MODELO DE GOMPERTZ (2005)

Según Yu, C., Liu, S. (2005) el modelo es una curva creciente, la expresión matemática de la cual se puede apreciar a continuación:

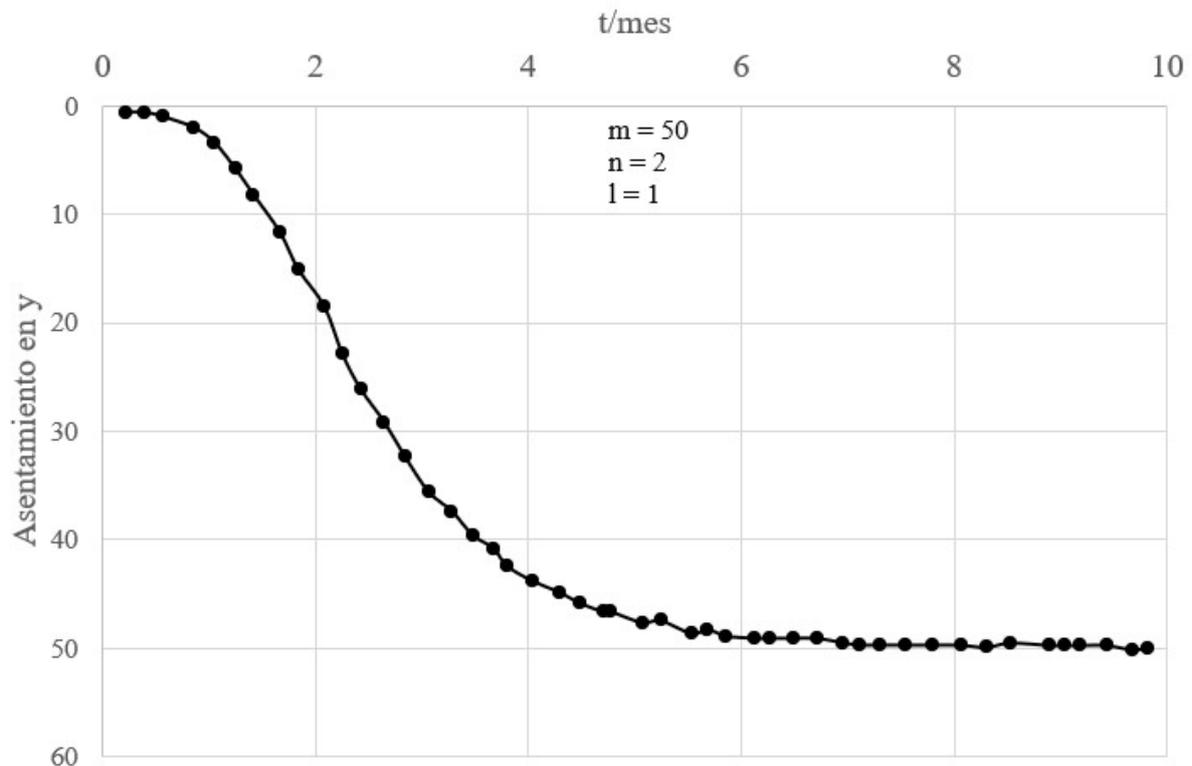


Figura N° 4.- Curva típica de Gompertz

Tomado y editado de Yu et al (2005)

En la Figura 3 se aprecia una curva típica de Gompertz. La ecuación puede expresarse como:

$$y = m \exp(-e^{(n-l \times t)})$$

Donde:

m: Constante

n: Constante

l: Constantes

t: Tiempo

La curva de Gompertz precisa de una nutrida cantidad de información para su correcto uso por lo que si bien se ajusta muy bien a las características de comportamiento que describa cada suelo en particular es preciso que se tenga una buena cantidad de información de mediciones

en el lugar. Estas mediciones ayudarán a calibrar correctamente la curva y que la misma pueda describir correctamente el comportamiento del suelo de cimentación.

2.4 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EN SITU Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la implementación de los distintos métodos descritos en el presente trabajo se mencionaron los parámetros que gobiernan el uso de cada uno de ellos. Por ende, se puede apreciar la importancia de la forma de cálculo de estos parámetros.

Para entender mejor la importancia y dependencia de cada uno de los valores usados en las distintas fórmulas, así como de los métodos realizados para obtenerlos se muestran unas gráficas que ilustran la variabilidad encontrada en cada uno de estos:

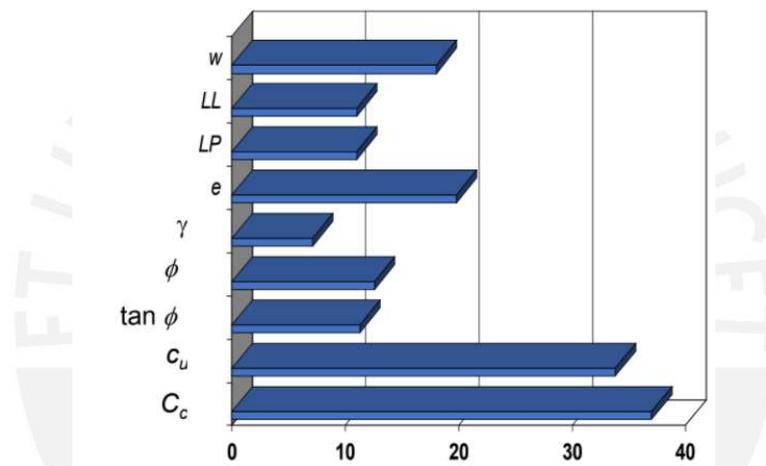


Figura N° 5.- Variabilidad de los parámetros

Tomado de Ortigão (2020)

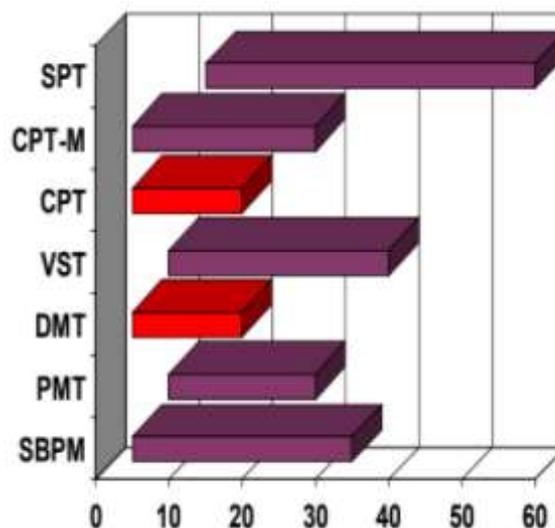


Figura N° 6.- Variabilidad de los métodos in situ

Tomado de Ortigão (2020)

Ya vimos en los acápites anteriores que existen distintos ensayos de campo y de laboratorio para la obtención de estos parámetros, ahora se describirán con mayor detalle algunos de los más importantes y usados en el mercado:

2.4.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

- **CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL (ASTM D 2435 / NTP 339.154)**

Este ensayo consiste en someter al suelo a incrementos de presión o carga para que se dé un reajuste de las partículas internas del mismo y que producto de este reajuste las partículas se desplacen y se dé una reducción en la relación de vacíos (esta deformación descrita es una deformación plástica). El ensayo como se detalló consiste en el reajuste de partículas internas para que se desplacen y conduzcan al agua y el aire fuera de ella. Es por ello por lo que factores como el grado de saturación, el coeficiente permeabilidad o las propiedades del fluido de los poros son relevantes.

Bajo el principio mencionado este ensayo es de importancia ya que permite calcular la magnitud de las compresiones totales que pueden presentarse bajo distintas cargas y la relación que hay entre el tiempo y las compresiones que sufre el suelo ante cargas sostenidas.

Al final del ensayo se tendrá un juego de valores de distintas cargas para poder realizar la gráfica logarítmica de relación de vacíos y esfuerzo efectivos. Con dicha gráfica se podrán calcular los distintos parámetros de consolidación requeridos.

- **COMPRESIÓN SIMPLE (ASTM D2166 / NTP 339.167)**

Según Zegarra (2019) el ensayo de compresión simple o compresión no confinada de un suelo es un medio rápido para determinar la resistencia al corte de un suelo. Construyendo el círculo de Mohr resulta evidente que la resistencia al corte o cohesión de una muestra de suelo puede ser estimada como la mitad de la resistencia a la compresión no confinada del suelo.

- **LÍMITE LÍQUIDO (ASTM D 4318-17 / NTP 339.129)**

Según Zegarra (2019) el límite líquido se puede determinar al ejecutar diversas pruebas en las cuales una porción de la muestra se coloca en la Cuchara de Casagrande, dividida en dos partes mediante un ranurador y forzada a unirse mediante el golpeteo continuo de la cuchara en un dispositivo mecánico estándar. Para realizar el ensayo se precisa de 3 o más intentos dentro de un rango de contenido de agua a fin de calcular el límite líquido (LL). El LL viene a ser la

humedad requerida para que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm con 25 golpes de la cuchara.

- **LÍMITE PLÁSTICO (ASTM D 4318-17 / NTP 339.129)**

Según Zegarra (2019) el límite plástico se determina mediante el amasado y rolado continuo de una porción de suelo hasta que el contenido de agua se reduzca de tal forma que al llegar a formar un rollito de 3.2 mm de diámetro se agriete la muestra. El límite plástico (LP) viene definido como la humedad del suelo para que se el punto antes descrito.

2.4.2 ENSAYOS IN SITU

- **CPT / SCPT_u**

El cono de penetración estándar CPT así como sus variaciones CPT_u y SCPT tienen una gran variedad de aplicaciones en un gran rango de suelos. El ensayo consiste en la hincada a velocidad constante del cono que realizará una medición continua de distintos parámetros geotécnicos que luego mediante distintas correlaciones semi-empíricas, entre los parámetros a poder hallar tenemos el OCR, el esfuerzo in situ, la sensibilidad, esfuerzo cortante no drenado, módulo de elasticidad, módulo de corte, permeabilidad y coeficiente de consolidación entre otros.

Entre los parámetros medidos directamente por este ensayo tenemos a la resistencia normalizada del cono, la ratio de fricción normalizado, presión de poros, tipo de comportamiento del suelo, etc:

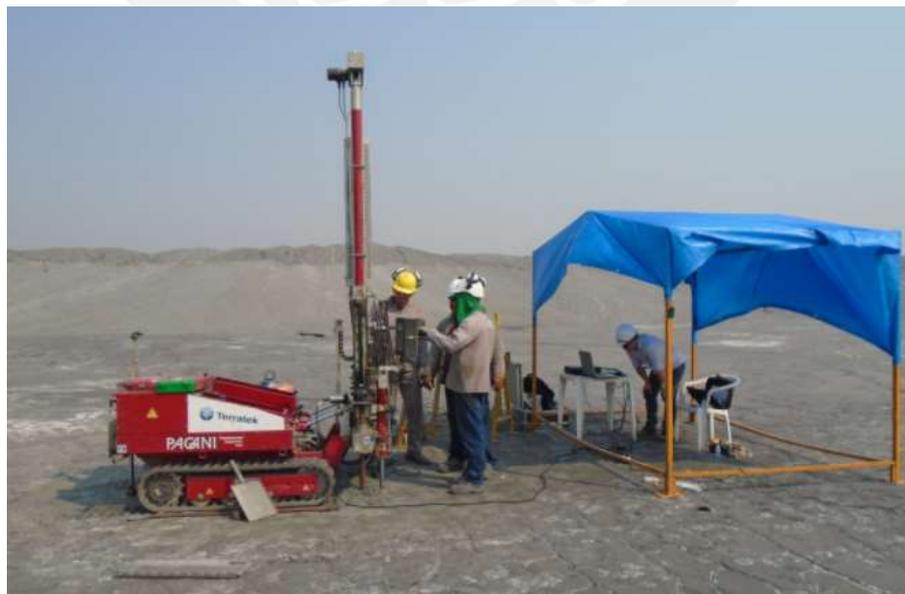


Figura N° 7.- Ensayo CPT

Tomado de Ortigão (2020)

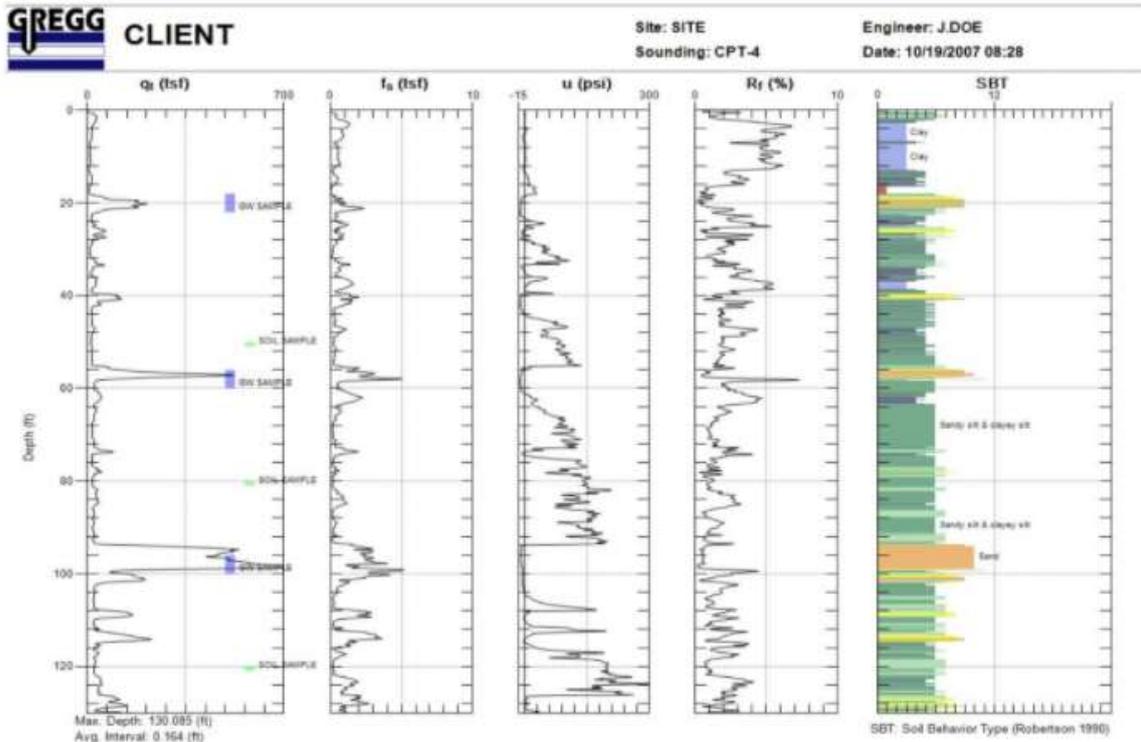


Figura N° 8.- Resultados de CPTu
Tomado de Robertson y Cabal (2015)

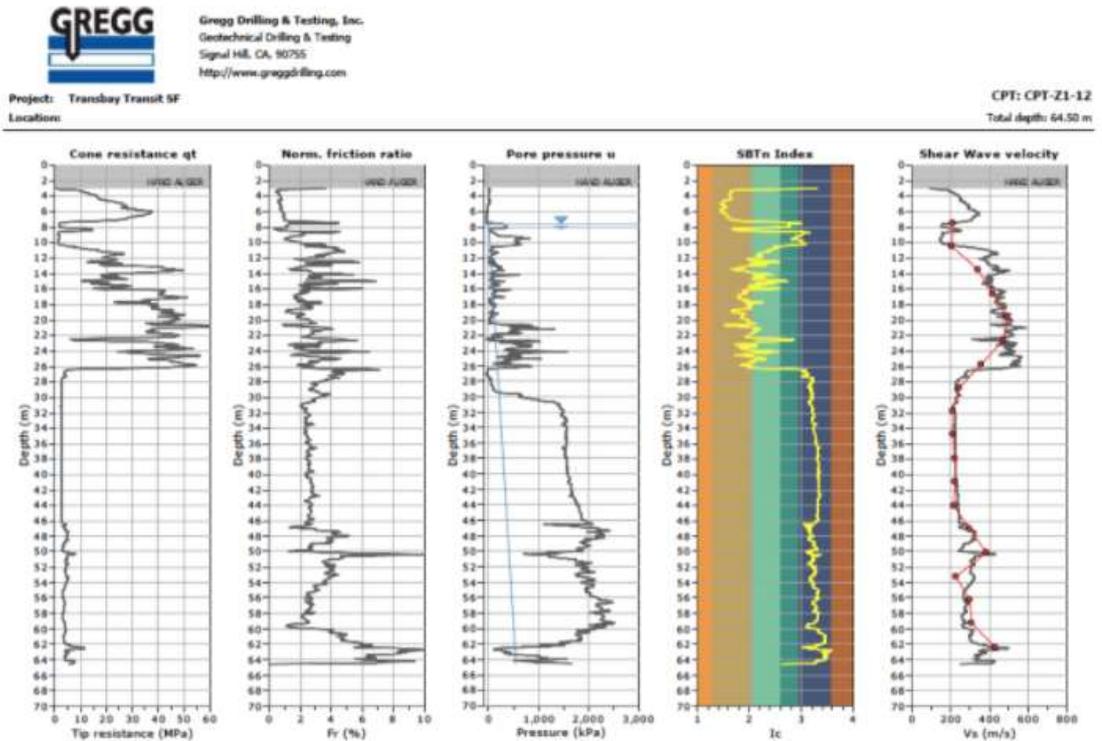


Figura N° 9.- Resultados de SCPTu
Tomado de Robertson y Cabal (2015)

- **ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTANDAR (SPT)**

Según Schnaid (2009) de todos los métodos de campo es el más conocido y el más usado en todo el mundo. Dada su simplicidad y la gran variedad de correlaciones basadas en los resultados que brinda este ensayo su uso masificado se mantiene hasta el presente. El SPT provee una medida de la resistencia del suelo, a través, del número de veces que se deja caer el martillo para que se avance verticalmente 30 cm en el terreno con la hincia luego de haber avanzado 15 cm previos excepto en los casos en que se cuenten 50 golpes y sean insuficientes para avanzar 15 cm en cuyo caso el ensayo termina. Con el valor de N se interpretan distintos parámetros bajo las muchas correlaciones que existen. Esta dependencia del valor de N y las correlaciones usadas son continuamente discutidas en los últimos años dada la falta de estandarización para realizar el ensayo en distintas partes. La principal ventaja comparativa que mantiene por ahora el SPT sobre otros métodos más recientes como el SCPTu es que puede recolectar muestra del suelo y que hoy en día en el mercado peruano el valor de los ensayos SPT es más barato que los CPT o SCPTu.

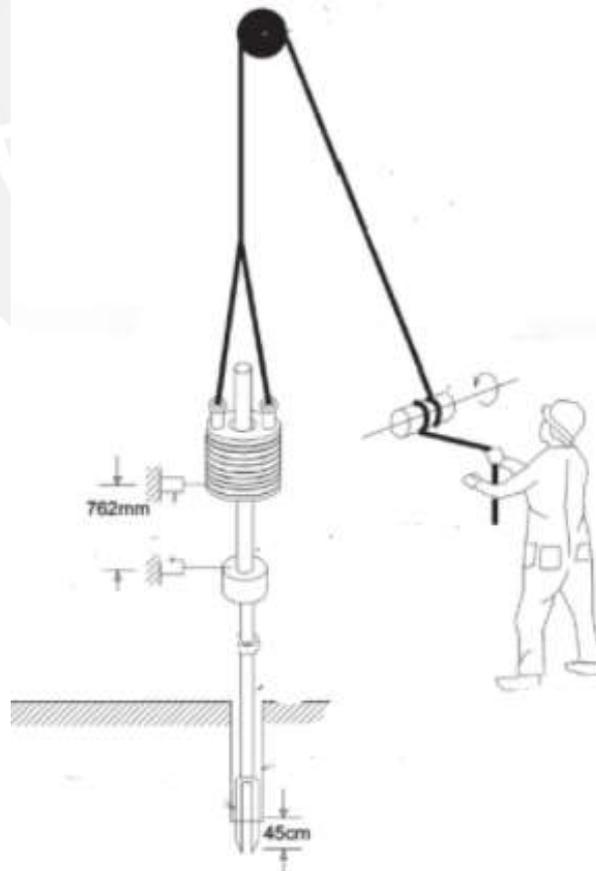


Figura N° 10.- Ensayo SPT

Tomado de Ortigão (2020)

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DESCRITO EN LOS DISTINTOS MÉTODOS

Como se puede observar en el capítulo previo se describen una serie de métodos para poder calcular los asentamientos generados por zapatas en arcilla. Como parte de la descripción de los métodos mencionados se aprecian las premisas que rigen cada uno de estos métodos y las variables involucradas en sus cálculos.

Al analizar estos métodos tenemos que partir del motivo que nos lleva a su importancia y este como ya se menciona es el generar diseños de calidad que eviten que las estructuras proyectadas no logren cumplir sus funciones correctamente. En este aspecto al evaluar zapatas estas pueden ser de distintas estructuras y cada una de ellas tiene un grado de importancia y por ende presentan una mayor necesidad de no sufrir contratiempos o desperfectos en su diseño ya que comprometerían su correcto funcionamiento.

Como pudimos observar en la revisión de información los métodos de cálculo están sujetos a las condiciones en las que se encuentra el suelo es por ello por lo que debemos analizar las condiciones y ubicación de este. Al analizar estas condiciones nos damos cuenta del principal problema del suelo y el que será uno de los que más influyan en que métodos se deben usar para el cálculo del asentamiento en arcillas. Este factor clave es el agua y esto está muy ligado con las condiciones climatológicas de la zona en que se encuentre cada proyecto.

Para entender esto tenemos que ir al génesis del problema o del análisis y este es la variación volumétrica que ocurre al aplicar una carga externa al suelo. Esta variación volumétrica como podemos ver de la revisión de información es la eliminación del agua que se encuentra en el suelo. Esta al salir genera vacíos que decantan en un reordenamiento de las partículas por lo que se da la variación volumétrica. Esta variación volumétrica al analizarse en la dirección Y nos da el asentamiento del suelo; sin embargo, debemos entender que este volumen perdido no desaparece, sino que se desplaza en otra dirección.

Al entender que el asentamiento es el producto de la eliminación del agua se tiene que entender que esta dependerá de sus condiciones hidráulicas y es por ello por lo que los distintos tipos de suelo presentan procesos de asentamiento o consolidación distintos. Esto fundamentado en sus características hidráulicas, podemos observar que los suelos granulares tales como las arenas y las gravas al tener menores restricciones para conducir el agua a través de sus partículas presentarán asentamientos visibles mucho más rápido que los suelos finos o arcillosos que

cuentan con mayores restricciones para que el agua pueda ser conducida a través de sus partículas.

Al ya poder identificar que se describen distintos tipos de asentamiento, de la revisión de información podemos ver que estos son 3: asentamiento inmediato, asentamiento por consolidación primaria y asentamiento por consolidación secundaria. Vemos que por las recomendaciones hechas en los distintos métodos revisados los asentamientos inmediatos serán de mayor relevancia en suelos granulares ya que como ya se dijo su conductividad hidráulica es mayor que en suelos finos (capacidad para eliminar o movilizar el agua). En nuestro análisis nos centramos en los asentamientos por consolidación primaria y por consolidación secundaria ya que estos tienen mayor relevancia en suelos arcillosos dada la baja permeabilidad presentada en estos suelos.

3.2 ANÁLISIS DE CONDICIONES DE SITIO

Teniendo claro que el problema es el agua y su desplazamiento o eliminación hay que ver condiciones de sitio en cada lugar. Este punto resulta relevante ya que al tener distintos tipos de climas y de morfología se tendrán distintas restricciones u accesibilidad de uso. Para ello analizamos los distintos tipos de climas que podremos encontrar en el país como espacio muestral para el análisis.

En la selva del Perú podemos encontrar suelos arcillosos y la morfología del lugar tiende a ser plana, pero con mucha vegetación y ríos que generan que la accesibilidad a ciertas zonas sea complicada. Por su parte el clima es lluvioso y con mucho calor. Por estas características vemos que el suelo al estar al nivel de los ríos y estar sujeto a continuas lluvias tendrá un nivel freático elevado y no podrá eliminarse el agua con facilidad ya que esta volverá a entrar al suelo continuamente producto de las lluvias intensivas.

Por su parte en la sierra del Perú encontramos un relieve abrupto, presenta pendientes, montañas y ríos. A su vez, el clima es muy cambiante teniendo épocas de lluvia intensa con calor en el día, pero mucho frío en la noche y en ciertas épocas del año puede estar expuesto a un clima con temperaturas muy bajas llegando a tener heladas. Analizando estas circunstancias tendremos que el nivel del agua será muy variable en las zonas de arcilla sobre todo en donde antes había un lago o pasaba un río en donde se sedimentaron las partículas. En dichas zonas habrá un nivel freático elevado que bajará en cierto tramo del año ayudado no solo por la sobrecarga colocada, sino también, por épocas de baja intensidad de lluvias. Sin embargo, en partes de la sierra y en épocas de año el nivel freático y la consolidación sufrirán inconvenientes

ya que llegarán épocas de lluvia y se friaje. Las épocas de lluvia generaran que el nivel freático vuelva a subir y el volumen de agua desplazada se vuelva a infiltrar parcialmente retrasando la consolidación. Por su parte el friaje generará un suelo más duro que evitará una rápida consolidación mientras se encuentre congelado.

A su vez en la costa del Perú representando climas más áridos encontramos una topografía plana en su mayoría con algunos ríos estacionales y otros secos. En esta zona el clima no presenta muchas precipitaciones y en su mayoría es seco, pero con humedad por la proximidad al mar. Esta presencia de ríos secos o parcialmente secos generó que también encontremos estratos de arcilla producto de la disposición de partículas generada por estos. Estas arcillas sin embargo no cuentan con niveles elevados de nivel freático salvo en las zonas de pantanos que aún persisten. Estas arcillas que se encuentran en su mayoría secas no representan mayor complicación para diseñar o calcular el asentamiento ya que este será muy bajo en estas zonas. Se tiene que decir que hay zonas en la costa donde la presencia de escasas lluvias, pero cercanía al mar y que cuentan con agua subterránea genera que el nivel freático sea elevado como en el norte del país donde si se requiere un correcto control de este asentamiento ya que logra ser de gran relevancia en el diseño de la cimentación.

Por lo tanto, al analizar los distintos climas y condiciones podemos ver que el cálculo del asentamiento si está afectado por estos ya que como definimos que el asentamiento se da por la movilización o eliminación de agua del suelo. Este flujo de agua como analizamos es afectado por las condiciones de morfología y el clima de la zona.

3.3 ANALISIS DE REQUISITOS

Los distintos métodos analizados presentan distintos requisitos para su ejecución y a su vez restricciones de tipo de arcilla. Estas restricciones y requerimientos serán fundamentales para poder elegir el mejor método a usar de acuerdo con las condiciones del proyecto y a su nivel de importancia.

Dentro de los métodos de cálculo de asentamiento inmediato si bien no es el de mayor relevancia en líneas generales si se aplica para arcillas no drenadas o parcialmente saturadas. En los métodos revisados encontramos el de elasticidad y el de Bjerrum. El método de elasticidad como su propio nombre lo dice está en función del módulo de elasticidad del suelo, las dimensiones de la cimentación, el módulo de Poisson del suelo, la profundidad de cimentación y la carga externa aplicada. Estos requisitos pueden ser cubiertos por campañas simples de exploración geotécnica usando distintos métodos para hallar la elasticidad del suelo

siendo uno de estos la geofísica y el SCPTu (Prueba de penetración con cono sísmica con medición de presión de poros, esta es una derivación del CPT). Por su parte, el método de Bjerrum requiere de las dimensiones de la cimentación, profundidad de cimentación y de estrato de arcilla, carga externa aplicada y módulo de elasticidad. Como bien se aprecia, estos requisitos son similares al método previamente descrito por lo que los datos requeridos pueden ser obtenidos con ensayos geofísicos o con la ejecución de ensayos SCPTu o SCPT.

Para el cálculo de los asentamientos por consolidación primaria tenemos en la revisión a los métodos de índice C_c y el edométrico. Estos métodos son muy usados en los cálculos ya que este tipo de asentamiento suele ser predominante en las arcillas. Para poder usar el método de índice C_c requerimos de información sobre las cargas aplicadas, del estrato de arcilla y de características geotécnicas que podemos hallar al realizar ensayos de consolidación. Por ello, para estos este método es fundamental el poder extraer una muestra inalterada. Algunos consultores calculan la densidad de campo para tratar de remoldar las muestras alteradas y asemejarlas a las condiciones de sitio, pero esta es una práctica inaceptable por no conservar la estructura del suelo y dar resultados que no tienen nada que ver con la realidad. A su vez el método edométrico como su propio nombre lo dice depende del ensayo edométrico que registra los cambios de volumen ante cambios en la presión ejercida. Estos dos métodos dependen de conocer las propiedades de gravedad y volumetría del suelo como su porcentaje de vacíos, densidad y volúmenes de vacíos. A su vez, se tiene que comentar que el método de índice C_c distingue el estado de consolidación del suelo para su cálculo del asentamiento ya que dependiendo de si esta normalmente consolidado o sobre consolidado se diferenciarán las ecuaciones a usar en el cálculo de su asentamiento.

Por su parte, el método de consolidación secundaria de Terzaghi y Peck (1996) depende del tiempo y de variables que se pueden encontrar usando el ensayo edométrico. Estos tipos de métodos como el de Índice C_c , edométrico y de consolidación secundaria presentados por Terzaghi y Peck (1996) fueron obtenidos de una recopilación de información y hoy en día siguen vigentes a pesar de haberse hecho hace varios años. Son métodos simples en cuanto a requerimientos ya que el realizar ensayos básicos hasta los de consolidación o edométricos brindarán la información necesaria para su uso.

Por otro lado, el método de Asaoka recurre a el coeficiente de consolidación y a los asentamientos iniciales y finales del estrato de análisis. Este método también cuenta con varios años desde su publicación y también puede usarse realizando ensayos básicos y de consolidación en el suelo.

Mientras tanto, el método de Bensallan et al (2013) contempla mayores anisotropías del suelo y sus propiedades hidráulicas reflejadas en sollicitaciones de data para su uso como la humedad, sus distintos estados límites del suelo (reflejadas en las humedades de cada uno de ellos), también, considera las dimensiones de la cimentación, las cargas externas aplicadas, el ángulo de fricción del suelo, la cohesión módulo de elasticidad del suelo, módulo de poisson y densidad del suelo así como otras relaciones de peso y volumen. Se aprecia que los requisitos para su uso son mayores. Sin embargo, de lo estudiado y verificado por Bensallan et al (2013) podemos decir que es un método que se adecua mejor a las condiciones del suelo y a sus distintos estados de esfuerzo. Para cumplir con los requerimientos de este método también podemos acudir a realizar de ensayos básicos de suelo para su caracterización, aplicar ensayos geofísicos o SCPTu así como algún ensayo triaxial para calcular la cohesión y fricción si no usamos correlacione para llegar a estimaciones de ellos mismos.

Por su parte los métodos de modelo lógico y de modelo de Gompertz presentados por Xu, H., Shi, B., Li, X. (2005) y Yu, C., Liu, S. (2005) respectivamente, son modelos derivados de formulaciones estadísticas para estimar tendencias o valores futuros. Estos métodos si bien no son tan usados ni recomendados pueden ser útiles cuando contemos con amplia información y podrás ajustarlos para que puedan reflejar mejor el cálculo de asentamiento en arcillas.

3.4 IDONEIDAD DE USO

Al analizar los requisito y limitaciones de los métodos descritos en el presente documento, debemos tener en cuenta el estado actual de los costos de los distintos métodos de investigación de campo y de ensayos de laboratorio. Hay que tenerlos en cuenta al momento de elegir qué tipo de método de cálculo de asentamiento se usará. Esto responde también a qué clase de proyecto se está realizando y de la importancia de este (puntos ya descritos y analizados en el presente capítulo).

Respecto a que método de cálculo usar solo por temas técnicos siempre se recomendará realizar un método más preciso, aunque es sabido que estos requieren de una mayor información. De entre los mostrados en la presente recopilación se recomienda usar el método de Bensallan et al (2013). Sin embargo, se tiene que mencionar que ante recursos limitados y ante condiciones que no sean críticas es bien usado y recomendado por su fácil acceso el usar los métodos planteados por Terzaghi y Peck (1996). Estos métodos si bien tienen muchos años desde que se plantearon brindan valores aproximados razonablemente para proyectos que no requieran análisis tan detallados.

Parte esencial en el análisis como ya se describió es la data o parámetros de entrada que usa cada método y de cómo los calcula. En ese sentido se aprecia, como se hace énfasis en parte del documento, que los métodos tradicionales planteados por Terzaghi y Peck fueron generados a observaciones y registros previos en función de información de sitio. Sin embargo, la certeza o grado de confiabilidad es menor que al aplicar métodos más recientes como el de Bensallan et al (2013) que se describe en el presente documento. Esto, debido a que métodos más recientes como el ya mencionado tienen en consideración condiciones más reales que los anteriores. Sin embargo, esta consideración de condiciones más reales conlleva una mayor cantidad de incertidumbres a considerarse las cuales llevan a mayores inversiones si queremos tener una data confiable como entrada en el análisis. Los distintos márgenes de incertidumbre que se pueden manejar en cada proyecto, así como de la inversión que se cuenta para ellos delimitará en gran medida la metodología de cálculo más idónea.

3.5 DESARROLLO A FUTURO

Parte importante del análisis es ver como cambiará el estado del arte para poder estar preparados ante las solicitudes del mercado y elevar la calidad de ingeniería entregada y normalizada. Como parte del análisis se ve que se a medida que pasa el tiempo se está creando un cargo de conciencia en los nuevos profesionales; los mismos que buscan con mayor ahínco distintas, novedosas y nuevas metodologías. Es por ello que cada vez se aprecia una mayor difusión de los nuevos métodos de cálculo. A su vez, se ve que los profesionales y el mercado se cuestionan más las metodologías tradicionales y su idoneidad de uso. Esto, responde también a la mayor cantidad de proyectos de gran envergadura que se vienen realizando y que requieren de cálculos y medidas de disminución de la incertidumbre más severas.

Como se menciona en el sub capítulo anterior la data o información de entrada es muy importante ya que de nada sirve usar métodos más completos o con mayores consideraciones si la data que ingrese tendrá igual o mayores grados de incertidumbre para el cálculo. En línea con lo descrito se denota la relevancia de la calidad de data para usar distintos tipos de métodos. Es por ello que ensayos como el SCPTu o CPT entre otros son descritos como unos de los más completos y que cuentan con las medidas necesarias para disminuir en gran medida esta incertidumbre. El problema actual es que estos ensayos en el mercado peruano aún representan mayores grados de inversión que no siempre es bien recibida por las empresas solicitantes y prestadoras de los servicios de ingeniería.

Ante una mayor concientización de los ensayos y metodologías se ve al mercado moverse hacia un punto en que estos costos extras, por la implementación de metodologías que reduzcan el grado de incertidumbre en los cálculos, disminuyan a tal punto que se pueda masificar su uso o al menos su consideración de uso en los distintos proyectos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Parte importante del presente trabajo es generar aportes para mejorar la ingeniería geotécnica del país. En dicho sentido, de la revisión de métodos de investigación realizada y de las comparaciones y análisis generados de estos se generan distintas conclusiones y recomendaciones.

4.1 CONCLUSIONES

Entre las principales conclusiones tenemos:

- Se concluye que metodologías como la de Gompertz y el modelo lógico que están basados en estadística requieren de una gran cantidad de datos o mediciones de sitio para poder ser ajustados al proyecto y presentar un correcto uso. Estas metodologías podrían encontrar un nicho en análisis continuos a lo largo de la vida útil de la edificación como podría ser el caso de edificaciones de gran importancia, emulando la ingeniería de registro usada en estructuras mineras.
- Se concluye que los métodos tradicionales de cálculo que hoy en día se usan desde hace mucho tiempo (como es el caso de los métodos de Terzaghi) presentan un grado de certeza bajo pero que es correctamente empleado para distintos proyectos de baja importancia y que puedan soportar grados de incertidumbre moderada.
- A su vez, se puede concluir que los nuevos métodos tales como el de Bensallan et al (2013) descrito en el presente documento tienen en consideraciones condiciones más reales del suelo por lo que se recomienda su uso en proyectos que impliquen una mayor importancia o menor grado de incertidumbre.
- Se concluye que hoy en día la implementación de nuestras metodologías en el diseño sigue ocasionando costos asociados extras que generan estos no se tomen en cuenta o se evalúe su uso.

- Se concluye que la metodología descrita por Bensallan et. al (2013) brinda mayor certeza y no requiere de una cantidad de mayores esfuerzos que no pueda ser manejada por los diseñadores o consultores.
- Se puede concluir que las mejoras en las herramientas de cálculo y de conocimiento generaron que en el transcurso de los años se generen mejores métodos para la aproximación de los asentamientos por lo que debemos evolucionar con las mejoras de la tecnología y mejorar los diseños implementando métodos que aprovechen mejor las herramientas actuales con las que se cuenta.
- Se concluye que una de las principales razones para que no se usen distintos métodos en el cálculo de asentamientos en arcilla ni se usen ensayos de campo más modernos es debido a que la norma de cimentaciones aún no les da la relevancia que debieran tener y los profesionales se cubren con lo que plantea la norma para no implementar mejoras.
- Se concluye que no solo importa el método que se use sino como se obtiene la información para usar cada uno de los métodos, esto se puede ver ante las grandes variabilidades que presentan los métodos de ensayos en campo más comunes y usados en el mercado actual por ende se tiene que empezar a migrar a ensayo in situ más certeros o con menor variabilidad en sus resultados.
- Se ve que los ensayos SCPTu presentan una baja variabilidad y que la data que puede ser usada para casi cualquier método de cálculo para el asentamiento por ende se hace notorio su valor en la masificación del uso de estos ensayos cuando sean aplicables.

4.2 RECOMENDACIONES

Entre las principales recomendaciones tenemos:

- Se recomienda se sigan realizando estudios para mejorar las metodologías actuales de cálculo de asentamiento de zapatas en arcilla ya que se denota una necesidad a mediano corto plazo de tener mayores grados de certeza en los cálculos y que esto no generara gastos asociados significativos.
- Se recomienda que se realicen mayores estudios de comparación entre distintos métodos para tener un mejor panorama al momento de elegir cual se usará en el diseño.
- Se recomienda un mayor compromiso de la industria (mercado laboras, empresas) de la mano con las universidades o centros de capacitación y formación, así como del

colegio de ingenieros para sumar esfuerzos en la masificación de la información y poder contribuir a que sean más conocidos los distintos métodos de cálculo y los ensayos ya sea de campo o laboratorio asociados que brindaran la data necesaria para su implementación.

- Los métodos más modernos muestran mejoras respecto a los cálculos comparados con las respuestas reales y si bien requieren mayores esfuerzos se recomienda sigan ejecutándose y mejorándose en pro de que al diversificar su uso podamos generar que estos esfuerzos extras de usarlos no se sientan ni se vean reflejados de gran medida en efectos negativos para el presupuesto.
- Se recomienda que se masifique el uso de los ensayos CPT, SCPT y SCPTu en los distintos proyectos ya que se aprecia que tienen una variabilidad baja en los datos que se obtiene al usarlos y esta variabilidad baja mejorará los cálculos en las estimaciones de asentamientos.
- Se recomienda que en la norma de cimentaciones se incluyan algunos ensayos de campo como los ensayos geofísicos o el SCPTu para poder ayudar en su masificación de uso por parte de ellos profesionales en todo el país y de esa forma poder generar mejor ingeniería en el país.
- A su vez, se recomienda que más empresas brinden los servicios de ensayos SCPTu para que de esa forma los precios del mercado bajen y se puede incentivar su uso y no tener solo unas pocas empresas que manejen el mercado de estos ensayos.
- Se recomienda que se realicen talleres de capacitación tanto en universidades como la misma asociación peruana de ingeniería geotécnica para que se pueda ayudar en incentivar el uso de estos ensayos.

5. REFERENCIAS

Asaoka, A. (1978, 18 de diciembre) Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations* Volume 18, Issue 4, pp 87-101.

Bensallam, S. Bahi, L. Ejjaouani, H. Shakhirev V. Rkha CHaham, K. (2014, 3 de Abril) Clay soil settlement: In-situ experimentation and analytical approach. *Soils and Foundations* Volume 54, Issue 2, pp 109-115.

Berezantsev, V.G., Ksenofontov, A.I., Platonov, E.V., Sidorov, N.N., Yaroshenk, V.A. (1961) *Mecánica des Sols et Fondations*. Moscou, Russia.

Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Design*, 5th Edition McGraw-Hill International Edition.

Brahma, P. and Mukherjee, S.P. (2010) A Realistic Way to Obtain Equivalent Young's Modulus of Layered Soil. Indian Geotechnical Conference, *GEOTredz*, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay, Mumbai, 16-18 December 2010, 305- 308.

Civil Engineers Forum (2020) *Differential Settlement of Soil – Factors to Consider in Foundation Design*. Recuperado de <https://civilengineersforum.com/soil-settlement-foundation-design-factors/>.

Das, B.M. (2014) *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.

Day, R. W. (2012). *Geotechnical Engineer's Portable Handbook*. 2nd Edition.

Ejjaaouani, H., Magnan, J.P., Shakhirev, V. (2008) *Interactions des Foundations et des Sols Gonflants: Pathologie, Calcul et études Expérimentales* (Ph. D. Thesis). École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, France.

Look, Burt (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). *Norma Técnica Peruana E050 Suelos y Cimentaciones*.

Majeed Muhauwiss, F. (2014) *Foundation Engineering*. Civil Engineering Department – College of Engineering Tikrit University.

Ortigao, A. (2020) *Instrumentación y ensayos In-Situ*. Asociación Peruana de Ingeniería Geotécnica (APGEO).

Razouki, S.S., Al-Zubaidy, D. A. (2010, 3 de Abril) Elastic settlement of square footing on a two-layer deposit. *Institution of Civil Engineering Geotechnical Engineering* 163, Issue GE2, pp 101-106.

Schnaid, F. (2009) *In situ Testing in Geomechanics*. Londres, Inglaterra: Editorial Taylor y Francis.

Shi B., Kong X. (2018) Study on Methods for Predicting the Settlements of Soft Clay Roadbed. In: Frikha W., Varaksin S., Viana da Fonseca A. (eds) *Soil Testing, Soil Stability and Ground*

Improvement. GeoMEast 2017. *Sustainable Civil Infrastructures*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61902-6_30

Terzaghi, K.; Peck, R. & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* Third Edition.

Xu, H., Shi, B., Li, X. (2005) Logistic growth model and its applicability for predicting settlement during the whole process. *Rock Soil Mech.* 26(3), 387–391.

Yu, C., Liu, S. (2005) A study on prediction of embankment settlement with the Gompertz model. *Rock Soil Mecha.* 26(4), 82-86.

Zegarra, J. (2019) Guía de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos. Pontificia Universidad Católica del Perú.

