

**ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES POR CONSOLIDACIÓN
PARA DIVERSOS FACTORES A PARTIR DE METODOLOGÍAS TEÓRICAS
Y COMPUTACIONALES.**

JELVER ONALDO RINCON VARGAS

JORGE ALEXANDER PITA RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES POR
CONSOLIDACIÓN PARA DIVERSOS FACTORES A PARTIR DE
METODOLOGÍAS TEÓRICAS Y COMPUTACIONALES.**

JELVER ONALDO RINCON VARGAS

JORGE ALEXANDER PITA RODRIGUEZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
INGENIERA CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y dado la salud y bendiciones para lograr este objetivo, sin él nada de esto sería posible.

A mi Madre Gladis Vargas Cely.

Por darme la vida, amor incondicional, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por haberme apoyado en todo momento.

A mi Padre Onaldo Antonio Rincón Cely.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor e incondicional apoyo mantenido a través del tiempo.

Porque ustedes dos me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos, Diego Alejandro, Laura Katerine Rincón Vargas

Por estar conmigo en camino a lograr esta meta.

A mi familia, Tía Betty, Tío Nolberto, Tío Nelson

Por acogerme y darme su cariño, apoyo y palabras de experiencia.

A mi abuelos, Ramiro Vargas, Fanny Cely

Por ayudarme a crecer y formar como persona.

A mi mayor bendición, mi hijo Juan Antonio Rincón Albarracín

Por este logro que es de él y para él, para poder brindar el futuro y la vida que se merece y por la que luchare con este título.

A mi familia paterna

Por sus buenos deseos y oraciones dedicadas para lograr esta meta.

A mis amigos

Por compartir conocimientos y experiencias durante toda nuestra formación profesional.

JELVER ONALDO RINCON VARGAS

DEDICATORIA

Este proyecto de grado se lo dedico a Dios, ya que sin su voluntad esto no sería posible.

A mi madre Carmen Rodríguez y a mi hermana Paula Pita, quienes me apoyaron de principio a fin a pesar de tantos obstáculos que se presentaron en el camino. Las amo.

A la memoria de mi padre, el cual sé estaría orgulloso al ver que culminé esta etapa tan importante de mi vida.

A Juliana, por apoyarme en estos últimos meses y estar a mi lado cuando más la necesito.

A mis amigos por aportar a mi crecimiento tanto personal como académico.

JORGE ALEXANDER PITA RODRIGUEZ.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 ASENTAMIENTOS	19
1.2 Asentamientos diferenciales	21
1.3 Causas de los asentamientos diferenciales	21
1.4 Asentamientos por consolidación para arcillas normalmente consolidadas.	23
1.5 Softwares especializados en análisis de asentamientos	24
2. DISEÑO METODOLÓGICO	25
2.1 Modelo número uno:	28
2.2 Modelo número dos:	28
2.3 Modelo número tres:	29
2.4 Modelo número cuatro:	30
2.5 Modelo número cinco:	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
3.1 Modelo número 1.	32
3.2 Modelo número 2	34
3.3 Modelo número 3.	35

3.4 Modelo número 4	36
3.5 Modelo número 5	37
3.5.1 Profundidad de terreno 3.5m.	37
3.5.2 Profundidad de terreno 14 m.	39
4. CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS.....	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. <i>Ejemplo de asentamiento uniforme y diferencial. [5]</i>	20
FIGURA 2. <i>Valores típicos de permeabilidad k tomados de SETTLE 3D</i>	27
FIGURA 3. <i>Modelo uno, nivel freático a 0.5m</i>	28
FIGURA 4. <i>Modelo dos, nivel freático a 0.5m</i>	29
FIGURA 5. <i>Modelo tres, nivel freático a 0.5m</i>	29
FIGURA 6. <i>Modelo cuatro, nivel freático a 0.5m</i>	30
FIGURA 7. <i>Modelo cinco, nivel freático a 0.5m</i>	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	32
Gráfica 2. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	34
Gráfica 3. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	35
Gráfica 4. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	36
Gráfica 5. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	38
Gráfica 6. <i>Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.</i>	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Causas de asentamientos diferenciales. [7]</i>	21
Tabla 2. <i>Propiedades del terreno [9].</i>	26
Tabla 3. <i>Límite líquido y coeficiente de consolidación (Cc)</i>	26

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Modelamiento y paso a paso de PLAXIS 2D.....	44
ANEXO B. Modelamiento y paso a paso del Settle 3D.	50

RESUMEN

TITULO ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES POR CONSOLIDACIÓN PARA DIVERSOS FACTORES A PARTIR DE METODOLOGÍAS TEÓRICAS Y COMPUTACIONALES.*

AUTORES JELVER ONALDO RINCÓN VARGAS
JORGE ALEXANDER PITA RODRÍGUEZ **

PALABRAS CLAVE: ASENTAMIENTOS, ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES, CONSOLIDACIÓN, PLAXIS 2D, SETTEL 3D.

DESCRIPCIÓN

El siguiente documento tiene como objeto modelar en PLAXIS 2D y SETTEL 3D diferentes situaciones en las que frecuentemente se pueden presentar asentamientos diferenciales en suelos, enfocándose en los asentamientos por consolidación los cuales se presentan en suelos arcillosos normalmente consolidados. Los asentamientos diferenciales son los responsables de generar grietas y grandes daños en estructuras ya que las bases de estas van a desplazarse verticalmente de manera no uniforme haciendo que como su nombre lo dice, el asentamiento sea diferente en una parte de la estructura que en otras. Los modelos planteados se hicieron sobre un suelo arcilloso normalmente consolidado el cual presentaba un nivel freático apenas a cincuenta centímetros de la superficie. A partir de estos modelos, se busca comparar los resultados obtenidos en cada una de las herramientas computacionales y los resultados obtenidos de forma teórica.

La Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander cuenta con las licencias originales tanto PLAXIS 2D como de ROCSCIENCE SETTLE 3D razón por la cual se trabajó con estos dos programas. Este proyecto se hace como ampliación y complemento a un proyecto de grado presentado en el 2014 por estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander.

* Proyecto de investigación

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Directora Hebenly Celis Leguizamo Ingeniera Civil. PhD-Profesor UIS

ABSTRACT

TITTLE ANALYSIS OF DIFFERENTIAL SETTLEMENTS FOR CONSOLIDATION FOR VARIOUS FACTORS FROM THEORY AND COMPUTING METHODOLOGIES.

AUTHORS JELVER ONALDO RINCÓN VARGAS
JORGE ALEXANDER PITA RODRÍGUEZ **

KEYWORDS SETTLEMENT, DIFFERENTIAL SETTLEMENT, CONSOLIDATION, PLAXIS 2D, SETTEL 3D.

DESCRIPTION

The following document has as object shape in PLAXIS 2D and SETTEL 3D different situations in those who frequently can appear differential settlements in soils, focusing in the settlements for consolidation which appear in clayey normally consolidated soils. The differential settlements generate cracks and big hurts in structures since the bases of these are going to move vertically in a not uniform way doing that as his name says it, the settlement is different in a part of the structure that in others. The proposed models were done on a clayey normally consolidated soil which was presenting a groundwater level scarcely to fifty centimeters of the surface. From these models, one seeks to compare the results obtained in each of the computational tools and the results obtained of theoretical form.

The School of Civil Engineering of the Industrial Universidad Industrial de Santander possesses the original licenses so many PLAXIS 2D as of ROCSCIENCE SETTLE 3D reason for which one worked with these two programs. This project is done as extension and complement to a project of degree presented in 2014 by students of civil engineering of the Universidad Industrial Santander.

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Directora Hebenly Celis Leguizamo Ingeniera Civil. PhD-Profesor UIS

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil es común hablar de lo impredecible que puede ser el estudio de algún suelo debido a la diversidad de factores que influyen en el comportamiento de los mismos [3]. Y es que en el análisis de suelos la relación entre los movimientos del terreno y la estabilidad de estructuras construidas sobre él es compleja ya que existen varios mecanismos generadores de movimientos de terreno y también diversos tipos de estructuras que disponen de diferente capacidad para soportar dicho movimiento. Es por eso que desde que Karl Terzaghi considerado como el padre de la mecánica de suelos empezó su trabajo dedicado al análisis de los suelos hasta hoy, se han desarrollado y planteado diferentes metodologías para poder estudiar, analizar y comprender cómo las diferentes condiciones a las que puede ser expuesto un suelo pueden afectar a este mismo y las diversas estructuras que este pueda estar soportando.

Las ayudas computacionales han venido creciendo de manera significativa para ayudar a facilitar el trabajo en diferentes ramas de la ciencia tanto así que hoy día se han diseñado gran número de softwares con este fin, obviamente la ingeniería civil no es la excepción ya que se han diseñado programas para modelado de estructuras, de sistemas de alcantarillado, análisis sísmico y por su puesto análisis de suelos.

Viendo la importancia que han tomado los programas de análisis computacional en la vida profesional, se quiso profundizar en el desarrollo del proyecto de grado “Análisis de asentamientos por consolidación mediante herramientas computacionales” desarrollado por Jonathan Javier Ochoa Aldana y Cesar Giovanni Mojica Barreto en el año 2014 [5], en el cual usando los softwares PLAXIS 2D y SETTLE 3D plantearon diferentes modelos para analizar y comparar asentamientos totales.

Entre las diversas situaciones que analiza la ingeniería civil cuando de suelos se habla, cabe destacar que una de las más complejas es el cálculo de asentamientos y aún de más cuidado cuando los asentamientos son diferenciales ya que si hay movimientos relativos en diferentes partes de la cimentación de la estructura se van a originar sobreesfuerzos en la misma [7].

Los asentamientos diferenciales pueden cambiar el aspecto de las estructuras, provocando grietas en los muros de las construcciones, así como la inclinación de las estructuras y hasta colapsos de las edificaciones causando pérdidas económicas tanto para propietarios como para constructores.

Es por eso que se ha planteado hacer uso de los programas PLAXIS 2D y SETTLE 3D enfocados en el análisis de asentamientos diferenciales por consolidación, modelando algunas de las causas más frecuentes que originan esta clase de asentamientos y comparar los resultados que nos arrojen estos análisis, con el fin de ampliar el uso que puede aportar estos dos softwares en la ingeniería y motivar a los estudiantes que vienen a que usen y se interesen en el manejo de estos softwares tan útiles.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar mediante diferentes metodologías las variables que afectan el cálculo de asentamientos diferenciales por consolidación para diferentes casos.

Objetivos Específicos

- Identificar los diferentes factores por los cuales se presentan asentamientos diferenciales por consolidación en un terreno, definir cuáles son los más frecuentes y los que presentan mayor riesgo.
- Identificar las diferentes metodologías que existen para el cálculo de dichos asentamientos y definir cuáles son los más apropiados para nuestros casos de estudio.
- Establecer la variación de los asentamientos diferenciales para los factores y metodologías escogidas anteriormente.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ASENTAMIENTOS

En el contexto de la ingeniería civil un asentamiento es básicamente el desplazamiento vertical de una estructura debido a la compresión del suelo, producido por la carga aplicada sobre este.

Los asentamientos se dividen en tres tipos:

Asentamiento Inmediato: es el desplazamiento vertical que se presenta en el momento de aplicada la carga o en un periodo no mayor de 7 días.

Asentamiento por consolidación: este asentamiento depende del tiempo y puede tomar meses y hasta años en presentarse.

Asentamiento por compresión secundario: llamado secundario pues parte de una deformación que ya existía y se da por el reajuste de la estructura del suelo. [4]

La suma de estas tres da como resultado el asentamiento total de una estructura.

$$\Delta H = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s$$

Siendo:

$$\Delta H = \textit{asentamiento total}$$

$$\Delta H_i = \textit{asentamiento inmediato}$$

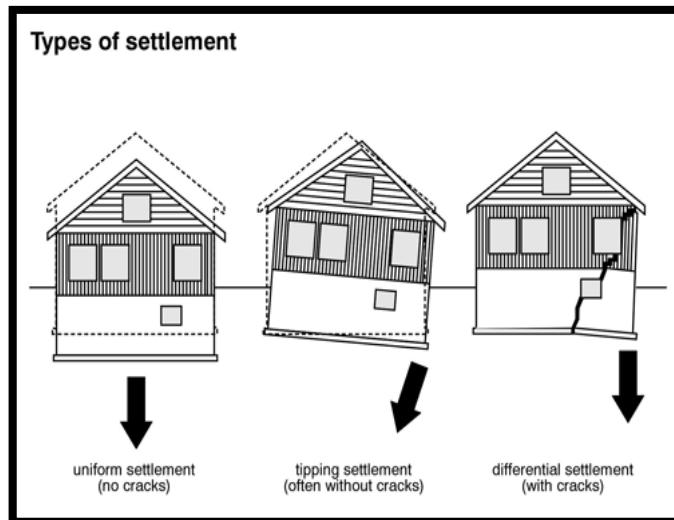
$$\Delta H_c = \textit{asentamiento por consolidacion}$$

$$\Delta H_s = \text{asentamiento secundario}$$

Este asentamiento total que puede llegar a presentar la estructura se puede dar de dos maneras diferentes y es que podemos encontrar que el desplazamiento vertical sea uniforme o en el peor de los casos podemos encontrar que sea un desplazamiento diferencial es decir que el asentamiento no sea el mismo en todos los puntos de la estructura.

En la siguiente imagen se puede observar primero un ejemplo de asentamiento uniforme, luego un asentamiento diferencial sin fracturas en la estructura y por último un asentamiento diferencial con daños en la estructura.

Figura 1. *Ejemplo de asentamiento uniforme y diferencial. [5]*



1.2 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

Después de que un edificio ha sido construido es normal que se presenten asentamientos, sin embargo, los asentamientos diferenciales son de mayor cuidado ya que son los que se presentan cuando las bases o cimientos de un edificio se asientan de forma desigual y pueden provocar grandes daños en las estructuras. Estos asentamientos se presentan cuando el suelo debajo de las estructuras se contrae, se expande o se aleja. Esto puede ser causado por las condiciones de sequía, los sistemas de raíces de árboles adultos, mal drenaje, líneas de agua rotas, las vibraciones de la cercana construcción o tierra de relleno mal compactado entre otras causas.

Uno de los ejemplos más famosos en el mundo de asentamientos diferenciales es la torre inclinada de Pisa, que desde que se construyó en el siglo XII no ha dejado de inclinarse y ha llegado al punto de hundirse 1.84m más en el extremo norte que en el extremo sur. Estudios han demostrado que el tipo de suelo sobre el cual se construyó la torre, es la causa de su inclinación. [8]

1.3 CAUSAS DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

A continuación se muestran algunas de las principales causas por las que se generan asentamientos diferenciales:

Tabla 1. *Causas de asentamientos diferenciales.* [3]

CAUSA	DESCRIPCIÓN
Variación del espesor y características del estrato compresible	Asentamiento proporcional al espesor. Puede ser convexo cóncavo o por ladeamiento.
Variación de las presiones de fundación, en el contacto suelo fundación.	Distribución no uniforme de presiones generada por las cargas. Por ejemplo edificios con secciones más altas.
Grandes áreas cargadas sobre fundaciones flexibles.	Asentamiento cóncavo sobre fundaciones de placa corrida o fundaciones aisladas de columnas de gran área.
Diferencia entre tiempos de construcción de diferentes partes de la estructura.	Mayor asentamiento en la parte reciente que en la antigua donde ya se desarrolló.
Variaciones en las condiciones de compresibilidad del sitio.	Construcción sobre áreas previamente ocupadas por cargas pesadas que sobre-consolidaron los mantos compresibles.
Variaciones en las condiciones de compresibilidad generadas por operaciones constructivas.	Descompresiones por excavaciones aledañas.

1.4 ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN PARA ARCILLAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS.

En la ingeniería se conocen diversos métodos y ecuaciones para calcular asentamientos. Su variedad depende del tipo de asentamientos que se quiera calcular, el tipo de suelo y otras características. Los asentamientos por consolidación es un fenómeno que se presenta en suelos arcillosos saturados. El suelo que se escogió para el análisis de este proyecto corresponde a un suelo arcilloso normalmente consolidado y se rige a partir de la siguiente expresión que se ajusta a las características del suelo:

Ecuación para cálculo de asentamientos por consolidación para suelos normalmente consolidados.

$$\delta = \frac{H}{(1 + e_o)} \left[Cc \cdot \text{Log} \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \right]$$

Dónde:

H= espesor del estrato

Eo= relación de vacíos

Cc= índice de compresión

Para realizar los análisis teóricos se usó esta ecuación para así hacer su respectiva comparación con los datos arrojados por los programas utilizados.

1.5 SOFTWARES ESPECIALIZADOS EN ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS

- ILLICON: Cálculo de asentamientos y consolidación.
- CONSOL: Conjunto de planillas EXCEL con macros que calculan asentamientos en una dimensión.
- VDRAIN : Cálculo de asentamientos y consolidación de suelos blandos. No es un programa de uso muy intuitivo.
- ROCSCIENCE- SETTLE D: software que analiza problemas geotécnicos bidimensionalmente.
- PLAXIS 2D: Programa que analiza asentamientos producidos por cargas superficiales.[2]

Para los análisis de los modelos se escogieron estos dos últimos softwares ya que la escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander cuenta con las licencias originales para su uso dentro de la universidad.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

Como ya se había mencionado anteriormente el objetivo principal del documento es comprar los asentamientos diferenciales por consolidación por medio de dos programas informáticos que son PLAXIS 2D y SETTLE 3D. Para ello se decidió plantear 5 modelos diferentes, hacer su respectivo análisis en cada software y posteriormente hacer una comparación de los resultados obtenidos por cada uno de ellos. Estos modelos representan algunas condiciones de terrenos en las cuales se presentan con mayor frecuencia asentamientos diferenciales.

Una mayor comprensión del manejo de estas herramientas informáticas, se presenta en los anexos, en los cuales se muestra un paso a paso general lo más detallado posible de cómo se usan los softwares.

Los modelos a continuación representan las causas más frecuentes que generan asentamientos diferenciales. El suelo utilizado para estos modelos fue tomado de un estudio preliminar realizado en Puerto Wilches, Santander en una zona caracterizada por su alta humedad y por sus altas temperaturas. Este suelo en cuestión es totalmente arcilloso, conformado por diferentes tipos de arcillas normalmente consolidadas.

La relación de vacíos e_0 , la densidad saturada Y_{sat} la densidad seca Y , fueron obtenidos de la siguiente tabla, de la cual se usaron los valores de arcillas muy compactas, compactas y semi-compactas:

Tabla 2. Propiedades del terreno. [9]

Tipo de terreno	Porosidad n (%)	Indice huecos e	Humedad natural ω (%)	Densidad seca γ_d (T/m ³)	Densidad húmeda γ (T/m ³)
Arena suelta	43	0,76	29	1,51	1,94
Arena densa	32	0,47	17	1,80	2,12
Zahorra	22	0,30	12	2,05	2,28
Arcilla muy blanda	60	1,67	62	1,08	1,34
Arcilla blanda	55	1,55	55	1,22	1,76
Arcilla semi-compacta	45	0,90	35	1,47	1,92
Arcilla compacta	43	0,87	32	1,45	1,89
Arcilla muy compacta	40	0,74	27	1,61	2,01
Arcilla dura	33	0,61	22	1,80	2,13
Loes yesífero	-	0,87	-	1,35	-
Turba	82	14	1.650	0,040	1,04
Hormigón	10-2	-	-	-	-
Margas	34	-	-	-	2,33

El índice de compresión fue hallado a partir del límite líquido obtenido de los sondeos realizados en los estudios preliminares del terreno. Se halló con la siguiente correlación:

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

Donde LI= límite líquido.

Tabla 3. Límite líquido y coeficiente de consolidación (C_c)

Tipo arcilla	Límite líquido	C_c
Semi-compacta	37,75	0,24475
Compacta	37,75	0,24475
Muy compacta	39,25	0,26345

La permeabilidad k fue estimado en 0.001m/día a partir de los siguientes rangos proporcionados por Settle 3D

Figura 2. Valores típicos de permeabilidad k tomados de SETTLE 3D.

Type	Range (m/d):
Sandy clay	2.16e-007 - 0.242
Compacted Boston blue clay	3.03e-006 - 2.77e-005
Vicksburg buckshot clay	2.59e-007 - 1.04e-006
Lean clay	1.73e-006 - 2.42e-005
Sodium - Boston blue clay	1.47e-007 - 8.65e-005
Dense silt, clayey silt	8.65e-005 - 0.00865
Clay, silty clay	8.65e-005
Lacustrine and marine offshore deposits - Clay	8.65e-005
Sand-silt-clay mistures, glacial tills	8.65e-005 - 0.0865
Homogeneous clays	8.65e-005

En resumen, los parámetros utilizados para el análisis de los modelos fueron:

Permeabilidad en todo el estrato = 0.001 m/d

- Arcilla semi-compactada:

$$\gamma_{\text{sat}} = 19.2 \text{ KN/m}^3, \gamma = 14.7 \text{ KN/m}^3, C' = 10 \text{ KN/m}^2, C_c = 0.0244, \phi = 30^\circ$$

- Arcilla compactada:

$$\gamma_{\text{sat}} = 18.9 \text{ KN/m}^3, \gamma = 14.5 \text{ KN/m}^3, C' = 15 \text{ KN/m}^2, C_c = 0.02635, \phi = 30^\circ$$

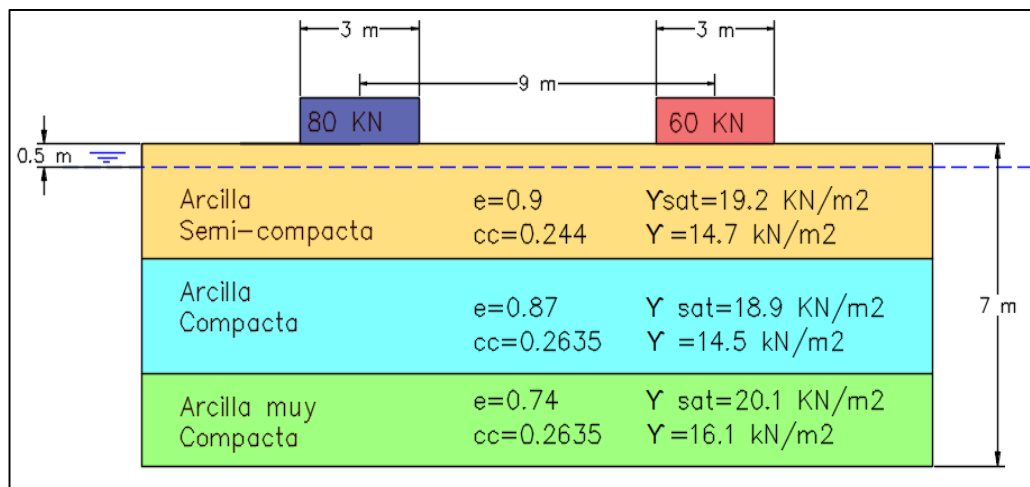
- Arcilla muy compactada:

$$\gamma_{\text{sat}} = 20.1 \text{ KN/m}^3, \gamma = 16.1 \text{ KN/m}^3, C' = 40 \text{ KN/m}^2, C_c = 0.02635, \phi = 32^\circ$$

2.1 MODELO NÚMERO UNO:

Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno a partir de la acción de dos cargas de diferente magnitud sobre zapatas de igual área. Las condiciones del terreno son las que se presentan en la figura 2.

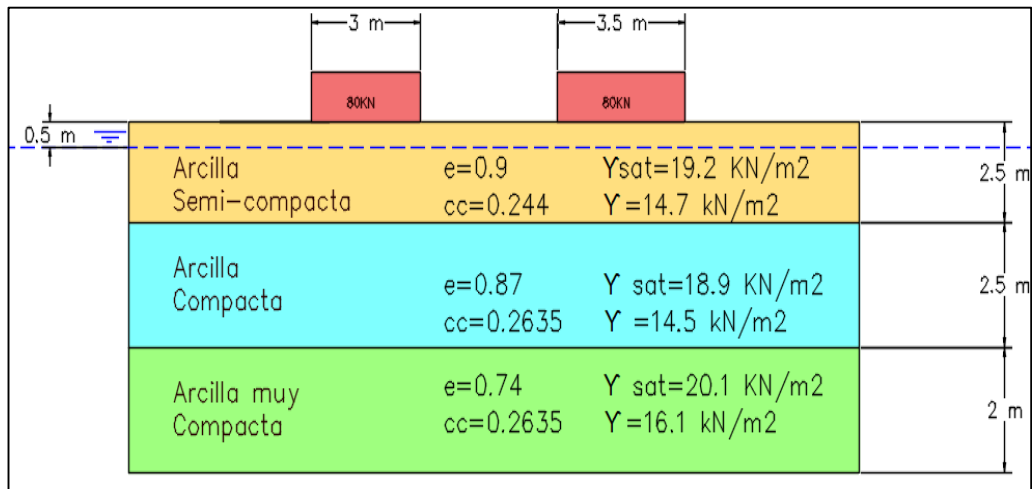
Figura 3. Modelo uno, nivel freático a 0.5m



2.2 MODELO NÚMERO DOS:

En el segundo modelo, el factor que se quiere variar fue el área, pero en este caso la magnitud de las cargas no varían, es constante en ambas zapatas, al igual que las condiciones del terreno.

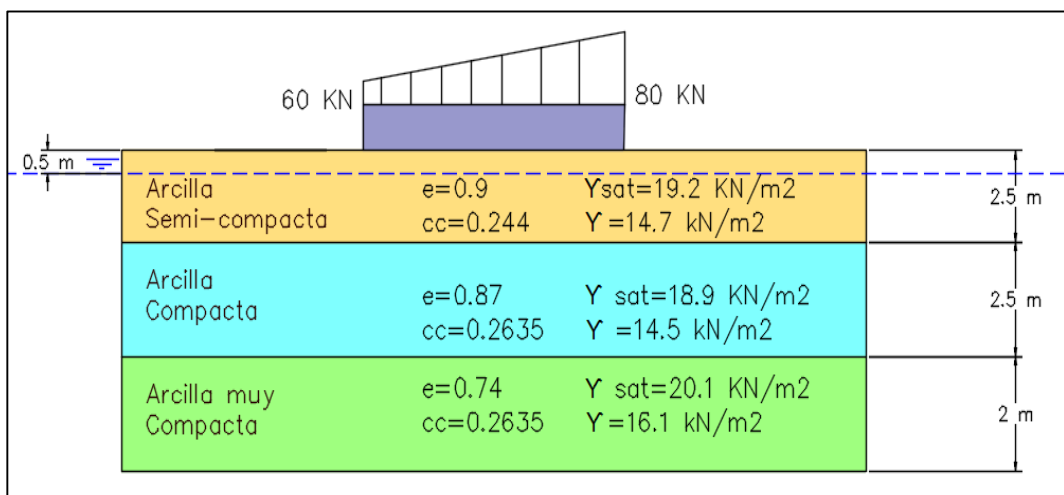
Figura 4. Modelo dos, nivel freático a 0.5m



2.3 MODELO NÚMERO TRES:

Para el modelo tres se simulo una losa de cimentación cargada en la cual la magnitud de la carga va a ser no uniforme. Al igual que los modelos anteriores las condiciones del terreno no varían.

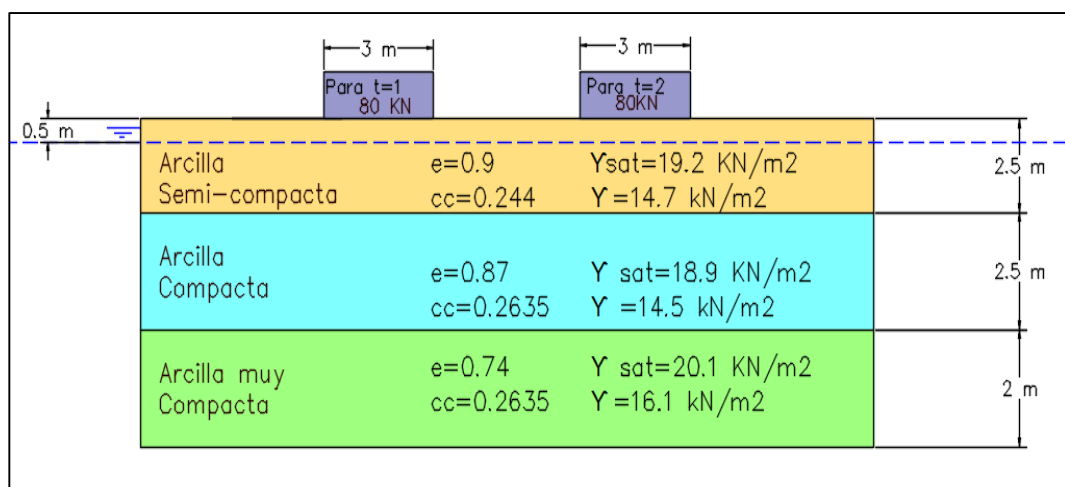
Figura 5. Modelo tres, nivel freático a 0.5m



2.4 MODELO NÚMERO CUATRO:

En este modelo se quiso variar el tiempo en el que las carga se aplica, es decir se simuló aplicar una carga en un $t=1$ (días) y la segunda carga en un $t=2$ (días) Las magnitudes de las cargas son iguales y las condiciones de terreno no varían.

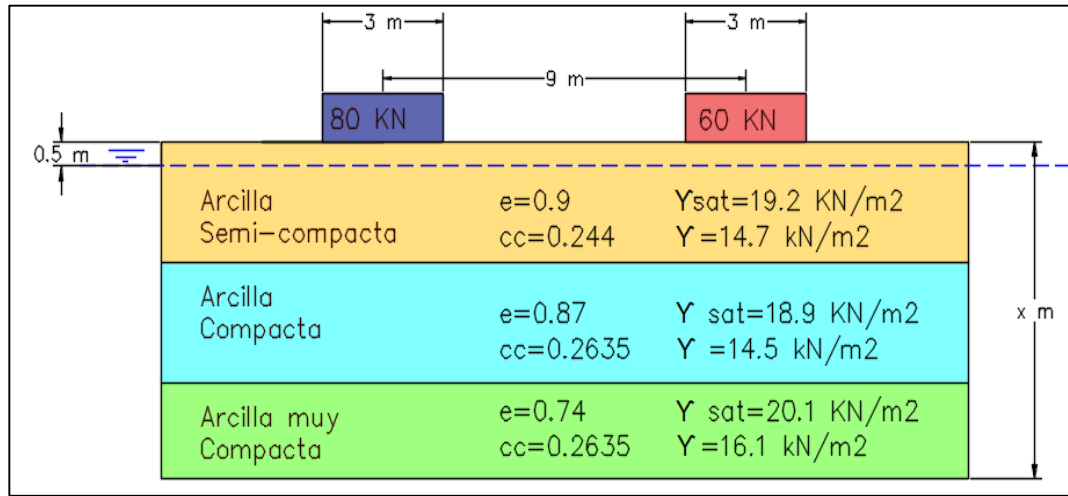
Figura 6. Modelo cuatro, nivel freático a 0.5m



2.5 MODELO NÚMERO CINCO:

Para el último modelo se analizó el asentamiento al variar únicamente el terreno aplicando cargas iguales. Para la parte (a) de este modelo el suelo tiene las mismas características que el modelo uno, pero con una variación en el estrato de suelos a la mitad (3.5m) y en la parte (b) aumentamos al doble las dimensiones de los estratos del suelo (14m).

Figura 7. Modelo cinco, nivel freático a 0.5m.



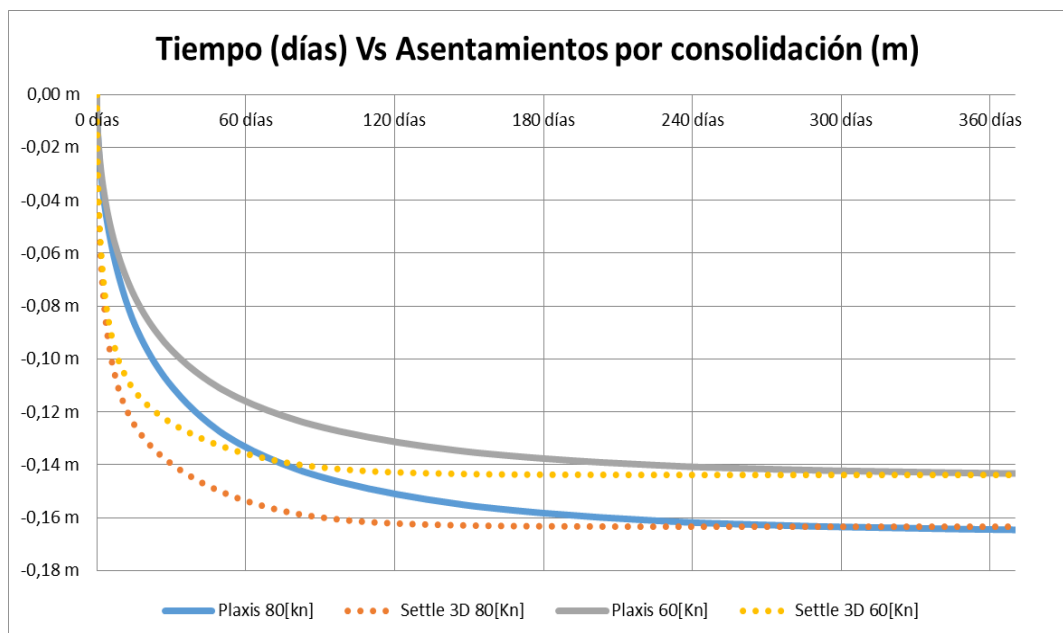
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se mostrará una gráfica y una tabla comparativa en cada modelo mostrando los asentamientos diferenciales obtenidos por ambos programas en diferentes días.

3.1 MODELO NÚMERO 1.

La siguiente grafica representa la información obtenida por cada una de las plataformas computacionales trabajadas.

Gráfica 1. Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.



A partir de esta gráfica y sus datos se calculó el asentamiento diferencial en cada uno de los softwares a lo largo de 10 años, especificando 9 nodos a lo largo de la trayectoria de desarrollo de la curva de asentamiento.

Tabla 4. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 1

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,002	0,005	0,008	0,014	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022
SETTLE 3D	0,004	0,009	0,011	0,015	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 22 mm
- Settle 3D: 20 mm
- Teórico: 25 mm

En este modelo se puede observar que el asentamiento diferencial por consolidación respecto al tiempo entre ambos softwares no varía de manera tan notable, ya que el asentamiento del terreno en Settle 3D y en Plaxis 2D es de tan solo de 2 mm.

3.2 MODELO NÚMERO 2

Gráfica 2. Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.

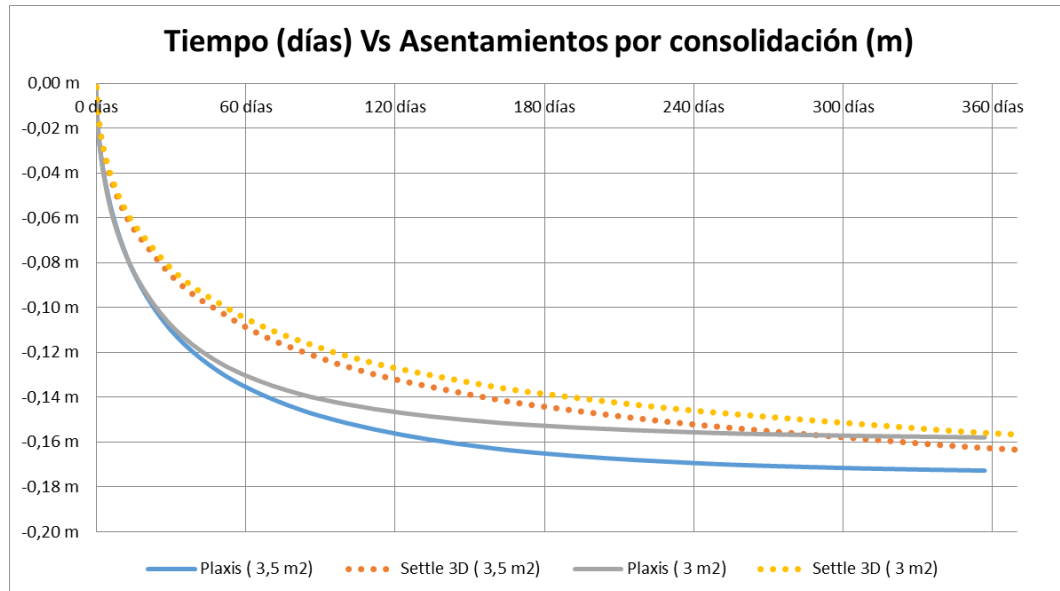


Tabla 5. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 2

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,001	0,001	0,001	0,002	0,013	0,015	0,015	0,015	0,015
SETTLE 3D	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006	0,008	0,007	0,008	0,008

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 15 mm
- Settler 3D: 8mm
- Teórico: 13 mm

En este caso se puede observar que al incrementar el área de la carga va a disminuir el asentamiento en el terreno y por consecuencia el asentamiento diferencial en este modelo va a ser menor. Con respecto al asentamiento diferencial hallado teóricamente podemos notar que PLAXIS 2D es más preciso que SETTLE 3D.

3.3 MODELO NÚMERO 3.

Gráfica 3. Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.

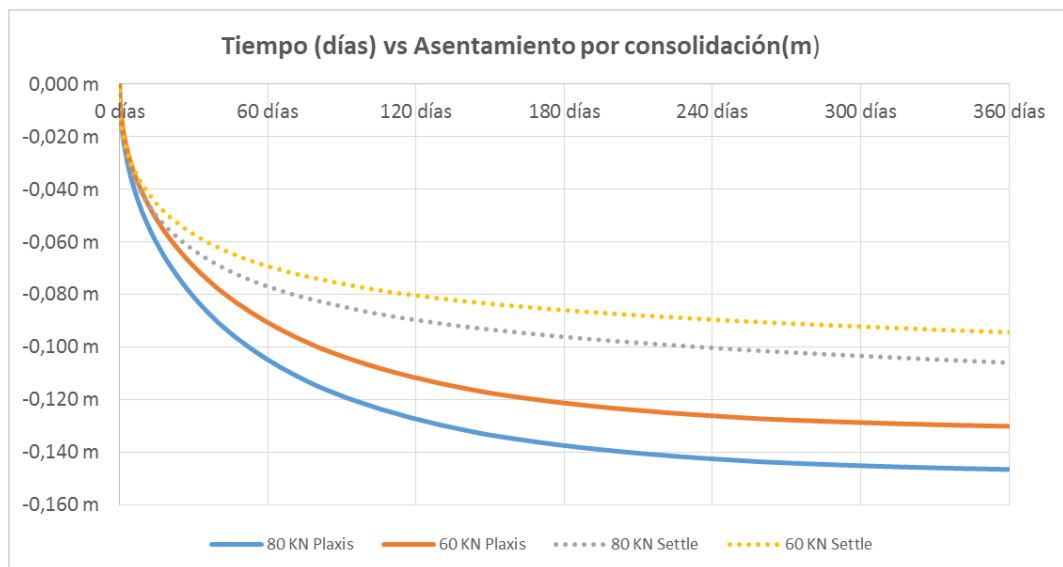


Tabla 6. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 3

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,002	0,005	0,007	0,012	0,016	0,016	0,017	0,017	0,017
SETTLE 3D	0,01	0,003	0,004	0,006	0,010	0,011	0,012	0,013	0,013

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 17 mm
- Settle 3D: 13 mm
- Teórico: 18 mm

Los resultados de este modelo se puede ver que PLAXIS 2D es más sensible y aproximado en el momento de analizar una placa tipo cimentación ya que es más notorio el asentamiento diferencial que en SETTLE 3D.

3.4 MODELO NÚMERO 4

Gráfica 4. . Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D

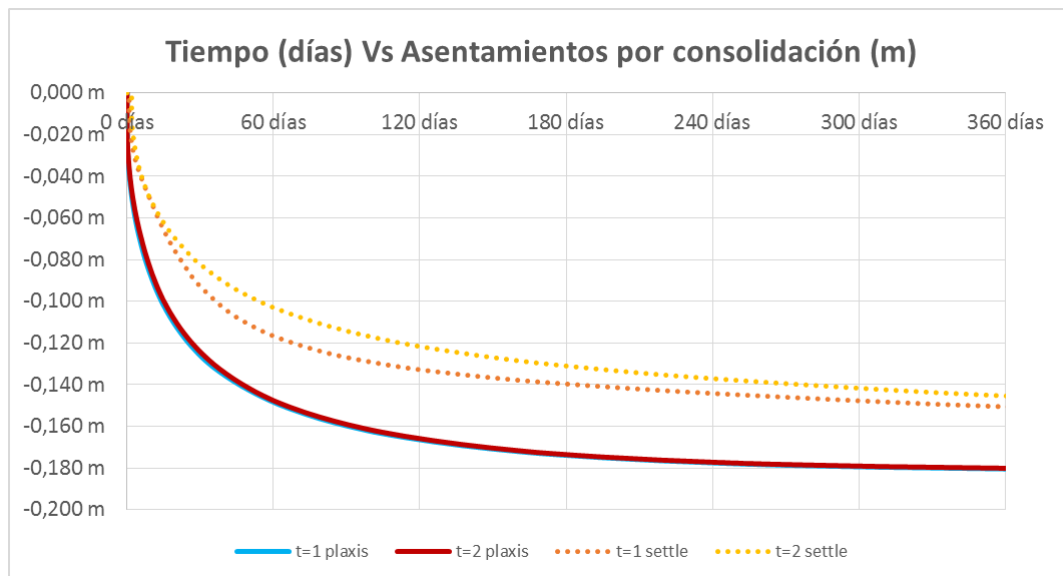


Tabla 7. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 4.

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,003	0,003	0,003	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SETTLE 3D	0,00	0,01	0,01	0,01	0,008	0,005	0,002	0,00	0,00

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 0 mm
- Settle 3D: 0 mm
- Teórico: 0 mm

En este modelo la variable que se analizó fue el tiempo en el que se aplica la carga en el terreno y se puede contemplar que tanto en PLAXIS 2D como en SETTLE 3D esta variable no afecta el asentamiento diferencial ya que aunque va a haber una diferencia mínima al inicio, la consolidación va a hacer que las dos zapatas se desplacen lo mismo.

3.5 MODELO NÚMERO 5

3.5.1 Profundidad de terreno 3.5m.

Gráfica 5. Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D

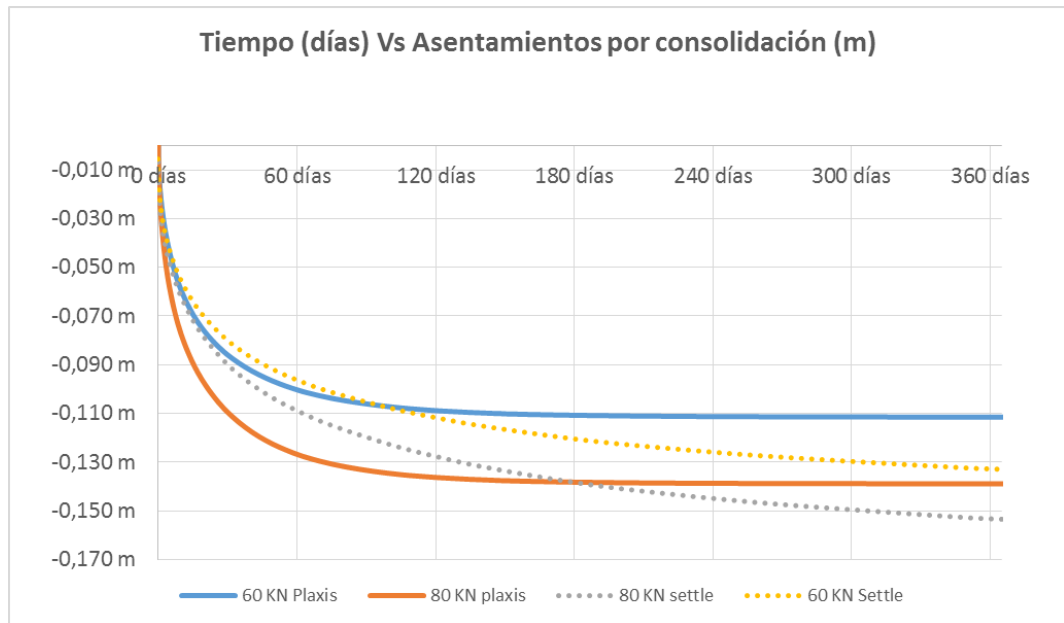


Tabla 8. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 5a.

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,007	0,015	0,018	0,024	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
SETTLE 3D	0,00	0,005	0,006	0,009	0,017	0,020	0,021	0,021	0,021

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 27 mm
- Settle 3D: 21 mm
- Teórico: 23 mm

Como era de esperarse, el asentamiento de cada zapata disminuyó al reducir la profundidad de cada estrato en el terreno comparado con el primer modelo. Sin embargo el asentamiento diferencial aumento, lo que nos indica que una de las zapatas se desplazó en mayor proporción con respecto al primer modelo simulado.

3.5.2 Profundidad de terreno 14 m.

Gráfica 6. Comparación de tiempo contra asentamiento por consolidación en PLAXIS 2D y SETTLE 3D.

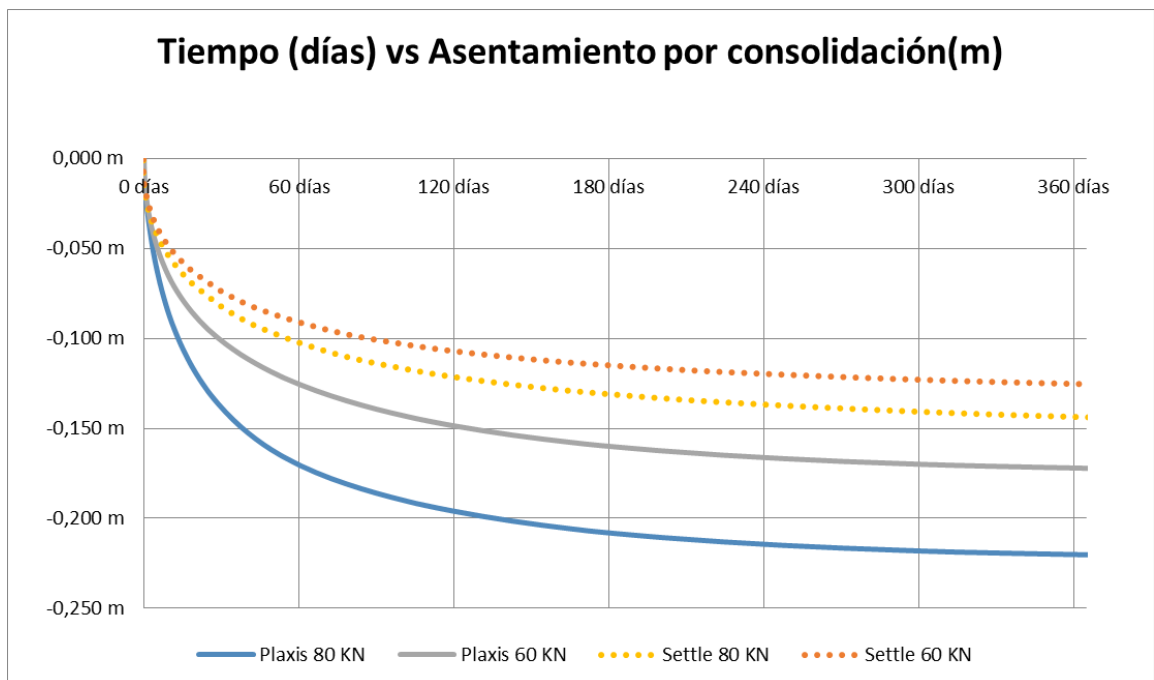


Tabla 9. Comparación de Asentamientos diferenciales modelo 5b.

DÍAS	ASENTAMIENTO DIFERENCIAL [m]								
	1	5	10	30	180	365	730	1825	3650
PLAXIS 2D	0,003	0,013	0,02	0,038	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
SETTLE 3D	0,002	0,004	0,005	0,008	0,016	0,018	0,02	0,022	0,022

Asentamiento diferencial por consolidación

- Plaxis 2D: 48 mm
- Settle 3D: 22 mm
- Teórico: 25 mm

En este último modelo se puede concluir que la profundidad del terreno afecta la magnitud del asentamiento en comparación al modelo 1, al aumentar la profundidad en un 100% aumento el asentamiento de cada zapata y en este caso también aumenta el asentamiento diferencial. Sin embargo podemos notar una pequeña falencia en PLAXIS 2D, pues el asentamiento aumento que era lo que se esperaba, pero lo hizo de manera desproporcionada en comparación con el software SETTLE 3D y el resultado del método teórico.

4. CONCLUSIONES

- Con el manejo y trabajo de cada una de las plataformas computacionales empleadas podemos concluir que la aplicación de los softwares son muy competentes en el área de diseño y análisis en el área de asentamientos, puesto que se analizaron con éxito los 5 modelos propuestos y los resultados obtenidos mediante estos programas fueron cercanos a los resultados teóricos.
- A pesar de que PLAXIS es un programa que trabaja en dos dimensiones a diferencia de SETTLE que lo hace en 3 dimensiones, sus resultados son más acertados y precisos con respecto al método teórico, ya que como se pudo observar de los 5 modelos en 3 de ellos los resultados fueron más próximos a los teóricos que los de SETTLE 3D y en solamente en un modelo, SETTLE 3D fue quien más se acercó al valor teórico. Esto puede deberse a que PLAXIS 2D es más exigente en el requerimiento de parámetros en comparación de SETTLE 3D.
- Del modelo 1, modelo 5a y modelo 5b se puede concluir que claramente a mayor o menor profundidad del terreno a analizar, los asentamientos van a aumentar o disminuir respectivamente, ya que en el modelo 5a tanto en PLAXIS 2D como en SETTLE 3D al disminuir el terreno a la mitad con respecto al modelo 1, los asentamientos de cada zapata disminuyeron causando así que el asentamiento diferencial cambiara, de igual forma al aumentar el terreno dos veces del modelo 1 como se puede ver en el modelo 5b, el asentamiento en cada zapata aumentó y por lo tanto también su asentamiento diferencial.

- En el tercer modelo, donde se analizaba una cimentación tipo placa, se pudo observar que SETTLE 3D es menos exacto al hacer el análisis con una carga distribuida no uniforme como se planteó en este modelo ya que el software asume la carga como flexible y no rígida, algo similar al comportamiento de una viga, permitiendo así que el asentamiento fuera más notable en el centro de la placa y no a los extremos. Por otro lado, PLAXIS 3D mostraba más credibilidad con sus resultados ya que el comportamiento del asentamiento fue uniforme a lo largo de la placa pues este trabajaba la carga como rígida.

- La aplicación de cargas en tiempos diferentes fue el modelo que menos asentamiento diferencial mostró en ambos programas, dando como resultado cero, la única variación es el de asentamientos inmediatos en la construcción de la cimentación de la primera zapata.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Civil Engineers Forum <http://civilengineersforum.com/soil-settlement-foundation-design-factors/>
- [2] Civil Geeks, ingeniería y construcción <http://civilgeeks.com/2011/04/09/programas-interesantes-para-suelos-gratis/>
- [3] Delgado Vargas M, Ingeniería de Fundaciones, primera edición 1996. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [4] Ingeniería Real <http://ingenieriareal.com/tipos-de-asentamientos-en-suelos>
- [5] Jonathan Javier Ochoa Aldana, Cesar Giovanny Mojica Barreto, Análisis de los asentamientos por consolidación mediante herramientas computacionales, tesis pregrado, Universidad Industrial de Santander 2014.
- [6] Juan Pérez Volcárcel, Conceptos generales de la mecánica del suelo, E.T.S arquitectura de la Coruña.
- [7] T. William Lambe, Robert V. Whitman, Soils mechanic, first edition 1979.
- [8] Torre de Pisa: Histórico problema de cimentación. http://app.idu.gov.co/boletin_alejandria/julio2013/doc/ARTICULOS_TECNICOS/PA-118-13.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Modelamiento y paso a paso de PLAXIS 2D.

Se introducen las propiedades como (Unidades, espaciamento de la grilla) y características del proyecto, (Nombre, ubicación, comentarios u observaciones de este).

Propiedades del proyecto

Proyecto Modelo

Proyecto
Título: Modelo 1
Directorio
Nombre

Opciones generales
Modelo: Deformación plana
Elementos: de 6 nodos

Comentarios
modelo de áreas iguales y cargas diferentes

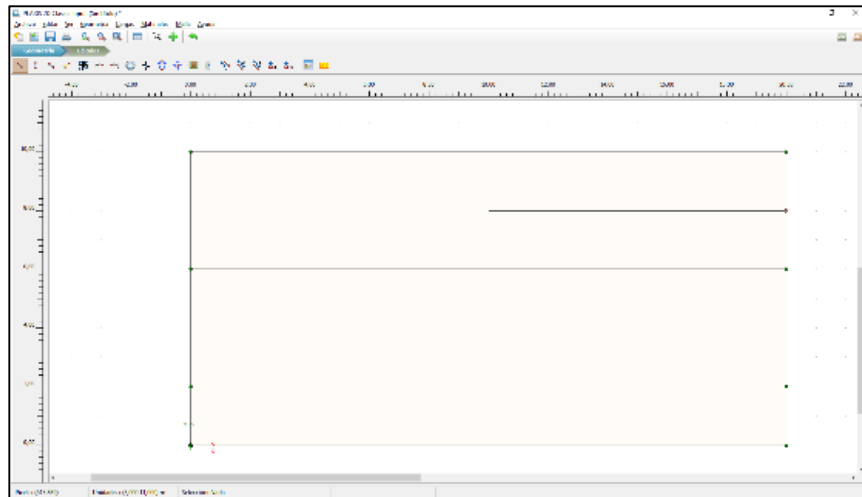
Aceleración
Ángulo (gravedad): -90° 1.0 G
aceleración-x: 0,000 G
aceleración-y: 0,000 G
Gravedad: 9,800 m/s²

Por defecto

Siguiente Aceptar Cancelar

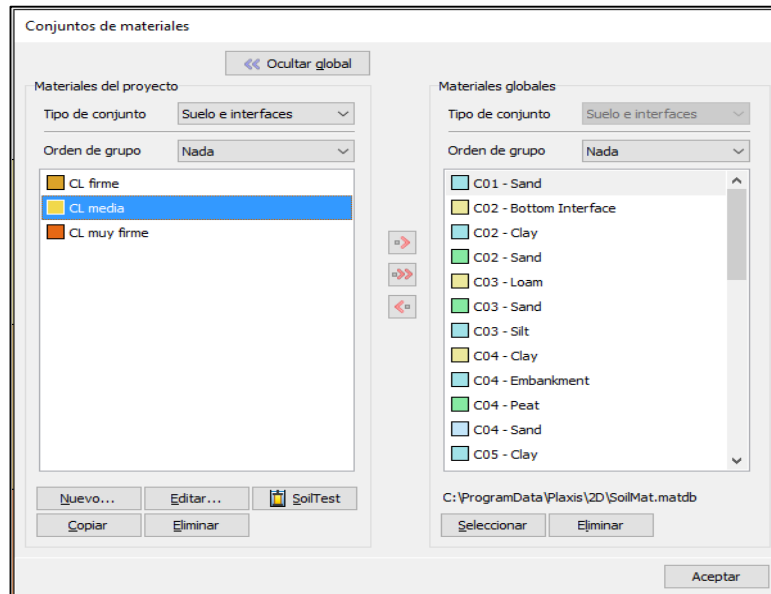
Propiedades de proyecto.

En este paso se procede a trazar la geometría del problema o diseño a simular.



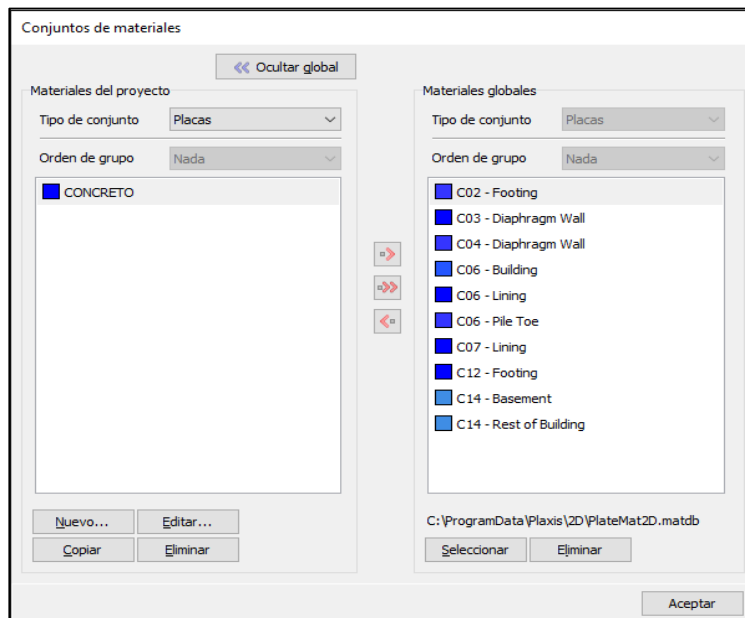
Geometría de diseño.

Después se define los tipos de suelo y propiedades de los materiales, algunos e encuentran predefinidos en el programa.



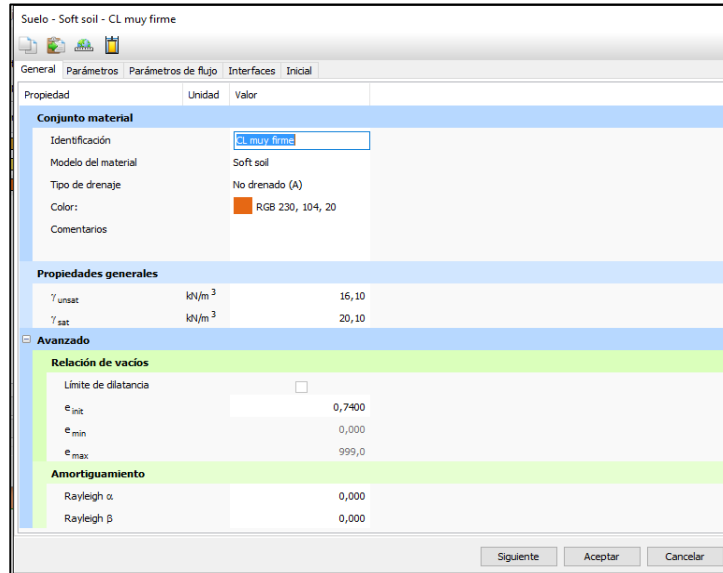
Conjunto de materiales.

En este caso también de debe definir el tipo y características del material con el cual se va a diseñar la cimentación, zapata o placa.



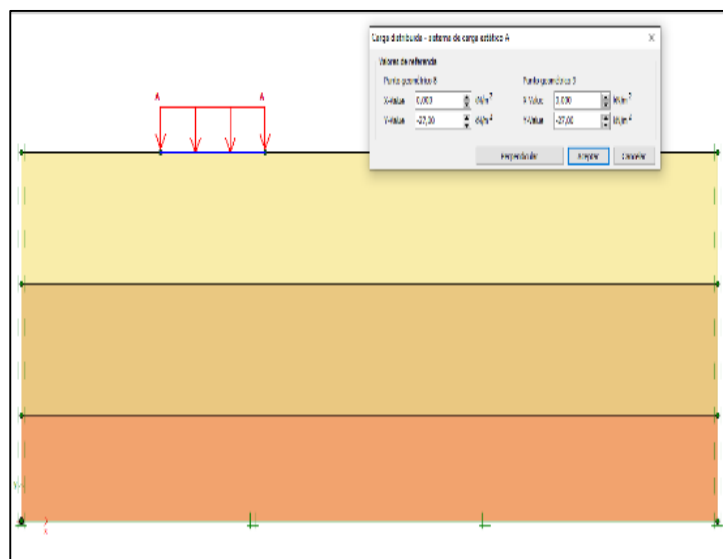
Propiedades de placa

Asignamos los valores a los materiales correspondientes a utilizar, esos valores se pueden encontrar en campo y son obtenidos en los ensayos de laboratorio pertinente, como son los gamas saturados y húmedos, relaciones de vacíos (e), índice de compresión (Cc), índice de expansión (Cs), permeabilidad (k), Ángulo de fricción (ϕ), cohesión (C').



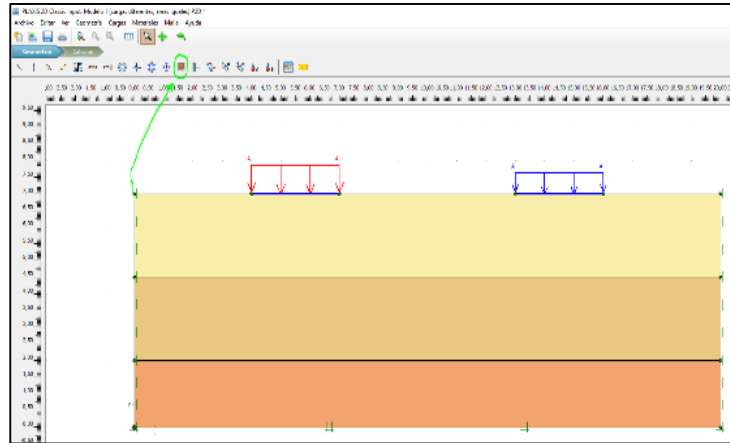
Propiedades y parámetros de suelo

Después de realizar los cambios en los materiales, se procede a asignar el material a cada uno de los estratos del suelo, al terminar esto procedemos a asignar el tipo de carga y su respectivo valor que se desea aplicar.



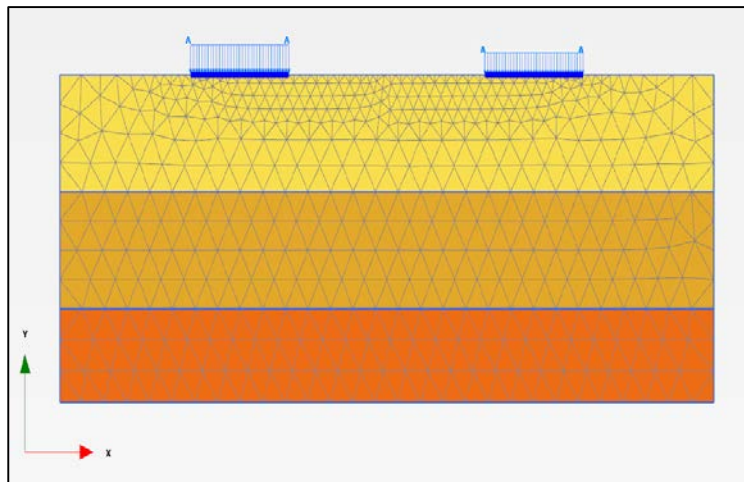
Asignación de materiales y carga asignada.

Ahora se debe crear las condiciones de contorno y generar la malla de elementos finitos (Pestaña de menú principal, MALLA – Refinamiento global).



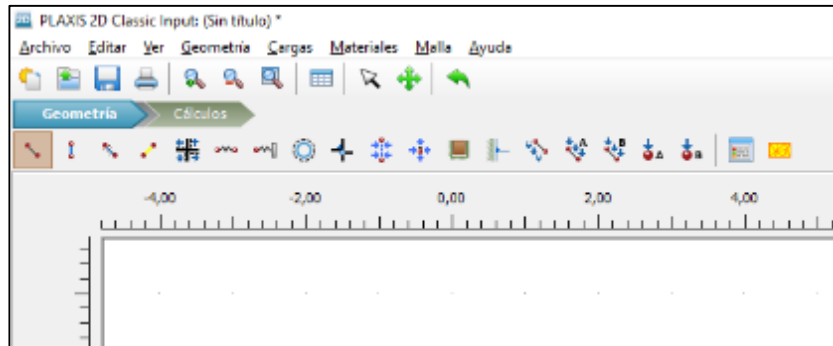
Malla de elementos finitos.

Después de elegir el tipo de refinamiento de malla, saldrá otra ventana con resultado parecido a este.



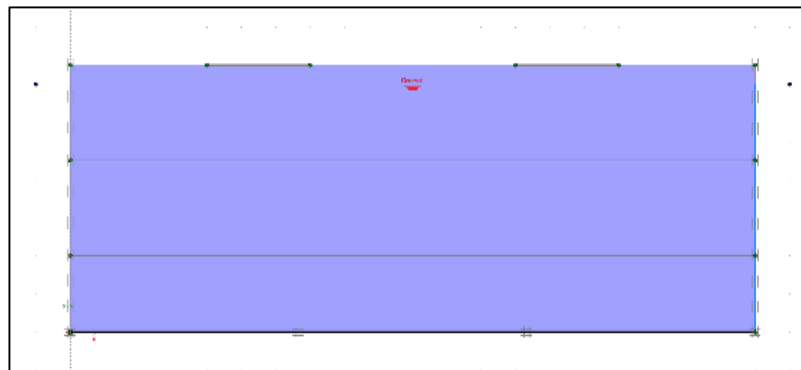
Visualización de malla bidimensional de elementos finitos.

Al terminar este proceso de la interfaz gráfica de modelamiento daremos paso a la interfaz de cálculos y simulación del proyecto, damos clic en cálculos.

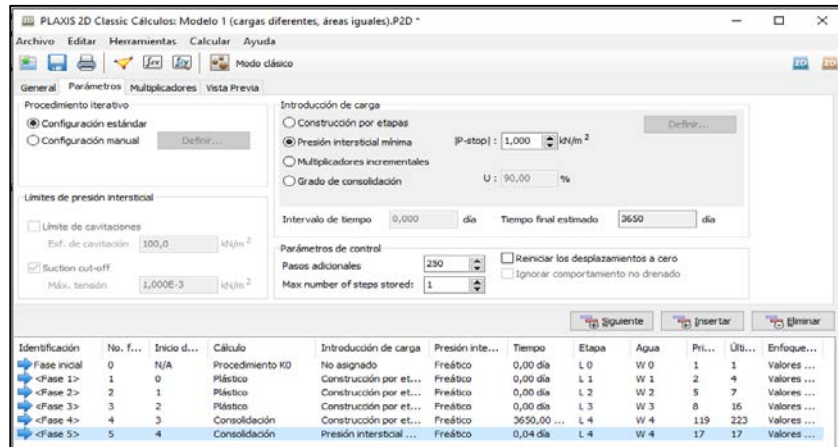


Simulación y cálculos del modelo.

En la interfaz de cálculos se crean las fases pertinentes al diseño y a la simulación que se desea hacer, en estas se definen nivel freático, presión de poros, condiciones iniciales y de plasticidad del suelo, la cimentación a cargar, la carga a aplicar, las etapas de construcción, la condición o condiciones de análisis de consolidación para que la presión de poros sea la mínima. Hay que resaltar que al iniciar una nueva fase hay que reiniciar los desplazamientos a cero, debido a que el análisis es consecutivo.

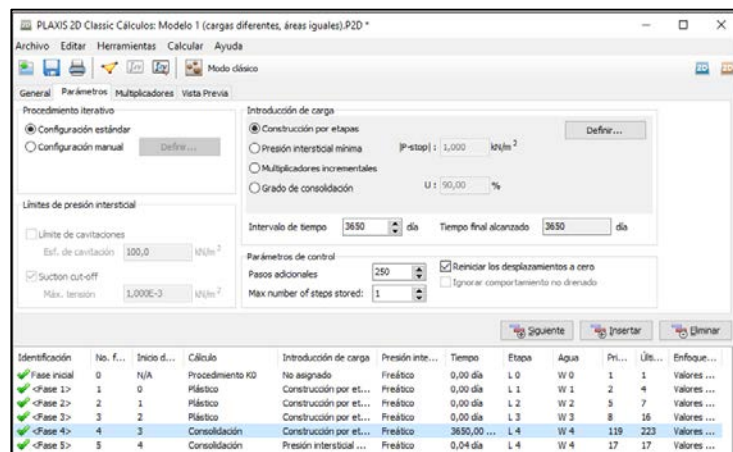


Condiciones de nivel freático y de presión de poros.



Fases de interfaz previas a la simulación y cálculo del modelo.

Luego de definir los parámetros de cada fase a analizar, se eligen el punto o los puntos de interés, se corre el programa, este grafica con una flecha verde frente a cada fase si el respectivo análisis quedo bien, es decir si los parámetros asignados cumplen y si se puede continuar con la siguiente fase.

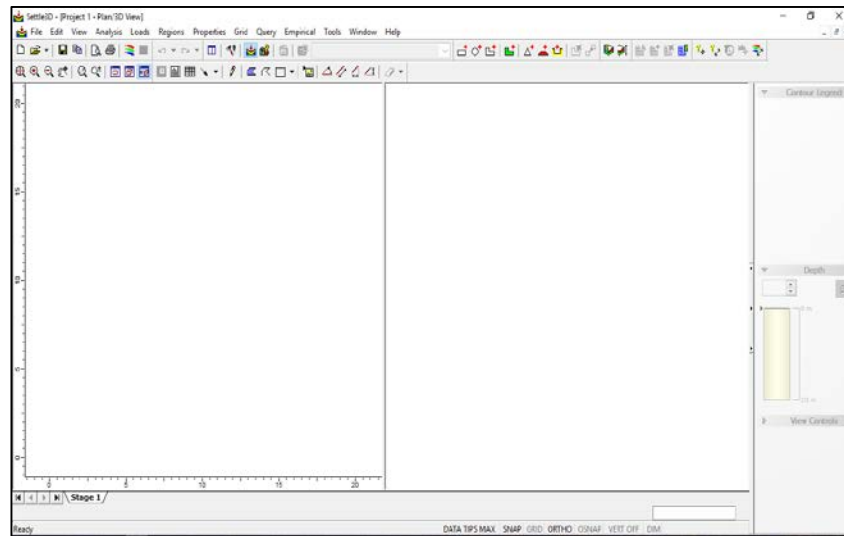


Cálculos realizados y verificados.

ANEXO B. Modelamiento y paso a paso del Settle 3D.

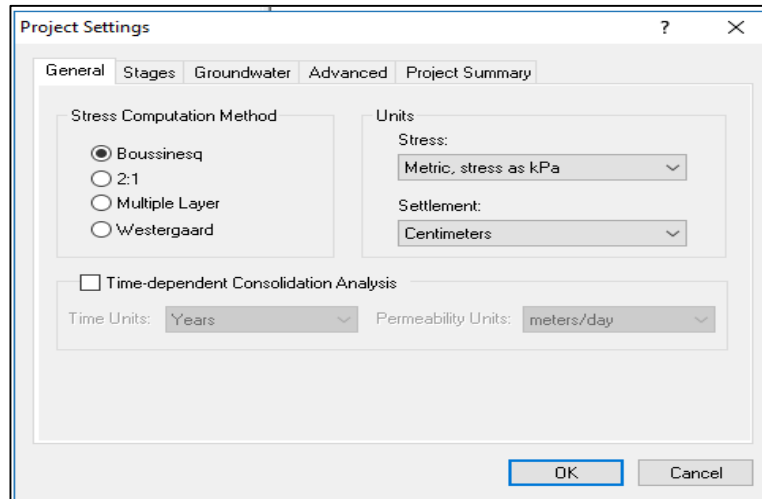
A continuación se mostrara un paso a paso general del uso de Settle 3D enfocado en asentamientos diferenciales por consolidación.

Para empezar a modelar se ejecuta el software SETTLE 3D que nos mostrara la siguiente interfaz:



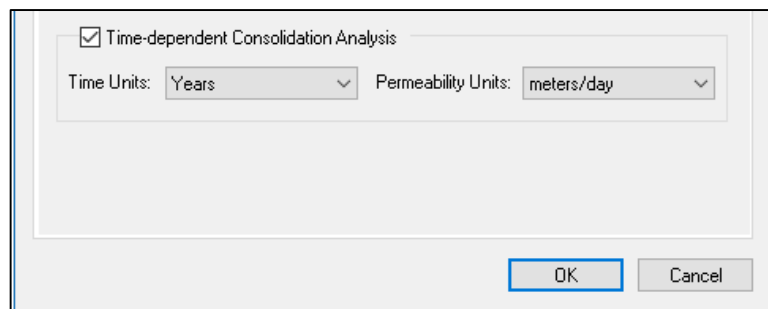
Interfaz SETTLE 3D

El primer paso a realizar será ir a *Análisis* y a continuación seleccionamos *Project settings*, saldrá una ventana como se muestra a continuación:



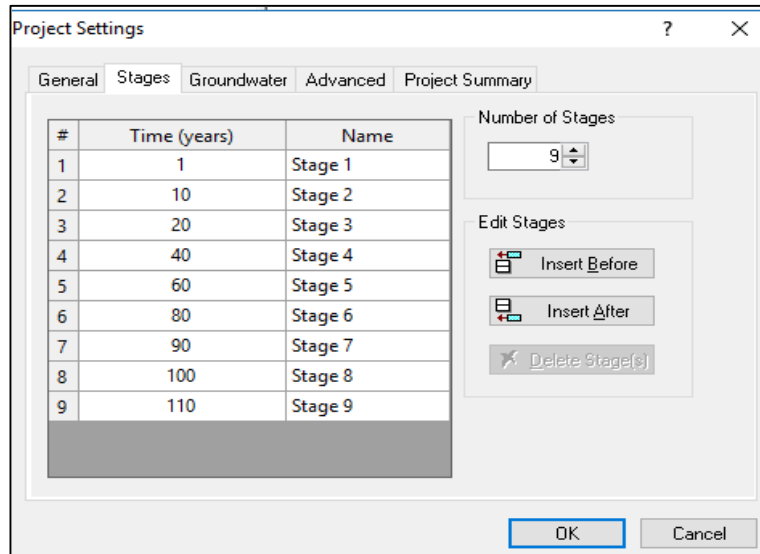
Configuración del proyecto.

En la pestaña general, se eligen las unidades con las que se quiera trabajar y se verifica que se active la casilla que dice Time Dependent Consolidation Analysis ya que lo que se quiere es hacer un análisis de asentamientos por consolidación. Posteriormente se selecciona la unidad de tiempo y las unidades de la permeabilidad.



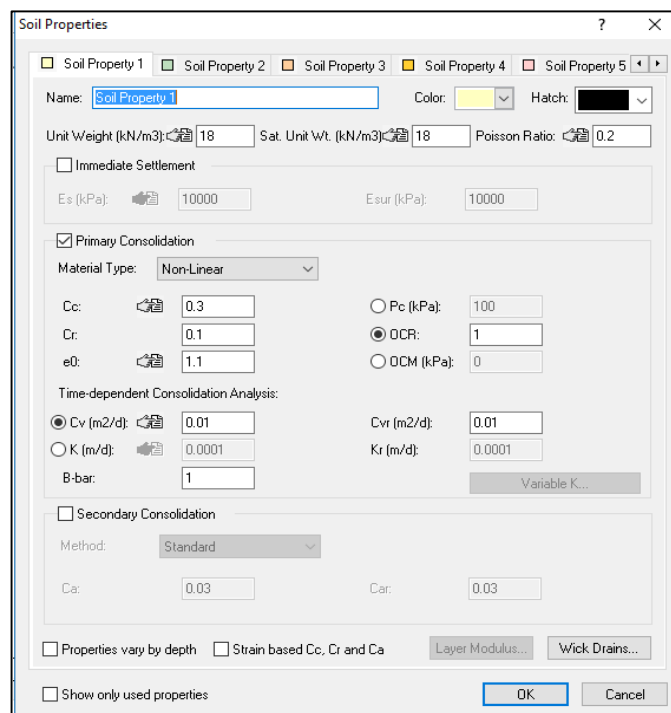
Asignación de unidades.

Ahora se selecciona la pestaña continua que dice Stages, en esta casilla se pone el número de etapas en las que se va a evaluar el asentamiento del modelo según la unidad de tiempo que se haya elegido.



Etapas del proyecto.

Las otras pestañas se dejan por defecto como aparecen. Posteriormente se configurarán las propiedades del terreno. En la barra de menú se elige la opción Properties y luego Soil Properties. Aparecerá una ventana así:



Propiedades del terreno.

En la parte superior se observan diferentes suelos los cuales se podrán renombrar y asignar las características que se quieran evaluar. Seleccionaremos la casilla que dice Primary Consolidation y cómo se puede ver las opciones de consolidación ya están disponibles para el análisis.

Consolidación Primaria.

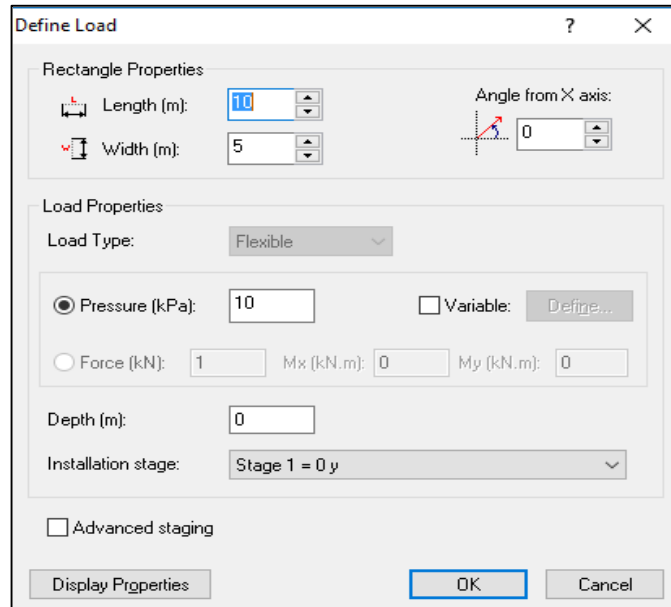
Luego de nombrar las capas y asignar sus respectivas propiedades se presiona OK. Nuevamente se elige Properties y ahora se selecciona Soil Layers, aparecerá una ventana donde se dará clic donde dice Insert layer below para adicionar las capas que necesitemos en nuestro modelo. Luego clic sobre cada nombre de la capa para asignar las características correspondientes de cada uno que ya se dio en el paso anterior, y por último se asigna el espesor de cada una de las capas.

#	Name	Thickness	Drained at Bottom
1	Soil Property 1	2	<input type="checkbox"/>
2	Soil Property 2	2.5	<input type="checkbox"/>
3	Soil Property 3	2.5	<input type="checkbox"/>

Espesor de las capas.

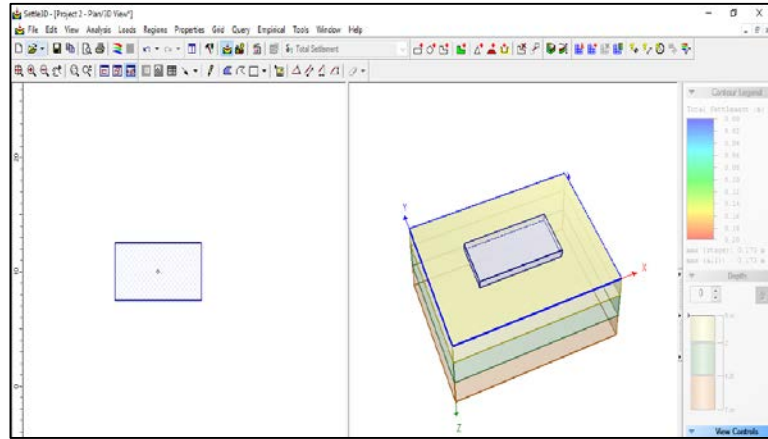
Se selecciona Ok y el programa vuelve a la interfaz inicial donde no se ha producido ningún cambio.

Ahora se aplican las cargas, para ello se elige Loads en el menú principal y luego add rectangular load, saldrá una ventana así:



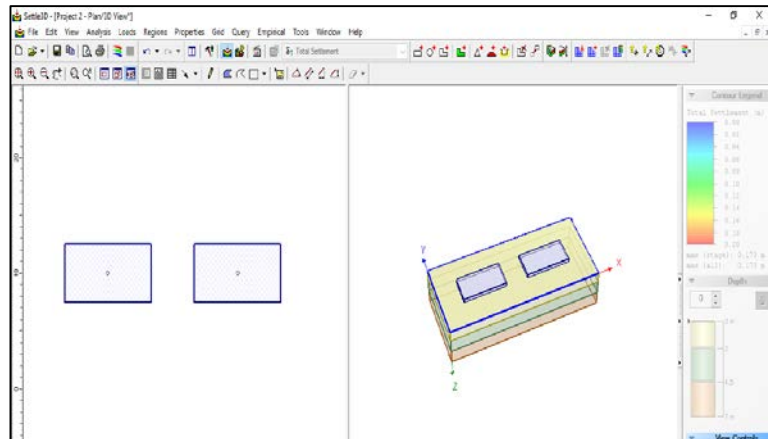
Asignación de fuerzas.

Aquí se asignan las dimensiones de la carga, su magnitud en Kpa, la profundidad en la cual se aplicara y el tiempo en el cual se quiere aplicar según las etapas que se hayan elegido. Al hacer esto damos OK y aparecerá donde ubicar nuestra carga, digitamos 5,5 y enter.



Carga puesta sobre el terreno.

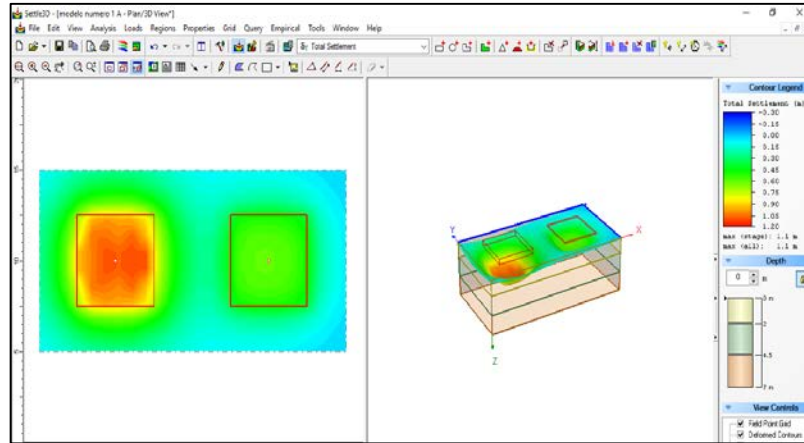
Ahora ubicaremos la segunda carga repitiendo el último paso.



Cargas sobre el terreno.

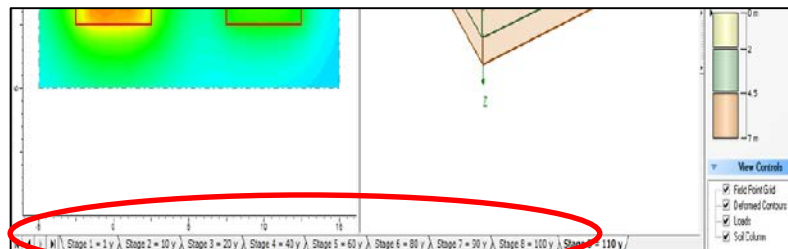
Como se puede observar a la izquierda hay una vista superior de las cargas y la derecha una vista 3D del terreno.

Ahora se correrá la deformación para ello se presiona en el teclado ctrl+a saldrá una ventana a la cual solo daremos ok. Sucederá algo así:



Mapa de calor de asentamiento del terreno.

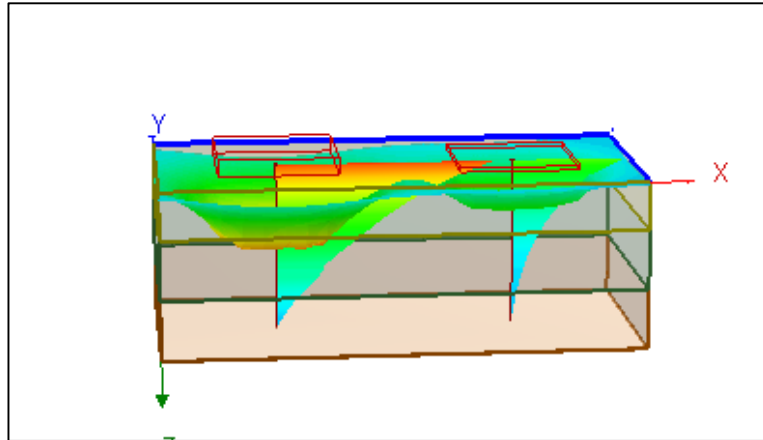
El programa mostrara en un rango de colores la deformación que se genera bajo caga carga esta deformación está representada por un rango a la derecha donde muestra el asentamiento máximo y el asentamiento en la etapa que estemos situados. Para cambiar la etapa y ver el asentamiento en esta la se selecciona en la parte de abajo del modelo.



Etapas del proyecto.

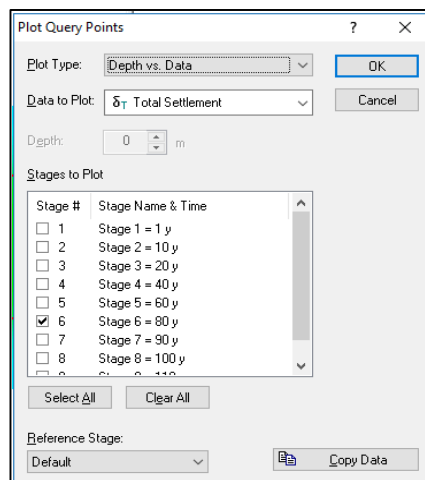
Ahora para ver nuestros resultados con más claridad, en la barra de menú se selecciona Query y luego query point, saldrá una ventana a la cual solo se presionará Ok. El cursor se convertirá en una cruz, significa que se debe seleccionar un punto en la carga, se ubicara el cursor en la mitad de una de

las cargas y se clickea. Repetimos el mismo proceso para la otra carga. Se verá algo así en la parte izquierda de nuestro modelo:



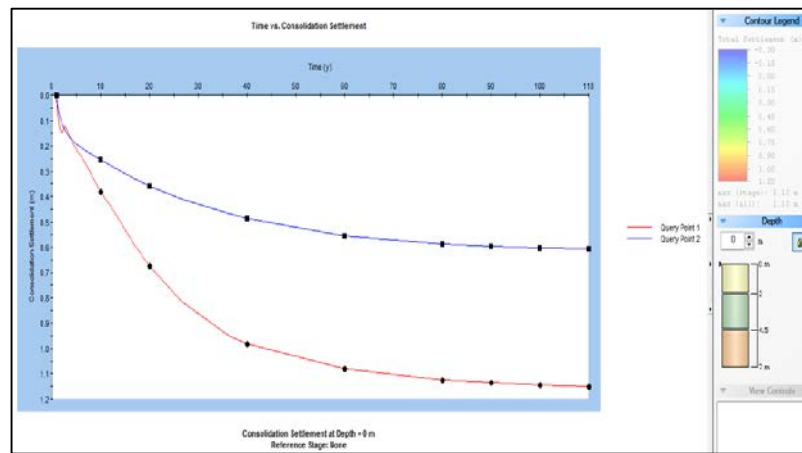
Asentamiento del terreno en vista 3D.

Nuevamente en query se selecciona graph query, donde se observara que el cursor se convertirá en un cuadrado y se dará clic a los dos puntos centrales de cada carga donde se seleccionó anteriormente. Se verá una ventana así:



Configuración para graficar asentamientos.

En plot type seleccionara data vs stage time, en data plot se seleccionara consolidation settlement y por ultimo OK. Así se mostrara el asentamiento de cada carga a través del tiempo.



Grafica de asentamientos de dos cargas, asentamientos vs tiempo.

Por ultimo para mayor claridad y un mejor análisis se recomienda exportar los datos a Excel, dando clic derecho sobre la gráfica y luego exportar a Excel.