



# **ANÁLISIS DE LOS ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**JHONATAN JAVIER OCHOA ALDANA  
CÉSAR GIOVANNY MOJICA BARRETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**



**ANÁLISIS DE LOS ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN MEDIANTE  
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**JHONATAN JAVIER OCHOA ALDANA**

**CÉSAR GIOVANNY MOJICA BARRETO**

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

**DIRECTOR**

**WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ**  
**Ingeniero Civil, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**BUCARAMANGA**

**2014**

## **DEDICATORIA**

Ese proyecto de grado es la culminación de una mis etapas académicas más importantes para mi vida, en la cual es el fruto de toda mi dedicación, esfuerzo y disciplina en el estudio, para así lograr este anhelado sueño de obtener el título de ingeniero civil, con el cual puedo empezar a marcar una nueva historia en la ingeniería civil de este país, por esta razón este importante logro va dedicado:

### *A DIOS*

Por ser la fuente de iluminación en mi camino, por iluminar cada paso que daba para cumplir este sueño y por sus bendiciones, por haberme brindado la fortaleza necesaria para cumplir este objetivo y sobre todo por la salud que me brindo.

### *A MI FAMILIA*

Por ser el motor de mi motivación a culminar mis metas, por su apoyo incondicional en cada instante de mi vida, por su sabiduría de guiarme por el buen camino y por la felicidad que me trasmiten cada instante que pasan por mis pensamientos.

### *A MI ABUELO GUSTAVO ALDANA CHIQUITO*

Que desde el cielo siempre me estará acompañando en cada uno de mis sueños y me estará guiando como un ángel más para la culminación de mis demás metas, como, lograr ser ese excelente Ingeniero Civil como lo fue él.

### *A MIS AMIGOS*

Por sus alegrías que me brindaron en cada momento, por sus apoyos y presencia en esta etapa que los convierten en una familia más, y a ti niña bonita que eres fuente de inspiración de mis mejores actos.

*JHONATAN JAVIER OCHOA ALDANA*

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto de grado es el resultado de mucha disciplina y esfuerzo, que durante mucho tiempo hice siempre con el propósito firme de llegar a ser un gran ingeniero, dedico este importante logro en mi vida a:*

*A DIOS*

*Por darme fortaleza espiritual en los momentos difíciles*

*A MI MADRE*

*Por darme la vida, ser mi motor de vida para salir adelante a pesar de las dificultades, por su esfuerzo y su amor incondicional que son las razones principales de este gran logro.*

*A todas y cada una de las personas que de alguna u otra manera contribuyeron al logro de este objetivo.*

**CÉSAR GIOVANNY MOJICA BARRETO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los resultados del estudio de la presente tesis van dedicados a todas las personas que formaron de alguna manera parte de la culminación de este proyecto, damos nuestros agradecimientos al Ingeniero civil Hector Torres por brindarnos su colaboración, ayuda y disposición en el manejo adecuado en todo lo que respecta a los programas Plaxis y Rocscience settle 3D, a nuestro director el Ingeniero Wilfredo por su orientación y apoyo en esta investigación y agradecer también a las personas que llevaron a cabo este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	19
1. JUSTIFICACIÓN .....	21
2. OBJETIVOS .....	22
2.1 Objetivo General .....	22
2.2 Objetivos Específicos.....	22
3. MARCO REFERENCIAL.....	23
3.1 MODELO DE TERZAGHI .....	23
3.2 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA.....	25
3.3 ECUACIONES QUE RIGEN EL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN .....	26
3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SOFTWARE .....	28
3.4.1 Características del software Rocscience (Settle 3D) .....	28
3.4.2 Características del software Plaxis. ....	29
4. DISEÑO METODOLOGICO.....	31
4.1 MODELO 1: CARGA DISTRIBUIDA INFINITA .....	31
4.1.1 Sin drenes.....	31
4.1.2 Con drenes.. .....	39
4.2 MODELO 2: CIMENTACIÓN SUPERFICIAL AISLADA .....	41
4.3 MODELO 3: TERRAPLÉN SOBRE SUELO COMPRESIBLE .....	42
4.3.1 Sin drenes.....	42
4.3.2 Con drenes.. .....	43
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
5.1 ANÁLISIS MODELO 1 .....	44
5.1.1 Comparación solución analítica con los resultados de los software.. .....	44

5.1.2	Tiempo de consolidación sin drenes.....	47
5.1.3	Tiempo de consolidacion con drenes.....	48
5.2	ANÁLISIS MODELO 2 .....	49
5.2.1	Comparación solución analítica con los resultados de los software. ....	49
5.2.2	Tiempo de consolidación .....	51
5.3	ANÁLISIS MODELO 3 .....	53
5.3.1	Comparación solución analítica con los resultados de los software. ....	53
5.3.2	Tiempo de consolidación sin drenes.....	55
5.3.3	Tiempo de consolidación con drenes.....	57
6.	CONCLUSIONES .....	58
8.	CITAS BIBLIOGRAFICAS.....	61
	BIBLIOGRAFIA.....	63

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> <i>Consolidación de los suelos. [6]</i> .....	25
<b>FIGURA 2.</b> <i>Comportamiento de un suelo normalmente consolidado donde <math>P_o = P_c</math> [6]</i> .....	26
<b>FIGURA 3.</b> <i>Modelo ejercicio número 1</i> .....	31
<b>FIGURA 4.</b> <i>Propiedades de los suelos.</i> .....	32
<b>FIGURA 5.</b> <i>Capas de suelo.</i> .....	33
<b>FIGURA 6.</b> <i>Interfaz de grafica del modelo 1</i> .....	34
<b>FIGURA 7.</b> <i>Lista de materiales predefinidos.</i> .....	35
<b>FIGURA 8.</b> <i>Propiedades de los materiales.</i> .....	35
<b>FIGURA 9.</b> <i>Materiales y carga asignada al dibujo geométrico.</i> .....	36
<b>FIGURA 10.</b> <i>Malla bidimensional de elementos finitos.</i> .....	36
<b>FIGURA 11.</b> <i>Interfaz de cálculos.</i> .....	37
<b>FIGURA 12.</b> <i>Parámetros de la interfaz de fases.</i> .....	38
<b>FIGURA 13.</b> <i>Cálculos realizados y verificados por el programa plaxis.</i> .....	38
<b>FIGURA 14.</b> <i>Modelo ejercicio número 1 con drenes.</i> .....	40
<b>FIGURA 15.</b> <i>Condición drenada en settle 3D</i> .....	40
<b>FIGURA 16.</b> <i>Condición drenada en la interfaz de cálculos de plaxis.</i> .....	41
<b>FIGURA 17.</b> <i>Modelo ejercicio número 2</i> .....	42

<b>FIGURA 18.</b> <i>Modelo ejercicio número 3</i> .....	43
<b>FIGURA 19.</b> <i>Modelo ejercicio número 3 con drenes</i> .....	43
<b>FIGURA 20.</b> <i>Asentamiento por consolidación modelo 1</i> .....	44
<b>FIGURA 21.</b> <i>Asentamiento por consolidación modelo 2</i> .....	49
<b>FIGURA 22.</b> <i>Asentamiento por consolidación modelo 3</i> .....	53
<b>FIGURA 23.</b> <i>Análisis de asentamiento del terraplé-Metodo de Grifits</i> .....	54

## LISTA DE GRAFICOS

<b>Gráfico 1.</b> <i>Deformación con respecto al tiempo. [6]</i> .....	28
<b>Gráfico 2.</b> <i>Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	46
<b>Gráfico 3.</b> <i>Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	47
<b>Gráfico 4.</b> <i>Comparación del tiempo contra el asentamiento por consolidación con drenes en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	48
<b>Gráfico 5.</b> <i>Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	51
<b>Gráfico 6.</b> <i>Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	52
<b>Gráfico 7.</b> <i>Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	55
<b>Gráfico 8.</b> <i>Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	56
<b>Gráfico 9.</b> <i>Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.</i> .....	57

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Relación teórica <math>U\% - T</math> [6]</i> .....	27
Tabla 2. <i>Análisis teórico de los asentamientos por consolidación de la zapata.</i> ....	50
Tabla 3. <i>Análisis teórico de los asentamientos por consolidación del terraplén.</i> .....	54

## GLOSARIO

<b>Asentamientos</b>	Desplazamiento o deformación cuando actúa una carga vertical sobre la superficie del terreno.
<b>Consolidación</b>	Disipación de presión intersticial debido al flujo de agua hacia el exterior, proceso que tiene como consecuencias, reducción de volumen de poros y asentamientos, aumento de la presión efectiva y un incremento de la resistencia del suelo.
<b>Relación de vacíos</b>	Es la relación entre el volumen de vacíos y de sólidos.
<b>Permeabilidad</b>	Es la propiedad que tiene el suelo de permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna.
<b>Compresibilidad</b>	Es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga.

## RESUMEN

<b>Título</b>	ANÁLISIS DE LOS ASENTAMIENTOS POR CONSOLIDACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.*
<b>Autores</b>	César Giovanni Mojica Barreto Jhonatan Javier Ochoa Aldana **
<b>Palabras Clave</b>	Asentamientos, consolidación, Nivel freático, permeabilidad, compresibilidad, arcillas saturadas.

### ***Descripción:***

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de los asentamientos por consolidación entre software especializados en este campo, el cual presenta enormes dificultades que se centran en los modelos numéricos de mecánica de suelos con la definición de datos referentes a sus propiedades y comportamiento en el cual se tiene en cuenta la capacidad de simular problemas en condiciones reales que se presentan en proyectos de ingeniería referentes al campo de la geotecnia pues este fenómeno bajo la apariencia sólida y homogénea del suelo produce asentamientos prolongados a lo largo de mucho tiempo, desestabilización de los suelos, deformaciones profundas que hacen que su comportamiento sea algo difícil de predecir. Analizando algunos casos importantes de deformación asociada al nivel freático, incremento de esfuerzos con las propiedades que gobiernan el proceso, permeabilidad, módulo de compresibilidad mediante, índice de consolidación entre otros y el uso de las siguientes herramientas computacionales que son rocsience (settle 3D) y plaxis la presente tesis pretende destacar estas herramientas, en la cual se indica su potencial y la forma como se pueden obtener resultados óptimos partiendo de un modelaje aproximado a la realidad, que además de simular el análisis de asentamientos por consolidación que se presentan así mismo, se comparan estos resultados obtenidos mediante análisis teóricos, generando la mejor solución a estos casos.

---

\* Proyecto de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Wilfredo del Toro Rodríguez Ingeniero Civil. PhD– Profesor UIS

## ABSTRACT

**Title** Analysis of consolidation settlements through computer programs.

**Authors** César Giovanni Mojica Barreto  
Jhonatan Javier Ochoa Aldana \*\*

**Keywords** consolidation, settlements, phreatic zone, permeability, bulk modulus, saturated clays.

### Description:

This research aims to make a comparison of the settlement by consolidation between specialized software in this field, which shows relevant difficulties found on numerical models of soil mechanics to the definition of information on their properties and performance in which takes into consideration the ability of simulating problems in real conditions produced by engineering projects related to the field of geotechnical science due to this phenomenon under the solid and homogeneous appearance soil produces long settlement over a long time, destabilization of soils, deep deformations and damages that make their performance sometimes unpredictable. By analyzing some important cases of deformation associated with the water table, the increase of efforts with properties that manage the process, permeability, modulus of the property to compress by means of the consolidation ratio and so on, and the use of computational tools such as rocsience (settle 3D) and Plaxis. This thesis aims to highlight these tools, in which potential and shape shown how optimal results can be reached based on an approximate reality, that despite of simulating the analysis of settlements by consolidation presented; likewise these results are compared through theoretical analysis, generating the best solution for these cases.

---

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Wilfredo del Toro Rodríguez Ingeniero Civil. PhD– Profesor UIS

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día en el campo de la ingeniería civil se ha hecho indispensable tener conocimientos no solo en lo que se va a desarrollar como proyecto sino también en la forma como se tiene que hacer y los problemas que esto va a generar. Un punto importante es el manejo que se le da al uso de las herramientas computacionales para los asentamientos por consolidación que se producen al hacer construcciones civiles como terraplenes, cimentaciones o cuando simplemente la aplicación de cargas los produce sobre suelos que generalmente se encuentran saturados y en donde las arcillas están normalmente consolidadas, ya que uno de los mayores obstáculos que se encuentran en el campo de los modelos numéricos en la mecánica de suelos y rocas, es el problema de la definición de datos referentes a sus propiedades.

Debido a que estas propiedades dependen de los materiales del cual estén compuestos los suelos, de su permeabilidad y de las características de cada estrato de suelo, tiene que darse un manejo o tratamiento adecuado de tal forma que los resultados sean coherentes y se logre evaluar el problema de los asentamientos. En nuestro caso hablamos de asentamientos por consolidación primaria, asentamientos que ocurren por la compresión de los estratos del suelo debido a la deformación y a la expulsión del agua de los espacios vacíos, el cual depende del tiempo y son en gran porcentaje pieza importante en la ejecución de proyectos, o simplemente funcionamiento de cualquier infraestructura. A diferencia de los asentamientos inmediatos que se producen en el suelo, los asentamientos por consolidación son más complicados ya que estos presentan bajo su apariencia sólida y homogénea asentamientos prolongados a lo largo de mucho tiempo, desestabilización de los suelos, deformaciones muy profundas, estratificaciones que hacen del comportamiento mecánico del suelo algo que no sea lo esperado.

Los asentamientos por consolidación se ven afectados en gran parte por el drenaje del agua del estrato de la arcilla siendo este su principal agente por la baja permeabilidad que este estrato posee lo que hace que la deformación completa por consolidación dependa del tiempo. Para reducir este factor de tiempo en la consolidación se aplican métodos de drenaje para los estratos de arcillas, los cuales consisten en poner en todo el estrato de arcilla unos drenes de arena que van separados a una distancia generalmente de 10 diámetros, lo cual hace que se facilite la reducción del tiempo de los asentamientos por consolidación en los proyectos de ingeniería ya que este tiempo incrementa los costos en los proyectos.

En las arenas los asentamientos se produce simultáneamente con el asentamiento inmediato que se produce en este estrato al aplicar cualquier carga, Esto se debe a la alta permeabilidad que tiene la arena, por consiguiente el análisis de asentamiento en arenas no se realiza con estos suelos aunque estén parcialmente saturado.

En busca de soluciones seguras y asequibles en materia de asentamientos, los programas Rocscience y Plaxis nos proporcionan un amplio rango de interpretación de datos y opciones de modelado, teniendo las capacidades de simular condiciones reales que se presentan en campo, predecir los comportamientos estructurales del suelo y establecer las necesidades o condiciones necesarias para obtener un factor de seguridad aceptable.

Es por esto que así como se avanza en nuevas estrategias de avance en proyecto, se innova en tecnología haciendo uso de la computación, hallando nuevas herramientas que permitan modelar problemas de la realidad, produciendo soluciones que se traducen en reducciones en costos y tiempos de ejecución.

## 1. JUSTIFICACIÓN

Uno de los mayores obstáculos que se encuentran en el campo de los modelos numéricos en la mecánica de suelos y rocas, es el problema de la definición de datos referentes a sus propiedades.

En busca de generar soluciones, se hace uso de la herramienta computacional. El software rociense es un avance tecnológico, el cual aparece luego de varios años de experiencia, convirtiéndolo en una de las herramientas más actuales y al parecer más precisas al momento de realizar proyectos de ingeniería referentes al campo de la geotecnia. En busca de soluciones seguras y asequibles en materia de asentamientos, este software nos proporciona un amplio rango de interpretación de datos y opciones de modelado teniendo la capacidad de simular condiciones reales que se presentan en campo, predecir el comportamiento estructural del suelo y establecer las necesidades o condiciones necesarias para obtener un factor de seguridad aceptable.

Este software está compuesto por varios programas que modelan diferentes situaciones o problemas, en nuestro caso haremos uso solamente de la herramienta Settle, 3D, la cual se enfoca a problemas y análisis de asentamientos por consolidación.

Sabiendo esto es necesario darle solución a estos problemas procurando tenerlos dentro de lo presupuestado en el proceso de análisis evitando que se generen en algún momento de la ejecución. Es por esto que así como se avanza en nuevas estrategias de avance en proyecto se innova en tecnología haciendo uso de la computación, hallando nuevas herramientas que permitan modelar problemas de la realidad, produciendo soluciones que se traducen en reducciones en costos y tiempos de ejecución

Este proyecto pretende destacar una de las nuevas herramientas de la ingeniería civil enfocada en el campo de la geotecnia, así mismo indicar su potencial y la forma como se pueden obtener resultados óptimos partiendo de un buen modelaje, que además de simular de manera muy aproximada el análisis de asentamientos que en la realidad se presenta, nos genere la mejor solución.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

Estudio comparativo de asentamientos por consolidación utilizando herramientas computacionales

### 2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Conocimiento del programa e identificación del proceso.
- ✓ Analizar los datos de campo de un caso práctico para la aplicación del módulo.
- ✓ Hacer el modelamiento del problema.
- ✓ Comparar resultados del programa con resultados teóricos.

### 3. MARCO REFERENCIAL

Las sobrecargas de las estructuras cimentadas en suelos finos saturados inducen la consolidación de estos. Se entiende por consolidación al proceso gradual mediante el cual el exceso de presión hidrostática debido a un incremento de carga se va convirtiendo en esfuerzos inter-granulares, a consecuencia del escape de fluidos de los poros del suelo.

La consolidación se divide en dos fases, la primera es la consolidación primaria que se genera por un exceso de la presión de poros que ejerce el agua la cual requiere de tiempos relativamente grandes para su disipación y desalajo retardando el proceso de deformación del suelo. Y la segunda fase es la consolidación secundaria que se presenta cuando existe un deslizamiento relativo entre las láminas arcillosas, este fenómeno se denomina viscosidad inter-granular y tiene importancia, sobre todo, cuando el subsuelo se encuentra altamente estratificado con intercalaciones de material permeable, ya que la consolidación primaria se presenta rápidamente. Cabe señalar que durante este proceso el suelo continua expulsando agua, pero en cantidad mucho menor que durante el proceso anterior.

La teoría de consolidación encontrada por Terzaghi (1925) que se expone a continuación explica exclusivamente el fenómeno hidrodinámico que se verifica para la expulsión del agua gravitacional de un material en el cual no se observa el fenómeno de viscosidad intergranular.

#### 3.1 MODELO DE TERZAGHI

La teoría de la consolidación tiene por objeto encontrar una fórmula que ligue las condiciones “esfuerzo – cambio de oquedad” en cualquier punto dentro de un suelo saturado en un tiempo determinado durante el cual el suelo se encuentra sometido a una carga sostenida.

Debido a lo complejo del problema es necesario hacer hipótesis simplificadoras obteniéndose soluciones para casos simples y bien definidos

Las hipótesis para el desarrollo de la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi son [1]:

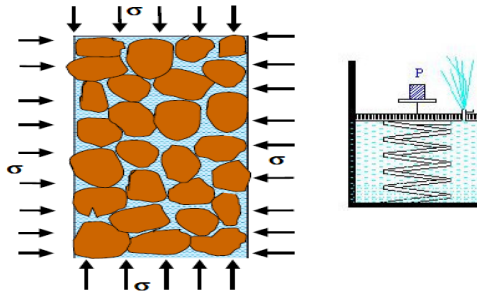
- La masa del suelo es homogénea e isotrópica en sentido vertical en toda su extensión.
- Los estratos de suelo en el campo se encuentran confinados lateralmente.
- El agua y los granos que forman el suelo son incompresibles.
- El agua que se expulsa es exclusivamente agua gravitacional, y por lo tanto se puede suponer válida la ley de Darcy.
- El cambio de oquedad tiende a un valor límite.
- Existe una relación lineal entre la presión aplicada y el cambio de volumen.
- El coeficiente de permeabilidad es constante.
- Las muestras son inalteradas.

Para explicar la teoría de la consolidación se hará uso de un modelo reológico que cumpla con la hipótesis antes mencionadas.

Sea un dispositivo en un cilindro y un pistón, la cavidad del cilindro representa los poros del material. Dentro de la cavidad se coloca un elemento resistente capaz de admitir esfuerzos y el cual representa la estructura del suelo. La llave representa la permeabilidad de suelo, ya que al cerrarla o abrirla se puede controlar la permeabilidad de la cámara.

Imaginemos ahora que la llave se encuentra abierta y el resorte completamente cargado. Evidentemente la carga será tomada íntegramente por el elemento resistente, por consiguiente, el agua dentro del piezómetro lateral instalado en el cilindro estará por el efecto de vasos comunicantes en posición más arriba. No obstante aún, si estas condiciones se abren o cierra la llave el estado de carga en la cámara no se altera.

**FIGURA 1.** Consolidación de los suelos. [6]



Si ahora como en la **figura 1** se aplica un incremento de carga y se abre un poco la llave de inmediato el agua comenzara a fluir forzada por el incremento de la presión hidráulica desarrollada en el interior de la cámara por lo que habrá una disminución de la oquedad y una deformación de resorte o estructura del suelo.

La estructura del suelo empezara a tomar la carga a medida que la presión hidráulica provocada por el esfuerzo ejercido disminuya con el tiempo, hasta llegar un momento en el cual ya no salga más el agua y la carga sea tomada en su totalidad por el elemento resistente.

Matemáticamente:  $\sigma = \sigma' + u$  [1]

Donde  $\sigma'$  es la presión vertical efectiva en el elemento y  $u$  la presión hidrostática.

La disipación del exceso de presión intersticial en cualquier punto solo se producirá mediante el flujo de agua en sentido vertical ascendente hacia la superficie ya que el gradiente hidráulico únicamente se presenta en dirección vertical. Como resultado se producirán deformaciones en la dirección vertical.

### 3.2 ASENTAMIENTO POR CONSOLIDACIÓN PRIMARIA

La deformación o asentamiento por consolidación para suelos normalmente consolidados se rige a partir de la expresión [16]:

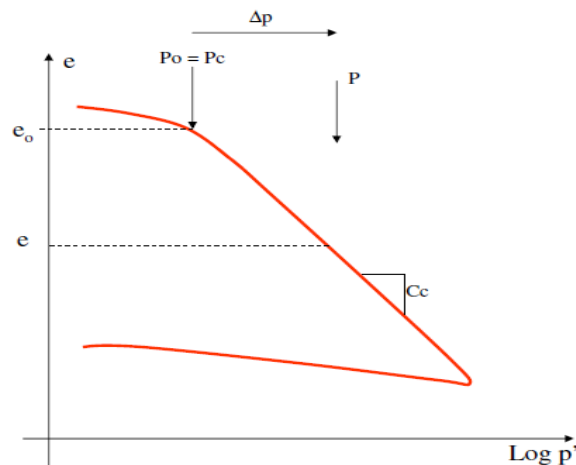
$$\delta = \frac{H}{(1 + e_o)} \left[ Cc \cdot \text{Log} \left( \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) \right]$$

Para llegar a ella se parte de

$$\delta = \frac{H \Delta e}{1 + e_o}$$

Donde  $\Delta e$  es la variación de la relación de vacíos,  $Cc$  indica la pendiente de la compresión de la **figura 2**.

**FIGURA 2.** Comportamiento de un suelo normalmente consolidado donde  $P_o = P_c$  [6]



o sea,

$$\Delta e = Cc \cdot \text{Log} \left( \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right)$$

### 3.3 ECUACIONES QUE RIGEN EL PROCESO DE CONSOLIDACIÓN

Analizando el flujo del agua en el elemento de la figura anterior, se llega a la siguiente ecuación para el coeficiente de consolidación que es

$$Cv = \frac{T \cdot H^2}{t} \text{ [cm}^2/\text{seg]} \text{ el parámetro que liga la compresión con el tiempo [16]}$$

Dónde:

$Cv$ : Coeficiente de consolidación de suelos.

t: tiempo teórico de consolidación.  
 T: Factor tiempo.  
 H: máxima distancia de drenaje.

La siguiente relación teórica vincula los tiempos de consolidación a través de un factor tiempo T con el porcentaje de consolidación %U

**Tabla 1.** Relación teórica U% - T [6]

U%	T
0	0.000
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.405
80	0.565
90	0.848

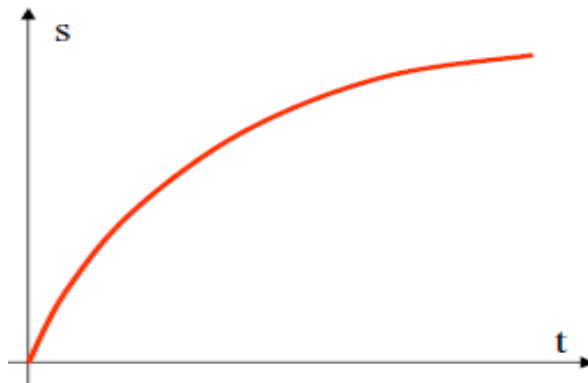
Procedimiento,

- Se calcula el asentamiento [16]

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

- Se determina el coeficiente de consolidación con datos suministrados, por los ensayos de laboratorio.
- Se le dan valores a %U y con el correspondiente valor de T se obtiene el tiempo t en el que se produce el asentamiento, luego se calcula el valor del asentamiento  $\delta_{(t)} = \%U \cdot \frac{\delta_{total}}{100}$ , donde se va a observar un comportamiento como el que se observa en el **Grafico 1**.

**Gráfico 1.** Deformación con respecto al tiempo. [6]



### 3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS SOFTWARE

Para los análisis de los asentamientos por consolidación se emplearon dos herramientas computacionales que son Rocscience (settle 3D) y Plaxis para cada problema a simular y aparte cada modelo se analizó teóricamente.

Se emplearon estos dos programas debido a que son dos plataformas con licencias originales adquiridas por la Universidad Industrial de Santander y en virtud a ello se estudiaron los asentamientos por consolidación para ver el potencial de estos programas con lo que respecta al estudio de esta tesis.

Rocscience es un software de avance tecnológico, el cual aparece luego de varios años de experiencia, convirtiéndolo en una de las herramientas más actuales y al parecer más adecuadas al momento de realizar proyectos de ingeniería referentes al campo de la geotecnia. Y Plaxis es una herramienta computacional con muchos años de experiencia en la labor con lo que respecta a la simulación de diseños, modelos y problemas que se presentan en la ingeniería geotécnica y por la cual siempre está en pos de mejorar cada día para la obtención de mejores resultados y así garantizar soluciones seguras y asequibles.

**3.4.1 Características del software Rocscience (Settle 3D).** Settle es un software de la plataforma Rocscience especializada en el análisis de asentamientos de suelos bajo cargas superficiales como terraplenes, fundaciones

y excavaciones, también combina el análisis de esfuerzos unidimensional con la visualización en 3D.

Este software puede recrear rápidamente perfiles complejos de suelo y sus condiciones de carga permitiendo ver los resultados en 3-dimensiones. El modelo a realizar puede ser desarrollado por etapas y el análisis de la consolidación la cual depende del tiempo, puede realizarse incluyendo la consolidación primaria y secundaria en intervalos de tiempo los cuales son definidos por el usuario. El nivel de agua subterránea se puede especificar con una línea piezométrica.

El perfil de suelo a modelar se define en el programa con índices que caracterizan su comportamiento como el índice de compresión (Cc), índice de recompresión (Cr), relación de vacíos (eo), módulo de elasticidad (E), permeabilidad (K) y pesos específicos.

También permite analizar cargas circulares, rectangulares, cargas uniformes y de magnitud variable, estas cargas se pueden aplicar a cualquier profundidad. La distribución de tensiones puede ser analizada por diferentes métodos de cálculo de esfuerzos como Bussinesq, Capa múltiple, relación vertical (2:1), relación vertical en cualquier ángulo [4]. La plataforma del programa es muy interactiva y fácil de usar, los gráficos se actualizan en tiempo real y los resultados se pueden exportar a Excel.

Settle3D calcula esfuerzos tridimensionales debido a las cargas de superficie. Sin embargo, los desplazamientos o asentamientos y presiones de poro se calculan en una sola dimensión, asumiendo sólo los desplazamientos verticales que pueden ocurrir.

**3.4.2 Características del software Plaxis.** Plaxis es un programa el cual está diseñado para simular problemas geotécnicos bidimensionales con lo que respecta a deformaciones y estabilidad de los suelos. Esta herramienta computacional emplea el método numérico de elementos finitos para la solución de los problemas a desarrollar, además plaxis utiliza una interfaz de usuario muy gráfica la cual permite realizar rápidamente la geometría de los problemas. Al realizar estas geometrías de los problemas y asignar las respectivas propiedades

de los suelos y condiciones de borde, plaxis permite generar fácilmente una malla de elementos finitos para la sección transversal del suelo del problema dibujado en la interfaz.

Esta malla consiste en dividir en múltiples partes geométricas la estructura del problema dibujado sin modificar sus propiedades, ni su geometría, haciendo que las múltiples partes geométricas que se generan se conviertan en elementos los cuales van conectados entre sí mediante puntos llamados nodos.

Este programa permite simular con facilidad una gran variedad de problemas geotécnicos en condiciones muy similares a las condiciones reales que se presentan en el campo laboral debido a que su interfaz de usuario es muy gráfica y fácil de manejar, aparte también posee una gran variedad de parámetros de los materiales ya definidas la cual permite cambiar y asignar los valores correspondientes que se encuentran en campo, asignándolos así a los diferentes estratos de suelo que hay en el problema. En el caso de la arcilla, algunos de estos parámetros son el Gama saturado ( $\gamma_{sat}$ ), la relación de vacíos ( $e$ ), el índice de compresión ( $C_c$ ), el índice de expansión ( $C_s$ ), permeabilidad ( $k$ ), el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la cohesión ( $C'$ ). Facilitando así una interpretación más real de los resultados que el software ofrece.

Para el cálculo de los resultados, plaxis divide el problema en varias fases que el usuario define de acuerdo a los resultados que se desean obtener. En estas fases se define el nivel freático, el análisis plástico del terreno, la carga aplicada al terreno, la construcción de un terraplén, la construcción de una zapata, la presión de poros, el análisis por consolidación, la mínima presión de poros que se desea obtener para la consolidación entre otros.

Estas fases se explicaran en uno de los modelos que se trabajó para la presente tesis y los cuales se tuvieron en cuenta para el resto de los modelos a analizar.

## 4. DISEÑO METODOLOGICO

Para realizar la comparación de los análisis de asentamientos por consolidación realizados por los dos software y por la parte teórica se modelaron tres tipos de problemas, en donde los casos uno y tres se analizaron sin drenes y con drenes, para así obtener un análisis de la reducción del tiempo en la consolidación, y el problema numero dos no tendrá drenes debido a que el modelo a simular es una cimentación.

Se realiza el modelamiento paso a paso de uno de los problemas a simular a través de los dos software empleados con su respectiva solución teórica, debido a que los demás problemas se simulan de manera muy similar a este primero.

### 4.1 MODELO 1: CARGA DISTRIBUIDA INFINITA

**4.1.1 Sin drenes.** Se considera el siguiente ejemplo de la ingeniería geotécnica para un perfil de suelo que se compone de dos materiales diferentes, arcilla normalmente consolidada y arena, con una carga uniformemente distribuida infinita en la parte superior de ellos, los datos del problema son:

Carga = 87 KN/m<sup>2</sup>

Arena:

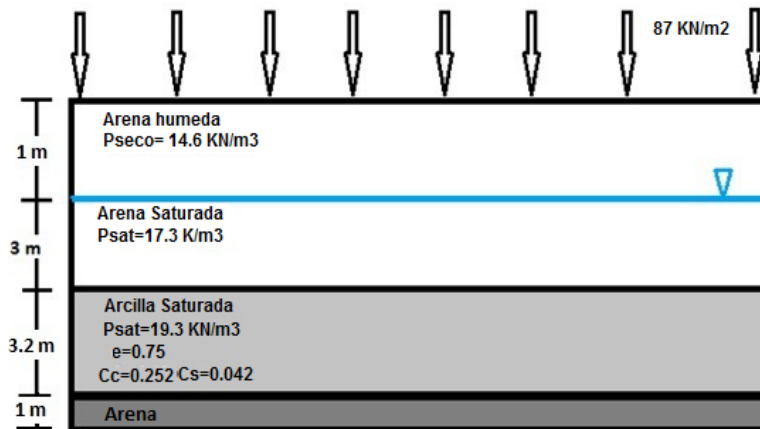
$\gamma_{\text{humedo}} = 16.4 \text{ KN/m}^3$ ,  $\gamma_{\text{sat}} = 17.3 \text{ KN/m}^3$ ,  $E = 33000 \text{ KN/m}^2$ ,  $e = 0.5$ ,  $C' = 25 \text{ KN/m}^2$ .

Arcilla:

$\gamma_{\text{sat}} = 19.3 \text{ KN/m}^3$ ,  $e = 0.75$ ,  $C_c = 0.252$ ,  $C_s = 0.042$ ,  $C' = 1 \text{ KN/m}^2$ .

La geometría del modelo del problema es el que se observa en la **Figura 3**.

**FIGURA 3.** Modelo ejercicio número 1



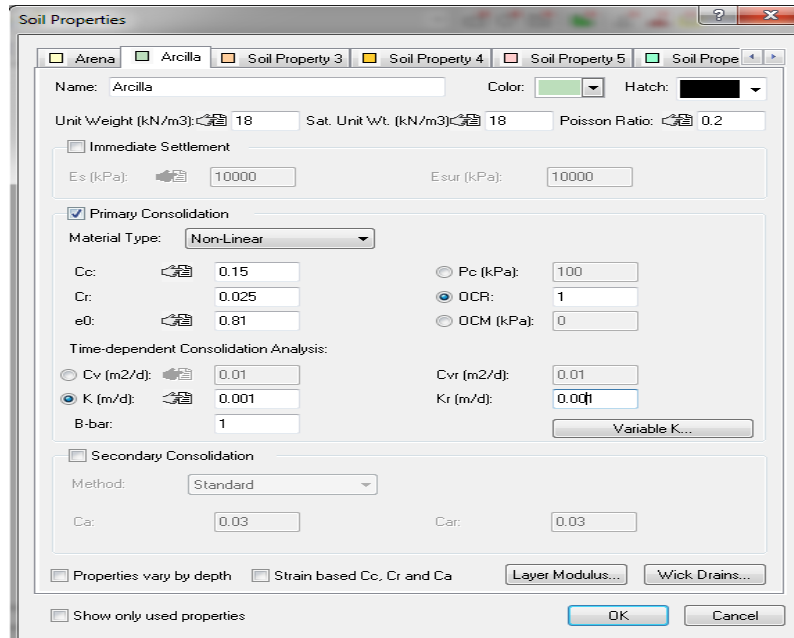
**4.1.1.1 Modelamiento en SETTLE 3D.** Se introducen las propiedades del suelo en el cuadro de diálogo PROPIEDADES DE SUELO para cada material.

Se introduce el nombre del suelo y la unidad de peso.

Se activa la casilla de verificación para habilitar la entrada de los coeficientes de consolidación  $C_c$ , de recompresión  $C_r$ , relación de vacíos  $e_o$ , y OCR. Si no se activa ninguna casilla no se computara el análisis para este material como por ejemplo para la arena que necesita análisis de consolidación, solo se emplea para la arcilla.

Se introducen los módulos de elasticidad de cada material para utilizar el método de cálculo de la tensión de capa múltiple que tiene en cuenta las diferencias de rigidez de los materiales.

**FIGURA 4.** *Propiedades de los suelos.*

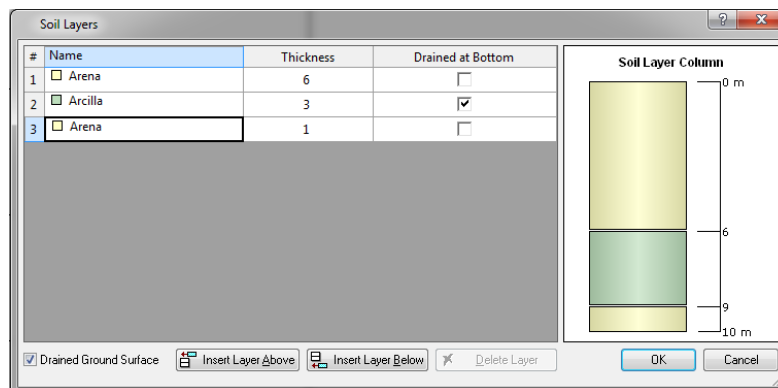


**Soil Properties**  
 Name: Arcilla    Color: [Green]    Hatch: [Black]  
 Unit Weight (kN/m<sup>3</sup>): 18    Sat. Unit Wt. (kN/m<sup>3</sup>): 18    Poisson Ratio: 0.2  
 Immediate Settlement  
 Es (kPa): 10000    Esur (kPa): 10000  
 Primary Consolidation  
 Material Type: Non-Linear  
 Cc: 0.15    Pc (kPa): 100  
 Cr: 0.025    OCR: 1  
 e0: 0.81    OCM (kPa): 0  
 Time-dependent Consolidation Analysis:  
 Cv (m<sup>2</sup>/d): 0.01    Cvr (m<sup>2</sup>/d): 0.01  
 K (m/d): 0.001    Kr (m/d): 0.001  
 B-bar: 1    Variable K...  
 Secondary Consolidation  
 Method: Standard  
 Ca: 0.03    Car: 0.03  
 Properties vary by depth     Strain based Cc, Cr and Ca    Layer Modulus...    Wick Drains...  
 Show only used properties    OK    Cancel

Luego de que las propiedades del suelo se han definido se asignan los espesores a los estratos del suelo del modelo y se activa la casilla de verificación de doble drenaje para la arcilla en el cuadro de dialogo de capas de suelo.

La opción de capas de suelo se utiliza para definir la secuencia de capas de suelo (**Figura 5**) que componen el perfil, el espesor de cada capa, y las condiciones de drenaje en la parte inferior de cada capa

**FIGURA 5.** Capas de suelo.



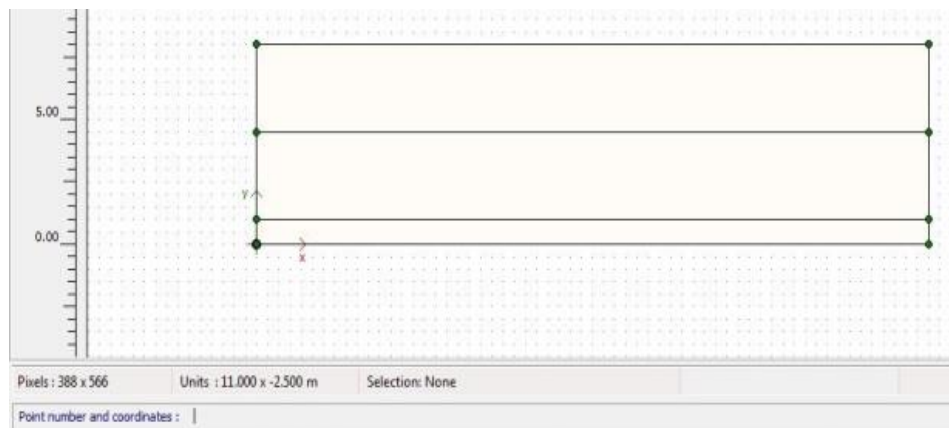
#	Name	Thickness	Drained at Bottom
1	Arena	6	<input type="checkbox"/>
2	Arcilla	3	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Arena	1	<input type="checkbox"/>

Soil Layer Column  
 0 m  
 6  
 9  
 10 m  
 D drained Ground Surface    Insert Layer Above    Insert Layer Below    Delete Layer    OK    Cancel

A continuación se define la carga, para este caso se optó por una carga rectangular de 87 KN/m<sup>2</sup> y con dimensiones 90x90 m con el fin de que se comportara como una carga semi-infinita, ya que el software trabaja en 3D y es necesario definir todas ellas.

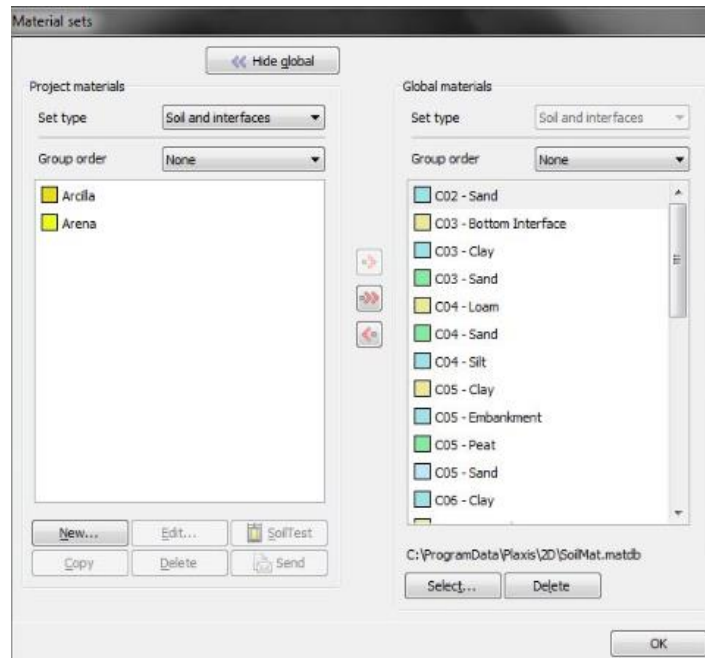
**4.1.1.2 Modelamiento en Plaxis.** El modelamiento en plaxis se inicia con la definición de los parámetros y propiedades del proyecto en el que se define las unidades y el espaciamento de la grilla de la interfaz de usuario, luego se trabaja con la interfaz gráfica del programa dibujando el problema a analizar.

**FIGURA 6.** *Interfaz de grafica del modelo 1*



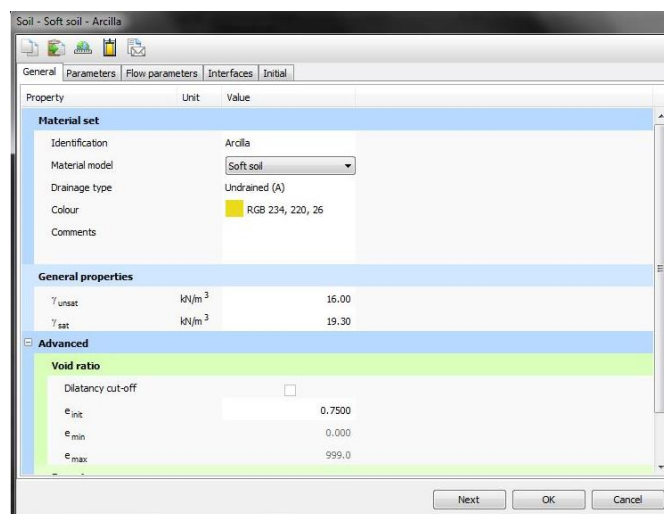
Luego de realizar la geometría del problema (**Figura 6**) se procede a definir los valores correspondientes a las propiedades de los materiales de los estratos del suelo los cuales algunos de estos materiales se encuentran predefinidos en el programa.

**FIGURA 7.** Lista de materiales predefinidos.



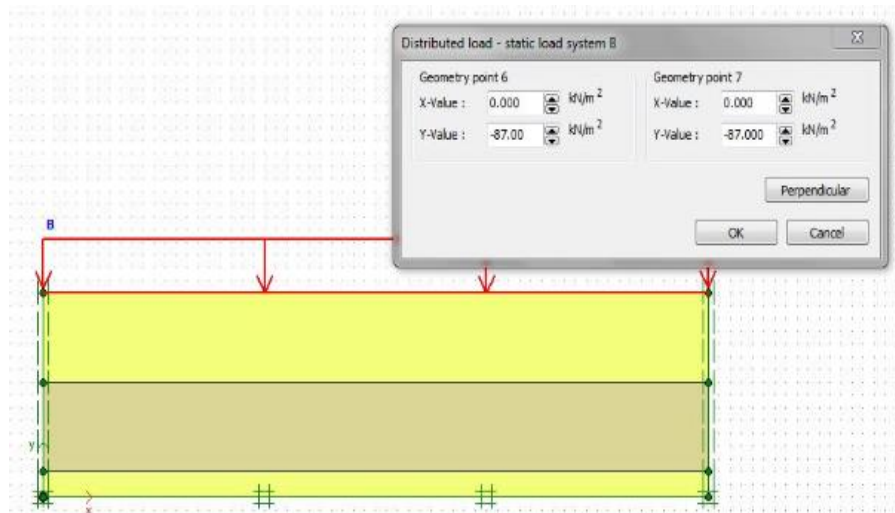
Después se asignan los valores a los materiales correspondientes que se encuentran en campo que son obtenidos en los laboratorios como los gamas saturados y húmedos, la relación de vacíos ( $e$ ), el índice de compresión ( $C_c$ ), el índice de expansión ( $C_s$ ), permeabilidad ( $k$ ), el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la cohesión ( $C'$ ).

**FIGURA 8.** Propiedades de los materiales.



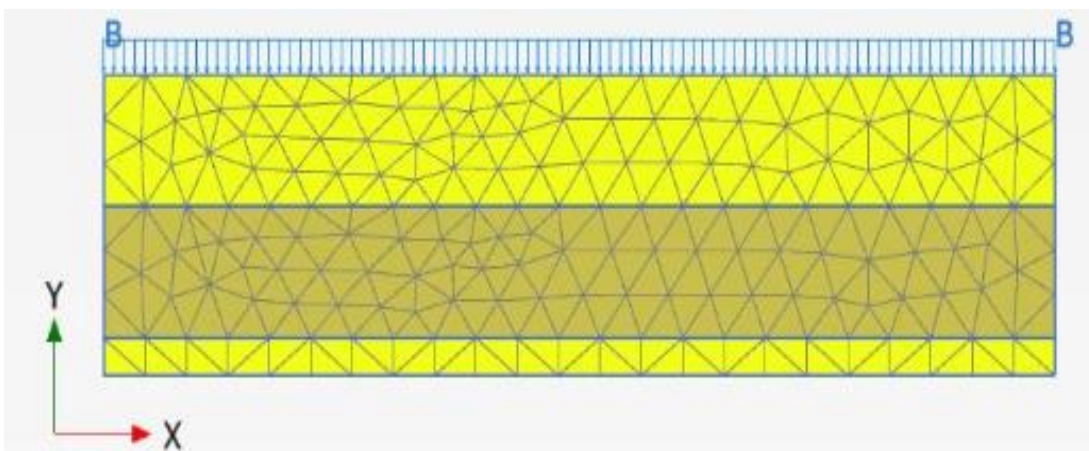
Al realizar estos cambios en los materiales, se procede a asignar el material a los estratos de suelo dibujados en la interfaz gráfica por el usuario y también se procede a asignar el respectivo valor de la carga que se le aplica al problema para su análisis.

**FIGURA 9.** *Materiales y carga asignada al dibujo geométrico.*



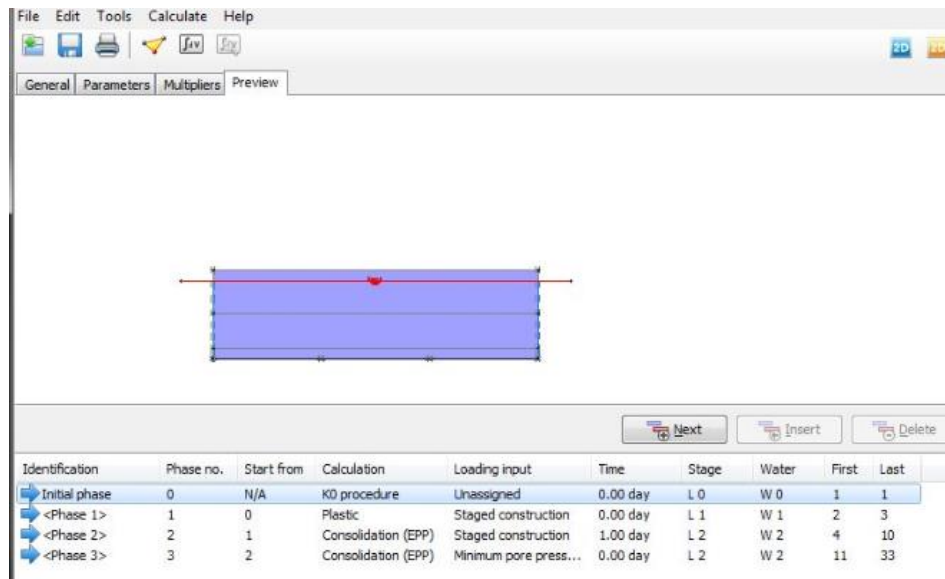
Luego de tener la carga asignada en la interfaz gráfica y haber asignado las propiedades de los materiales se procede a poner las condiciones de contorno y generar la malla de elementos finitos.

**FIGURA 10.** *Malla bidimensional de elementos finitos.*



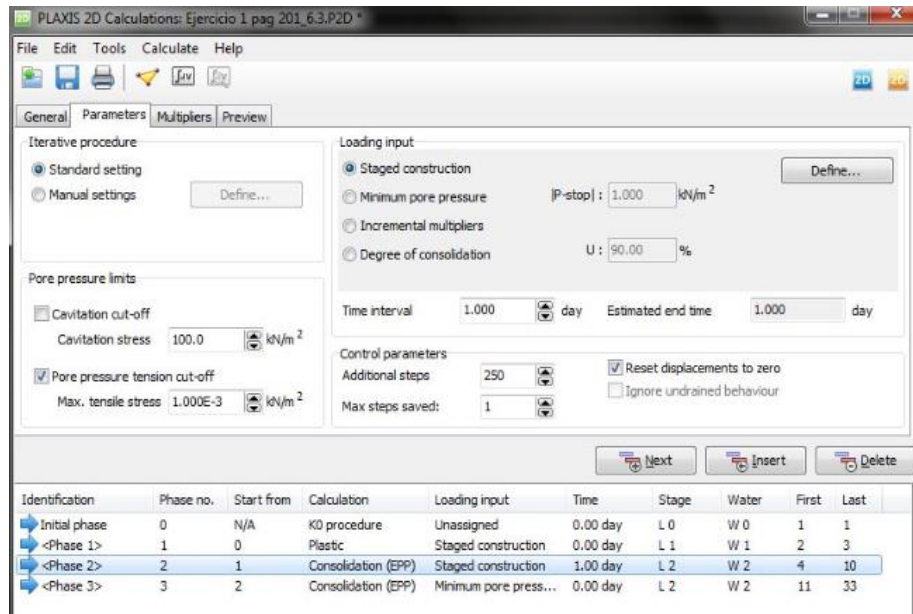
Al terminar de generar la malla y para poder hacer los cálculos respectivos plaxis deja la interfaz gráfica para darle paso a una nueva interfaz en la que se crean fases para la simulación del ejercicio.

**FIGURA 11.** *Interfaz de cálculos.*



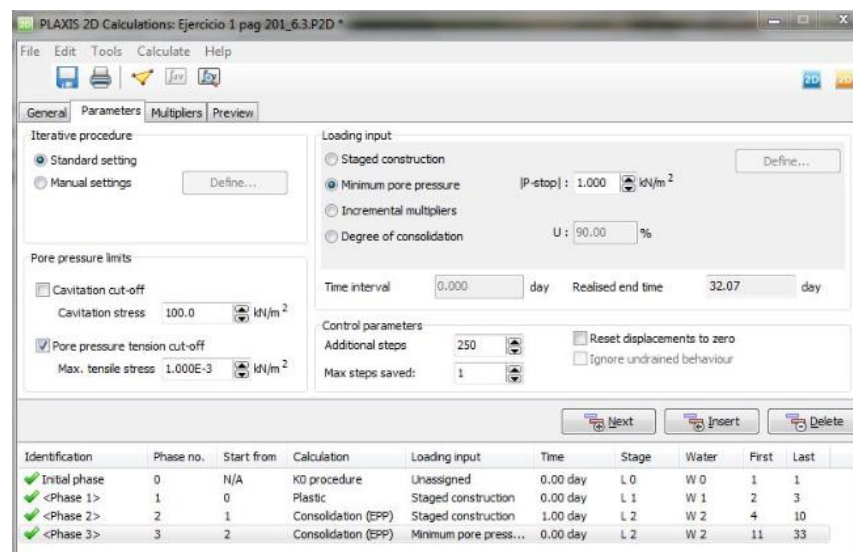
En la interfaz de cálculos se generaron cuatro fases, en las cuales se definieron el nivel freático, la presión de poros, las condiciones inicial y plástica del suelo, la carga a aplicar, la condición de análisis de consolidación para que la presión de poros sea la mínima. Cabe resaltar que al iniciar una nueva fase hay que resetear a cero los desplazamientos de las antiguas fases debido a que el análisis de las fases es consecutivo, es decir, al finalizar una fase inmediatamente inicia el análisis de la siguiente fase, y con eso se satisface que el asentamiento por consolidación no se vea afectado por los asentamientos inmediatos de la estructura del suelo.

**FIGURA 12.** *Parámetros de la interfaz de fases.*



Luego de definir los parámetros de cada fase a analizar, se corre el programa para realizar los cálculos respectivos, y este a su vez indica con una flecha de color verde si el análisis en la respectiva fase quedó bien analizado, es decir si los parámetros asignados cumplen y si se puede continuar con el análisis de la siguiente fase.

**FIGURA 13.** *Cálculos realizados y verificados por el programa plaxis.*



Luego de realizar los cálculos respectivos en el programa, se procede a la interpretación y análisis de los resultados que el programa ha dado.

**4.1.1.3 Análisis teórico.** Para el análisis teórico de los asentamientos por consolidación de cada uno de los modelos partiremos de la siguiente ecuación general [16]

$$S_c = \frac{(C_c)(H)}{1 + e_o} \log\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right)$$

Donde,

$S_c$  = Asentamiento.

$C_c$  = Índice de Compresión.

$e_o$  = relación de vacíos.

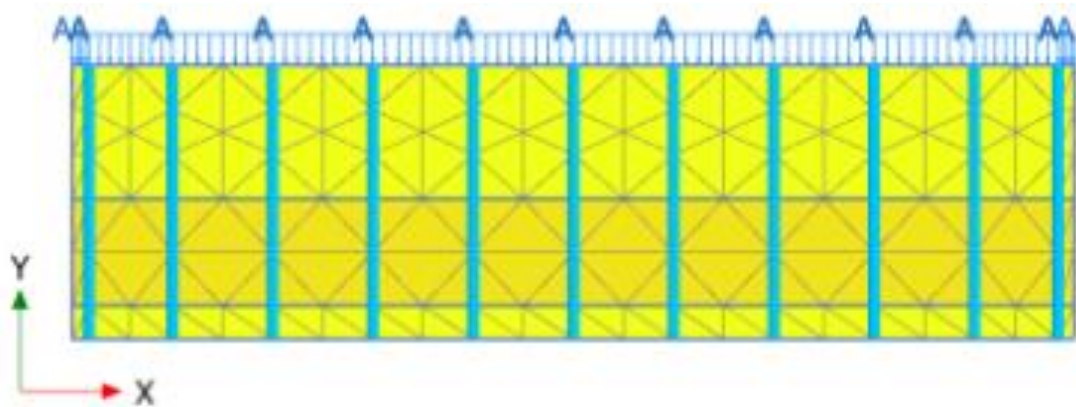
$P_o$  = Presión efectiva inicial.

$\Delta P$  = Incremento de presión.

**4.1.2 Con drenes.** En este caso se incluyeron drenes de arena, con diámetros de 0.30 m y con una separación aproximada de 3 metros entre los drenes. Para la simulación de este problema, estos drenes se implementaron en todo el estrato del suelo para así drenar el agua que se encuentra dentro del estrato de la arcilla y así reducir el tiempo de su consolidación.

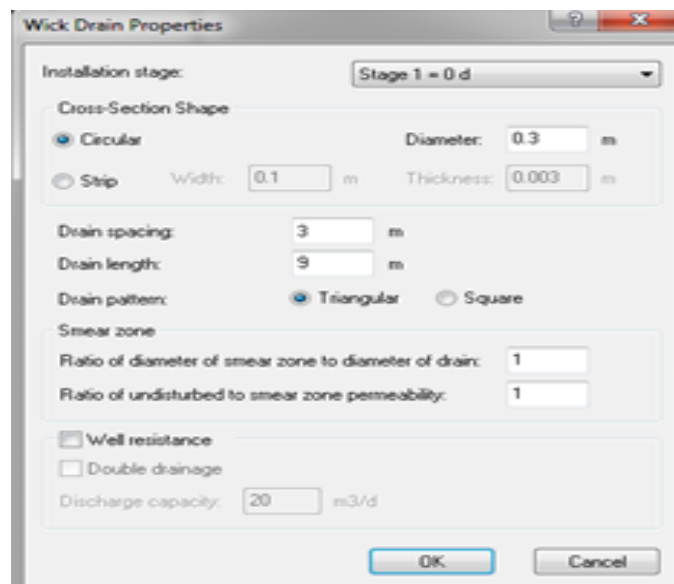
Teóricamente se analiza solamente la gráfica del tiempo contra el asentamiento por consolidación total con su respectivo grado de consolidación ya que la deformación seguirá siendo la misma.

**FIGURA 14.** Modelo ejercicio número 1 con drenes.



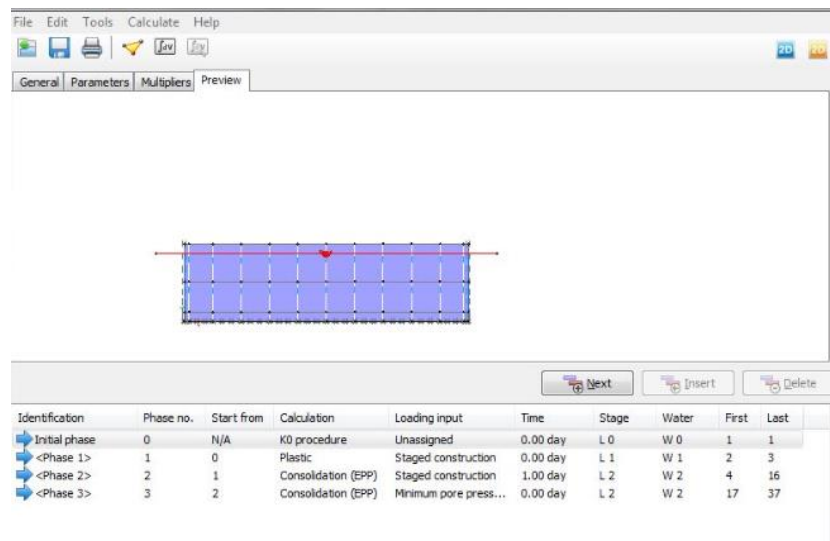
**4.1.2.1 Modelamiento en SETTLE 3D.** Para settle 3D se analiza la consolidación dependiente en el tiempo cuando tenemos drenes, para esto se debe especificar el diámetro de los drenes, el espaciamiento, la profundidad y la relación entre la permeabilidad horizontal y la vertical  $K_h/K_v$ .

**FIGURA 15.** Condición drenada en settle 3D



**4.1.2.2 Modelamiento en Plaxis.** Para plaxis, este modelamiento se realiza dibujando los drenes en la interfaz gráfica con su respectiva separación. En plaxis no es necesario asignarle el diámetro de los drenes debido a que programa es una plataforma bidimensional y por ende estas propiedades de los drenes ya las trae por defecto, lo que hace ver que la afectación del tiempo de consolidación se debe a la separación de los drenes mas no por su diámetro.

**FIGURA 16.** Condición drenada en la interfaz de cálculos de plaxis.



Para la fase de los cálculos se activan los drenes en la fase inicial del análisis plástico del suelo y las demás quedarán activados debido a que son secuenciales y por esto las otras fases se realizan igual al modelo sin drenes.

## 4.2 MODELO 2: CIMENTACIÓN SUPERFICIAL AISLADA

Asentamiento por consolidación del estrato de arcilla de 3 m de espesor que resulta de la carga tomada por una zapata cuadrada de 1.5 m. La arcilla es normalmente consolidada [4], los datos del problema a simular son:

Zapata:

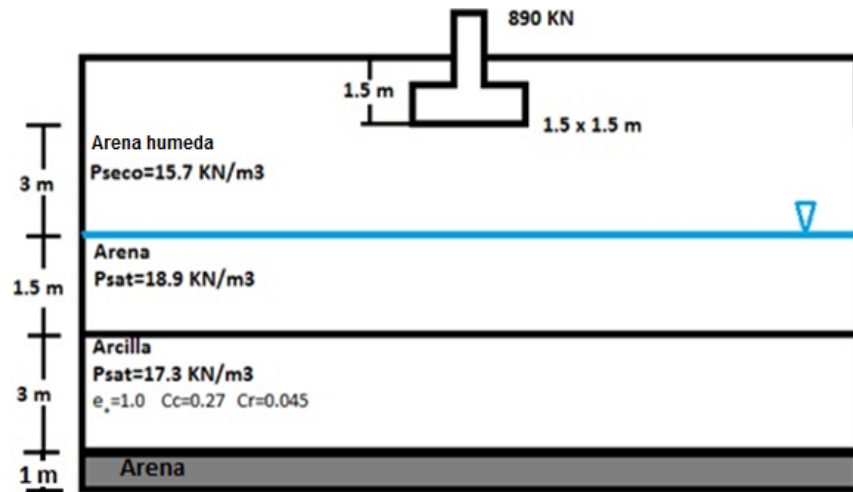
Dimensiones de 1.5 m X 1.5 m, profundidad: 1.5 m, carga puntual: 890 KN

Arena:

$\gamma_{\text{humedo}} = 15.7 \text{ KN/m}^3$ ,  $\gamma_{\text{sat}} = 18.9 \text{ KN/m}^3$ ,  $E = 30000 \text{ KN/m}^2$ ,  $e = 0.5$ .

Arcilla:  
 $\gamma_{sat} = 17.3 \text{ KN/m}^3$ ,  $e = 1.0$ ,  $C_c = 0.27$ ,  $C_s = 0.045$ .

**FIGURA 17.** Modelo ejercicio número 2



### 4.3 MODELO 3: TERRAPLÉN SOBRE SUELO COMPRESIBLE

**4.3.1 Sin drenes.** Un suelo de 2 capas bajo un terraplén de 4 m de altura y 22 metros de base, para una carretera, que se aplica en la parte superior de los estratos de suelo.

Datos:

Terraplén:

Peso:  $20 \text{ KN/m}^3$ ,  $e = 0$ ,  $C' = 10 \text{ KN/m}^2$ ,  $\Phi = 35^\circ$ , altura = 4 m.

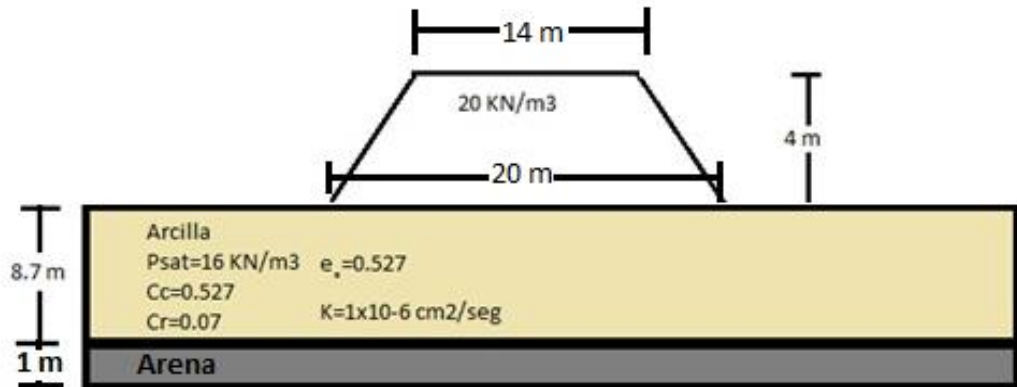
Arcilla:

$\gamma_{sec} = 16 \text{ KN/m}^3$ ,  $\gamma_{sat} = 16 \text{ KN/m}^3$ ,  $e = 0.527$ ,  $C' = 29$ ,  $\Phi = 2^\circ$ ,  $K = 0.864 \text{ E-}3 \text{ m/día}$ .

Arena:

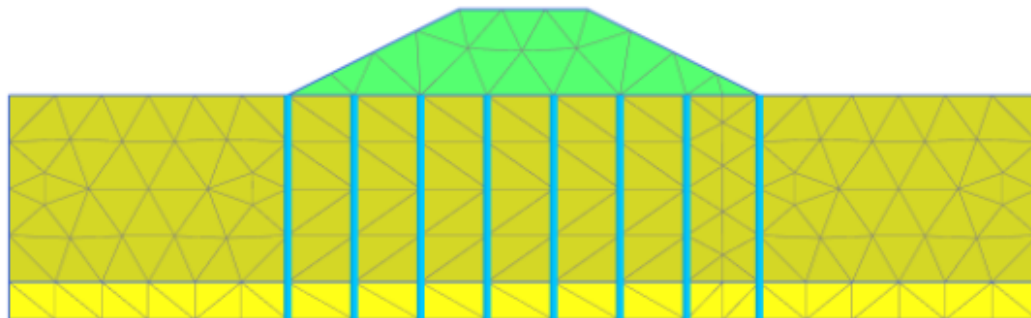
$\gamma = 18 \text{ KN/m}^3$ ,  $\gamma_{sat} = 18 \text{ KN/m}^3$ ,  $e = 0.5$ ,  $E = 30000 \text{ KN/m}^2$ ,  $K_x = K_y = 7.128 \text{ m/día}$ ,  $C' = 2 \text{ KN/m}^2$ ,  $\Phi = 32^\circ$ .

**FIGURA 18.** Modelo ejercicio número 3



**4.3.2 Con drenes.** En este problema se pondrán los drenes solamente debajo del terraplén con una separación aproximada de 3 metros y un diámetro de 0.3 m.

**FIGURA 19.** Modelo ejercicio número 3 con drenes



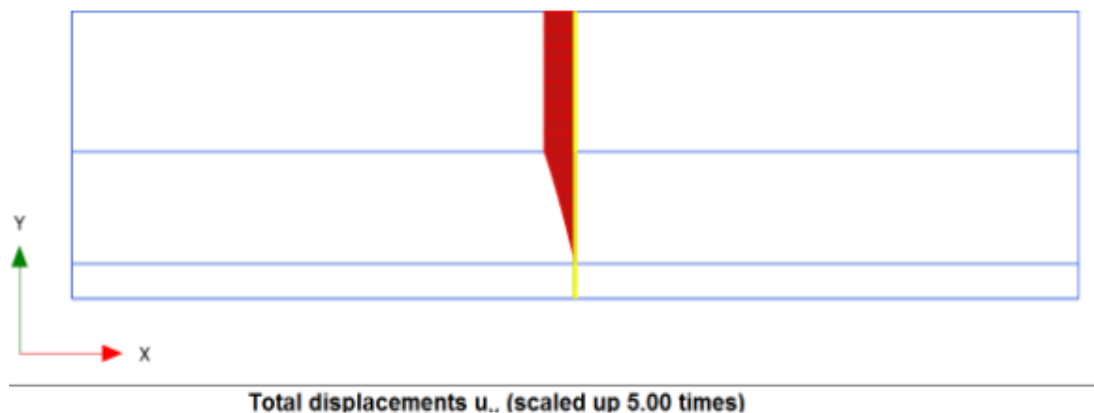
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se compararon y analizaron los datos obtenidos de los modelos mediante los dos software y la solución teórica.

### 5.1 ANÁLISIS MODELO 1

Consolidación del suelo sometido a una carga uniforme infinita.

**FIGURA 20.** *Asentamiento por consolidación modelo 1.*



En **la figura 20** observamos que el asentamiento progresa gradualmente a medida que se disipan las presiones de poro y las tensiones efectivas aumentan.

El comportamiento del material es no-lineal, el módulo de compresibilidad volumétrico no es constante si no que es función de las tensiones.

#### 5.1.1 Comparación solución analítica con los resultados de los software.

Como la arcilla es normalmente consolidada se utiliza la fórmula expuesta anteriormente y se reemplaza los respectivos datos para hallar su asentamiento.

$$S_c = \frac{(C_c)(H)}{1 + e_o} \log\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right)$$

$$P_o = (14.6 \text{ KN/m}^3)(1 \text{ m}) + (17.3 - 9.8 \text{ KN/m}^3)(3 \text{ m}) + (19.3 - 9.81 \text{ KN/m}^3)(3.2/2 \text{ m})$$

$$P_o = 52.284 \text{ KN/m}^2$$

$$S_c = \frac{(0.252)(3.2)}{1 + 0.75} \log\left(\frac{52.284 + 87}{52.284}\right)$$

$$S_c = 0.196 \text{ m}$$

Comparando los resultados se obtiene que la diferencia porcentual entre los asentamientos obtenidos por Plaxis y Settle 3D es del 3.39%, entre teórico y settle 3D es del 2.71% y entre plaxis y el teórico es del 6%.

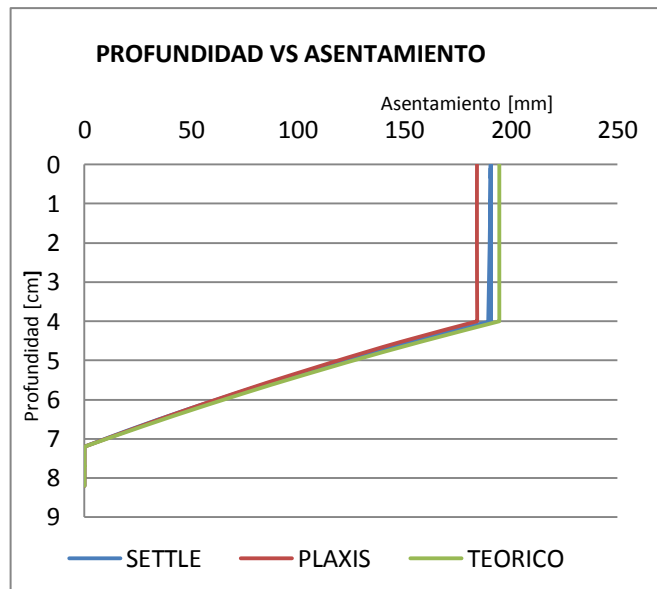
**Solución analítica:  $S_c = 196 \text{ mm}$**

**Resultado SETTLE 3D = 190.68 mm**

**Resultado PLAXIS = 184.23 mm**

Exportando los datos de la deformación por consolidación de los programas a la hoja de cálculo de Excel y realizando en esta misma hoja el análisis teórico de la consolidación contra profundidad obtenemos la siguiente gráfica:

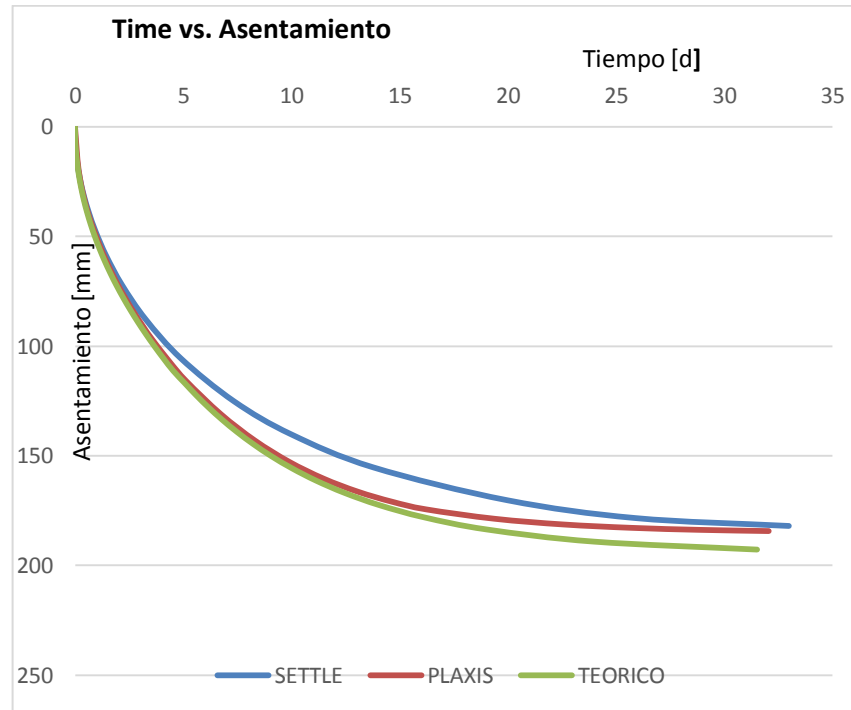
**Gráfico 2.** Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



En el **Gráfico 2** se puede observar que los asentamientos por consolidación obtenidos por los dos softwares y por la parte teórica son muy aproximados, también se puede ver que el asentamiento por consolidación en el estrato de las arenas es cero por la alta permeabilidad que posee haciendo que su drenaje y disminución de presión de poros se efectúen simultáneamente con el asentamiento inmediato.

### 5.1.2 Tiempo de consolidación sin drenes

**Gráfico 3.** Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



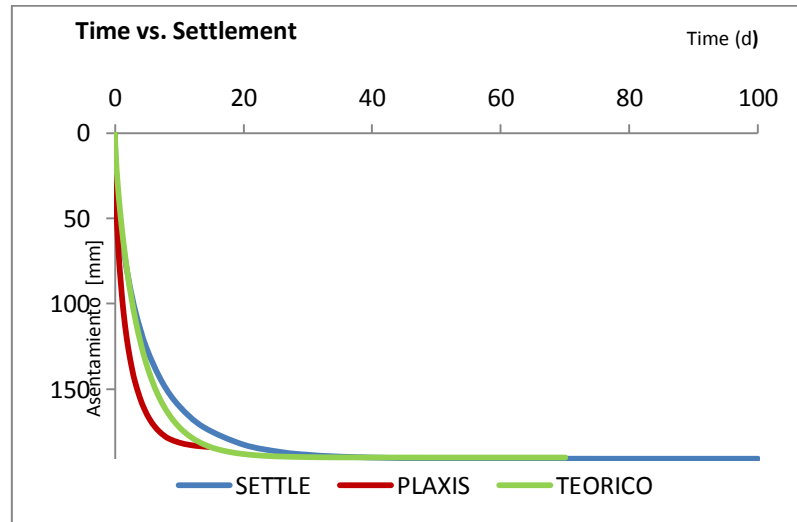
Tiempo de consolidación,

**Resultado teórico = 31.53 días**  
**Resultado Settle 3D = 31.42 días**  
**Resultado Plaxis = 32.02 días**

Los resultados que observamos en análisis de consolidación con respecto al tiempo para el modelo 1 son muy consistentes con los análisis teóricos, los resultados se dan para el tiempo requerido en alcanzar el 95% de la consolidación total, queda claro que SETTLE 3D y PLAXIS reproducen con precisión analítica los resultados con una diferencia máxima de 1.54%, para este caso que constituye un problema de consolidación unidimensional.

### 5.1.3 Tiempo de consolidación con drenes

**Gráfico 4.** Comparación del tiempo contra el asentamiento por consolidación con drenes en settle 3D, plaxis y teórico.



Tiempo de consolidación,

**Resultado teórico = 12.89 días**

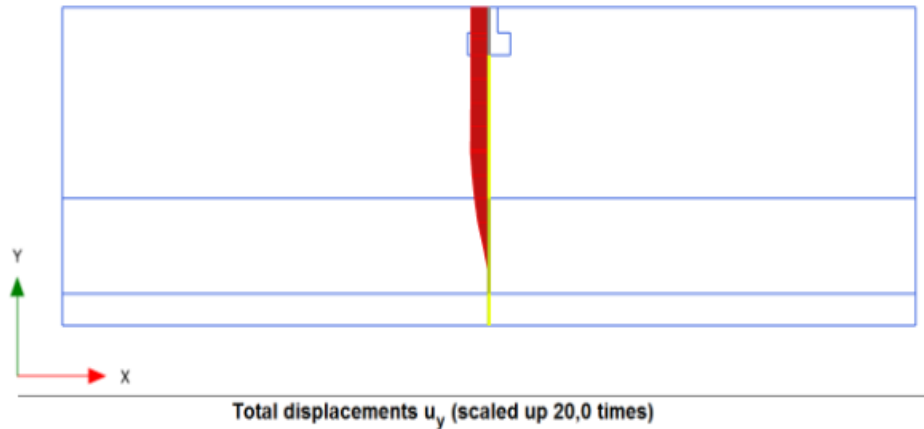
**Resultado Settle 3D = 18.72 días**

**Resultado Plaxis = 14.57 días**

Los tiempos requeridos para alcanzar una consolidación del 95% en el modelo 1 con drenes disminuye y varían un poco del teórico. Esto se puede deber a que SETTLE 3D tiene en cuenta parámetros como el diámetro de los drenes, el flujo horizontal desde los drenes, zona de mancha cerca de las paredes del drenaje debido a la construcción del dren alterando así la permeabilidad del suelo perturbado afectando la disipación de la presión de poros.

## 5.2 ANÁLISIS MODELO 2

**FIGURA 21.** Asentamiento por consolidación modelo 2.



Zapata concéntrica de 1.5x1.5 m con una carga de 890 KN.

Se modeló con como una carga repartida de forma rectangular incrustada 1.5 m en el suelo. El nivel freático se encuentra a 4.5 m de profundidad.

### 5.2.1 Comparación solución analítica con los resultados de los software.

$$S_c = \frac{(Cc)(H)}{1 + e_o} \log\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o}\right)$$

$\Delta P = q \times I_c$  ...Incremento de esfuerzo bajo una superficie rectangular

$I_c$  = factor de influencia

$$m = \frac{L}{B}, n = \frac{z}{B/2}$$

$I_c = f(m, n)$

$$\Delta P_{prom} = \frac{qI_c1 + 4qI_c2 + qI_c3}{6}$$

(*regla de Simpson*) [4]

**Solución analítica:  $S_c = 21.130$  mm**

**Resultado SETTLE 3D = 21.56 mm**

**Resultado PLAXIS = 25.51 mm**

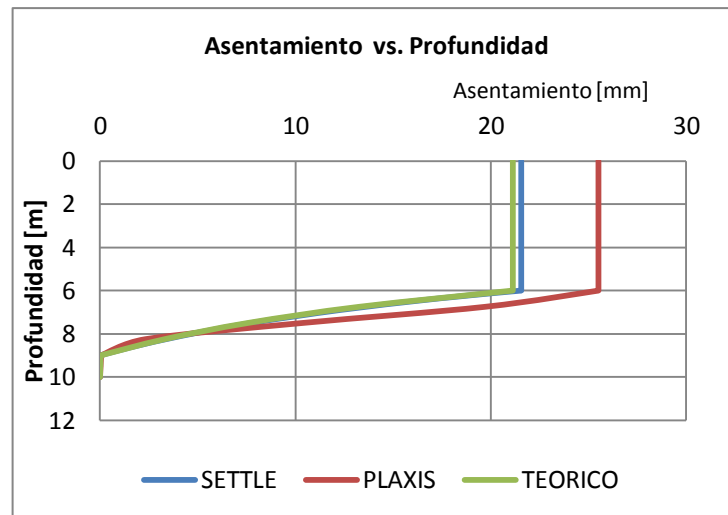
Comparando los resultados se obtiene que la diferencia entre los asentamientos por consolidación entre plaxis y settle 3D es del 15.5%, entre teórico y settle 3D es del 2 % y entre plaxis y el teórico es del 17.18%.

**Tabla 2. Análisis teórico de los asentamientos por consolidación de la zapata.**

H [m]	$q^*lc1$	$q^*lc2$	$q^*lc3$	$\Delta P_{prom}$	esfuerzo	$\Delta S_c$ (mm)	$\sum S_c$ (mm)
0	20.2	17.6	15.0	17.6	89.9	7.9	21.1
5.25	15.0	13.3	11.5	13.3	95.5	5.7	13.3
6.00	11.5	10.3	9.1	10.3	101.1	4.3	7.6
9.0	9.1	8.3	7.5	8.3	106.8	3.3	3.3

Exportando los datos de la deformación por consolidación de los programas a la hoja de cálculo de excel y realizando en esta misma hoja de cálculo el análisis teórico de la consolidación contra profundidad se obtiene la siguiente gráfica:

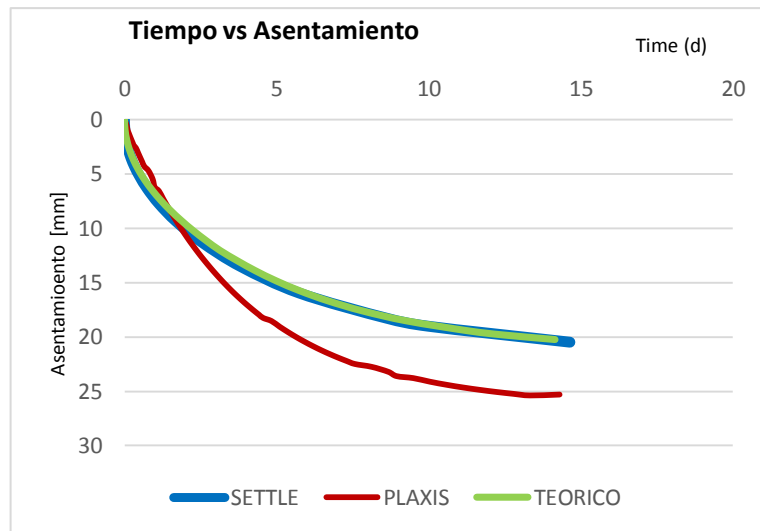
**Gráfico 5.** Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



En el **Gráfico 5** el software Plaxis se aleja un poco de los resultados obtenidos por el análisis teórico y por el programa Settle 3D debido a que Plaxis tiene en cuenta más parámetros para la simulación de la zapata, como es la interacción de la zapata con el suelo con los parámetros del suelo Mohr-Coulomb, pero cabe resaltar que no es significativo registrando una diferencia de tan solo 4 mm.

### 5.2.2 Tiempo de consolidación

**Gráfico 6.** Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



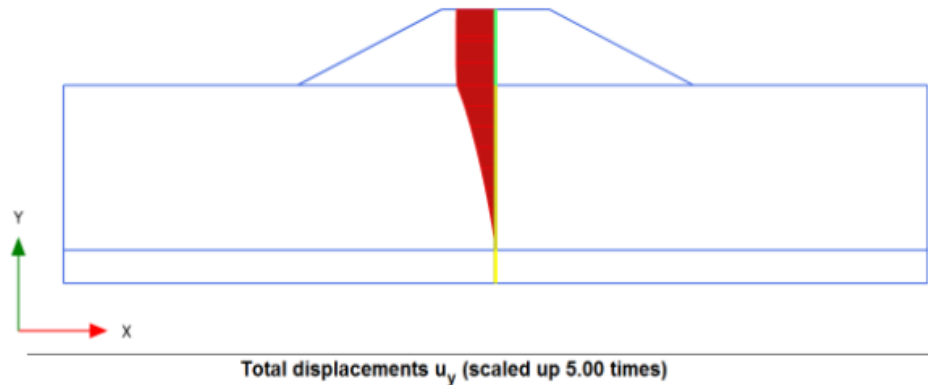
Como se muestra en el **Gráfico 6** el comportamiento del suelo en los modelos computacionales y el teórico son muy consistentes, el software Settle 3D se acercó a la solución teórica con un error de 3.16% a diferencia de Plaxis que se alejó con una diferencia de 6.08% casi el doble, donde también se observa una diferencia mayor en el asentamiento total, alejándose un poco más de las curvas de las soluciones anteriores.

**Resultado teórico = 14.19 días**  
**Resultado Settle 3D = 14.64 días**  
**Resultado Plaxis = 13.33 días**

El software Settle 3D se acercó mucho a la solución teórica, casi superponiéndose a las curvas de las soluciones teóricas en los **Gráfico 5** y **Gráfico 6**.

### 5.3 ANÁLISIS MODELO 3

**FIGURA 22.** Asentamiento por consolidación modelo 3.

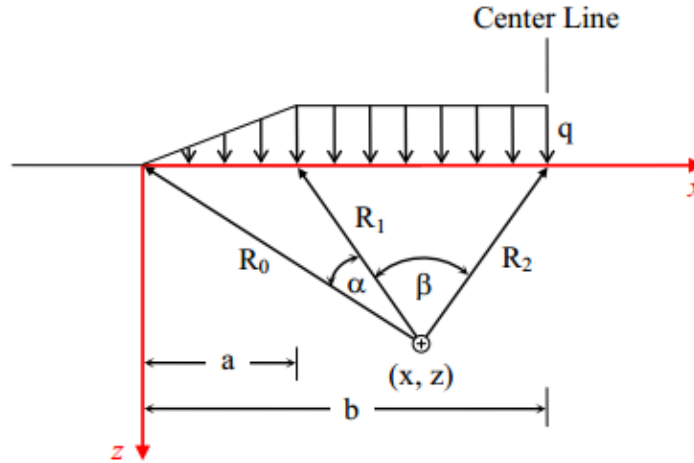


La **Figura 22** muestra la consolidación debido a una carga por terraplén, a un suelo de dos capas, la primera de arcilla de 8.7 metros de profundidad y la segunda de arena, se le aplica una carga trapezoidal de 22 m de base y 4 m de alto.

Este problema verifica las deformaciones verticales debidas a una carga por terraplén en el centro de la sección.

**5.3.1 Comparación solución analítica con los resultados de los software.** La forma de la solución analítica es como la que se muestra en la Figura 23.

**FIGURA 23.** Análisis de asentamiento del terraplé-Metodo de Grifits



$$\Delta P = \frac{q}{\pi} \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R^2} (x - b) \right] \quad [3]$$

**Solución analítica = 429.322 mm**

**Resultado SETTLE 3D = 417.123 mm**

**Resultado PLAXIS = 428.84 mm**

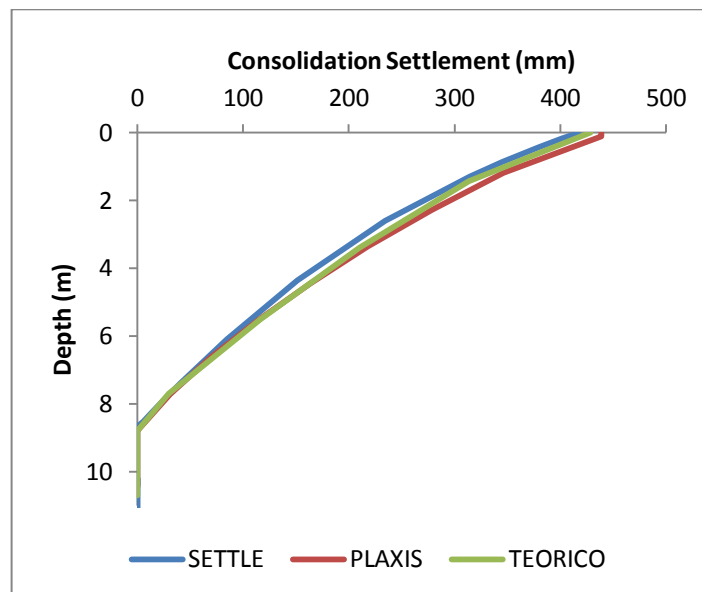
**Tabla 3.** Análisis teórico de los asentamientos por consolidación del terraplén.

z	Po	$\alpha$	$\beta$	$\Delta P$	$\Delta P \times 2$	$\Delta S_c$	$\sum S_c$ (mm)
0.000							
2.000	18.380	0.124	1.249	39.723	79.447		429.322
4.000	30.760	0.391	0.983	49.893	99.787	0.118	429.322
6.000	43.140	0.588	0.785	57.433	114.867	0.106	311.318
8.000	55.520	0.730	0.644	62.853	125.707	0.096	205.400
10.000	67.900	0.833	0.540	66.791	133.582	0.091	109.275
10.700	72.233	0.862	0.511	67.912	135.825	0.018	17.911

Comparando los resultados se obtiene que la diferencia entre los asentamientos por consolidación entre plaxis y settle 3D es del 2%, entre teórico y settle 3D es del 2.84 % y entre plaxis y el teórico es del 0.11%.

Exportando los datos de la deformación por consolidación de los programas a la hoja de cálculo de excel y realizando en esta misma hoja de cálculo el análisis teórico de la consolidación contra profundidad obtenemos la siguiente gráfica:

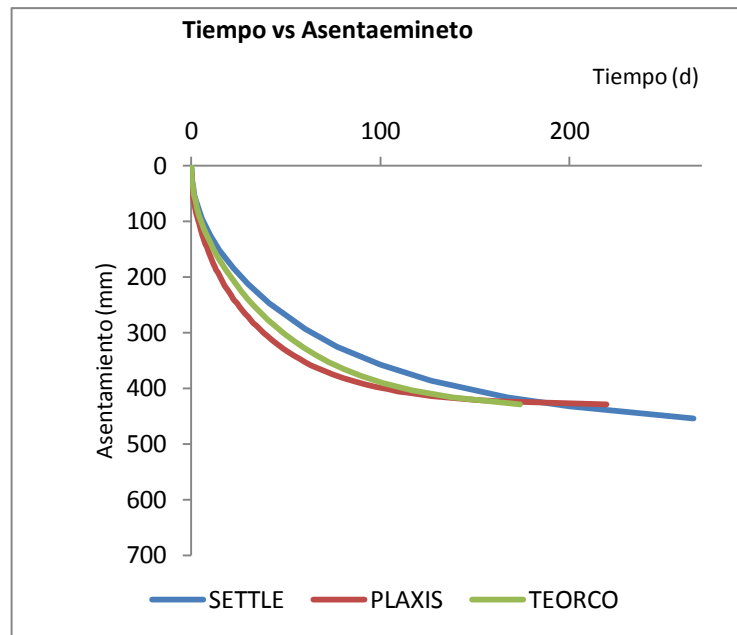
**Gráfico 7.** Comparación de profundidad contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



Como se puede evidenciar en el **Gráfico 7** las dos soluciones obtenidas de los software Plaxis y Rocscience comparada con la solución teórica son muy similares, acercándose en todas ellas las curvas de profundidad contra asentamiento.

### 5.3.2 Tiempo de consolidación sin drenes

**Gráfico 8.** Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



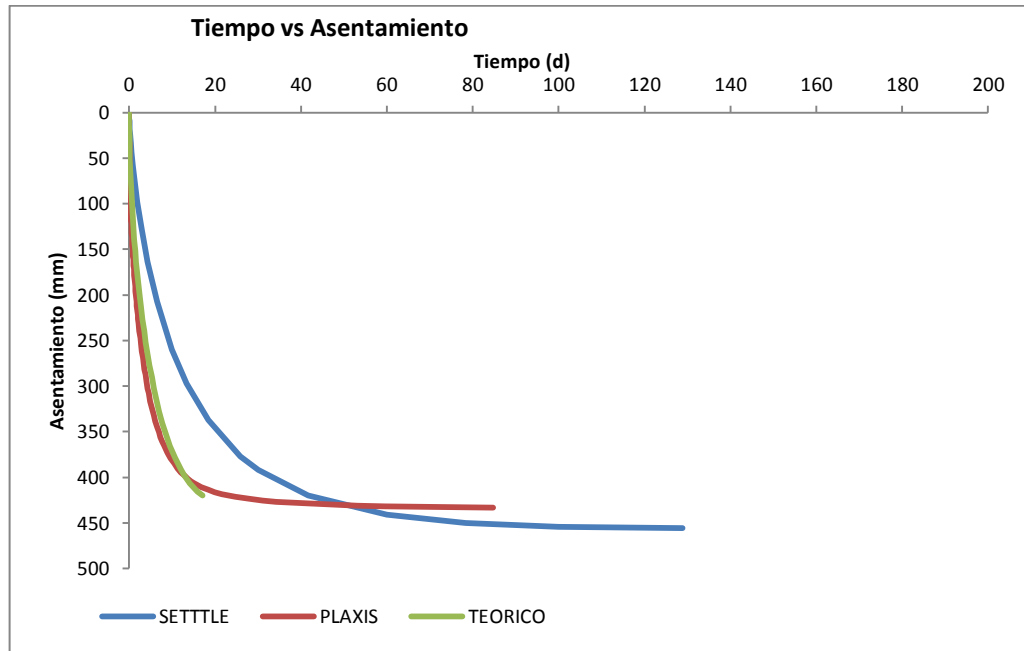
Se observa en el **Gráfico 8** que para todas las soluciones las curvas de asentamiento se comienzan a estabilizar a partir de los 200 días, aunque la solución para el software Settle 3D el asentamiento se estabiliza un poco más adelante debido que al analizar el problema en un estado de flujo aumentaron los asentamientos, pues este programa a diferencia de las soluciones teóricas mostradas, tiene en cuenta en la matriz de elementos finitos la permeabilidad  $K$  en el cálculo de tensiones, y esto da lugar a que los asentamientos varíen cuando se analizan en estado estático y en estado de flujo.

Tiempo de consolidación

**Resultado teórico = 229 días**  
**Resultado Settle 3D = 266 días**  
**Resultado Plaxis = 220 días**

### 5.3.3 Tiempo de consolidación con drenes

**Gráfico 9.** Comparación del tiempo contra asentamiento por consolidación en settle 3D, plaxis y teórico.



Los asentamientos teóricamente tendrían que ser mas rápidos pero se observa en le **Gráfico 9** que la solución de SETTLE 3D difiere notoriamente de las demas soluciones , esto se debe a que éste tiene en cuenta mucho mas factores que afectan el asentamiento como la permeabilidad vertical y la horizontal y la afectacion del suelo alrededor del dren.

Tiempo de consolidación

**Resultado teórico = 17.01 días**

**Resultado Settle 3D = 51.86 días**

**Resultado Plaxis = 18.37 días**

## 6. CONCLUSIONES

En la presente tesis se resolvieron con éxito 3 modelos de aplicación de los asentamientos por consolidación que se pueden presentar en las construcciones de ingeniería civil mediante los software Plaxis, Settle 3D y también mediante el análisis teórico. Para cada modelo se estudió su deformación por consolidación, tiempo de consolidación en algunos casos con uno de drenes. Se compararon los resultados obtenidos entre los programas y los resultados teóricos obtenidos por los métodos tradicionales.

Para hacer un correcto uso de Plaxis y Rocscience es necesario manejar los programas por un importante número de horas de trabajo para así entender bien su metodología. También es necesario tener un amplio estudio y conocimiento en el campo de la geotecnia para realizar una adecuada simulación en lo que se refiere a la geometría de los problemas, las condiciones de contorno, las fases del problema y las correctas propiedades de los materiales.

Plaxis resulta ser un programa un poco más difícil de entender su metodología de análisis que Settle 3D, a pesar de todo el material disponible que se encuentra sobre el manejo de este mismo, debido a que el programa se divide en cuatro interfaces de usuario para la simulación de los problemas geotécnicos, dificultando así la comprensión de su metodología y su manejo adecuado. Settle 3D tiene la ventaja de que posee una interfaz gráfica muy interactiva y fácil de entender que satisface las condiciones y parámetros necesarios que se lograron mediante métodos tradicionales lo que permite la comprensión hacia la metodología empleada para la simulación de los problemas y el entendimiento de la interpretación de datos de una manera menos difícil, mientras que Plaxis exige más parámetros y análisis de las propiedades de los suelos, lo que hace que se prefiera de esta manera el uso de Settle 3D para la simulación de estos problemas.

Los valores y parámetros sobre las propiedades de los materiales que ofrece los programas Settle 3D y Plaxis, son valores que presentan algún tipo o grado de dispersión que hay que tener en cuenta a la hora de asignarlos, pues cabe

rezaltar que estos valores son producto de muchas investigaciones sobre estos estratos de suelos o materiales que no siempre se asemejan a lo que se encuentra en campo, por esta razón son necesarios los ensayos de laboratorio para la determinación correcta de los valores que se presentan en realidad y así obtener una adecuada solución que se asemeje a la realidad que se presenta en el campo geotécnico.

En el modelo 1 se observa que la diferencia de los asentamientos por consolidación es muy baja entre los resultados obtenidos por los programas Plaxis y Settle 3D y el análisis teórico de lo cual se concluye que los valores obtenidos entre ellos son muy próximos, probablemente por tratarse de una carga infinita, lo que impone unas condiciones de frontera similares.

En el modelo 2 se tiene que la mayor diferencia del asentamiento por consolidación está entre Plaxis y el teórico el cual es del 17.18% y entre Plaxis y Settle 3D el cual es del 15.5%. La diferencia de estos resultados fue más significativa entre las soluciones dadas por Plaxis, esto se debe a que Settle 3D requiere menor número de parámetros que Plaxis y los métodos tradicionales de análisis teórico están muy limitados debido a que están basados en hipótesis simplificadores de los parámetros y propiedades de los materiales; igualmente la geometría es muy simple, lo cual hace que los resultados obtenidos tengan una diferencia con los resultados obtenidos mediante los programas.

En el modelo 3 se tiene que la diferencia de los asentamientos por consolidación entre los programas y el análisis teórico no son significativos, lo cual indica que los resultados obtenidos de los programas satisfacen las ecuaciones que requieren los métodos tradicionales del análisis teórico.

Settle 3D y Plaxis permiten analizar problemas más complejos con geometrías que se ajusten a la realidad, exigiendo una mayor cantidad de parámetros de las propiedades de los suelos; de esta manera realiza un análisis numérico más detallado, para obtener un mejor análisis y una mejor solución a los problemas que se presentan en el campo, estableciendo las necesidades o condiciones

necesarias para obtener un factor de seguridad aceptable en un tiempo mas optimo que el que se podria obtener mediante los analisis teoricos tradicionales.

## 8. CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Juárez Badillo y Rico Rodríguez, Mecánica de Suelos, tomo 1: fundamentos de la mecánica de suelos, tercera edición, Limusa S.A., Mexico, 2005, el fenómeno de la consolidación unidimensional de los suelos, p. 245.

[2] Juárez Badillo y Rico Rodríguez, Mecánica de Suelos, tomo 2: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos, tercera edición, Limusa S.A., Mexico, 2004, Distribucion de esfuerzos en la masa del suelo, p. 14.

[3] Braja M. Das, Principios de ingeniería de cimentaciones, cuarta edición, California state University, Sacramento, 1999, Calculo de asentamientos, p. 240.

[4] Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, cuarta edición, California state University, Sacramento, 2002, Consolidación, p. 151.

[5] Robert D. Holz and William D. Kovacs, An introduction to geotechnical engineering, 2nd Edition, prentice-Hall Inc., New jersey, 1981, Consolidation and consolidation settlements, p. 283.

[6] Capítulo 5. Consolidación de suelos. Disponible: <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Capitulo%205%20Consolidacion%20de%20suelos.pdf>. [citado 18 de Agosto de 2014]

[7] Fredlung "Soil mechanics for unsaturated soils", Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. Soil mechanics in engineering practice, 3rd ed., Wiley, New York.

[8] SETTLE 3D.settlement and consolidation analisis-Teory Manual 2007-2009 Rocscience Inc-Stress pag 1

[9] Manuales de Plaxis 2D. Disponibles: <http://www.plaxis.nl/plaxis2d/manuals/>

[10] CAPITULO I - Universidad de Magallanes. Disponible:  
[http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/diaz\\_diaz\\_2008.pdf](http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/diaz_diaz_2008.pdf) .

[11] Tutorial Manual – Plaxis. Disponible: <http://www.plaxis.nl/files/files/3D2013-1-Tutorial.pdf>.

[12] CONSOLIDACION DE SUELOS. Disponible:  
<http://albatros.uis.edu.co/eisi/ArchivosProfesores/U9186/CONSOLIDACION%20DE%20SUELOS%20.pdf>.

[13] CIMENTACIONES - Web del Profesor. Disponible:  
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/nbelandria/materias/geotecnia/Cimentaciones.pdf>

[14]CONSOLIDACION DE SUELOS, Cátedra de Geotecnia I, facultad de ingeniería -U.N.P.L Disponible:  
<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Capitulo%205%20Consolidacion%20de%20suelos.pdf>

[15] Parámetros geotécnicos para la caracterización elastoplástica de suelos, R.Gibert Disponible: <http://civilgeeks.com/2013/10/28/parametros-geotecnicos-para-la-caracterizacion-elastoplastica-de-suelos/>

[16] Capítulo9. Consolidación. Disponible:  
<http://www.galeon.com/geomecanica/cap9.pdf>. [citado 18 de Agosto de 2014]

## BIBLIOGRAFIA

JUÁRES BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos. Tomos 1 y 2. México: Limusa, 2005.

DAS, Braja M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Mexico: Cengage Learning, 2010. Calculo de Asentamientos, p. 240.

DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Mexico: Thomson Learning, 2001. Consolidación, p. 151.

HOLZ, Robert D. and KOVACS, William D. An Introduction to Geotechnical Engineering. New jersey: Prentice-Hall Inc., 1981. Consolidation and consolidation settlements. p. 283.

LAMBE, William y WHITMAN, Robert. Mecanica de Suelos. Mexico: Limusa: Editores, 1994. p. 260.

RICO RODRIGUEZ, Alfonso y DEL CASTILLO MEJIA, Hermilo. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Volumen 1 y 2. Mexico: Limusa: Noriega Editores, 1996.