

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE SUELOS ARCILLOSO BLANDO CON  
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**YULI MARIBEL ARIAS CIFUENTES  
JORGE LUIS BALLESTEROS TOVAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2016**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE SUELOS ARCILLOSO BLANDO CON  
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**YULI MARIBEL ARIAS CIFUENTES**

**CÓD.2103506**

**JORGE LUIS BALLESTEROS TOVAR**

**CÓD. 2094504**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero civil**

**DIRECTOR**

**ING.M.Sc. HEBENLY CELIS LEGUIZAMO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE INGENIERÍAS FISICO-MECANICAS**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2016**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto va dedicado inicialmente a Dios, por darnos bendición y sabiduría en cada momento culminante en nuestra vida y así lograr alcanzar el sueño de ser ingeniera.

A mi abuela Dioselina Ruiz Chona con la cual empecé esta meta pero en estos momentos no se encuentra de cuerpo pero siempre me estará acompañando, a mi madre Amanda Cifuentes Montenegro por la lucha y el esfuerzo de sacarme adelante, también por inculcarme los valores y educación en mi formación.

A mis demás familiares, los cuales estuvieron pendiente de mi formación.

A las personas que conocí en la trayectoria de esta carrera los cuales creyeron en mi capacidad.

**YULI MARIBEL ARIAS CIFUENTES**

## **DEDICATORIA**

Todo empezó como un sueño de un niño, que quería construir una casa muy grande para toda su familia y un perro, con ayuda de Dios y apoyado por una persona que a pesar que no se encuentra en este momento con vida desde el cielo nunca ha dejado de iluminarme, mi abuelita Victoria Ballesteros, mis dos viejos Jorge Luis y Luz Marina fueron parte fundamental al igual que mi amigo, confidente, hijo y hermano Antonio José, ellos siempre han estado a mi lado en los momentos en que los he necesitado.

A pesar de tener dos ángeles en el cielo, mi viejita y una persona que me estuvo acompañando desde el salón de clases, mi profesora favorita, la tía que encendía la chispa con una sonrisa, mi tiita Ruby las oraciones de mi abuelita Bitá han sido necesarias, ya que fue largo el camino, también la ayuda de mi tiita Panchita y El tío Moisés, quienes se convirtieron en mis papás adoptivos. Este sueño también contó con el apoyo de otra pareja a la cual puedo llamar padres, mi tía Chelita y mi tío William, quienes me regalaron tres bellas hermanas y han estado a mi lado desde muy pequeño. Hay una persona que fue mi gasolina día a día, la cual me brindo su apoyo en los momentos más difíciles. También conté con una palabra, un chiste y una sonrisa de la tía Miriam quien fue la encargada de dejar mi tristeza muchas veces a un lado, sin olvidar a mis tíos, mis primos especialmente mi negro Pipe Florian y mi primita Toyita, compañeros de estudio y amigos de carrera. Tener una hoja para dedicar un triunfo tan grande para mí es muy difícil, solo espero que cada uno de ellos se sienta orgulloso de haber hecho parte de este sueño, que empezó con un niño que quería construir una casa grande para toda su familia y un perro.

**JORGE LUIS BALLESTEROS TOVAR**

## **AGRADECIMIENTOS**

Por medio de este proyecto de grado, queremos agradecer a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil por darnos el privilegio de habernos formado como ingenieros civiles, en el desarrollo de este proyecto, se presentaron muchas adversidades, las cuales fueron superadas con ayuda de la Ing. Hebenly Celis y el Ing. Hector Torres, quienes fueron los que nos guiaron en el transcurso de este trabajo. No podemos dejar atrás a los profesores que semestre a semestre se esforzaron por transmitirnos todos sus conocimientos, con los cuales pudimos llegar a cumplir un sueño y una meta, el cual es llamarnos ingenieros civiles UIS.

En nuestro paso por la universidad, gozamos de conocer aparte del campus central en Bucaramanga, las seccionales de Barbosa y Barrancabermeja, ya que fue allí donde empezó este proceso, además de todos los compañeros que hicieron parte día a día de nuestras largas jornadas de estudio.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. MARCO TEORICO .....	16
2. METODOLOGÍA.....	20
2.1 MORH-COULOMB .....	20
2.2 SOFT SOIL.....	20
3. MODELOS REALIZADOS .....	23
4. PARAMETROS PARA EL DISEÑO .....	24
5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EMPLEADA GENERAL .....	26
6. RESULTADOS .....	31
6.1. VARIACIONES EN LA PRESIÓN DE POROS.....	31
6.2. VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN.....	32
6.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN VS TIEMPOS.....	34
6.4. GRAFICAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN .....	35
6.5. FACTOR DE SEGURIDAD.....	36
7. CONCLUSIONES .....	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
BIBLIOGRAFIA.....	42

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ilustración del Perfil ModeloNº1 .....	23
<i>Figura 2.</i> Ilustración del Perfil ModeloNº2 .....	23
<i>Figura 3.</i> Imagen de la Descripción de los nodos Elemento de seis nodos .....	26
<i>Figura 4.</i> Imagen de la Descripción de los nodos Elementos de 15 nodos. ....	27
<i>Figura 5.</i> Perfil Modelo No. 1 .....	27
<i>Figura 6.</i> Perfil Modelo No. 1 .....	28
<i>Figura 7.</i> Imagen de los puntos de análisis del Perfil Modelo No. 1 .....	29
<i>Figura 8.</i> Imagen de los puntos de análisis del Perfil Modelo No. 2 .....	29
<i>Figura 9.</i> Imagen de Presión intersticial Modelo N°1.....	32
<i>Figura 10.</i> Imagen de Presión intersticial Modelo N°2.....	32
<i>Figura 11.</i> Imagen de deformación del Modelo N°1 Morh.Coulomb .....	33
<i>Figura 12.</i> Imagen de deformación del apique N°1 Soft Soil .....	33
<i>Figura 13.</i> Imagen de deformación del Modelo N°2 Morh-Coulomb .....	33
<i>Figura 14.</i> Imagen de deformación del Modelo N°2 Soft Soil .....	34

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Parámetros para modelar por Morh-Coulomb</i> .....	21
Tabla 2. <i>Parámetros para modelar por Soft Soil</i> .....	21
Tabla 3. <i>Parámetros para modelar Modelo No. 1 Morh-Coulomb</i> .....	24
Tabla 4. <i>Parámetros para modelar Modelo No. 1 Soft Soil</i> .....	25
Tabla 5. <i>Parámetros para modelar Modelo No. 2 Morh-Coulomb</i> .....	25
Tabla 6. <i>Parámetros para modelar Modelo No. 2 Soft Soil</i> .....	25
Tabla 7. <i>Imagen de las Fases para calcular plasticidad y consolidación</i> .....	29
Tabla 8. <i>Resultados del análisis respectivo</i> .....	30
Tabla 9. <i>Resumen de los análisis</i> .....	38

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
<i>Gráfica 1.</i> Grafica Deformación vs. Tiempo para el Modelo No. 1 .....	34
<i>Gráfica 2.</i> Grafica de la Deformación vs. Tiempo para el Modelo No. 2 .....	35
<i>Gráfica 3.</i> Grafica Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo No. 1 .....	36
<i>Gráfica 4.</i> Grafica Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo No. 2 .....	36
<i>Gráfica 5.</i> Gráfica del factor de seguridad el Modelo No. 1 .....	37
<i>Gráfica 6.</i> Gráfica del factor de seguridad el Modelo No. 2 .....	37

## RESUMEN

**TITULO:** MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE SUELOS ARCILLOSO BLANDO CON HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES\*

**AUTORES:** JORGE LUIS BALLESTEROS TOVAR  
YULI MARIBEL ARIAS CIFUENTES \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Metodologías, Arcillas, Plaxis, Santander.

### DESCRIPCION

En el siguiente artículo se presenta la modelación de un suelo arcilloso blando, tipo CL arcilla arenosa de baja compresión y CH arcilla de alta plasticidad, para la modelación de estos se seleccionaron dos metodologías de estudio, el método de Morh Coulomb y Soft Soil en el software Plaxis 2D 2015, los cuales se aplicaron a un talud de la región de Santander en el municipio de Vélez con coordenadas de cada una de las muestras No.1 N 1'156.765 y E 1'045.065 y No.2 N 1'157.108 y E 1'045.043. En el perfil del talud se identificaron siete puntos principales los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta los mayores cambios en las pendientes del talud. En el modelo No.1 se encontró la máxima deformación en el punto G con un valor de 0,315 mm para la metodología de Morh Coulomb y 0,448 mm para la metodología Soft Soil, mientras que en el modelo No.2 se encontró la máxima deformación en el punto E, por Morh Coulomb fue de 0,557 mm y por Soft Soil fue 0,736 mm. Los cálculos principales que se obtuvieron en la modelación fueron presión de poros máxima y mínima, máxima deformación horizontal, máxima deformación en el tiempo establecido de un día, máximo esfuerzo y factor de seguridad. Al calcular el factor de seguridad no se encontró cambios su valor para todos los casos fue de 1,0. Los mayores cambios se presentaron en el cálculo del esfuerzo en el modelo No.1 la diferencia entre ellos es de 23,692KN/m<sup>2</sup> y en el modelo No.2 fue de 0,592 KN/m<sup>2</sup>. Se darán a conocer las conclusiones de los datos obtenidos en la modelación realizada por dicho software al final de este.

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, escuela de Ingeniería Civil, Directora:M.Sc Ingeniera Hebenly Celis Leguizamo.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING AND SIMULATION OF SOFT CLAY SOIL WITH COMPUTATIONAL TOOLS OVERVIEW\*

**AUTHORS:** JORGE LUIS BALLESTEROS TOVAR  
YULI MARIBEL ARIAS CIFUENTES \*\*

**KEYWORDS:** Methodologies, clay, Plaxis, Santander.

### DESCRIPTION

In the following article modeling clay soil soft, type CL sandy clay low compression and CH clay of high plasticity is presented for modeling these two methodologies study, the method of Morh Coulomb and Soft Soil were selected in the software Plaxis 2D 2015, which were applied to a slope in the region of Santander in the municipality of Vélez with coordinates of each of the samples N 1'156.765 No.1 and No.2 N E 1'045.065 and 1'157.108 and E 1'045.043. Batter profile seven main points which were selected taking into account the major changes in the slopes of the slope were identified. In the model No.1 maximum strain he was found in the G-spot with a value of 0.315 mm for Coulomb Morh methodology and 0.448 mm for Soft Soil methodology, while the No.2 model maximum strain was found in the E point, Morh Coulomb was 0.557 mm and 0.736 mm Soft Soil was. The main calculations were obtained in modeling pressure maximum and minimum pore maximum horizontal deformation, maximum strain on time a day, maximum stress and safety factor. When calculating the safety factor not change its value found for all cases was 1.0. The biggest changes occurred in the calculation of effort in the No.1 model the difference between them is 23,692KN / m<sup>2</sup> and the No.2 model was 0.592 KN / m<sup>2</sup>. They will present the findings of the data obtained in the modeling performed by the software at the end of this.

\*Degree Project

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering, school of Civil Engineering, Director: M.Sc Engineer Hebenly Celis Leguizamo.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el área de estudio de la mecánica de suelos ha mostrado un crecimiento significativo, con el fin de dar soluciones a los problemas que diariamente se encuentran en el campo de la geotecnia. Por eso es que trabajos de investigación como éste se han venido desarrollando implementando dichos modelos, con el objetivo principal de modelar la realidad física de estos geomateriales y así tratar de dar solución a los problemas a los que se deben enfrentar las nuevas generaciones. Así, por ejemplo, se pueden encontrar varias investigaciones basadas en diferentes conceptos como la elasticidad no lineal, el endurecimiento plástico, la teoría del estado crítico y la hipoplasticidad [1].

De esta manera, a continuación se presenta un trabajo, para modelar y simular las arcillas blandas con herramientas computacionales, para esto se utilizó el software Plaxis 2D 2015 [2]. Este software cuenta con siete metodologías de análisis, de estas se seleccionaron dos implícitas en el programa, ya que son las más óptimas para la modelación de suelos blandos, la primera fue el método de Mohr-Coulomb y la segunda el método de Soft Soil. Este análisis se realizó en un talud que se encuentra ubicado en el área del departamento de Santander.

Para el desarrollo de los métodos, se identificaron dos perfiles de suelo, con los datos obtenidos en la modelación, se compararon las diferencias obtenidas entre los métodos analizados.

## 1. MARCO TEORICO

La cimentación de terraplenes sobre suelos blandos constituye uno de los principales campos de aplicación de la mejora del terreno con columnas de grava. Entre otras ventajas, el tratamiento mediante columnas de grava para la cimentación de terraplenes, proporciona un incremento de la seguridad frente al deslizamiento de los taludes. Se presenta en este artículo un análisis de sensibilidad del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento de taludes, para una serie de casos hipotéticos constituidos por terraplenes apoyados sobre suelos blandos mejorados mediante columna de grava, en función de la intensidad del tratamiento, de la forma de modelización del terreno mejorado, de las características del terreno natural y de la altura de los terraplenes considerados. Para ello, se aplican dos metodologías de cálculo diferenciales, como son el método de elementos finitos en dos dimensiones y los métodos analíticos tradicionales de estabilidad de taludes. Asimismo, a partir del análisis efectuado, se ponen de manifiesto las consideraciones a tener en cuenta de acuerdo a la metodología de análisis que se adopte [3].

La tesis se tiene como objetivo hacer un procedimiento para los modelos que están programados por el software Plaxis 2D, estos se harán con ejemplos de cuadros de resumen con los parámetros geotécnicos y geomecánicos más comunes de punta arena, este procedimiento se hace por cinco etapas , la primera es medir en terreno las dimensiones físicas del lugar donde se emplaza el elemento a modelar, después realizar ensayos de laboratorios a las muestras, definir geometría y propiedades que se funda sobre el suelo y por último se identifica y cuantifica las cargas externas.

Se hace una explicación muy detallada del funcionamiento del programa como son las configuraciones generales, modelo geométrica en este explica cada una de las

herramientas, cargas y condiciones de contorno, propiedades de los materiales después se genera la malla de elementos finitos. Este procedimiento se realiza para cada una de las muestras que se tomaron [4].

Suelos blandos como arcillas, limos arcillosos y turbas demuestran un alto grado de compresibilidad en comparación con otros suelos. En las pruebas edómetros, arcillas normalmente consolidadas se comportan hasta diez veces más suave que normalmente consolidadas arenas. La tarea de la tesis de este maestro ha sido investigar el comportamiento de consolidación principal de arcilla blanda mediante la comparación de los resultados.

Obtenido a partir de cálculos de análisis de elementos finitos en 2D Plaxis con los cálculos analíticos y examinar las mediciones. Dos modelos diferentes materiales se utilizaron durante los finitos cálculos de elementos, que comparan el rendimiento de la más avanzada constitutiva Soft Modelo de material del suelo contra el modelo de material de Mohr-Coulomb de uso común hoy en día. Dos estudios de casos. Los estudios de casos comprenden bermas roca instalados en arcilla blanda en el Mar del Norte. Una característica común tanto para los casos de estudio fueron que después de la instalación de la berma de la roca, piezas del subsuelo experimentado compresión virgen. Mediciones de la encuesta se obtuvieron durante días de la consolidación de estudio de caso 1, y 31 días después de la consolidación de estudio de caso 2. Los resultados indican que la realización de diseño con el modelo de material de Mohr-Coulomb no es más adecuada cuando se trata de predecir el comportamiento de consolidación principal de arcilla blanda. La mayoría de los resultados precisos, cuando se compara con las mediciones topográficas reales. Para el caso de estudio 2, los resultados computacionales obtenidos con el modelo de suelo blando correlacionados con precisión con mediciones topográficas reales, en contraria a la de Mohr-Coulomb modelo, que sólo prevé una solución de consolidación en cm para el mismo período de tiempo. Sin embargo, el modelo de terreno blando,

todavía lleva a cabo mejor en comparación con el modelo de Mohr-Coulomb y cálculos analíticos. El resultado del terreno blando. El estudio realizado en la tesis de este maestro de la conclusión de que los proyectos que incluyen arcilla blanda sometido a compresión virgen deben beneficiarse de la utilización del modelo de terreno blando durante PLAXIS cálculos de consolidación en lugar de con el modelo de Mohr-Coulomb [5].

Este artículo discute las diferencias entre los modelos de elemento finito tridimensional y bidimensional usados para analizar la seguridad a largo plazo del relleno sanitario. En el año 2003 se construyó un terraplén de prueba en una de las celdas de residuos sólidos, la cual se instrumentó con piezómetros, inclinómetros y bancos de nivel. Con los desplazamientos y presiones de poro medidos en campo, se calibraron los modelos numéricos para que reprodujeran el comportamiento observado. Los modelos calibrados se utilizaron para hacer predicciones sobre la seguridad a largo plazo del relleno sanitario. Se exponen las diferencias encontradas en ambos tipos de análisis; la discusión se centra en los parámetros de rigidez, en los desplazamientos, en los factores de seguridad, y principalmente en los mecanismos de falla resultantes. Se concluye que el modelo tridimensional llega a resultados más realistas que permiten identificar de manera más adecuada el mecanismo de falla de este relleno sanitario sobre suelos blandos [6].

Cam Clay es un modelo constitutivo elastoplástico que se aplica a suelos cohesivos – limos y arcillas –y que permite simular la relación que existe entre relación de vacíos, resistencia y rigidez de estos suelos para una amplia variedad de aplicaciones ingenieriles. Este artículo consta de cinco capítulos en el primero es sobre la teoría de la plasticidad orientada a la mecánica de suelos, el siguiente modelo de cam clay modificado descrito para estado de tensiones y deformaciones, en el tercero se describe las características físicas y mecánicas de la deformación, en el cuarto se observan ensayos de consolidación y ensayos

triaxial para cada una de las muestras, y por último la calibración numérica de cam clay en función de los resultados.

Los parámetros se determinaron por ensayos de consolidación para arcillas .Se observó que en cam clay no es capaz de predecir acertadamente el comportamiento mecánico de las muestras limosas para este caso es necesario hacer ajustes de forma experimental para conseguir las correcciones numéricas aceptables [7].

## **2. METODOLOGÍA**

En el programa que se utilizó en este proyecto se pueden encontrar siete metodologías implementadas por el mismo para el análisis de suelos, estas son: Morh Coulomb, Soft Soil, Linear Elasti, Hardening Soil, Soft Soil Creep, Jointed Rock y User Defined. En este proyecto solamente se van a modelar suelos arcillosos, por esto definieron dos de estas metodologías para ser comparadas y analizadas mediante los resultados obtenidos, en dicha selección se tuvo en cuenta cuál es la más óptima para la simulación de suelos blandos y como resultado se obtuvo que las más exactas son la metodología de Morh Coulomb y la metodología Soft Soil.

### **2.1 MORH-COULOMB**

Es un modelo que parte del primer orden no lineal del suelo. Este es un modelo elastoplástico perfecto (propiedades idénticas en todas las direcciones), desarrollado a partir de la ley de Hooke. Se simula el comportamiento de suelos finos normalmente consolidados y suelos granulares sueltos, el cual no representa el comportamiento elastoplástico progresivo sino que primero es un modelo elástico y luego plástico perfecto.

En la Tabla 1. Se puede observar los parámetros de entrada para modelación en el programa.

### **2.2 SOFT SOIL**

Este modelo tiene influencia en los suelos blandos, distingue parámetros de carga y descarga en la primera zona, también llamada zona elástica, su análisis es muy similar al de la metodología de Hardening Soil, aunque éste hace distinción en el

modelamiento por capas, es decir, se basa en un plano donde analiza el esfuerzo vs el estado límite de tensión entre dos modos de carga, mientras que el Soft Soil determina inicialmente el esfuerzo de preconsolidación, y el esfuerzo máximo que se ha alcanzado en un tiempo determinado para un perfil con varios estratos de suelo.

**Tabla 1. Parámetros para modelar por Morh-Coulomb**

Parámetro	Descripción	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical	m/día
E	Módulo de Young	KN/m <sup>2</sup>
$\phi$	Angulo de fricción	°
c	Cohesión	KN/m <sup>2</sup>
u	Relación de poisson	-
$\psi$	Angulo de dilatancia	°

Fuente: software PLAXIS 2D 2015 Adaptada por el autor

Este modelo tiene los siguientes parámetros de entrada en la tabla 2 se hace un abreve descripción de ellos.

**Tabla 2. Parámetros para modelar por Soft Soil**

Parámetro	Descripción	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical	m/día
$\lambda^*$	Índice de compresión modificado	-
$k^*$	Índice de hinchamiento modificado	-
$\phi$	Angulo de fricción	°
c	Cohesión	KN/m <sup>2</sup>
$\psi$	Angulo de dilatancia	°

Fuente: software PLAXIS 2D 2015 Adaptada por los autores.

Los índices de hinchamientos y compresión se pueden obtener mediante dos relaciones: Relación con los parámetros de cam-clay

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} \quad k^* = \frac{k}{1+e}$$

$\lambda$  = Pendiente de la línea de consolidación

$k$  = Pendiente de la línea de descarga y recarga

$e$  = Relación de vacíos

Relación con parámetros internacionales normalizados

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e)} \quad k^* = \frac{2C_s}{2,3(1+e)}$$

$C_c$  = Índice de compresión o compresibilidad

$C_s$  = índice de hinchamiento

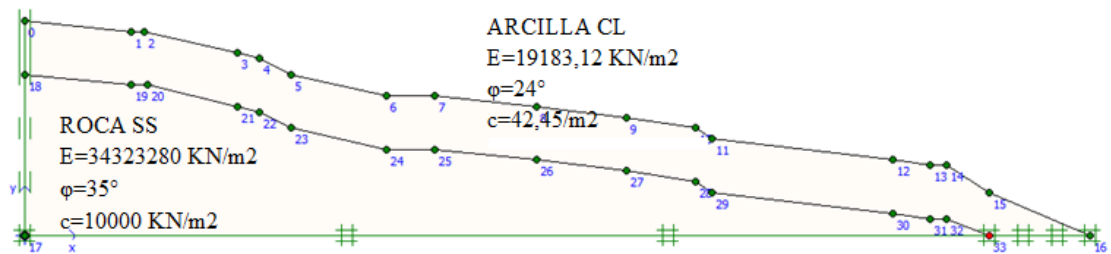
$e$  = Relación de vacíos

### 3. MODELOS REALIZADOS

La modelación se hizo con la información de los perfiles estratigráficos y las curvas de nivel obtenidas gracias a la investigación de Geomatica de la UIS para dos taludes de la región de Santander

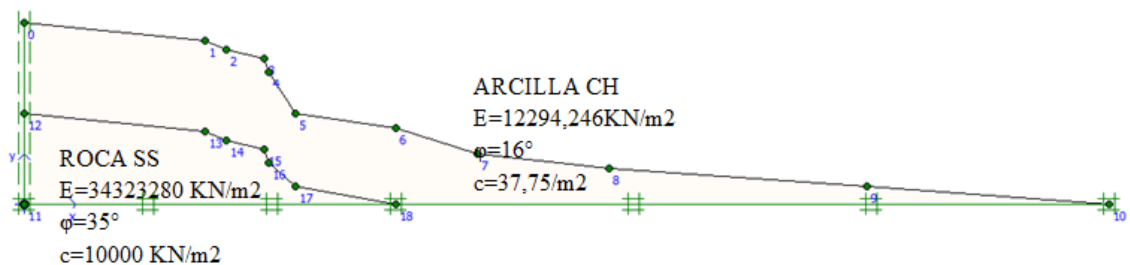
En la figura 1 y 2 se muestran los perfiles escogidos para el análisis y los parámetros del suelo de cada capa.

Figura 1. Ilustración del Perfil ModeloNº1



Fuente: Autores.

Figura 2. Ilustración del Perfil ModeloNº2



Fuente: Autores.

#### 4. PARAMETROS PARA EL DISEÑO

Para el análisis de los perfiles se seleccionaron dos metodologías, la de Morh Coulomb y Soft Soil .

Los valores necesarios para la modelación se obtuvieron por medio de un ensayo de consolidación unidimensional de carga y descarga, ensayo de compresión no confinada compactado por el equipo Harvard miniatura y correlaciones obtenidas teóricamente [8].

En las tablas 3 y 4 se presentan los parámetros utilizados en la modelamiento del talud N°1. En este perfil se encontraron 2 materiales arcilla tipo CL y roca tipo SS.

Tabla 3. *Parámetros para modelar Modelo No. 1 Morh-Coulomb*

Parámetro	Descripción	Arcilla CL	Roca SS	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	21,57	23	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	22,41	23	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	1E-7	8,64E-9	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical	1E-7	8,64E-9	m/día
E	Módulo de Young	19183,12	34323280	KN/m <sup>2</sup>
$\phi$	Angulo de fricción	24	35	°
c	Cohesión	42,45	10000	KN/m <sup>2</sup>
u	Relación de poisson	0,35	0,25	-
$\psi$	Angulo de dilatancia	0	35	°

Fuente: software PLAXIS 2D 2015, adaptada por los autores.

Tabla 4. *Parámetros para modelar Modelo No. 1 Soft Soil*

Parámetro	Descripción	Arcilla CL	Roca SS	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	21,57	23	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	22,41	23	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	1E-7	8,64E-9	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical al	1E-7	8,64E-9	m/día
$\lambda^*$	Índice de compresión modificado	0,0369	0,07058	-
$k^*$	Índice de hinchamiento modificado	0,009569	0,003084	-
$\phi$	Angulo de fricción	24	35	°
$c$	Cohesión	42,45	10000	KN/m <sup>2</sup>
$\psi$	Angulo de dilatancia	0	35	°

Fuente: software PLAXIS 2D 2015 Adaptada por los autores.

En las siguientes tablas 5 y 6, se puede observar los parámetros que fueron utilizados para la modelación del talud 2. En este perfil se hallaron dos tipos de materiales diferentes el primero una arcilla CH y roca tipo SS.

Tabla 5. *Parámetros para modelar Modelo No. 2 Morh-Coulomb*

Parámetro	Descripción	Arcilla CL	Roca SS	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	20,65	23	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	22,26	23	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	1E-7	8,64E-9	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical	1E-7	8,64E-9	m/día
$E$	Módulo de Young	12294,25	34323280	KN/m <sup>2</sup>
$\phi$	Angulo de fricción	16	35	°
$c$	Cohesión	37,75	10000	KN/m <sup>2</sup>
$\nu$	Relación de poisson	0,35	0,25	-
$\psi$	Angulo de dilatancia	0	35	°

Fuente: software PLAXIS 2D 2015 Adaptada por los autores.

Tabla 6. *Parámetros para modelar Modelo No. 2 Soft Soil*

Parámetro	Descripción	Arcilla CL	Roca SS	Unidades
$\gamma_{unsat}$	Peso unitario no saturado	20,65	23	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	peso unitario saturado	22,26	23	KN/m <sup>3</sup>
$K_x$	Permeabilidad dirección horizontal	1E-7	8,64E-9	m/día
$K_y$	Permeabilidad dirección vertical al	1E-7	8,64E-9	m/día
$\lambda^*$	Índice de compresión modificado	0,02515	0,04739	-
$k^*$	Índice de hinchamiento modificado	0,01613	0,00308	-
$\phi$	Angulo de fricción	16	35	°
$c$	Cohesión	37,75	10000	KN/m <sup>2</sup>
$\psi$	Angulo de dilatancia	0	35	°

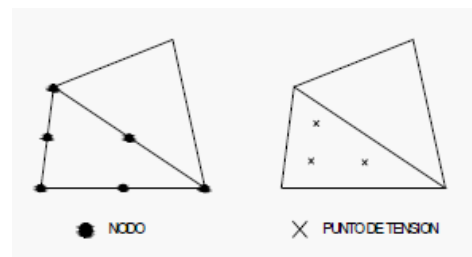
Fuente: software PLAXIS 2D 2015 Adaptada por los autores.

## 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EMPLEADA GENERAL

El modelamiento en este trabajo se realizó mediante el software Plaxis 2D 2015, el cual se basa en elementos finitos, éste modela dos problemas dimensionales de la deformación y la estabilidad en la ingeniería, los primeros pasos del mismo se iniciaron en el año 1987 en DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Este programa se basa en tres aplicaciones principales, el primero tiene como objetivo la introducción de parámetros, el segundo es el encargado de realizar los cálculos determinados y por ultimo está el que imprime los resultados obtenidos del análisis.

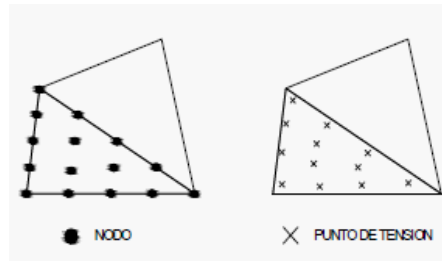
Para empezar a modelar, el software utiliza dos alternativas, las cuales muestran que tan riguroso será el mismo, en la figura 3 y 4 se puede observar los puntos de tensión de cada nodo, el primero utiliza un sistema de seis nodos, el cual entrega tres puntos de evaluación de tensión, éste no es tan riguroso como el de quince nodos, ya que el de quince nodos proporciona 12 puntos de evaluación de tensión, por este motivo la evaluación será más exacta que la anterior nombrada y se especializa en casos de geotecnia.

*Figura 3.* Imagen de la Descripción de los nodos Elemento de seis nodos



Fuente: Manual software PLAXIS 2D 2015

Figura 4. Imagen de la Descripción de los nodos Elementos de 15 nodos.

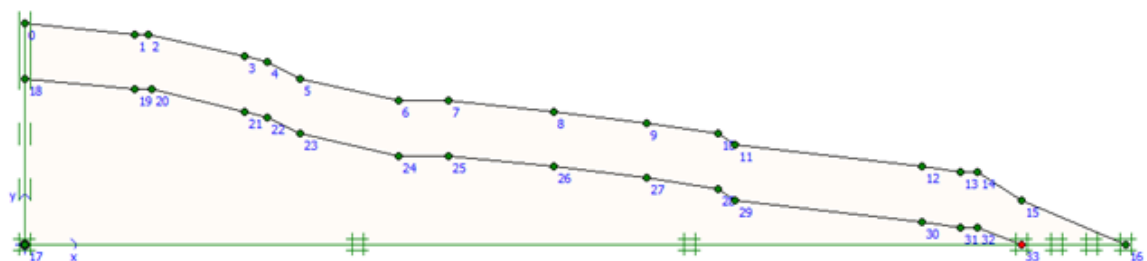


Fuente: Manual software PLAXIS 2D 2015

El primer paso que se ejecutó en el software fue la identificación del perfil del talud y posteriormente realizar su esquema teniendo en cuenta la interfaz y las coordenadas del mismo, identificando las dimensiones de cada uno de los materiales que lo componen. Enseguida se debió dar una condición de contorno para saber si existe algún desplazamiento.

En la figura 5 se puede observar el modelo en la fase previa al ingreso de los materiales con sus parámetros respectivos a la metodología que se escogió.

Figura 5. Perfil Modelo No. 1

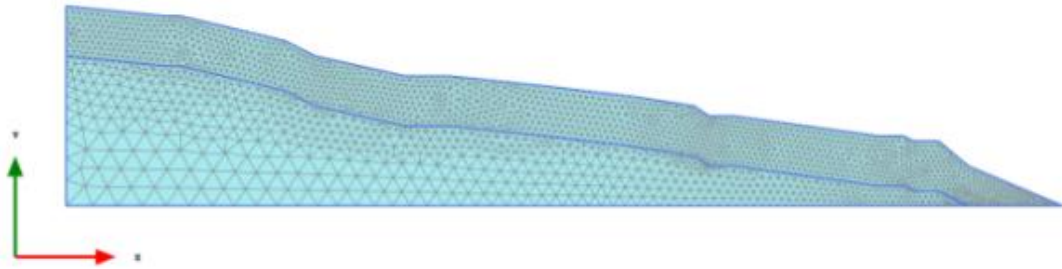


Fuente: Autores.

En esta etapa se crearon capas para cada uno de los materiales, caracterizando detalladamente uno a uno, introduciendo parámetros específicos de los mismos, entre ellos el módulo de elasticidad, el ángulo de fricción, la cohesión, la relación de Poisson entre otros. Estas capas se asignaron al perfil del talud identificando cada tipo de material. Se creó una malla de análisis, el programa cuenta con cinco

tipos de mallas, muy fina, fina, media, gruesa y muy gruesa, esta opción dependerá del análisis que se requiera hacer, en nuestro caso por haber utilizado arcillas, se analizó con una malla muy fina como se observa en la figura 6.

*Figura 6.* Perfil Modelo No. 1



Fuente: Autores.

En ese instante ya se tiene completo el perfil del talud, se procedió a hacer el análisis del programa, el cual cuenta con cuatro fases, en la fase inicial se definió el nivel freático del terreno, en la segunda, la fase normal, el programa hizo los cálculos plásticos por construcción de etapas, teniendo como referencia un parámetro de tiempo, estimado en días, en nuestro caso, ese parámetro fue de un día. La tercera fase fue la fase de consolidación, la cual toma los mismos parámetros de la fase anterior y por último se tiene la segunda fase de consolidación, esta utilizó como parámetro la presión intersticial mínima, la cual en nuestro caso fue  $1.0 \text{ kN/m}^2$ .

En la figura 7 se observa las fases que se nombraron anteriormente para previamente hacer el análisis determinado.

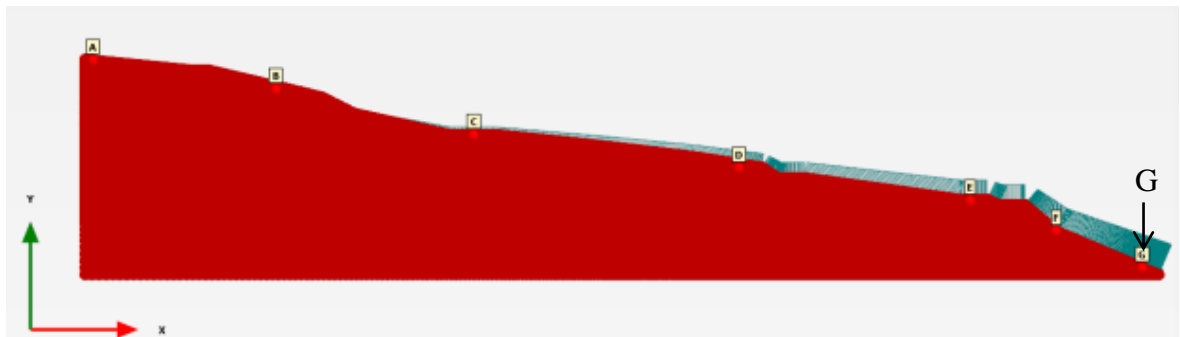
Tabla 7. Imagen de las Fases para calcular plasticidad y consolidación.

Identificación	No. fase	Inicio de...	Cálculo	Introducción de carga	Presión intersticial	Tiempo	Etapa	Agua	Pri...	Últi...	Enfoque...
Fase inicial	0	N/A	Procedimiento KO	No asignado	Freático	0,00 día	L 0	W 0			Valores ...
Fase normal	1	0	Plástico	Construcción por et...	Freático	1,00 día	L 0	W 0			Valores ...
Fase consolidación	2	1	Consolidación	Construcción por et...	Freático	1,00 día	L 0	W 0			Valores ...
Fase consolidación	3	2	Consolidación	Presión intersticial ...	Freático	0,00 día	L 0	W 0			Valores ...

Fuente. Autores.

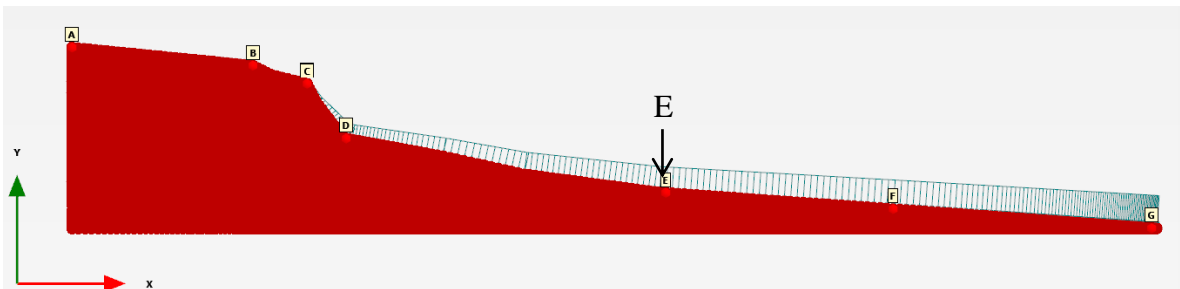
Se asignaron los puntos en donde se quiso hacer el análisis, por defecto el programa da la opción de tener 10 puntos de análisis, para este caso se tomó siete puntos donde se encuentra la mayor pendiente, los cuales se ven en la figura 8 Y 9 que están ubicados en la parte más externa del talud.

Figura 7. Imagen de los puntos de análisis del Perfil Modelo No. 1



Fuente. Autores.

Figura 8. Imagen de los puntos de análisis del Perfil Modelo No. 2



Fuente. Autores.

Finalmente se procedió a analizar las cuatro fases al mismo tiempo, el software calcula fase a fase e imprime los resultados obtenidos dependiendo el parámetro

de tiempo establecido anteriormente por el usuario, para obtener gráficamente dichos resultados, el programa cuenta con una opción que compara parámetros en ejes coordenados, se deben asignar abscisas y ordenadas en los mismos, algunos de estos parámetros son: tiempo, desplazamiento, presión entre otros.

Cuando el análisis es finalizado en la figura 10 se detalla que en la parte de identificación sale en verde esto nos indica un buen análisis.

Tabla 8. *Resultados del análisis respectivo*

Identificación	No. fase	Inicio de...	Cálculo	Introducción de carga	Presión intersticial	Tiempo	Etapas	Agua	Pri...	Últi...	Enfoque...
✓ Fase inicial	0	N/A	Procedimiento K0	No asignado	Freático	0,00 día	L 0	W 0	1	1	Valores ...
✓ Fase normal	1	0	Plástico	Construcción por et...	Freático	1,00 día	L 0	W 0	2	3	Valores ...
✓ Fase consolidación	2	1	Consolidación	Construcción por et...	Freático	1,00 día	L 0	W 0	4	5	Valores ...
✓ Fase consolidación	3	2	Consolidación	Presión intersticial ...	Freático	26440,00 ...	L 0	W 0	6	15	Valores ...

Fuente. Autores.

## 6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los casos por medio del análisis del software Plaxis 2D 2015. El programa permite hacer varias iteraciones con los mismos parámetros suministrados por el usuario, para este proyecto se analizaron las siguientes graficas:

Variaciones presión de poros

Variaciones de deformación

Graficas de Deformación vs tiempo Graficas de esfuerzo vs deformación

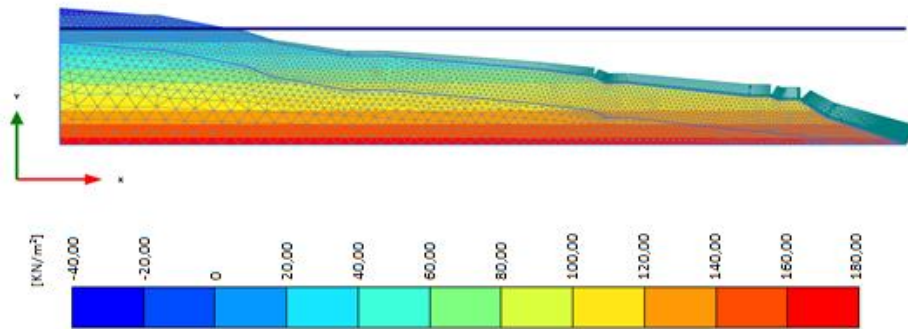
Factor de seguridad

Estas graficas serán analizadas en los puntos más críticos del talud

### 6.1. VARIACIONES EN LA PRESIÓN DE POROS

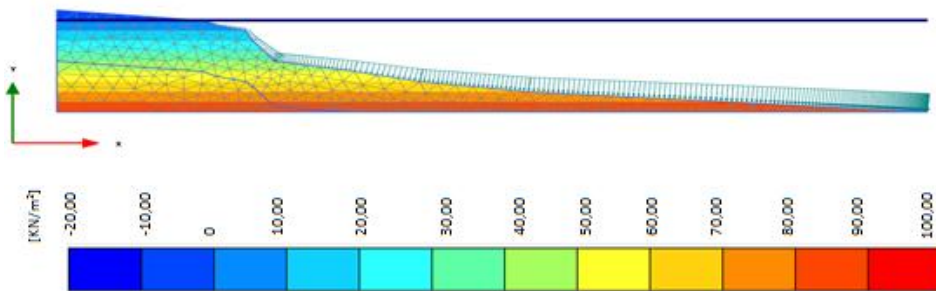
En las figuras se observan las gráficas arrojadas por el software para presión intersticial. En la figura 11 se muestra el análisis para el modelo No. 1, aquí se muestra que no importa la metodología escogida, el resultado será el mismo, para este caso en específico la presión mínima es  $-30 \text{ KN/m}^2$  y presión máxima es  $170 \text{ KN/m}^2$ , en la figura 12 se observan los mismo datos que en la anterior pero para el modelo No. 2 y en este caso la presión mínima es  $-10 \text{ KN/m}^2$  y máxima es  $90 \text{ KN/m}^2$ , analizando estos resultados se concluye que la variación de estos resultados se debe al nivel freático y las dimensiones los materiales en el talud.

Figura 9. Imagen de Presión intersticial Modelo N°1



Fuente. Autores.

Figura 10. Imagen de Presión intersticial Modelo N°2

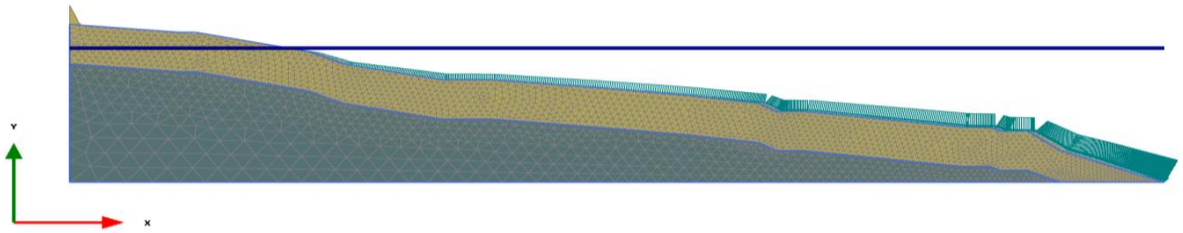


Fuente. Autores.

## 6.2. VARIACIÓN DE DEFORMACIÓN

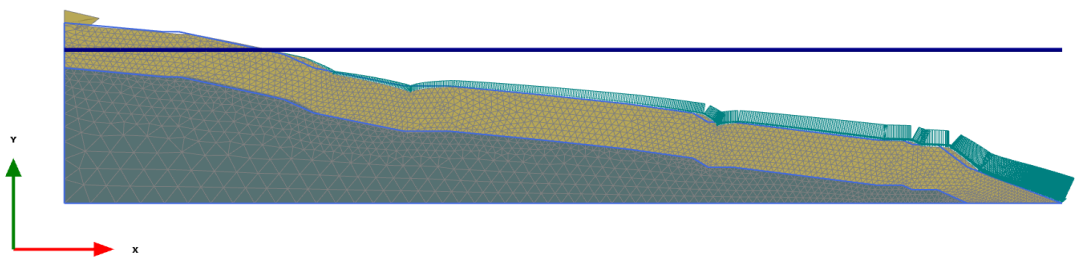
En la figura 13 se puede observar la malla modelada mediante la metodología de Mohr Coulomb para el modelo N°1, en la cual se puede ver un desplazamiento del talud de 0,02312 m. La figura 14 se analiza por el modelo por Soft Soil el cual nos arroja un valor correspondiente a 0,01166 m.

Figura 11. Imagen de deformación del Modelo N°1 Morh.Coulomb



Fuente. Autores.

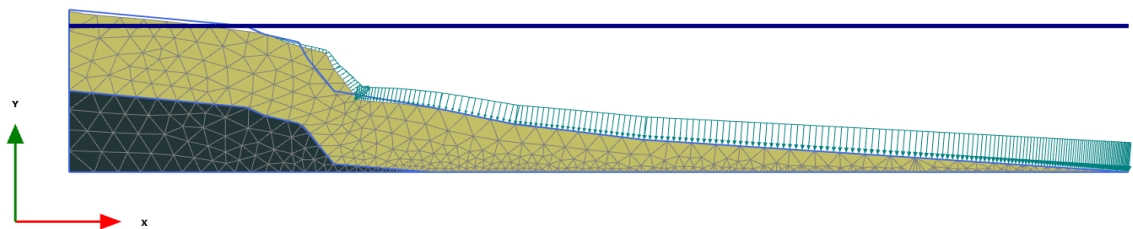
Figura 12. Imagen de deformación del apique N°1 Soft Soil



Fuente. Autores.

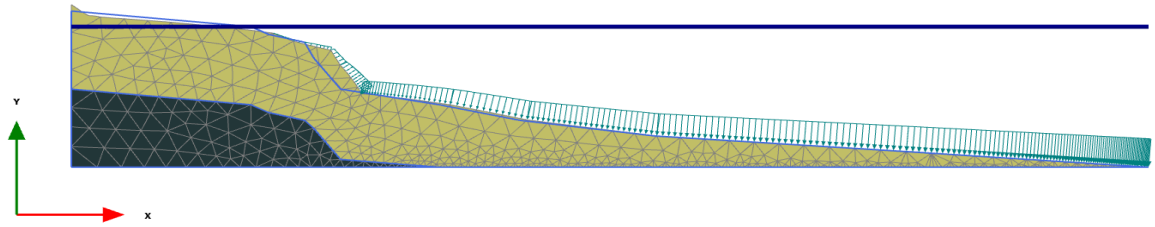
En la figura 15 y 16 se observa el análisis de deformación para el modelo N° 2 por las dos metodologías estudiadas. El método de Morh Coulomb la cual corresponde a la figura 15 su deformación fue de 0,00714 m, al hacerlo por la otra metodología escogida figura 16 su valor corresponde a 0,01745m

Figura 13. Imagen de deformación del Modelo N°2 Morh-Coulomb



Fuente. Autores.

Figura 14. Imagen de deformación del Modelo N°2 Soft Soil

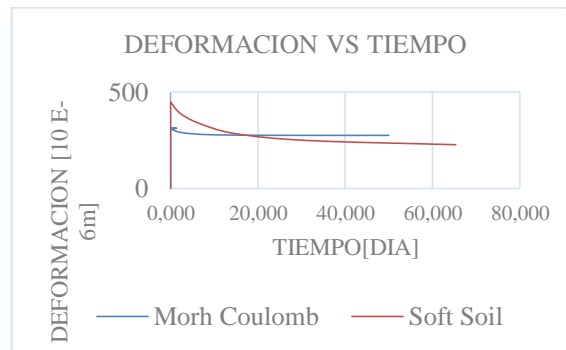


Fuente. Autores.

### 6.3. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN VS TIEMPOS

En esta grafica 1 se puede observar el comportamiento sobre el punto **G** (ver figura 8), en el cual suceden las mayores deformaciones, cuando es modelado mediante la metodología de Morh coulomb en un tiempo de un día, su desplazamiento es 0,315 mm, este va disminuyendo a medida que va aumentando el tiempo, hasta llegar a un valor constante de 0,274 mm. Se obtuvo comportamiento similar por la metodología de soft soil aunque ahora el máximo valor de desplazamiento es 0,448 mm en el mismo tiempo.

Gráfica 1. Grafica Deformación vs. Tiempo para el Modelo No. 1

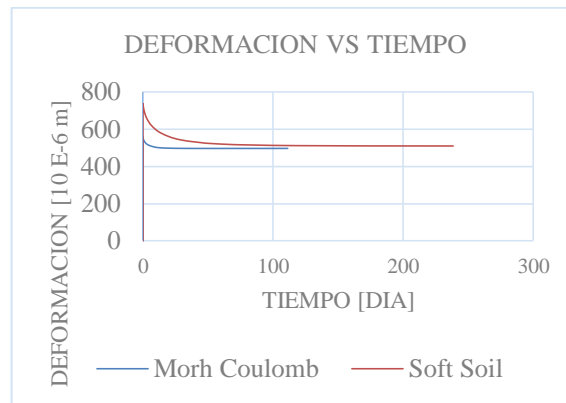


Fuente. Autores.

En la gráfica 2 se ven dos graficas cada una de ellas corresponde al análisis por cada metodología, este se hizo en el punto E (ver figura 9) donde ocurre la máxima deformación, con el valor de 0,557 mm, al pasar el tiempo la deformación

disminuye hasta llegar a un valor constante de 0,496 mm., en la gráfica roja, el valor máximo también se da con el mismo punto, aunque ahora el valor será 0,736mm.

Gráfica 2. Grafica de la Deformación vs. Tiempo para el Modelo No. 2

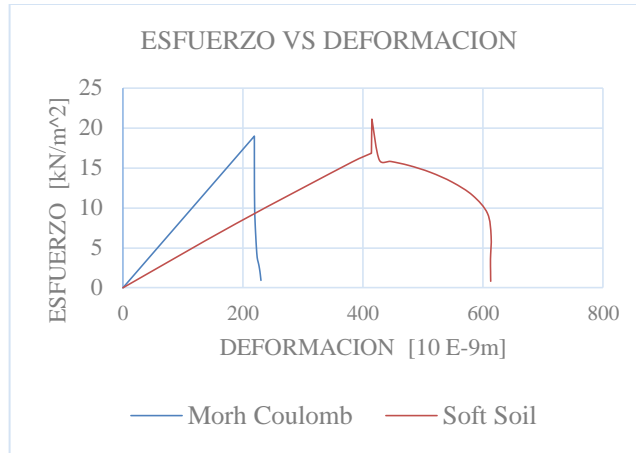


Fuente. Autores.

#### 6.4. GRAFICAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

En la gráfica 3, se observar el comportamiento elástico y plástico que tienen estos materiales por el método de Morh- Coulomb y el método de Soft Soil, donde el esfuerzo máximo es  $18.993 \text{ KN/m}^2$  y  $21.108 \text{ KN/m}^2$ , respectivamente

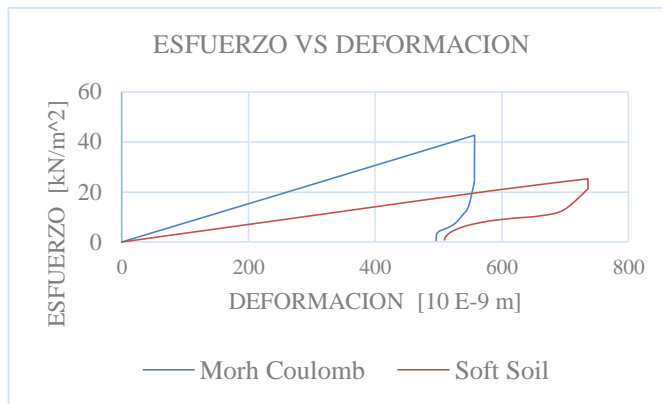
Gráfica 3. Grafica Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo No. 1



Fuente. Autores.

Como en el caso anterior, los dos modelos tienen un comportamiento similar para los dos métodos, el de Morh-Coulomb arroja un esfuerzo de 42,685 KN/m<sup>2</sup>, mientras que el de Soft Soil es 20,516 KN/m<sup>2</sup> (grafica 4).

Gráfica 4. Grafica Esfuerzo vs. Deformación para el Modelo No. 2



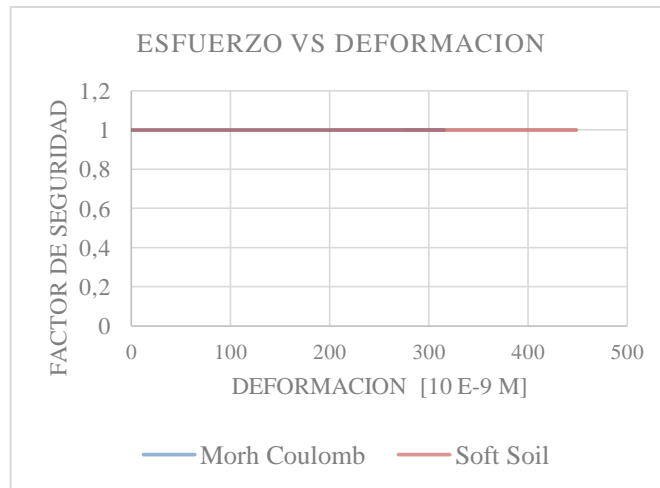
Fuente. Autores.

## 6.5. FACTOR DE SEGURIDAD

En las siguientes graficas 5 y 6 se puede observar los valores del factor de seguridad para cada uno de los talud que se modelaron por Morh Coulomb y Soft

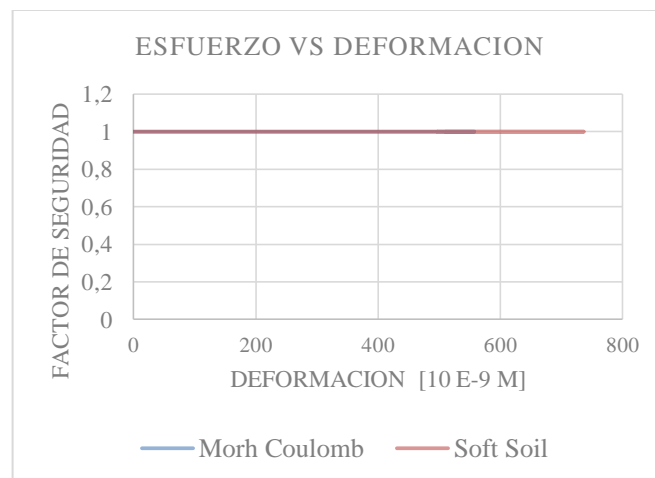
Soil, estos análisis se hace al caso de fallas por deslizamiento en un talud, es la relación entre fuerzas resistentes y fuerzas deslizantes que actúan a lo largo de la superficie del potencial deslizamiento, en nuestro caso el valor obtenido por el análisis es de 1.0 estos nos indica estabilidad del talud.

Gráfica 5. Gráfica del factor de seguridad el Modelo No. 1



Fuente. Autores.

Gráfica 6. Gráfica del factor de seguridad el Modelo No. 2



Fuente. Autores.

Tabla 9. *Resumen de los análisis*

				Morh Coulomb		Soft Soil	
				Modelo No. 1	Modelo No.2	Modelo No. 1	Modelo No.2
Presión de poros	Máxima	KN/m <sup>2</sup>	170	90	170	90	
	Mínima		-30	-10	-30	-10	
Máxima deformación horizontal		m	0,0312	0,00714	0,01166	0,01745	
Máxima deformación (tiempo= 1 día)		m	0,00315	0,00557	0,00448	0,00736	
Máximo esfuerzo		KN/m <sup>2</sup>	18,993	42,685	21,108	20,516	
Factor de seguridad			1,0	1,0	1,0	1,0	

Fuente. Autores.

## 7. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de variación de presión de poros se evidencia que no existen diferencias en los resultados cuando se utilizan las dos metodologías, ya que para el modelo N°1 la presión de poros fue de  $170 \text{ KN/m}^2$  por Morh Coulomb y Soft Soil y para el el modelo N°2 la presión de poros fue de  $90 \text{ KN/m}^2$  por las dos metodologías.

A pesar de que los dos métodos utilizan parámetros de entrada diferentes y modelan el suelo de distintas maneras se encontró una gran similitud en los resultados obtenidos, como por ejemplo los puntos analizados en el apique 1 nos arroja el mayor desplazamiento en el talud fue en el punto G (Figura 8) por las dos metodologías, los resultados no son tan lejanos entre ellos por Morh Coulomb su desplazamiento fue de  $0,315 \text{ mm}$  y por soft soil fue de  $0,448 \text{ mm}$ .

Se encontró la mayor diferencia en el análisis de esfuerzo vs deformación, ya que la máxima esfuerzo en el modelo N°1 fue de  $18,993 \text{ KN/m}^2$  y para el modelo N°2 fue de  $42,685 \text{ KN/m}^2$ , mientras que para la metodología Soft Soil los máximos esfuerzos fueron  $21,108 \text{ KN/m}^2$  y  $20,516 \text{ KN/m}^2$  en el modelo N° 1 y modelo N°2 respectivamente.

Las menores diferencias en los resultados obtenidos se muestran en el factor de seguridad, para las dos metodologías y los dos modelos, ya que en los cuatros casos su valor fue de  $1,0$  lo cual indica que el talud está estabilizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRINKGREVE, Ronald. Selection of soils models and parameters for geotechnical engineering application. En: Soils constitutive models, Evaluation, selection and calibration (GSP 128), ASCE, 2005. p. 69-98.

[2] BRINKGREVE, Ronald. Plaxis 2D: Tutorial manual: Essential for geotechnical professionals. Netherlands. 2010. p.71-77.

[3] VUKOTIC, Goran; FERNANDEZ, Luis y DÍAZ, Emanuel. Análisis de sensibilidad y fiabilidad de cálculo para coeficiente de seguridad frente al deslizamiento en terraplenes apoyados sobre suelos blandos mejorados con columnas de grava" Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Barcelona 30 de Octubre de 2009. p. 1.

[4] DÍAZ, Yamile y LÓPEZ, Elizabeth. Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de punta arenas. (Trabajo de grado). Facultad de Ingeniería. Universidad de Manizales. Departamento en Construcción. 2008. p.2.

[5] KAHLSTRÖM, Mats. Plaxis 2D comparison of Mohr-Coulomb and Soft Soil material models (Trabajo de grado). Luleå University of Technology Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. 2013. p. 6.

[6] PIEDRAHITA, Nathalia y SHELLEY, Efrain. Análisis de la seguridad a largo de un relleno sanitario sobre suelos blandos con modelos 2D y 3D. Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, Quintana Roo. 2012. p.1.

[7] LEDESMA, Osvaldo. Calibración de Cam Clay para suelos del postpampeano (Trabajo de grado). Laboratorio de Mecánica de Suelos, Laboratorio de Materiales y Estructuras Departamentos de Estabilidad y Construcciones. Facultad de Ingeniería-UBA. 1999. (p.3).

[8] CANOBA, Carlos y FRAGA, Hernando. Propiedades elásticas de las rocas. Departamento de Ciencias Geológicas – Escuela de Agrimensura Facultad d Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad nacional de Rosario, 2004. p.8.

## BIBLIOGRAFIA

ARRÚA, Pedro. Comportamiento tenso-deformacional de limos loésicos en dirección horizontal (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias exactas Físicas y Naturales. 2008.

BRINKGREVE, Ronald. Plaxis 2D: Tutorial manual: Essential for geotechnical professionals. Netherlands. 2010.

\_\_\_\_\_. Selection of soils models and parameters for geotechnical engineering application. En: Soils constitutive models, Evaluation, selection and calibration (GSP 128), ASCE, 2005.

CANOBA, Carlos y FRAGA, Hernando. Propiedades elásticas de las rocas. Departamento de Ciencias Geológicas – Escuela de Agrimensura Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura Universidad nacional de Rosario, 2004 .

DIAZ, Yammile y LÓPEZ, Elizabeth. Plaxis como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de punta arenas. (Trabajo de grado). Facultad de Ingeniería. Universidad de Manizales. Departamento en Construcción. 2008.

KAHLSTRÖM, Mats. Plaxis 2D comparison of Mohr-Coulomb and Soft Soil material models (Trabajo de grado). Luleå University of Technology Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. 2013.

LEDESMA, Osvaldo. Calibración de Cam Clay para suelos del postpampeano (Trabajo de grado). Laboratorio de Mecánica de Suelos, Laboratorio de Materiales y Estructuras Departamentos de Estabilidad y Construcciones. Facultad de Ingeniería-UBA. 1999.

LEONI, Augusto. Parametrización de suelos [En línea]. Facultad de ingeniería U.N.L.P. [Citado 10 de Febrero de 2016]. Disponible en [http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Cap%C3%ADtulo%202\\_Parametrizaci%C3%B3n%20de%20suelos.pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Cap%C3%ADtulo%202_Parametrizaci%C3%B3n%20de%20suelos.pdf)

MANTILLA, Luis; CRUZ, Enrique y COLEGIAL, Juan. Introducción a la geología del sector Vélez–Bolívar–Guavatá (departamento de Santander, Colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. Boletín de Geología Vol. 25, No. 40. 2003.

PIEDRAHITA, Nathalia y SHELLEY, Efrain. Análisis de la seguridad a largo de un relleno sanitario sobre suelos blandos con modelos 2D y 3D. Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, Quintana Roo. 2012.

VUKOTIC, Goran; FERNANDEZ, Luis y DÍAZ, Emanuel. Análisis de sensibilidad y fiabilidad de cálculo para coeficiente de seguridad frente al deslizamiento en terraplenes apoyados sobre suelos blandos mejorados con columnas de grava" Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Barcelona 30 de Octubre de 2009.

WOLFRUM, Silvia. Anclaje de rocas (Tesis doctoral). Universidad politécnica de Madrid E.T.S de ingenieros de caminos, canales y puertos. 2005.