

**ASENTAMIENTOS DE ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN TERRENOS
ADYACENTES A LADERAS O EXCAVACIONES**

**JUAN SEBASTIÁN GÁMEZ GUEVARA
ANGIE MICHELL MENESES OREJARENA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ASENTAMIENTOS DE ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN TERRENOS
ADYACENTES A LADERAS O EXCAVACIONES**

**JUAN SEBASTIÁN GÁMEZ GUEVARA
ANGIE MICHELL MENESES OREJARENA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

Director:

Msc. Luis Alberto Capacho Silva



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración recibida de todos aquellos que hicieron posible la realización de este proyecto en especial:

Al profesor Luis Alberto Capacho Silva por haber guiado todo el proyecto y aportar de su conocimiento para la realización del proyecto.

A la escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander por darnos una excelente formación académica, profesional y personal.

A todos los profesores de la escuela de ingeniería civil por haber contribuido en nuestra formación como profesionales íntegros.

A nuestros familiares y amigos por brindarnos su total apoyo durante toda la carrera.

A Dios por darnos la sabiduría para poder realizar con éxito este proyecto de grado.

DEDICATORIA

A mi mayor bendición, mi hija Luna Gabriela Vásquez Meneses

Por este logro que es por ella y para ella, por motivarme todos los días, por enseñarme a ser una mejor versión de mí.

ANGIE MICHELL MENESES OREJARENA

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 ASENTAMIENTOS.....	20
2.1.1 Asentamiento inmediato.....	20
2.1.2 Asentamiento por consolidación.....	20
2.1.3 Asentamiento por compresión secundaria:	20
2.2 TIPOS DE ASENTAMIENTOS	21
2.2.1 Asentamientos uniformes	21
2.2.2 Asentamientos diferenciales.....	21
2.3 LADERAS.....	21
2.3.1 Laderas, zona de riesgo:	22
2.4 EXCAVACIÓN	22
2.4.1 Obras de contención para protección de colindancias:.....	23
2.5 MÉTODOS EN ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS	23
2.5.1 Elementos finitos	23
2.5.2 Plaxis 2D:	24

2.5.3 Modelos constitutivos:	25
2.5.3.3 Modelo elástico lineal:	28
2.5.3.5 Modelo para Suelo Blando (Soft Soil model):.....	28
2.5.3.6 Modelo de Suelo Blando con fluencia (Soft Soil creep model):	28
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 ESCENARIO NÚMERO 1: TERRENO PLANO.....	31
3.1.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos:.....	31
3.1.2 Modelo 2: Casa 2 pisos.....	32
3.2 ESCENARIO NÚMERO 2: TERRENO VECINO A UNA EXCAVACIÓN	32
3.2.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos.....	32
3.2.3 Modelo 3: cambio de distancia.....	33
3.3 ESCENARIO NÚMERO 3: TERRENO EN UNA LADERA	34
3.3.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos.....	34
3.3.2 Modelo 2: Casa 2 pisos.....	34
3.3.3 Modelo 3: cambio de distancia.....	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS POR EL MÉTODO DE MOHR COULOMB	36
4.1.1 Estructura 1: Edificio de 6 pisos.	36
4.1.2 Estructura 2: Casa de 2 pisos.	37
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS POR EL MÉTODO HARDENING SOIL MODEL.....	38
4.2.1 Estructura 1: Edificio de 6 pisos.	38
4.2.2 Estructura 2: Casa de 2 pisos.	39

4.3 ANÁLISIS DE DISTANCIA VS DEFORMACIÓN EN LA EXCAVACIÓN.....	40
4.4 ANÁLISIS DE DISTANCIA VS DEFORMACIÓN EN LA LADERA	41
5. CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
BIBLIOGRAFIA	46
ANEXOS	47

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1 Perfil estratigráfico del suelo. Talud Río de Oro.....</i>	30
<i>Tabla 2 Parámetros para el modelo de Mohr Coulomb.</i>	30
<i>Tabla 3 Parámetros para el modelo de Hardening Soil model.....</i>	30
<i>Tabla 4 Parámetros de las estructuras a tener en cuenta</i>	31
<i>Tabla 5 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Mohr Coulomb.</i>	37
<i>Tabla 6 Asentamientos máximos en los tres terrenos, de la casa de dos pisos por el modelo de Mohr Coulomb.</i>	38
<i>Tabla 7 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Hardening Soil.</i>	39
<i>Tabla 8 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Hardening Soil</i>	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1 Discretización de un elemento continuo</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2 Curva tensión – deformación.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3 Curva tensión - deformación.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4 Modelo 1, escenario 1, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 5 Modelo 2, escenario 1, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6 Modelo 1, escenario 2, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7 Modelo 2, escenario 2, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 8 Modelo 1, escenario 3, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 9 Modelo 2, escenario 3, Nivel freático a 13.5 m.</i>	<i>35</i>

LISTA DE GRAFICOS

Pág.

<i>Gráfico 1 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Mohr Coulomb, del edificio de 6 pisos en los tres escenarios.</i>	<i>36</i>
<i>Gráfico 2 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Mohr Coulomb, de la casa de 2 pisos en los tres escenarios.....</i>	<i>37</i>
<i>Gráfico 3 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Hardening Soil, del edificio de 6 pisos en los tres escenarios.</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 4 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Hardening Soil, de la casa de 2 pisos en los tres escenarios.....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfico 5 Comparación de distancia versus asentamiento en PLAXIS 2D por los modelos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, del edificio de 6 pisos variando la distancia entre la estructura y el borde de la excavación.</i>	<i>40</i>
<i>Gráfico 6 Comparación de distancia versus asentamiento en PLAXIS 2D por los modelos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, del edificio de 6 pisos variando la distancia entre la estructura y la corona de la ladera.</i>	<i>41</i>

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Modelación	47
Anexo B Cálculo de parámetros o características del suelo	83
Anexo C Cálculos de los parámetros de las zapatas	89
Anexo D Resultados de las deformaciones en PLAXIS 2D.	91

RESUMEN

TÍTULO: ASENTAMIENTOS DE ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN TERRENOS ADYACENTES A LADERAS O EXCAVACIONES

AUTOR(ES): JUAN SEBASTIÁN GÁMEZ GUEVARA
ANGIE MICHELL MENESES OREJARENA

PALABRAS CLAVES: asentamientos, ladera, excavación, Plaxis 2D, Mohr Coulomb, Hardening Soil.

DESCRIPCIÓN:

Los estudios de suelos de las edificaciones deben contemplar y estudiar la afectación de estas al terreno circundante, debido a que se aprecian asentamientos en este y a que si estas estructuras se encuentren cerca de una ladera o una excavación, pueden afectar más al suelo, lo que podría traer como consecuencia derrumbes del terreno y daños a las estructuras. El siguiente documento tiene como objeto modelar en PLAXIS 2D diferentes escenarios de terrenos que pueden afectar las condiciones del suelo circundante a edificaciones y provocar asentamientos diferenciales en este, enfocándose en analizar tres escenarios que son: en terreno plano, en terreno vecino a una excavación y a una ladera. A partir de estos modelos se busca comparar los resultados obtenidos del software con el fin de observar las variaciones de los asentamientos dependiendo del cambio de escenario; estos modelos se hicieron en un suelo arenoso limoso, localizado en la vereda Carrizal al frente de Centro abastos, en el municipio de Girón, departamento de Santander, el cual presenta un nivel freático de 13,5 m. y se llevaron a cabo a través de dos métodos que posee PLAXIS 2D, que son el de Mohr Coulomb y Hardening Soil. La escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander cuenta con la licencia original del programa PLAXIS 2D, razón por la cual se trabajó con este programa además de ser uno de los más recomendados para el cálculo de asentamientos diferenciales.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Msc. Luis Alberto Capacho Silva.

ABSTRACT

TITLE: ASENTAMIENTOS DE ESTRUCTURAS LOCALIZADAS EN TERRENOS ADYACENTES A LADERAS O EXCAVACIONES

AUTHOR (S): JUAN SEBASTIÁN GÁMEZ GUEVARA
ANGIE MICHELL MENESES OREJARENA

KEYWORDS: settlements, hillside, Excavation, Plaxis 2d, Mohr Coulomb, Hardening Soil.

DESCRIPTION:

The soil studies of the edifications , should contemplate and study the affectation of these to the surrounding terrain, because they are appreciated settlements in this, and that these structures are located near a hillside or an excavation, can affect more to the soil , which could result in landslides and damage to the structures. The following document aims to model in PLAXIS 2d different terrain scenarios that can affect the conditions of the surrounding soil to edifications and provoke differential settlements in this, focusing on analyzing three scenarios that are: In the flat terrain, in neighboring terrain to an excavation and to a hillside. From these models it is sought to compare the results obtained from the software in order to observe the variations of the settlements depending on the change of scenery; These models were made in a silty sandy soil, located on the sidewalk at the front of the Abastos center, in the municipality of Girón, Santander department which presents a groundwater level at 13.5 m, and were carried out through two methods that POS EE PLAXIS 2d, which are Mohr Coulomb and Hardening Soil.

The School of Civil Engineering of the Industrial University of Santander has the original license of the program PLAXIS 2d reason why we worked with this program besides being one of the most recommended programs for the calculation of differential settlements .

*Degree work

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Msc. Luis Alberto Capacho Silva.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de los asentamientos son de vital importancia para el diseño de las cimentaciones en las obras civiles, evitándose así las fisuras en muros, placas u otros elementos o colapsos que se producen a través del tiempo debido a las deformaciones del suelo. Las grietas por asentamientos diferenciales se pueden originar por una falta de soporte del suelo o por un mal diseño de la cimentación, lo cual causa un movimiento no uniforme de la edificación. A diferencia de las estructurales, estas grietas casi nunca se asocian con el colapso parcial o total de una edificación. Sin embargo, es de vital importancia el estudio de estos asentamientos con la intención de encontrar nuevas alternativas o de determinar la más óptima dependiendo del caso a solucionar. En el proyecto nos enfocaremos en los asentamientos generados en el terreno natural en laderas y excavaciones, teniendo en cuenta las cargas de estructuras cercanas a estos escenarios. Asimismo, considerará los asentamientos en estas estructuras por encontrarse en terreno con una fuerte pendiente (mayor del 50%).

Una de las situaciones que analiza la Ingeniería Civil cuando se trata de suelos y una de las más complejas es el cálculo de asentamientos, especialmente cuando son asentamientos diferenciales, ya que hay movimientos relativos en diferentes partes de la cimentación de la estructura y se van a originar sobreesfuerzos en la misma. Otro factor importante y que no se tiene muy en cuenta son los asentamientos que se dan ya sea en la corona de la ladera o en el borde de la excavación, debido a que son estudios poco comunes y que en muchas ocasiones no se tienen las medidas necesarias para evitar posibles consecuencias negativas tanto para el terreno como para las estructuras.

Con el tiempo las herramientas computacionales han crecido de manera considerable para ayudar y facilitar el trabajo de diferentes campos de la ciencia. A partir de la importancia que han tomado los programas de análisis computacional

en la vida profesional, se ha planteado hacer uso del programa PLAXIS 2D para el desarrollo de este proyecto utilizando dos métodos para el cálculo de asentamientos que son el de Mohr Coulomb y el Hardening Soil. Dichos métodos permitirán modelar los casos más frecuentes que podrían perjudicar el terreno natural circundante a las estructuras que se van a considerar para los modelos, así como los asentamientos en estas. Lo anterior posibilitará la comparación de los resultados que arrojen estos análisis; con el desarrollo del proyecto se ampliará el uso que puede aportar este software en la ingeniería y motivar a estudiantes e ingenieros a aprovechar los recursos que nos brindan estas herramientas tecnológicas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar mediante diferentes metodologías los asentamientos horizontales y verticales inmediatos de construcciones localizadas en terrenos adyacentes a laderas o excavaciones.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1. Seleccionar y organizar las fuentes de información y los datos relevantes, e identificar las diferentes metodologías para determinar los movimientos horizontales y verticales del terreno adyacente a una excavación.

1.2.2. Crear un escenario de asentamientos mediante herramienta software en donde se plasme las variables del suelo de un talud de corte de sótano y la carga de la edificación vecina.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ASENTAMIENTOS

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

Los asentamientos se dividen en tres tipos:

2.1.1 Asentamiento inmediato: ocurre como consecuencia de la deformación elástica del suelo. Este tipo de asentamiento puede llevarse a cabo en suelos secos, húmedos o saturados, sin que esto afecte la humedad del resultado final. Los suelos más adecuados para la observación de este cambio son los granulares y se apoya en los fundamentos de la teoría de la elasticidad, según la cual los sólidos elásticos lineales sufren deformaciones y desplazamientos lineales si son sometidos a pequeñas cargas.

2.1.2 Asentamiento por consolidación: se trata del cambio de volumen que se da en suelos cohesivos saturados como resultado de que expulse el agua contenida en sus poros. Los dos tipos de suelo que abarca dicho grupo son los arcillosos y los arcillosos saturados, con grava fina, y uno de sus factores más importantes es la permeabilidad, la cual debe ser baja. El asentamiento por consolidación es una deformación que depende del tiempo.

2.1.3 Asentamiento por compresión secundaria: tiene lugar como resultado del ajuste de la estructura del terreno y seguidamente no hay compresión de poros ni esfuerzo. En su nombre aparece la palabra secundaria para hacer referencia a que esta compresión ocurre luego de una deformación, la cual implica un esfuerzo efectivo constante sin modificación en la cantidad de agua en los poros. Esta clase

de asentamiento también es dependiente del tiempo. La suma de estas tres da como resultado el asentamiento total de una estructura. [1]

2.2 TIPOS DE ASENTAMIENTOS

2.2.1 Asentamientos uniformes: Se presentan cuando las deformaciones en el subsuelo son iguales en cualquier punto de la superficie construida. Este tipo de asentamiento se presenta en lugares donde el tipo de suelo es el mismo en el área de construcción y también el contenido de agua considerando las cargas en sus cimentaciones iguales en cada una de ellas.

2.2.2 Asentamientos diferenciales: Este tipo de asentamiento es el que se presenta en la mayoría de los casos en el que la estructura tiene diferentes asentamientos de un punto a otro y cambia la magnitud y distribución de los esfuerzos con el que fue diseñada la estructura; se puede dar por la variación de la composición del suelo, lo que causa que sean diferentes. [2]

2.3 LADERAS

La noción de ladera suele utilizarse para nombrar al declive de una montaña, de un monte o de una altura en general. Puede decirse, en este sentido, que la ladera es uno de los lados de la montaña en cuestión. Son diversos los fenómenos que existen de ladera; no obstante, tomando como criterio el movimiento que vienen a realizar, tendríamos que decir que los más significativos son los que se exponen a continuación:

- Movimientos de flujo, que no tienen una superficie neta de lo que sería desplazamiento, entre otras cosas. Dentro de dicha categoría podríamos incluir tanto a la solifluxión como a la reptación.
- Desprendimientos que son de carácter vertical.
- Deslizamientos que pueden ser rotacionales o traslacionales.
- Movimientos complejos, en los cuales se combinan varios de los fenómenos de ladera citados. [3]

2.3.1 Laderas, zona de riesgo: Entre las principales causas del deterioro de los suelos en Latinoamérica están los rellenos antropogénicos y la tendencia a construir en zonas de ladera, según lo afirma el ingeniero Alfonso Álvarez Manilla Aseves, de la empresa Plaxis Latinoamérica y docente de la Universidad Autónoma de Querétaro. Él menciona algunas situaciones causantes de vulnerabilidad en el terreno en esta ciudad mexicana, las cuales se repiten a lo largo de América Latina.

“Muchos asentamientos humanos buscan lugares que cuenten con vistas espectaculares, las cuales, generalmente, se presentan en zonas de ladera o sitios altos. Y, por el tipo de material geológico del que están constituidos estos terrenos (tales como coluviones, depósitos de pie de monte, de talud, que son materiales granulados sueltos, por sus propiedades mecánicas y la lluvia potencial), pierden la resistencia al humedecerse y sobrevienen los deslizamientos de una manera súbita o través del tiempo”, indicó Manilla Aseves. [4]

2.4 EXCAVACIÓN

Se entenderá por excavación al proceso de excavar y retirar volúmenes de tierra u otros materiales para la conformación de espacios donde serán alojados cimentaciones, tanques de agua, hormigones, mamposterías y secciones correspondientes a sistemas hidráulicos o sanitarios según planos de proyecto. [5]

Para ejecutar los trabajos de excavación o movimientos de tierra, se debe contar con estudios previos. Estos estudios deben aportar información concreta acerca de las características del suelo antes de iniciar las labores de excavación. Se aconseja tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Contar con un estudio estratigráfico del terreno a excavar, el cual demuestre qué tipo de suelo se espera encontrar.
- Se debe determinar con exactitud el nivel freático del lugar, de gran importancia para poder determinar la forma de trabajo que se tendrá durante la excavación.

- Ubicación de edificaciones próximas o colindantes, se debe contar con información actualizada del estado de dichas construcciones, tales como la profundidad de cimentación.
- Cota máxima de la profundidad que alcanzará la excavación.
- Detectar en el subsuelo todos los obstáculos y/o infraestructura existente que pudiera afectar la excavación. Como sistemas de comunicaciones (líneas de teléfono, internet, etc.), sistemas de agua potable, drenajes u otros. [6]

2.4.1 Obras de contención para protección de colindancias: Al momento de realizar una excavación de sótanos de edificios es usual que se realice en áreas de tipo residencial o comercial, donde generalmente se encuentran edificaciones importantes. Para evitar realizar algún tipo de daño a la estructura aledaña, debido a la diferencia de niveles generados por la excavación, se debe contar con un sistema de protección adecuado al tipo de suelo con que se cuenta y con el tipo de edificaciones que se ven afectadas. [7]

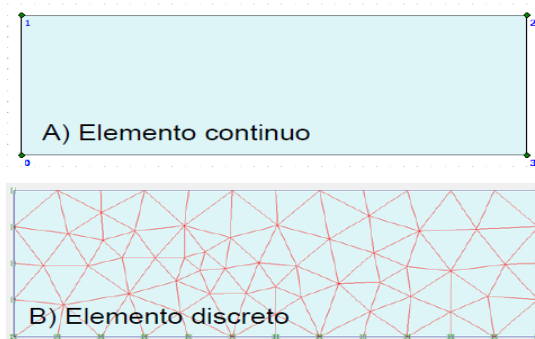
2.5 MÉTODOS EN ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS

2.5.1 Elementos finitos: La base del método de elementos finitos es la representación de un cuerpo por un ensamble de subdivisiones llamadas elementos. Estos se interconectan a través de puntos llamados nodos. Así, pues, el fin del método de elementos finitos es determinar deformaciones o características particulares del suelo. Al introducir cargas al sistema, los transforma en esfuerzos normales y cortantes que introduce a una matriz y, al solucionarla, se obtendrán los datos requeridos como esfuerzos y deformaciones.

En consecuencia, el método se ha usado especialmente en el campo de la ingeniería para dar solución a sus diversos problemas, basándose en un cuerpo o estructura dividida en elementos discretos con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente y

que además proporciona el estado de tensiones y deformaciones. Es un procedimiento numérico aplicable a un gran número de problemas con condiciones de borde impuestas (en las estructuras las condiciones de borde serían: restricciones y cargas externas) Pezzotti (2007). Para facilitar y ayudar la ejecución de este método hay herramientas computacionales que lo aplican, algunos de estos softwares son: GEO5 que contiene el programa MEF especializada en este método, SAGE CRISP y PLAXIS 2D y 3D.

Figura 1 Discretización de un elemento continuo



2.5.2 Plaxis 2D: Se elige el programa geotécnico Plaxis 2D, que implementa el método de elementos finitos. Dicho programa ofrece la posibilidad de analizar diferentes modelos de comportamiento del suelo, al tiempo en que permite modelar una gran cantidad de opciones para el estudio de cualquier tipo de terreno y de geometría. Por ello, se utilizará el mencionado programa PLAXIS, gracias a su utilidad en la Ingeniería Civil para dar solución a ecuaciones diferenciales de gran complejidad, simplificando los retos de diseño y construcción geotécnica. Por ello que se requieren herramientas especializadas para conocer las deformaciones en las diferentes etapas constructivas. Además, PLAXIS es un programa que implementa Elementos Finitos para el cálculo de deformaciones y esfuerzos de diversos problemas de distinta naturaleza, utilizados en proyectos como excavaciones, presas, taludes y túneles.

El programa se encuentra regido por otros 4 subprogramas, que son: Input, Calculations, Output y Curves. En su orden respectivo, el Input permite introducir la geometría del suelo y cimiento, además de cargas; este proceso se realiza de forma sencilla debido a que consta de un sistema CAD para su elaboración. El segundo subprograma llamado Calculations permite describir el tipo de análisis que se desea ejecutar en un tiempo determinado y la aplicación de las cargas al modelo. El output permitirá mostrar los resultados de los cálculos, presiones, malla de elementos finitos, entre otros. Por último, el subprograma Curves muestra de forma sencilla los resultados mediante gráficas. Es importante entender los modelos del programa que se definen en el subprograma Input. [8]

2.5.3 Modelos constitutivos: Los dos modelos constitutivos más utilizados son el *Mohr Coulomb* (MC) y el *Hardening Soil* (HS). Sin embargo, existen modelos más complejos para estudios más elaborados o para tipos de terrenos con unas características mucho más específicas. Los que se utilizaron en esta investigación se mencionan a continuación:

2.5.3.1 Mohr Coulomb: Este modelo se conoce como un modelo de plasticidad perfecta. Si se observa la gráfica tensión - deformación, se puede detallar cómo en un primer tramo tiene un comportamiento elástico definido por el valor *módulo de Young* (E). Cuando la gráfica alcanza una tensión determinada, el terreno tiene un comportamiento plástico, donde las deformaciones son irreversibles. Una vez alcanzado este tramo, incluso realizando ciclos de descarga de tensiones, no se recuperan las deformaciones. Por otro lado, estos ciclos se realizan con un módulo de descarga igual que el valor del *módulo de Young* asociado al tramo elástico.

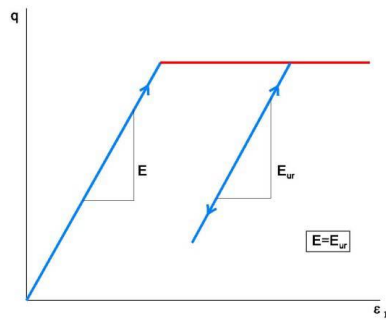


Figura 2 Curva tensión – deformación

- **Parámetros de cálculo Mohr Coulomb**

Para definir un terreno con el modelo elasto-plástico de *Mohr Coulomb* se necesitan cuatro parámetros que se enumeran a continuación:

- Módulo de Young (E).
- Coeficiente de Poisson (ν).
- Ángulo de rozamiento interno (ϕ).
- Cohesión (c).

Con estos parámetros se definen propiedades del terreno, tales como: elasticidad del suelo (E y ν) resistencia y plasticidad (ϕ y c). [9]

2.5.3.2 Hardening Soil El modelo Hardening Soil es un modelo hiperbólico de endurecimiento. La característica principal de este modelo es que la superficie de fluencia no se fija en el espacio, ya que se puede expandir debido a las deformaciones plásticas. Dichas deformaciones pueden darse por endurecimiento, por compresión o por endurecimiento por cortante.

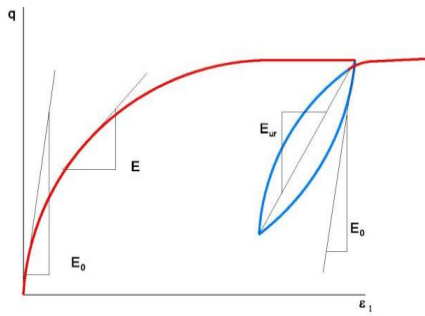


Figura 3 Curva tensión - deformación

El modelo *Hardening Soil* es capaz de reproducir fenómenos básicos del terreno como los que se citan continuación:

- Disminución del volumen de vacíos producida por deformaciones plásticas.
- Aumento de los módulos de rigidez con mayores tensiones de confinamiento (relacionadas con la profundidad).
- Consideración de los efectos de preconsolidación, dada la historia de un terreno concreto.
- Consideración de deformaciones irreversibles.
- Consideración de la dilatancia, fenómeno que produce un aumento del volumen del terreno al tener aplicada una tensión de cizalladura.

- **Parámetros de cálculo *Hardening Soil***

Para definir un terreno con el modelo de *Hardening Soil* se necesitan muchos más parámetros que en el caso de los modelos con *Mohr Coulomb*. En total, se necesitan once parámetros que se enumeran a continuación:

- 1- Cohesión (c).
- 2- Ángulo de rozamiento interno (ϕ).
- 3- Ángulo de dilatancia (ψ).
- 4- Rigidez secante en ensayos triaxiales (E_{50ref}).
- 5- Rigidez tangente en ensayos edométricos (E_{oedRef}).
- 6- Potencia de la dependencia tensional de la rigidez (m).
- 7- Rigidez en carga - recarga (E_{urRef}).

8- Coeficiente de Poisson en carga - recarga (v_{ur}).

9- Tensión de referencia para las rigideces (σ'_{ref}).

10- Coeficiente de presión lateral de tierras (K_{onc}).

11- Relación entre q_f y q_a (R_f).

Los tres primeros parámetros definen la resistencia del terreno (c , ϕ y ψ), los cuatro siguientes, la rigidez del terreno (E_{50ref} , E_{oedRef} y E_{urRef}) y los cuatro restantes se consideran parámetros avanzados. [9]

2.5.3.3 Modelo elástico lineal: Este modelo representa la ley de Hooke de elasticidad lineal isótropa. El modelo incluye dos parámetros de rigidez elástica a saber: el módulo de Young, E , y el coeficiente de Poisson, ν . El modelo elástico lineal tiene muchas limitaciones en relación a la simulación del comportamiento de los suelos. Se utiliza fundamentalmente para capas rígidas de suelo.

2.5.3.4 Modelo para Roca Fracturada (Jointed Rock model): Se trata de un modelo elástico-plástico anisótropo en que la rotura por acción de las tensiones tangenciales sólo puede producirse en un número limitado de direcciones de deslizamiento. Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada.

2.5.3.5 Modelo para Suelo Blando (Soft Soil model): Es un método utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos como arcillas normalmente consolidadas y turbas. El modelo proporciona buenos resultados en las situaciones de compresión primaria.

2.5.3.6 Modelo de Suelo Blando con fluencia (Soft Soil creep model): Es un modelo de segundo orden formulado en el marco de la visco plasticidad. El modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento dependiente del tiempo de suelos blandos tales como arcillas normalmente consolidadas y turbas. El modelo incluye una ley logarítmica para la variación de rigidez con el cambio de volumen, cuyo fin es calcular los asentamientos. [10]

3. METODOLOGÍA

El objetivo principal del trabajo de investigación es evaluar, mediante diferentes metodologías, los asentamientos del terreno natural adyacente a una ladera o excavación por medio del programa informático como PLAXIS 2D utilizando dos métodos: el Mohr Coulomb y el Hardening Soil. Estos últimos se escogieron porque son los únicos que cumplen con el desarrollo de los objetivos planteados y con el perfil estratigráfico del suelo. Para ello se decidió plantear 3 escenarios que son un terreno plano, un terreno vecino a una excavación y una ladera. Para cada uno de estos escenarios se plantearon 2 modelos diferentes, el primero con las cargas transmitidas al suelo de un edificio de 6 pisos, el segundo con las cargas transmitidas al suelo de una casa de 2 pisos y para los dos últimos escenarios se planteó un tercer modelo en el que variará la distancia entre la ladera y la excavación con la estructura del edificio de 6 pisos. Con estos dos modelos se hará el respectivo análisis en el software y, posteriormente, hacer una comparación de los resultados obtenidos. Estos modelos representan algunas condiciones de terrenos en las cuales se pueden presentar asentamientos diferenciales en las estructuras y en el terreno natural circundante a estas.

En el Anexo A. se encuentra una mayor comprensión del manejo del software Plaxis 2D, en el cual se muestra un paso a paso general y detallado de cómo se usó este software para el análisis de estos modelos.

El suelo para estos modelos fue tomado de un estudio preliminar realizado en un talud de Río de Oro, Santander, conformado por tres tipos de arenas limosas y un limo.

Los siguientes parámetros geotécnicos del perfil estratigráfico para ambos modelos se obtuvieron a partir de ensayos ya realizados anteriormente y otros calculados de manera teórica.

Tabla 1 Perfil estratigráfico del suelo. Talud Río de Oro.

Muestra	Perfil estratigráfico del suelo		
	Profundidad [m]	Clasificación	Descripción
M1	0 a 3	SM	Arena limosa, color café claro
M2	3 a 9	SM	Arena limosa, color gris a marrón
M3	9 a 12	SM	Arena limosa, color rosado
M4	12 a 16+	ML	Limo, color gris oscuro

Tabla 2 Parámetros para el modelo de Mohr Coulomb.

Muestra	Parámetros modelo Mohr Coulomb					
	ϕ	Cohesión [Kpa]	γ_s [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	Módulo de young E [Mpa]	Coefficiente de Poisson [ν]
M1	41	40.94	17,552666 67	18.6	14	0.26
M2	41	35.70	15,942	17.0	14	0.26
M3	45	15.17	16,2104	17.2	14	0.226
M4	29	12.81	17,8740	21.2	14	0.34

Tabla 3 Parámetros para el modelo de Hardening Soil model

Muestra	Parámetros modelo Hardening Soil model							
	ϕ	Cohesión [Kpa]	γ_s [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	E 50 ref. [Mpa]	E oed ref. [Mpa]	E ur ref. [Mpa]	K onc
M1	41	40.94	17,552667	18.6	14	0.26	0.26	0,34
M2	41	35.70	15,942	17.0	14	0.26	0.26	0,34
M3	45	15.17	16,2104	17.2	14	0.226	0.226	0,29
M4	29	12.81	17,87403	21.2	14	0.34	0.34	0,51

Para los modelos se emplearon dos estructuras: estructura 1: Edificio de 6 pisos, estructura 2: Casa de dos pisos.

Las cargas y parámetros de las zapatas de la estructura 1 fueron tomadas de una edificación existente en la ciudad de Bucaramanga; las cargas y parámetros de la estructura 2 se diseñaron con el fin de simular y aproximar valores de una casa promedio de dos pisos. El dato se verá en la siguiente tabla:

Tabla 4 *Parámetros de las estructuras a tener en cuenta*

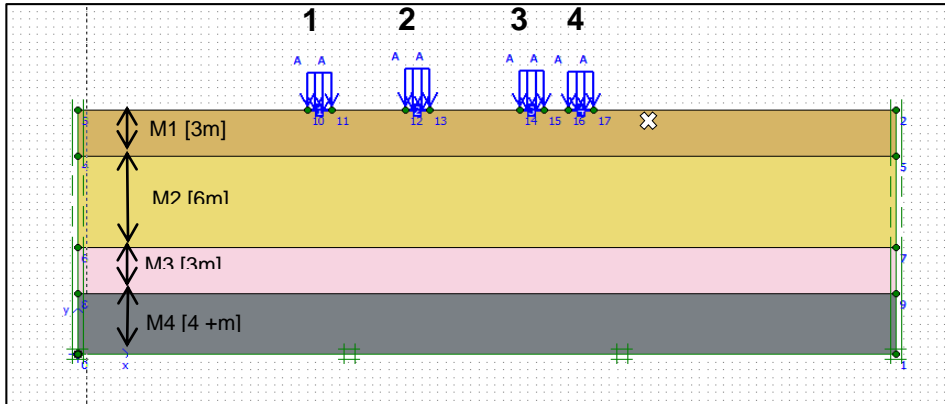
Edificación	DATOS DE LAS ZAPATAS				PARÁMETROS PARA INGRESAR EN EL PROGRAMA				
	Zapatas tipo	E Mpa	A [m ²]	I [m ⁴]	EA [KN]	EI [KN*m ²]	Peso [KN]	Coeficiente de Poisson del concreto ν	Cargas [KN/m ²]
Edificio 6 pisos	1	20	4,5	3,38	90000	67500	54	0,15	346
	2	20	5,78	5,57	115600	111361	69,4	0,15	382
	3	20	5,78	5,57	115600	111361	69,4	0,15	361
	4	20	5,12	4,37	102400	87381	61,4	0,15	354
Casa 2 pisos	1'	20	2	0,67	40000	13333	24	0,15	157
	2'	20	4,5	3,38	90000	67500	30	0,15	145
	3'	20	3,38	1,9	67600	38081	25	0,15	146

El valor de la permeabilidad K_o es el mismo valor para todos los estratos de suelos y fue estimado en 0.001m/día a partir de rangos obtenidos de fuentes bibliográficas. [11]

3.1 ESCENARIO NÚMERO 1: TERRENO PLANO

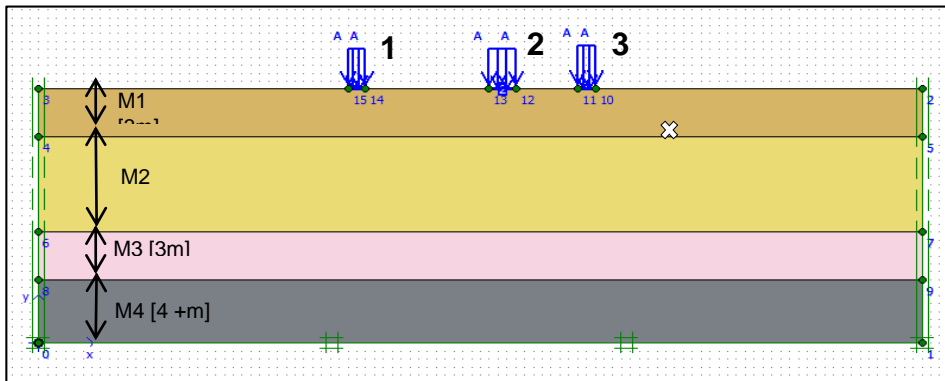
3.1.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos: Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno al cual se aplicará la acción de las cargas ejercidas por la estructura 1 correspondiente al edificio de 6 pisos, del cual analizamos 4 zapatas con el fin de examinar los asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 4 Modelo 1, escenario 1, Nivel freático a 13.5 m.



3.1.2 Modelo 2: Casa 2 pisos. Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno plano al cual se le aplicará la acción de las cargas ejercidas por la estructura 2 correspondiente a la casa de 2 pisos, de la cual analizamos 3 zapatas con el fin de examinarlos asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 5 Modelo 2, escenario 1, Nivel freático a 13.5 m.

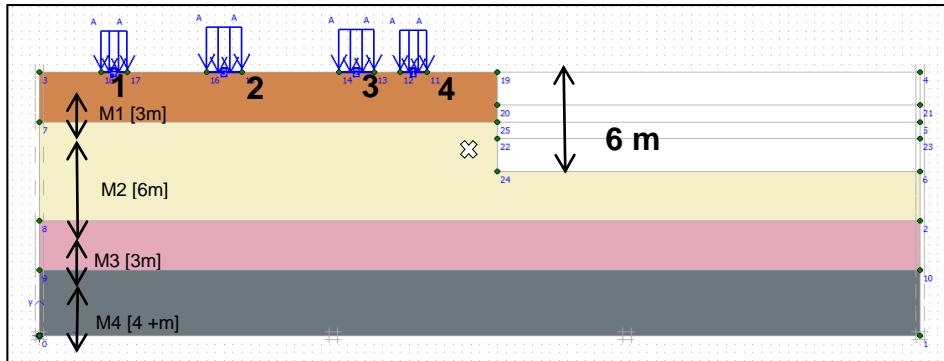


3.2 ESCENARIO NÚMERO 2: TERRENO VECINO A UNA EXCAVACIÓN

3.2.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos. Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno en el cual se realizará una excavación de 6 metros a 4

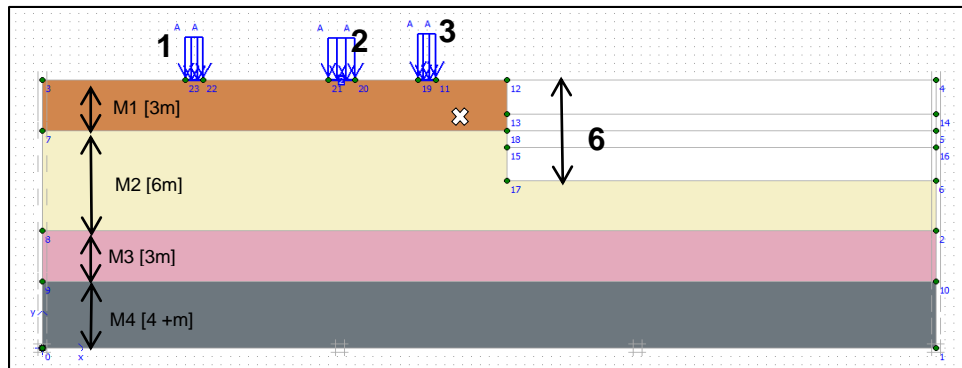
metros de la estructura y se evaluará con las cargas ejercidas por la estructura 1 correspondiente al edificio de 6 pisos, del cual analizamos 4 zapatas, con el fin de examinarlos asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 6 Modelo 1, escenario 2, Nivel freático a 13.5 m.



3.2.2 Modelo 2: casa 2 pisos. Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno en el cual se realizará una excavación de 6 metros a 4 metros de la estructura y se evaluará con las cargas ejercidas por la estructura 2 correspondiente a la casa de 2 pisos, de la cual analizamos 3 zapatas, con el fin de examinarlos asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 7 Modelo 2, escenario 2, Nivel freático a 13.5 m.



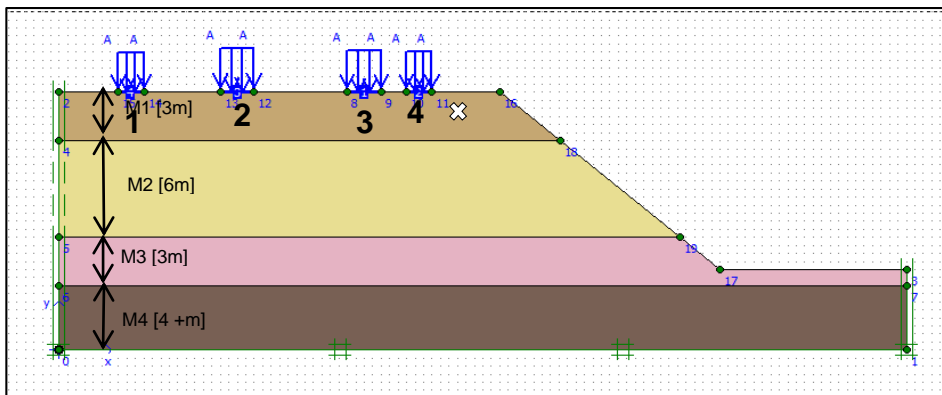
3.2.3 Modelo 3: cambio de distancia. En este modelo se analiza el comportamiento del terreno manteniendo las condiciones del numeral 3.2.1 (Modelo

1: Edificio 6 pisos) y variando la distancia que hay entre las cargas y el inicio de la excavación, realizando modelos cada 1 m.

3.3 ESCENARIO NÚMERO 3: TERRENO EN UNA LADERA

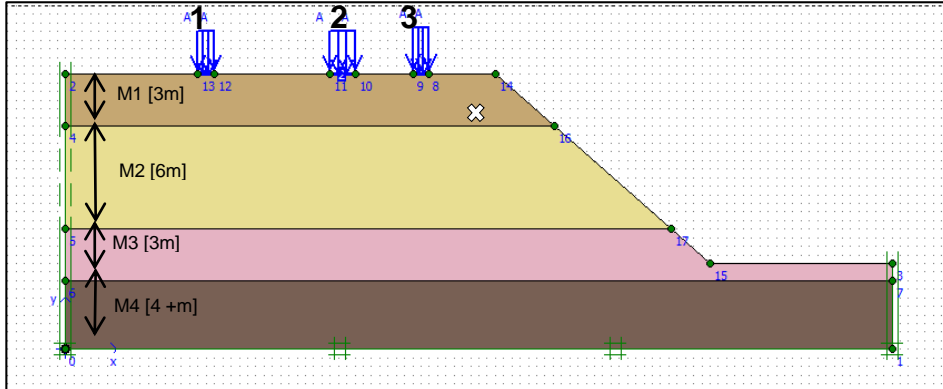
3.3.1 Modelo 1: Edificio 6 pisos. Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno en el cual se realizará una ladera con un ángulo arbitrario de inclinación de 40.24° a 4 metros de la estructura y se evaluará con las cargas ejercidas por la estructura 1 correspondiente al edificio de 6 pisos, del cual analizamos 4 zapatas, con el fin de examinar los asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 8 Modelo 1, escenario 3, Nivel freático a 13.5 m.



3.3.2 Modelo 2: Casa 2 pisos. Para el primer modelo se analiza el comportamiento del terreno en el cual se realizará una ladera con un ángulo arbitrario de inclinación de 40.24° a 4 metros de la estructura y se evaluará con las cargas ejercidas por la estructura 2 correspondiente a la casa de 2 pisos, de la cual analizamos 3 zapatas, con el fin de examinar los asentamientos obtenidos en el punto X ubicado a 2 metros de la estructura y 2 metros por debajo del suelo.

Figura 9 Modelo 2, escenario 3, Nivel freático a 13.5 m.



3.3.3 Modelo 3: cambio de distancia. En este modelo se analiza el comportamiento del terreno manteniendo las condiciones del numeral 3.3.1 (Modelo 1: Edificio 6 pisos) y variando la distancia que hay entre las cargas y el inicio de la ladera, realizando modelos cada 1 m.

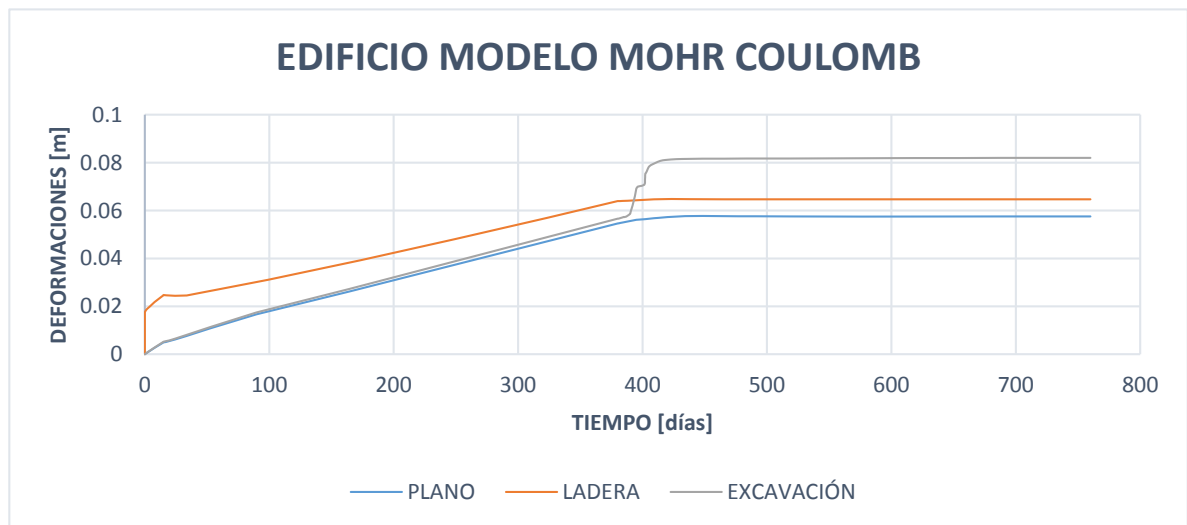
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran dos gráficas en las que se utilizan los resultados obtenidos por cada una de las estructuras estudiadas por los dos métodos comparando los asentamientos con el cambio de escenario.

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS POR EL MÉTODO DE MOHR COULOMB

4.1.1 Estructura 1: Edificio de 6 pisos. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos:

Gráfico 1 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Mohr Coulomb, del edificio de 6 pisos en los tres escenarios.



El resultado de esta gráfica muestra los asentamientos totales evaluados en los tres escenarios con el punto establecido X. Los comportamientos de las deformaciones en la ladera tienden a ser de mayor magnitud que en un terreno plano y, como se espera, la conducta de la gráfica de la excavación es muy similar a la del terreno plano hasta que esta se realiza a una distancia de 4 metros del edificio causando

cambios notorios en los asentamientos. También se obtuvo que después de determinado tiempo las deformaciones tienen un comportamiento constante.

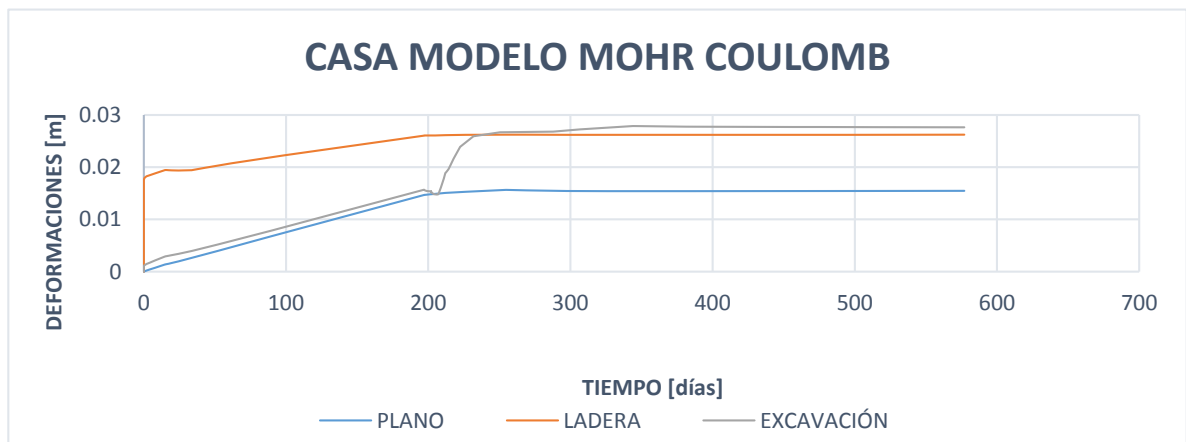
La siguiente tabla muestra los asentamientos máximos que se encuentran debajo de la estructura donde se aplica la carga al suelo; se nota que no hay una diferencia mayor a 3 cm entre estos; revisar Anexo D.

Tabla 5 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Mohr Coulomb.

EDIFICIO	ASENTAMIENTOS MÁXIMOS Mohr Coulomb		
TERRENO	PLANO	EXCAVACIÓN	LADERA
ASENTAMIENTO [m]	0,134	0,157	0,158

4.1.2 Estructura 2: Casa de 2 pisos. En la siguiente grafica se muestra los resultados obtenidos:

Gráfico 2 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Mohr Coulomb, de la casa de 2 pisos en los tres escenarios



El resultado de esta gráfica muestra un comportamiento muy similar a la gráfica del numeral anterior 4.1.1 (Estructura 1: Edificio de 6 pisos) con unos asentamientos mucho más pequeños y, al ser el rango de las deformaciones más reducido, se

percibe en la gráfica del terreno plano y el terreno de la excavación la falta de precisión al elegir un punto con las mismas coordenadas debido al cambio de geometría del terreno y la malla creada por Plaxis 2D.

A continuación, en la tabla de asentamientos máximos que se encuentran debajo de las estructuras donde se aplica la carga, se puede notar que, al disminuir la carga notablemente, los asentamientos no superan los 5 cm y la diferencia de estos con el cambio de escenario no es mayor a 1 cm; revisar Anexo D.

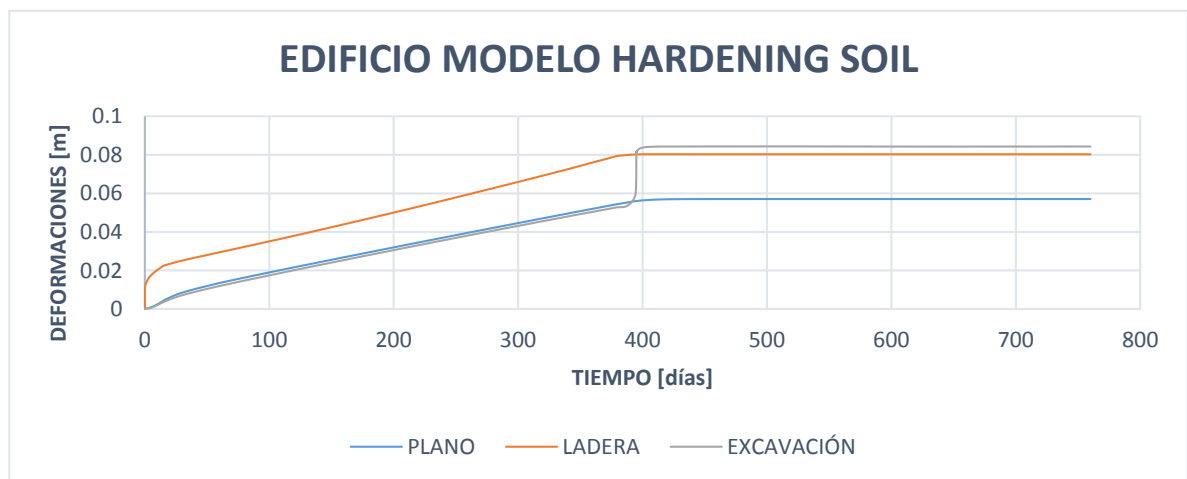
Tabla 6 Asentamientos máximos en los tres terrenos, de la casa de dos pisos por el modelo de Mohr Coulomb.

CASA	ASENTAMIENTOS MÁXIMOS Mohr Coulomb		
TERRENO	PLANO	EXCAVACIÓN	LADERA
ASENTAMIENTO [m]	0,0414	0,0475	0,0476

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS TRES ESCENARIOS POR EL MÉTODO HARDENING SOIL MODEL

4.2.1 Estructura 1: Edificio de 6 pisos. En la siguiente gráfica se muestra los resultados obtenidos:

Gráfico 3 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Hardening Soil, del edificio de 6 pisos en los tres escenarios.



El resultado de esta gráfica muestra los asentamientos totales evaluados en los tres escenarios con el punto establecido X por el modelo de Hardening Soil. Las deformaciones entre los dos métodos tienen diferencias que no pasan los 10 mm y un comportamiento muy similar a los resultados obtenidos con el método de Mohr Coulomb.

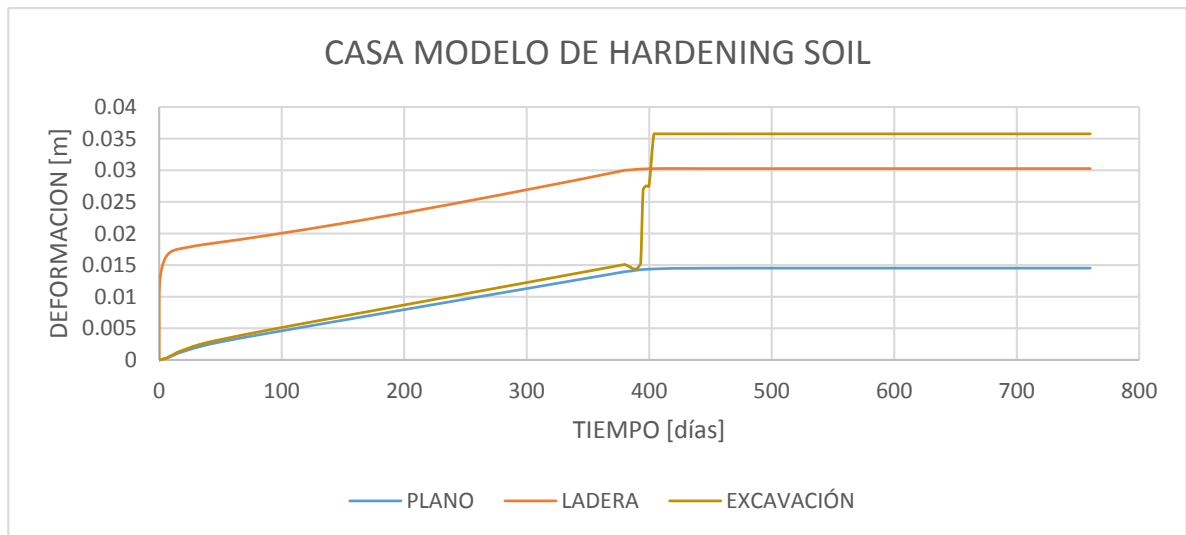
Tabla 7 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Hardening Soil.

EDIFICIO	ASENTAMIENTOS MÁXIMOS Hardening Soil model		
TERRENO	PLANO	EXCAVACIÓN	LADERA
ASENTAMIENTO [m]	0,134	0,157	0,158

Revisar Anexo D.

4.2.2 Estructura 2: Casa de 2 pisos. En la siguiente gráfica se muestra los resultados obtenidos:

Gráfico 4 Comparación de tiempo versus asentamiento en PLAXIS 2D por el modelo de Hardening Soil, de la casa de 2 pisos en los tres escenarios.



El resultado de esta gráfica muestra un comportamiento muy similar a la gráfica del numeral anterior 4.2.1 (Estructura 1: Edificio de 6 pisos) con unos asentamientos

mucho más pequeños. Los asentamientos mayores tienen una diferencia que no supera los 2 mm.

Tabla 8 Asentamientos máximos en los tres terrenos, del edificio de 6 pisos modelo de Hardening Soil

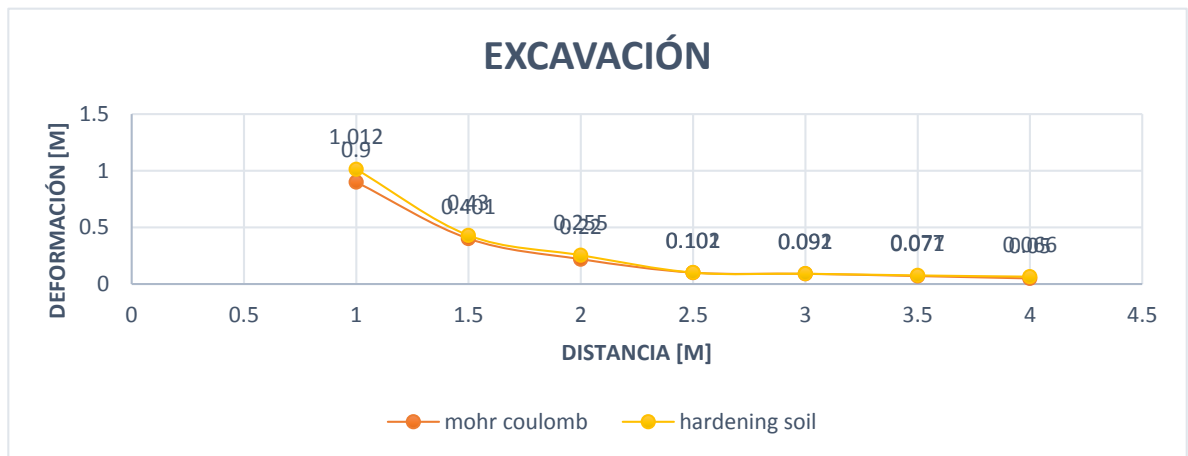
CASA	ASENTAMIENTOS MÁXIMOS Hardening Soil Model		
TERRENO	PLANO	EXCAVACIÓN	LADERA
ASENTAMIENTO [m]	0,0414	0,0475	0,0476

Revisar Anexo D.

4.3 ANÁLISIS DE DISTANCIA VS DEFORMACIÓN EN LA EXCAVACIÓN

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de los asentamientos obtenidos en el punto X cuando se varía la distancia entre la estructura y el borde de la excavación:

Gráfico 5 Comparación de distancia versus asentamiento en PLAXIS 2D por los modelos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, del edificio de 6 pisos variando la distancia entre la estructura y el borde de la excavación.



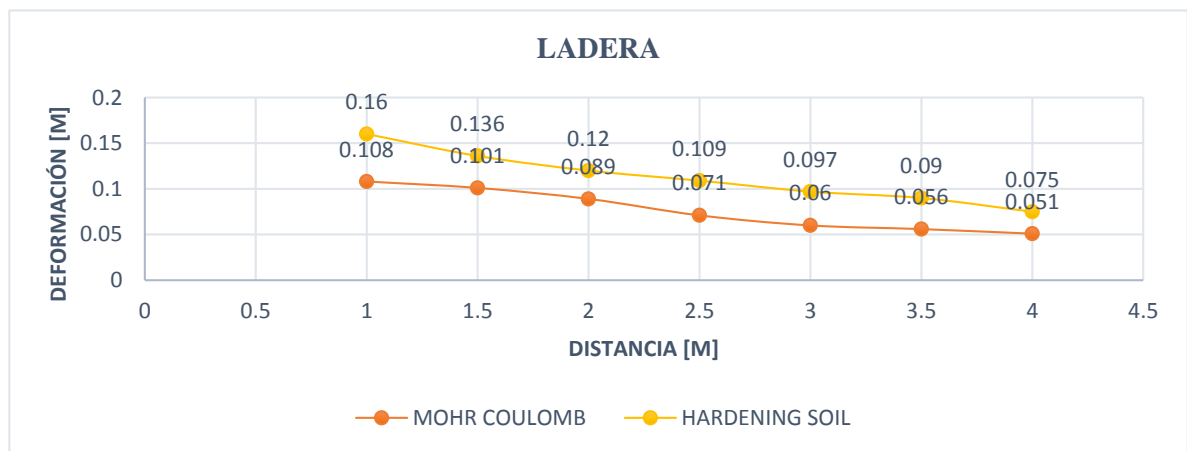
La gráfica muestra el cambio de deformación al ir variando la distancia entre la estructura y el borde de la excavación en ambos modelos. Se percibe que al tomar una distancia de 4 a 3 metros los asentamientos no tienen cambios bruscos entre

las deformaciones, pero después de 3 metros las deformaciones van aumentando de forma drástica, interpretando que el suelo ya empezó a fallar y no es apto para tener este tipo de escenario; se detallan comportamientos similares siendo el de Hardening Soil el de mayor valor con diferencias muy mínimas.

4.4 ANÁLISIS DE DISTANCIA VS DEFORMACIÓN EN LA LADERA

En la siguiente gráfica se muestran los resultados de los asentamientos obtenidos en el punto X cuando se varía la distancia entre la estructura y la corona de la ladera:

Gráfico 6 Comparación de distancia versus asentamiento en PLAXIS 2D por los modelos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, del edificio de 6 pisos variando la distancia entre la estructura y la corona de la ladera.



La gráfica muestra el cambio de deformación al ir variando la distancia entre la estructura y el borde de la ladera en ambos modelos. Las deformaciones son menores respecto a la gráfica del numeral 4.3 (Análisis de distancia vs deformación en la excavación). Los modelos presentan comportamientos similares también se deduce que al tener un menor rango de deformaciones se hace más notoria la diferencia entre ambos modelos respecto a la magnitud de las deformaciones. Sin embargo, esta diferencia es muy mínima.

5. CONCLUSIONES

- Se utilizó una herramienta de software que implementa el método de Elementos Finitos para el cálculo de deformaciones horizontales y verticales, el cual es el más fiable para determinar los asentamientos planteados en el proyecto; Se investigó acerca de los modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo y de otros medios continuos que posee el programa PLAXIS 2D y se concluyó que el modelo de Mohr Coulomb y el de Hardening Soil pueden ser utilizados para simular el comportamiento de suelos arenosos cumpliendo con los requerimientos de nuestro perfil estratigráfico.
- De los modelos analizados aplicando cargas al suelo correspondientes a una casa de dos pisos y a un edificio de seis pisos, se puede concluir claramente que a mayor o a menor carga aplicada al terreno a analizar los asentamientos van a aumentar o disminuir respectivamente, ya que los asentamientos del edificio superan en más del doble los de la casa.
- De las gráficas 5 y 6 se percibe que, a una distancia de 4 metros entre las estructuras empleadas en el proyecto y los bordes de la excavación y la corona de la ladera, el terreno natural circundante a estas edificaciones no tiene asentamientos que se consideren relevantes, concluyendo que a una distancia de 4 metros o más es prudente la ejecución de estos tipos de escenarios sin una medida de estabilización.
- De la gráfica 5 se puede concluir que a medida que se acercan las estructuras al borde de la excavación se nota como se van incrementando los asentamientos en el terreno natural y se observa un aumento significativo a partir de los 2,5 metros de distancia entre la estructura y la excavación lo que se podría tomar como un signo de alerta para no llevar estas excavaciones cerca de dichas estructuras sin alguna medida de precaución y de esta manera para evitar la falla del suelo en la excavación de sótanos.

En las obras cuando se ejecutan las excavaciones a 0 metros de una edificación vecina o realizan construcciones al borde de una ladera, las constructoras deben tomar medidas de estabilización como muros de contención, sistemas de pantallas, anclajes activos, anclajes pasivos entre otros ya que si no se llevan a cabo pueden ocasionar deslizamientos, derrumbes, fallas en las edificaciones vecinas, poniendo en riesgo las vidas de civiles.

- En la grafica 6 el terreno de ladera muestra asentamientos menores en comparacion con la grafica 5, ésto indica que al realizar un corte con inclinacion del terreno en lugar de realizarlo de manera vertical es una alternatriva efectiva para disminuir los aserntamientos aleaños a una edificación.
- Los asentamientos estan ligados a la forma en la que se desarrolle la excavación ya sea con inclinación o vertical; estas deformaciones cuando tienen estructuras circundantes deben cumplir y contemplar según la norma NSR-10 Titulo H capítulo 5.1.3.2 y ejecutar obras de contención para estabilizarlas.
- Del manejo de la plataforma computacional empleada se concluye que la aplicación del software es muy competente y ayuda a los profesionales a modelar y conocer el comportamiento del suelo ante diferentes condiciones en el área de diseño y en el análisis de asentamientos. Se comprendió como se puede representar y modelar casos reales relacionados con excavaciones, laderas y en terrenos planos, reforzando los conceptos adquiridos de la línea de geotecnia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PÉREZ LOBO, J., & GARDEY, A. (2015). Definición de asentamiento — Definición. De. Retrieved from <https://definicion.de/asentamiento/> [Accessed: 05-OCT- 2017].

[2] "ASENTAMIENTO DIFERENCIAL DE ESTRUCTURAS.docx", *Scribd*, 2018. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/208001138/ASENTAMIENTO-DIFERENCIAL-DE-ESTRUCTURAS-docx>. [Accessed: 05- OCT- 2017].

[3] "Artículos de apoyo para estudiantes Diapositivas Asentamientos- INGEAS SAS Bucaramanga", *Ingeassas.com*, 2018. [Online]. Available: <http://ingeassas.com/docencia.php>. [Accessed: 05- OCT- 2017].

[4] PÉREZ PORTO, J. and MERINO, M. "Definición de ladera — Definición de", *Definición. De*, 2014. [Online]. Available: <https://definicion.de/ladera/>. [Accessed: - OCT- 2017].

[5] "Evalúan riesgos de construir en laderas y rellenos", *Agencia de noticias*, 2018. [Online]. Available: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/evaluan-riesgos-de-construir-en-laderas-y-rellenos.html>. [Accessed: 05- OCT- 2017].

[6]"Excavación", *Ingenierocivilinfo.com*, 2018. [Online]. Available: <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/01/excavacion.html>. [Accessed: 05-OCT- 2017].

[7] MOSCOZO BARRIOS, Luis Roberto. Asesorado por el Ing. Luis Adolfo Chicas Torres, Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios Guatemala, julio de 2011.

[8] VELANDIA, A. and VELOZA, P. "análisis del comportamiento del suelo de cimentación de edificaciones pequeñas, sometidas a incrementos de esfuerzos generados por construcciones vecinas de mayor tamaño", Pregrado, Universidad Santo Tomás, 2018.

[9] D. García, "la excavación urbana y los edificios vecinos", Doctorado, Universitat Politècnica De Catalunya Barcelonatech, 2015.

10] BRINKGREVE, R. and . AL-KHOURY, R. PLAXIS: versión 8. Delft: Plaxis, 2003, pp. 40-41.

[11] SUAREZ DIAZ, Jaime "diseño de cimientos", 2nd ed. bucaramanga: uis, 1992, pp. 40-60.

BIBLIOGRAFIA

BRINKGREVE, R. and . AL-KHOURY, R. PLAXIS: versión 8. Delft: Plaxis, 2003, pp. 40-41.

MOSCOZO BARRIOS, Luis Roberto. Asesorado por el Ing. Luis Adolfo Chicas Torres, Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios, Guatemala, julio de 2011.

PÉREZ LOBO, J., & GARDEY, A. (2015). Definición de asentamiento — Definición. De. Retrieved from <https://definicion.de/asentamiento/> [Accessed: 05- OCT- 2017].

PÉREZ PORTO, J. and MERINO, M. "Definición de ladera — Definición de", *Definición. De*, 2014. [Online]. Available: <https://definicion.de/ladera/>. [Accessed: - OCT- 2017].

SUAREZ DIAZ,Jaime “diseño de cimientos”, 2nd ed. Bucaramanga: UIS, 1992, pp. 40-60.

VELANDIA, A. and VELOZA, P. "análisis del comportamiento del suelo de cimentación de edificaciones pequeñas, sometidas a incrementos de esfuerzos generados por construcciones vecinas de mayor tamaño", Pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogota, 2018.

ANEXOS

ANEXO A MODELACIÓN

A.1. Inicio

Plaxis 2D versión 8.2 se encuentra compuesto por 4 subprogramas, el primero es Input, donde se introducen los datos, el segundo Calculations, donde se especifican los análisis y cálculos a realizar, Output, este subprograma arroja los resultados, aparece en varias ocasiones en el uso de los otros subprogramas y por ultimo Curves, donde se pueden generar graficas de interpretación con los resultados. Todas las imágenes presentadas a continuación son elaboradas mediante pantallazos tomados al programa. [7]

Para iniciar el programa, debemos empezar por abrir el subprograma Input.



Figura A-1 ícono de ingreso al subprograma INPUT.

Si se va abrir un proyecto ya existente, se debe dar clic en la opción More files, para buscar la carpeta de origen del archivo. Como la idea del manual es explicar paso a paso, mostraremos todo desde la creación de un nuevo proyecto. [7]

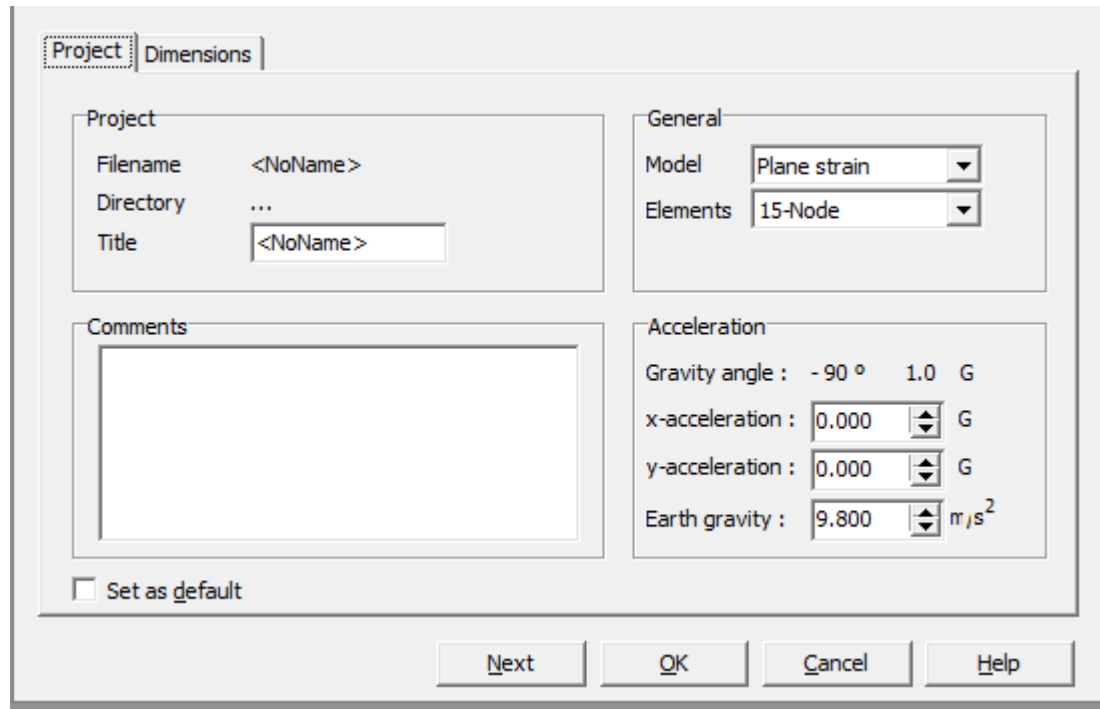


Figura A-2 Ventana para definir los ajustes generales del modelo.

Uno de las partes importantes es en General opción, ya que pide que especifiquemos dos parámetros, el modelo y elementos. Utilizamos deformación plana, debido a que es muy funcional para geometrías con una sección transversal aproximadamente uniforme como rectángulos o cuadrados. Se escogen 15 nodos, ya que proporciona resultados más exactos y nos proporciona 12 puntos de evaluación de presiones, mientras que la otra opción es de tan solo 6 nodos, solo ofrece 3 puntos de evaluación. [13] Una vez definido estas partes del proyecto, se abre la segunda ventana llamada dimensiones. Se tiene presente esta ventana para dar las unidades de trabajo, la dimensión de la grilla, donde left y right son del ancho, mientras que top y bottom son de altura, por último, se menciona en que escala se

quiere la separación de la grilla, spacing para los valores grandes y snap para los espacios entre la grilla.

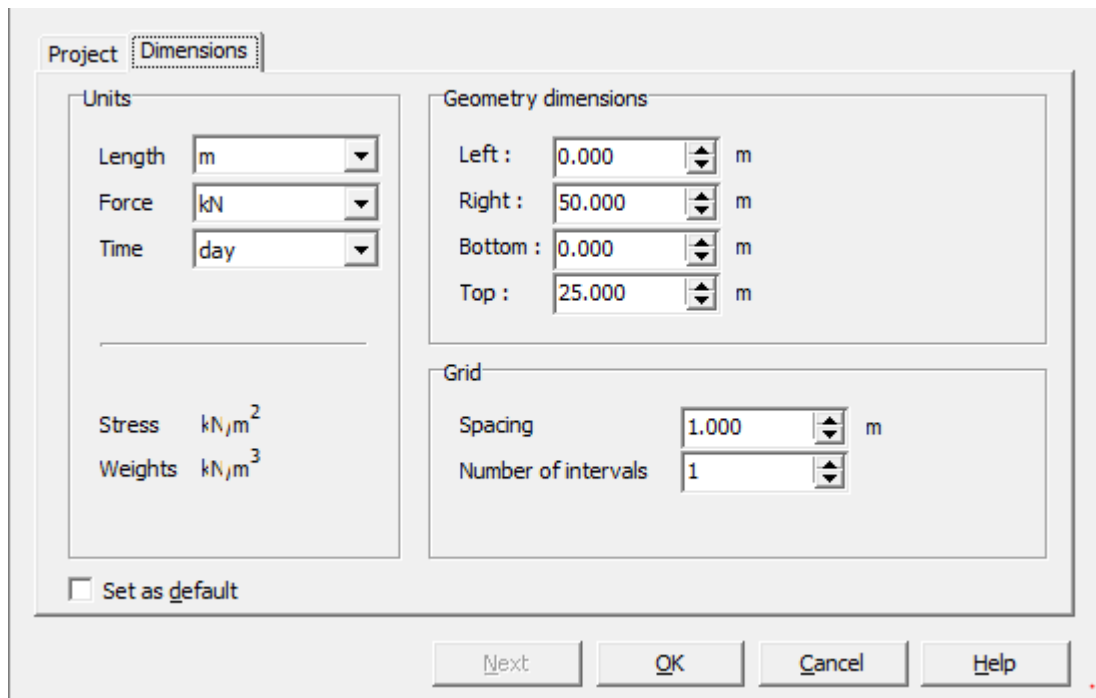


Figura A-3 Ventana para definir unidades y la grilla en la zona de dibujo.

Posteriormente dar ok, se abre la siguiente venta.

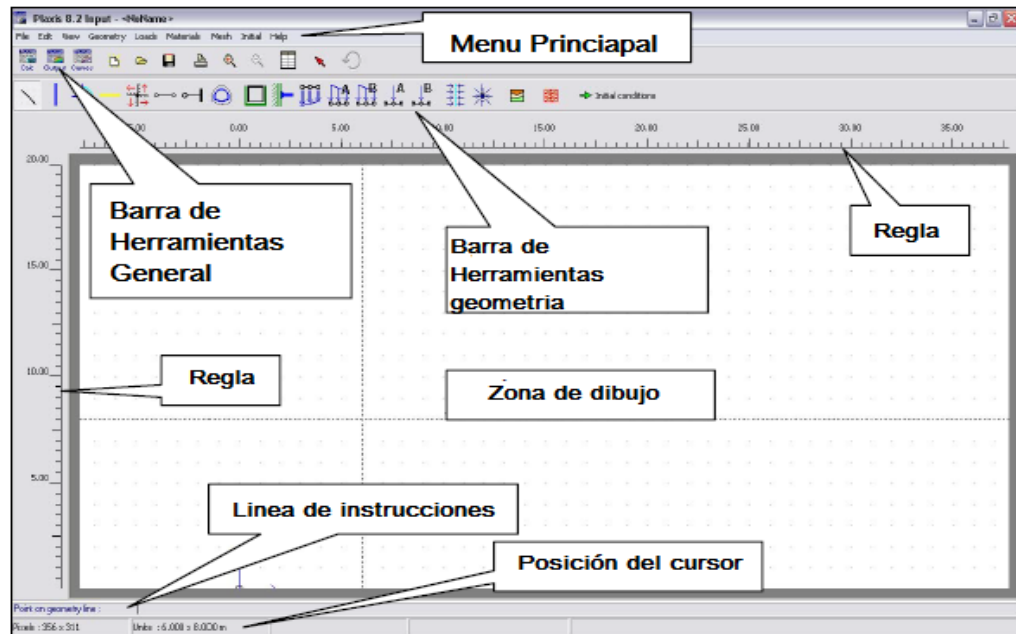


Figura A-4. Ventana principal de INPUT.

Se explicarán a continuación las barras, comandos y opciones que da el programa.

A.2 Menú principal

Nos da las opciones desde guardar hasta definir la malla de elementos finitos. Estas se explicarán a continuación.

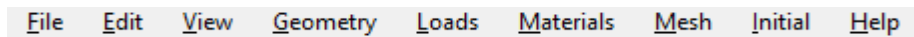


Figura A-5. Barra de menú principal.

- **File:** Nos permite guardar, imprimir, re direccionar el archivo o exportar datos que necesitemos tratar con mayor facilidad en otro programa como Excel.
- **Edit:** Al seleccionar unos valores en la tabla de resultados o propiedades nos deja copiar, o si se realiza algún paso mal le damos Undo, para así deshacerlo.

- **View:** Nos permite generar una tabla de coordenadas de cada punto al realizar un dibujo en el programa, adicional nos da las opciones para editar la grilla, ejes, entre otros.
- **Geometry:** Nos da las opciones de la barra de geometría.
- **Loads:** Se utiliza para definir las cargas, ya sean puntuales o distribuidas.
- **Materials:** Se escoge el tipo de material a simular para definir las características.
- **Mesh:** Nos permite definir la malla de elementos finitos, como o cuanto la queremos refinar, puede ser a todo el modelo o en los puntos donde lo necesitemos.
- **Initial:** Se selecciona la opción para entrar en la segunda parte de INPUT y terminar de definir condiciones.
- **Help:** Es una opción rápida para llevarnos a los manuales del programa. [7]

A.3 Barra de herramientas general

Nos proporciona opciones rápidas. Se explicarán a continuación.

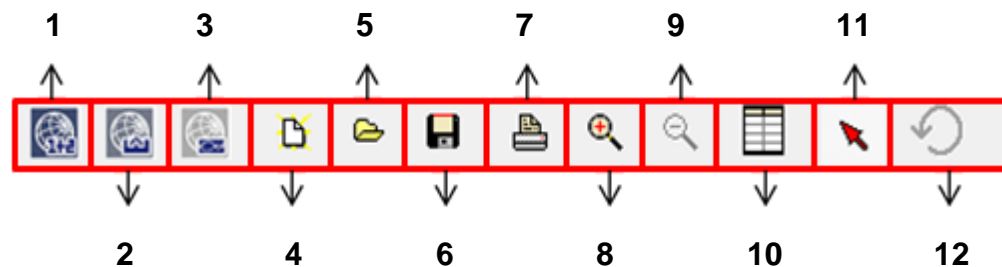


Figura A-6. Barra de herramientas general.

- 1) **Go to Calculations:** Nos lleva de forma inmediata a otro subprograma, que es el de cálculos.
- 2) **Go to Output:** Nos enseña resultados en el subprograma de salida.

- 3) **Go to Curves:** Al ya tener resultados del programa de cálculos, nos podremos dirigir al programa de curvas para generar gráficos, de lo contrario su utilidad es poca.
- 4) **New:** Generar un nuevo proyecto.
- 5) **Open:** abrir un proyecto o modelo ya creado.
- 6) **Save:** Guardar el archivo de trabajo.
- 7) **Print:** Opción rápida para imprimir o sacar PDFs de lo que se está observando.
- 8) **Zoom in:** Para acercarse a ver mejor un detalle.
- 9) **Zoom Out:** Para alejarse y observar todo el modelo.
- 10) **Coordinates table:** tabla de coordenadas.
- 11) **Selection:** opción para que el puntero nos deje seleccionar objetos en el dibujo.
- 12) **Undo:** Deshacer la última actividad realizada. [7]

A.4 Herramientas de dibujo o geometría.

En esta barra podemos definir la forma geometría del modelo, los parámetros a tener presente y los materiales que se aplicaran al modelo. Los comandos se explican a continuación.

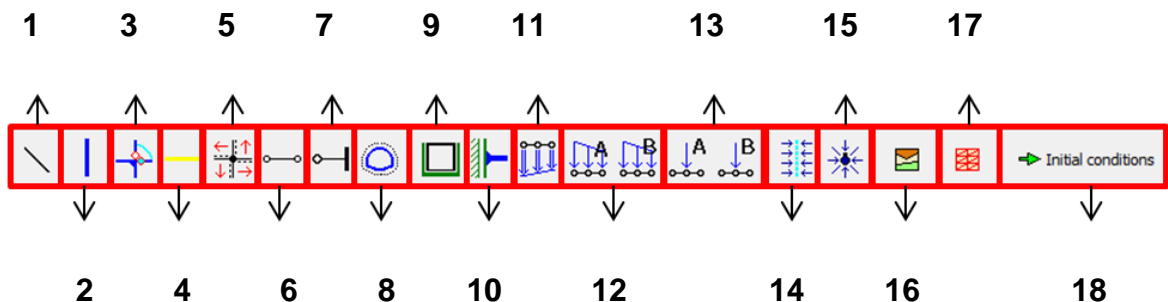


Figura A-7. Barra de herramientas de dibujo o geometría

- 1) **Geometry line:** Este comando nos deja definir de forma sencilla la geometría del suelo y de las estructuras.
- 2) **Plate:** Se utiliza este comando para modelar estructuras esbeltas que interactúan con el suelo, se emplea igual que geometry line.
- 3) **Hinge and rotation spring:** Se utiliza este comando cuando se necesita generar una unión rígida, conexión articulada o un amortiguador de rotación.
- 4) **Geogrid:** Se implementa cuando se quiere modelar geotextiles o geomallas para reforzar el suelo.
- 5) **Interface:** Se utiliza este comando, para que la interacción de suelo con estructuras esbeltas sea más real. Se dibuja al igual que una línea, y dependiendo del lado donde esta interactuando la estructura con el suelo, aparece (+) o (-), si es por ambos lados aparecen los dos signos.
- 6) **Node to node anchor:** Comando que se implementa para modelar anclajes entre dos puntos, que puede ser sometido a fuerzas de tracción y/o compresión.
- 7) **Fixed-end anchor:** Se utiliza para modelar anclajes con un extremo fijo, deben estar conectados a líneas geométricas. Funciona bien para modelar soportes de muros.
- 8) **Tunnel:** Este comando se utiliza para modelar túneles de sección circular.
- 9) **Standard Fixities:** Se aplica para definir las condiciones de contorno, establece que en los bordes del modelo geométrico el desplazamiento es nulo, es decir no existirán movimientos en el sentido de X ni de Y.
- 10) **Rotation Fixities:** Se utiliza para eliminar la rotación en el eje Z de una placa. Simplemente se da la opción y se selecciona el punto que no queremos que se desplace.

11) **Prescribe displacement:** Sirve para proyectar los desplazamientos máximos que queremos obtener, para que así el programa nos determine la carga que puede generar tal desplazamiento.

12) **Distributed load system A-B:** Se utiliza para modelar cargas distribuidas en el modelo. Se necesitan el punto de partida y donde termina, al definir ya la forma de la carga, se le da doble clic para poder definir el valor de la carga que se utilizara en el modelo.

13) **Point load system A-B:** Esta opción es muy similar a la anterior, la diferencia es que solo se necesita un punto, en el cual ira aplicado la carga puntual del proyecto, para definir el valor es igual dándole doble clic al terminar.

14) **Drains:** Se utiliza dentro de la geometría del modelo, para definir sobre que líneas, el exceso de presión de poros tiende a cero. Aplica en análisis de consolidación o aguas subterránea preferiblemente.

15) **Wells:** Se utiliza para modelar dentro de la geometría, puntos donde se ira descargado una fuente hídrica subterránea y podría generar hundimiento en la masa del suelo.

16) **Mesh:** Nos permite definir la malla de elementos finitos, como o cuanto la queremos refinar, puede ser a todo el modelo o en los puntos, líneas o estructuras donde lo necesitemos.

17) **Initial conditions:** Se da clic en esta opción para entrar en la segunda fase del subprograma INPUT, y así terminar de definir parámetros como nivel freático y presión de poros. [7]

El siguiente paso es seleccionar el comando Geometry line, para iniciar a dibujar el esquema del proyecto. La forma sencilla de elaborarlo es dirigiéndose a la línea de instrucciones, donde pueden introducir por coordenadas (x, y) los puntos del modelo a realizar.

Se habilita esta opción una vez se ha escogido geometry line, y como se mencionó antes, se introduce primero el valor de la coordenada en x (50) y luego la de y (0), dejando un espacio entre ambos valores, y así con todos los puntos.

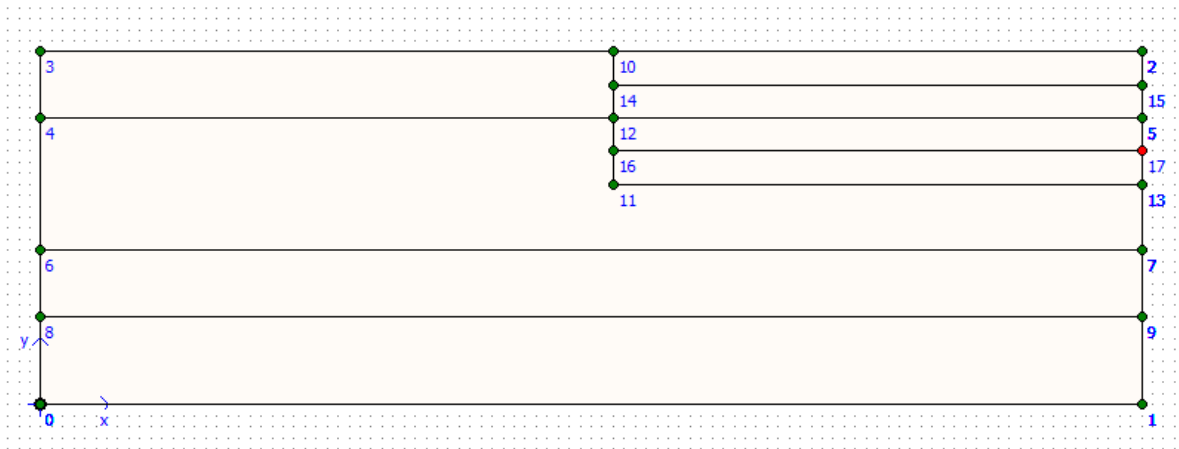
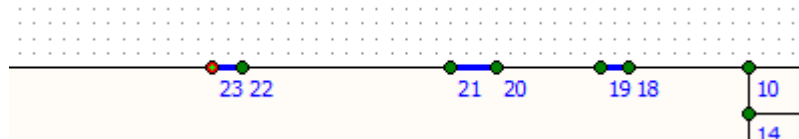


Figura A-8 Dibujo de la geometría del suelo

Una vez el esquema con geometry line este correcto, realizamos el dibujo de las zapatas con el comando plate. Se dibuja en la superficie del estrato más alto.

Figura A-9 Dibujo de las zapatas



Se asigna el modelo con las condiciones de contorno. Utilizamos el comando Standard Fixities.

Al seleccionar opción de Set Type, se despliega otra ventana con más opciones, como la siguiente.

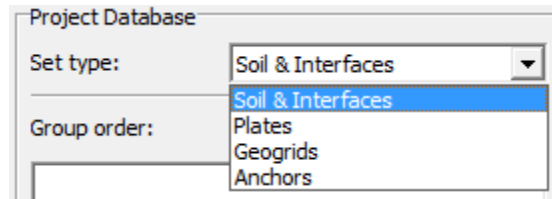


Figura-A-12 Opciones de Set Type

Las opciones que presentan son:

- **Soil & Interfaces:** Esta opción nos solicita la mayor cantidad de parámetros posibles por parte del programa. Esta opción nos ayuda a acercarnos al comportamiento real del suelo. Pide parámetros como γ_{sat} , γ_{sat} , k_x , k_y , E , C_c , C_s , e_0 , C , ϕ , entre otros.
- **Plates:** Se utiliza esta opción para definir las propiedades de muros, pilotes o tabla estacas. Los parámetros que pide son EA , EI , d , w , $Rayleigh \alpha$, $Rayleigh \beta$, entre otros.
- **Geogrids:** Se utiliza para definir las propiedades de geomallas o geotextiles. Solo pide EA y N_p (para determinar N_p remitirse al manual de referencia o científico).
- **Anchors:** Se utiliza para definir las propiedades de los anclajes. Los parámetros que pide son EA , L de espacio, la fuerza máxima a tensión y a compresión. [7]

Para definir las propiedades del suelo, que se va a ingresar, se selecciona la opción de Soil & Interfaces. Una vez seleccionado Set Type, dar clic en la opción New, que abre una ventana, la cual dispone de varias opciones como identificación, que será

el nombre comentarios, el modelo del material, el tipo de material, parámetros e interfaces.

La mayoría de modelos de materiales necesitan los valores de:

γ_{unsat} : peso del suelo parcialmente saturado. Si el nivel freático está por encima del estrato, el valor es el mismo del peso saturado.

γ_{sat} : Peso del suelo saturado.

k_x : Permeabilidad en la dirección X.

k_y : Permeabilidad en la dirección Y. [7]

Mohr-Coulomb - <NoName>

General Parameters Interfaces

Material set

Identification: <NoName>

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} 0,000 kN/m³

γ_{sat} 0,000 kN/m³

Comments

Permeability

k_x : 0,000 m/day

k_y : 0,000 m/day

Advanced...

SoilTest Next OK Cancel

Figura A-13 Ventana general para definir tipo de materiales

A continuación, se presentan las diferentes casillas:

1) **Identification:** En esta zona, se introduce el nombre del estrato del suelo al que se le definirán los parámetros.

2) **Modelo del material:** En esta instancia, se define el tipo de modelo que simulara el comportamiento del material, ya sea suelo u estructura. Cada tipo pide unos parámetros diferentes. Los tipos de modelo son:

2.1. *Linear Elastic:* Este modelo se utiliza usualmente para modelar materiales rígidos como el hormigón. El modelo solicita para metros de rigidez elástico como E y ν .

2.2. *Mohr-Coulomb:* Este modelo es de los más utilizados, para aproximarse al comportamiento del suelo en general. Pide parámetros como E , ν , C , ϕ y Ψ .

2.3. *Soft Soil Model:* Se utiliza para modelar el comportamiento de suelos blandos, como arcillas normalmente consolidadas y turbas. Pide parámetros como C_c , C_s y e_o . Funciona para analizar consolidación primaria, mucho mejor que el modelo de Mohr-coulomb.

2.4. *Hardening Soil Model:* Se utiliza para modelar el comportamiento de arenas o gravas, al igual que suelos blandos como arcillas y sedimentos. Pide más parámetros de rigidez que los anteriores.

2.5. *Soft Soil Creep Model:* Funciona para modelar suelos blandos y analizarlo a través de largos tiempos, es decir consolidación secundaria. Pide los mismos parámetros que el Soft Soil model y adicional C_α .

2.6. *Jointed Rock Model:* Este modelo se utiliza para modelar o simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada. [7]

Material Type: Se elige el tipo de comportamiento que queremos que tenga el suelo o esqueleto solido con el agua. Existen 3 tipos como se ve en la siguiente imagen:

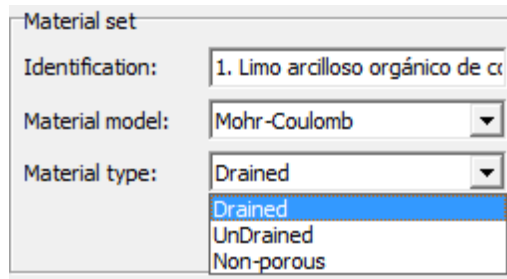


Figura A-14 Tipo de comportamiento del material

3.1. **Drained:** Este comportamiento se utiliza para simular un suelo drenado, el cual será sometido a cargas lentas y largo plazo para su análisis, un suelo saturado.

3.2. **Undrained:** Se utiliza para modelar el comportamiento no drenado del suelo, es decir un suelo saturado, se somete a una carga rápida o sísmica para su comportamiento, es decir de corto plazo.

3.3. **Non-porous:** Es un comportamiento no poros, usualmente se utiliza para modelar el comportamiento de elementos rígidos como el hormigón estructuras en general.

4) **Comments:** Se utiliza el espacio para describir notas o comentarios importantes del material.

5) **Color:** se utiliza para definir el color que se le proporcionara al estrato o material. Al dar clic en la opción, despliega una ventana de diversos colores a escoger.

6) **Soil Test:** Esta opción es para realizar un ensayo triaxial o edométrico, una vez se han introducido la mayoría de propiedades, para poder determinar los faltantes con estos ensayos. Esta opción nos abre otra ventana como la siguiente, donde simplemente hay que darle run o correr para que haga el ensayo. [7]

Se inicia seleccionando Soil & Interfaces en Material Sets, donde se definen los 4 estratos del suelo, utilizando el modelo de Mohr coulomb. Las propiedades que requiere el programa se observan en la tabla x.

Tabla A-1 Parámetros geotécnicos del perfil estratigráfico

Muestra	Parámetros Geotécnicos del Perfil Estratigráfico.								
	Profundida [m]	Clasificacion	Descripcion	ϕ	Cohesion	γ_s [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	Modulo de young E [Mpa]	Coefficiente de poisson [ν]
M1	0 a 3	SM	Arena limosa, color café claro	41	40.94 kPa	17,55266667	18.6	14	0.26
M2	3 a 9	SM	Arena limosa, color gris a marron	41	35.70 kPa	15,942	17.0	14	0.26
M3	9 a 12	SM	Arena limosa, color rosado	45	15.17 kPa	16,2104	17.2	14	0.226
M4	12 a 16+	ML	Limo, color gris oscuro	29	12.81	17,87403333	21.2	14	0.34

Los estratos deben tener al final las propiedades como se muestran a continuación para el estrato 1, así sucesivamente para cada estrato siguiente.

Figura A-15 Introducción de los parámetros generales del suelo

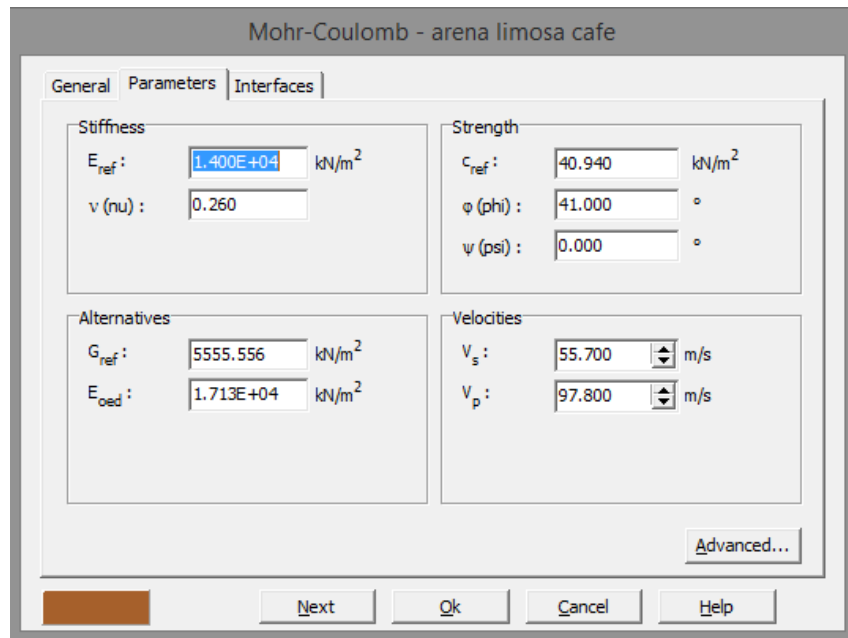


Figura A-16 introducción de los parámetros secundarios del suelo

Una vez introducidos las propiedades para el suelo y el cemento, se debe ver como a la ventana siguiente:

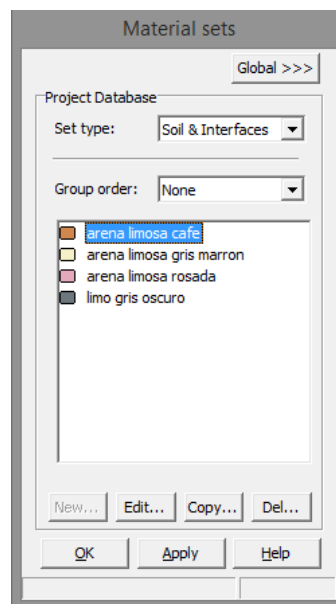


Figura A-16 Materiales para suelo y cemento definidos.

Ahora se procede a definir los materiales para las zapatas, seleccionando en Set Type la opción Plates y le darle new, donde abre la siguiente ventana:

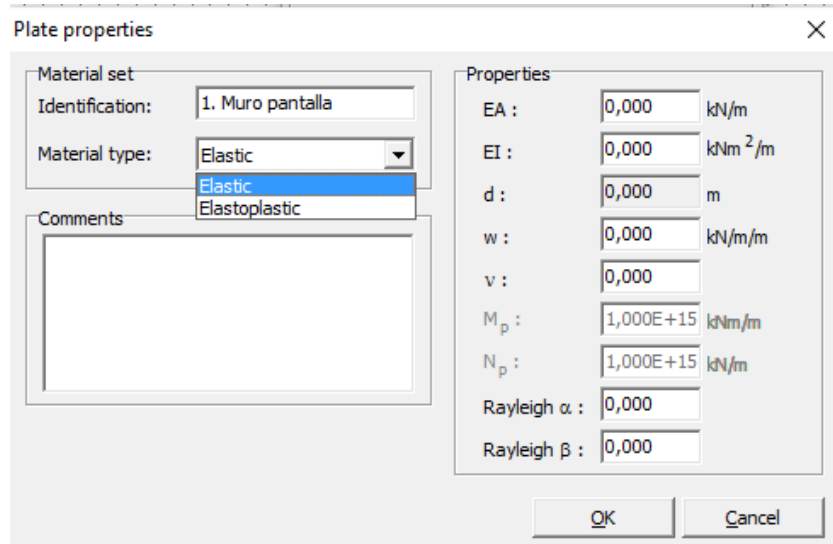


Figura Figura A-17 Ventana de propiedades de las zapatas

- **EA:** Es el valor del módulo de Young al que llega la estructura, multiplicado por el área de la cara que se muestra en el modelo.
- **EI:** Es el valor del módulo de Young al que llega la estructura, multiplicado por la inercia de la cara que se muestra en el modelo.
- **d:** Este lo determina automáticamente e modelo, debe coincidir con la longitud de la estructura o el ancho.
- **w:** Es el área por metro, que definimos para que el programa calcule el peso por metro de la estructura.
- **v:** Relación de Poisson.
- **Mp:** Es el valor del momento máximo que se presenta en la estructura.
- **Np:** Es el valor del cortante máximo que se presenta en la estructura.

• **Rayleigh α** : Se utiliza este valor para que el programa determine la influencia de los medios en la amortiguación en el sistema.

• **Rayleigh β** : Se utiliza este valor para que el programa determine la influencia de la rigidez en la amortiguación en el sistema.

La diferencia entre elástico y elastoplástico, es que el usuario puede introducir el M_p y N_p , o de lo contrario, deja elástico donde el programa toma unos valores estándar. Los valores de Rayleigh, no son tan esenciales en los modelos, son parámetros adicionales para mejorar el comportamiento del modelo. [7]

Material set	
Identification:	zapata 1
Material type:	Elastic

Properties	
EA :	4.000E+04 kN/m
EI :	1.333E+04 kNm ² /m
d :	2.000 m
w :	24.000 kN/m/m
v :	0.150
M_p :	1.000E+15 kNm/m
N_p :	1.000E+15 kN/m
Rayleigh α :	0.045
Rayleigh β :	4.000E-03

Figura A-18 Propiedades de la zapata 1.

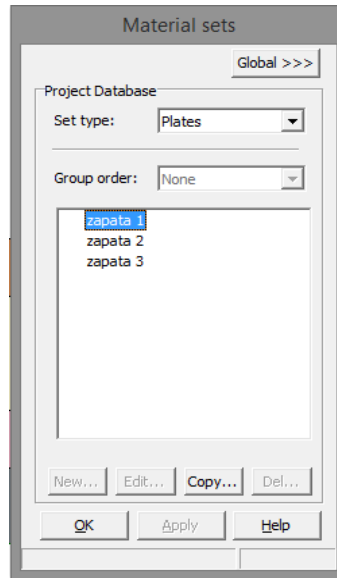


Figura A-19 Materiales para las tres zapatas.

Una vez se tienen todos los materiales definidos con sus propiedades los asignamos, se selecciona el objeto y darle aplicar al estrato requerido, o arrastrando las propiedades del material hasta el objeto deseado. A las líneas de interface, se le aplica el mismo material del suelo donde se encuentran.

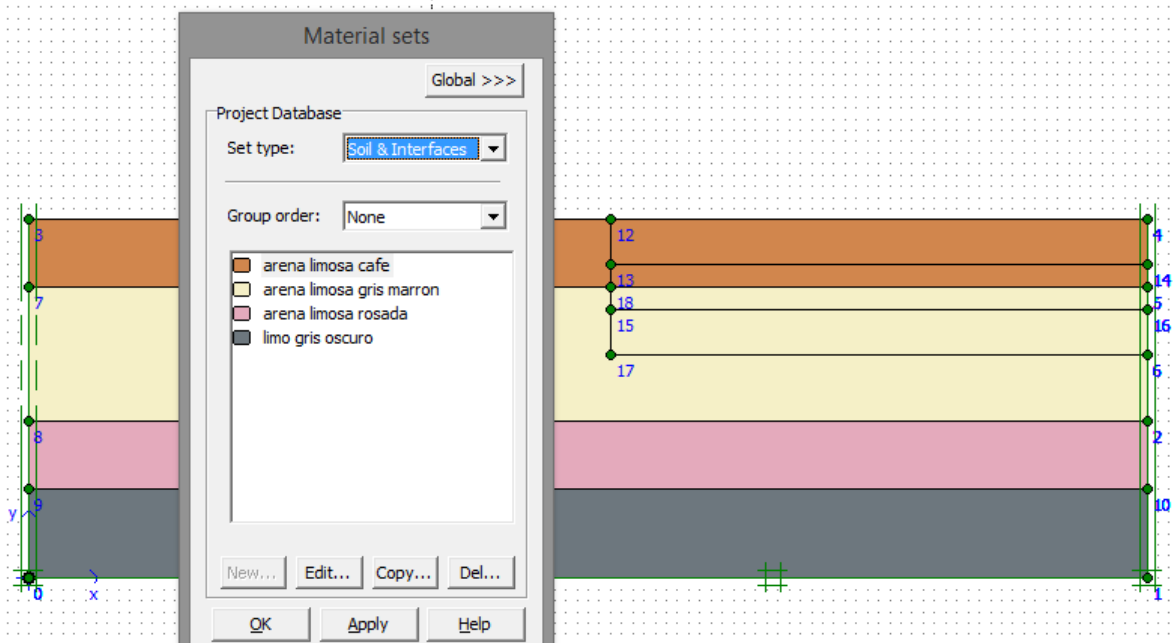


Figura A-20 Materiales aplicados.

Una vez se define los materiales, se asignan las cargas distribuidas que se aplican en el modelo, sobre cada cimiento.

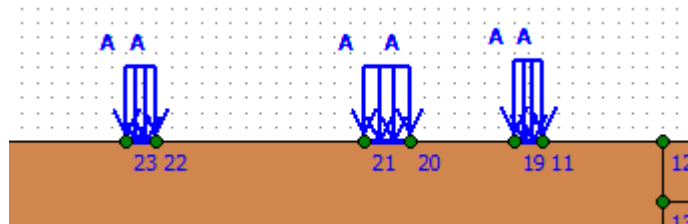


Figura A-21 Cargas aplicadas

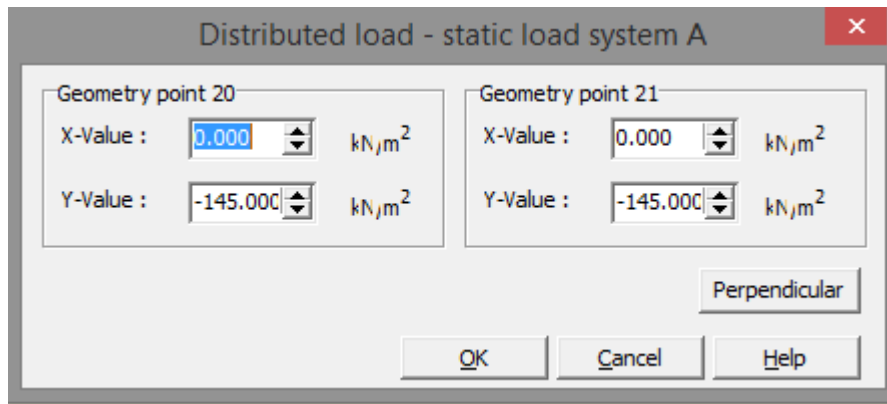


Figura A-22 asignación del valor de las cargas

A. 6 Malla de elementos finitos

En esta instancia se asigna la malla de elementos finitos y como estará refinada.

La malla estará compuesta por triángulos, que se denominan Mesh C-1 o C-2, dependiendo de la cantidad de nodos que se establezcan dentro, pero ambos son triángulos. Lo que se quiere es refinar muy bien cerca de las zonas donde queremos obtener valores más precisos.

Primero para graficar, se selecciona la opción Mesh en la barra del menú principal, y damos clic en Global Coarseness, donde hay 5 categorías para refinar, very coarse para el menos refinado, y very fine como la opción que más refina.

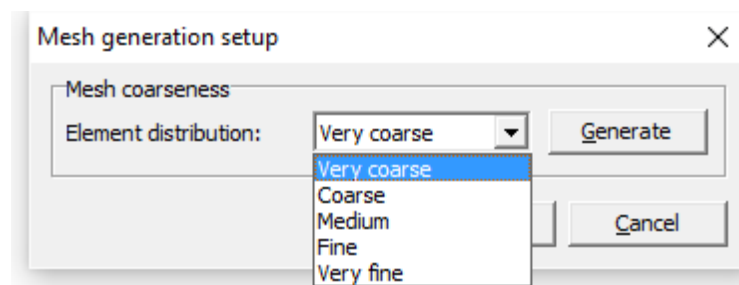


Figura A-23 Distribución de la malla

Seleccionamos Very fine, y damos clic en generate.

Si el modelo les presenta un problema, es debido a que no se puede dejar ningún objeto sin definir el abre la ventana del subprograma output, para mostrar cómo queda la malla, para salirnos le damos en Update, que se encuentra en la zona de arriba. [7]

Asi debe quedar el refinamiento de la malla:

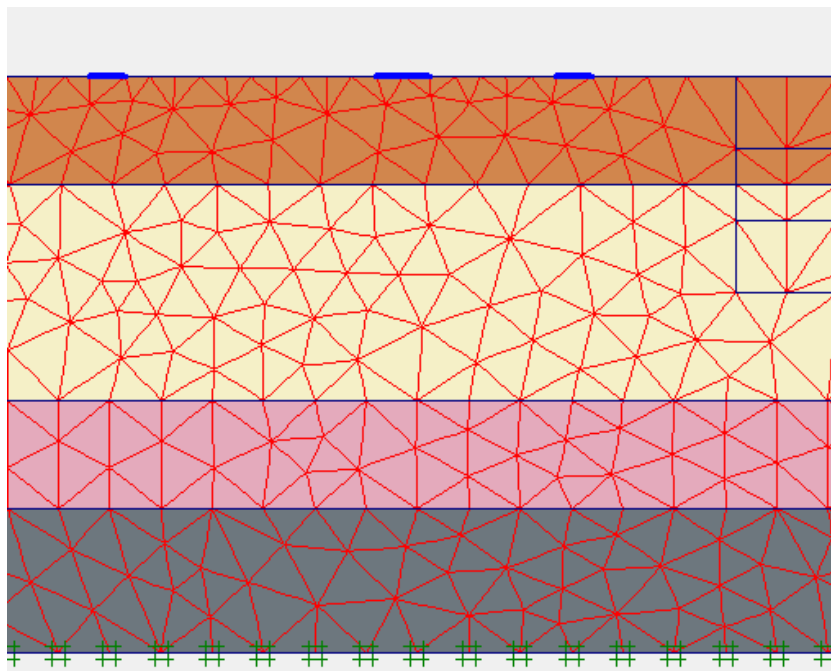


Figura A-24 Refinamiento final de la malla

A.7 Condiciones iniciales

Ahora le damos clic en Initial conditions, para definir nivel freático, el nivel de consolidación del suelo y otras condiciones de contorno. [7]

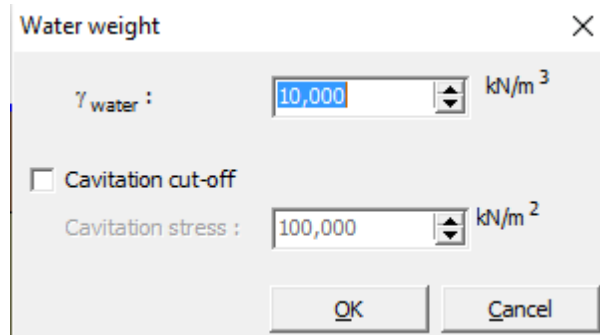


Figura A-25 Peso específico o densidad del agua

Aparece la ventana anterior, donde definimos el peso específico del agua, que queremos que contemple el programa, en este caso es 10 kN/m³.

Al darle ok, nos abre la siguiente ventana:

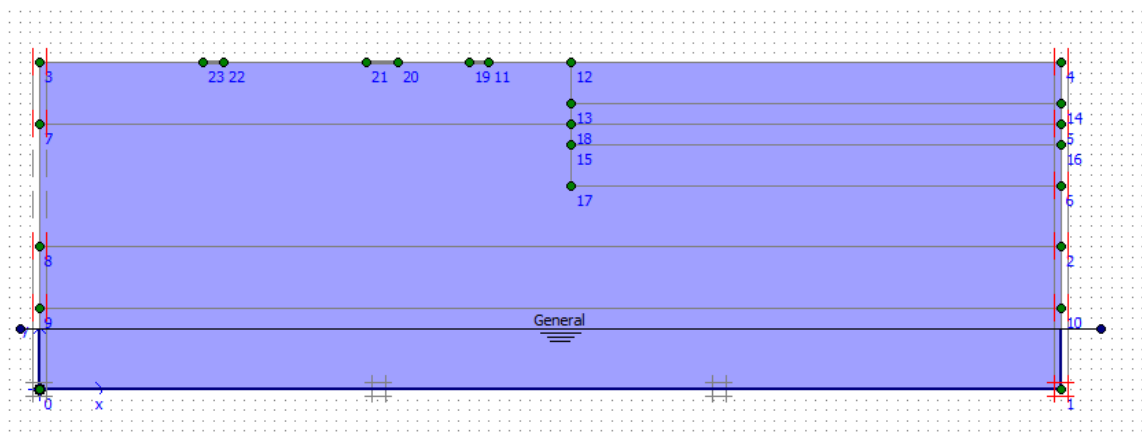


Figura A-26 Ventana de condiciones iniciales

En el subprograma Input, se encuentra otra barra de herramientas, para las condiciones iniciales que está dividida en 2 partes, que se explican a continuación:

A.8 Barra de condiciones iniciales:

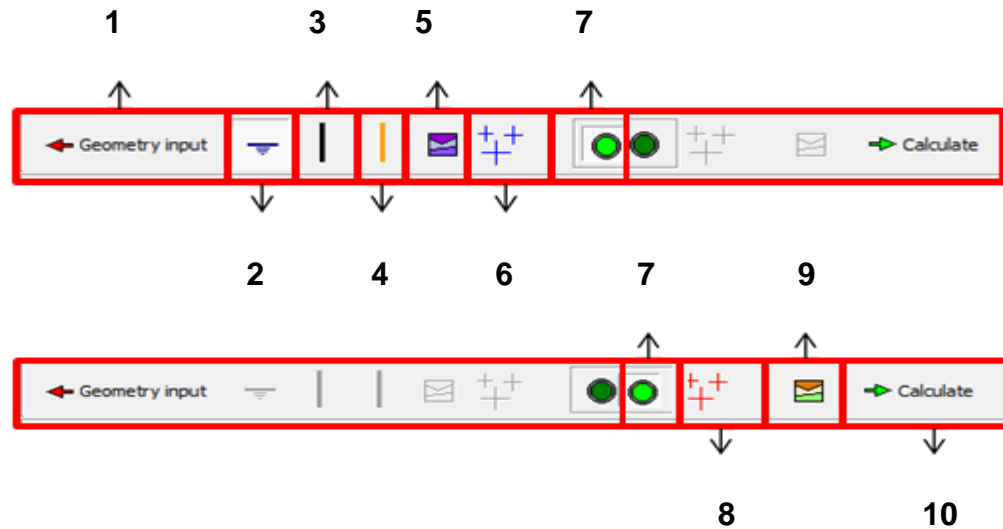


Figura A-27 Barra de condiciones iniciales

- 1) **Geometry Input:** se utiliza para regresar a la ventana anterior para cambiar la geometría del modelo ya realizado.
- 2) **Phreatic level:** se utiliza para definir el nivel freático en el modelo. Se realiza al igual que una línea.
- 3) **Closed flow boundary:** Se utiliza esta opción, para definir que no existe flujo de agua a través del contorno geométrico.
- 4) **Closed consolidation boundary:** Esta condición de contorno, se lleva a cabo cuando se quiere analizar consolidación. Toma que el exceso de presión de poros o intersticial en es nulo en todo el contorno.
- 5) **Material Sets:** se definen las propiedades de los materiales que estarán bajo este nivel freático. En el caso del modelo serán los mismos.
- 6) **Generate water pressures:** Se da clic en esta opción para determinar la presión de poros total en el fondo del modelo.

7) **Conmutador:** se utiliza para pasar de un módulo a otro, el de la izquierda para las opciones antes mencionadas, y el botón verde de la derecha para las opciones que se explican a continuación.

8) **Generate initial stresses:** se utiliza para calcular el esfuerzo efectivo en el fondo del modelo.

9) **Material sets:** se utiliza para definir las propiedades en el modelo. En este caso se deja igual para el modelo que estamos realizando.

10) **Calculate:** Nos lleva al subprograma de Calculations. [7]

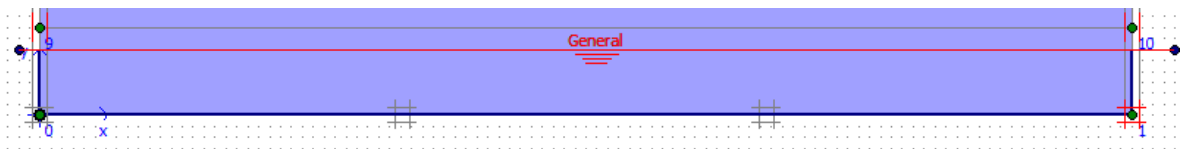


Figura A- 29 Nivel freático

Después de ya definir los anteriores parámetros, se calcula la presión de poros del modelo, dándole clic en la opción Generate water pressures, abriendo la siguiente ventana:

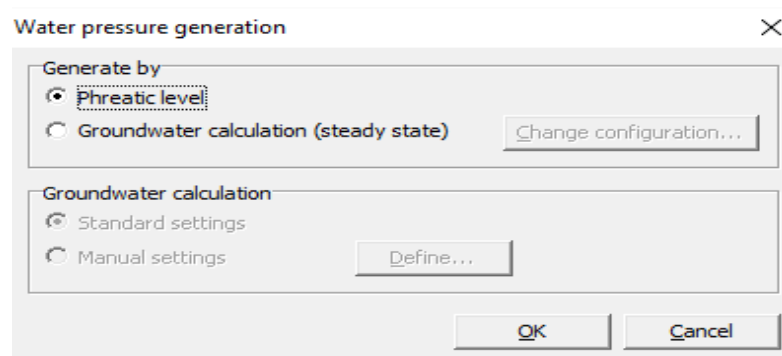


Figura A- 30 Generar presión de poros

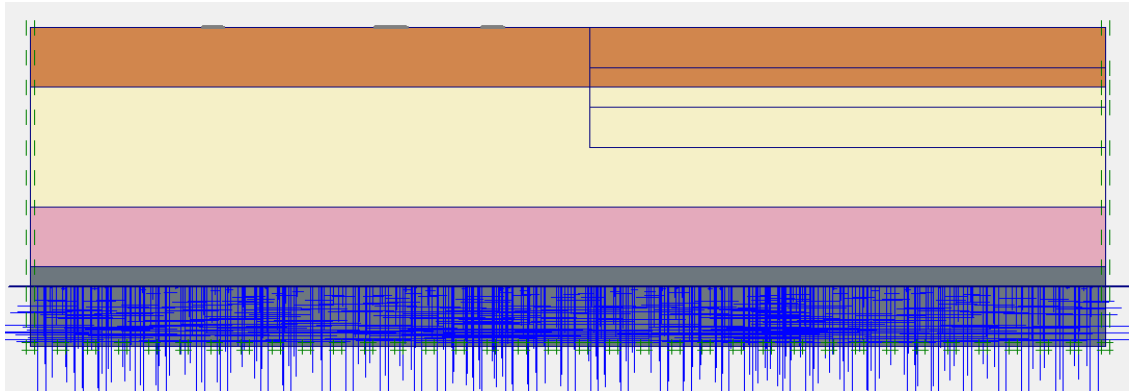


Figura A-31 Presión de poros generada

A continuación, se genera el esfuerzo efectivo, dándole clic a Generate initial stresses, que nos abre la siguiente ventana.

K0-procedure ✕

ΣM-weight :

Cluster	Material	OCR	POP	K0
1	MC	N/A	N/A	0.515
2	MC	N/A	N/A	0.293
3	MC	N/A	N/A	0.344
4	MC	N/A	N/A	0.000
5	MC	N/A	N/A	0.344
6	MC	N/A	N/A	0.344

Figura A-32 Definición del estrato sobre consolidado

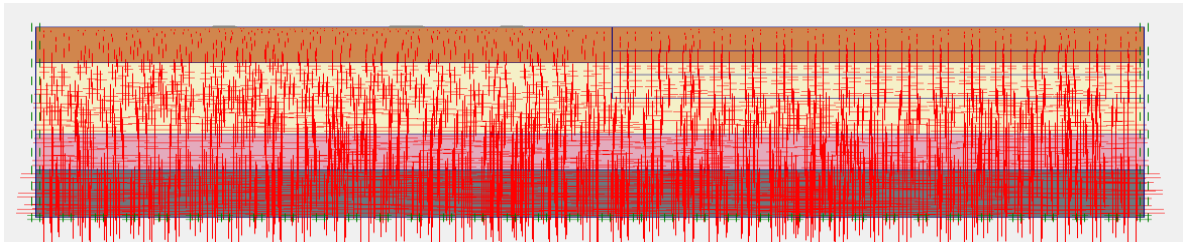


Figura. A-33 Esfuerzo efectivo generado

Cuando finaliza esta fase, el programa guarda, al instante abre el subprograma de PLAXIS, llamado Calculations, donde se define las instancias y pasos a seguir en los cálculos, como se explicará más adelante.

A.9 Cálculos

En esta instancia, se definen los cálculos para determinar las deformaciones en el suelo, mediante el método de elementos finitos. En esta ventana, se aprecian 4 pestañas importantes, General, Parameters, Multipliers y Preview.

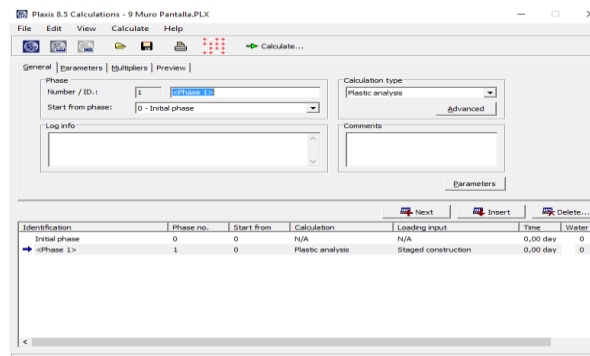


Figura A-34 Ventana de cálculos general

1) **Phases:** es el sitio, donde se otorga el nombre a la fase de cálculo a desarrollar, además, se puede decir desde que fase inicie, dependiendo cuantas se hagan, con la opción Start from phase. 0 Initial phase, es la parte definid en el Input.

2) **Calculation Type:** se elige el tipo de cálculo o análisis que se quiere hacer en el modelo. Existen 4 como se ve a continuación: [7]

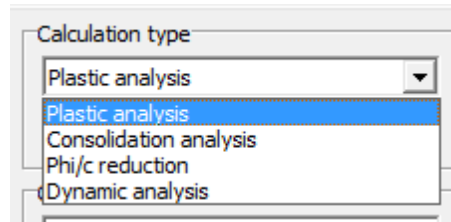


Figura A-35 Tipos de cálculos

2.1. **Plastic analysis:** Se selecciona esta opción, cuando se quiere realizar un análisis de deformación elastoplástico, en el que el amortiguamiento debido al exceso de presión de poros en el tiempo, no se quiera tener en cuenta. Es apropiada para la mayoría de aplicaciones o prácticas geotécnicas.

2.2. **Consolidation analysis:** Se utiliza este análisis, cuando se quiere estudiar la disipación del exceso de presión de poros con el tiempo, en suelos saturados de tipo arcilla.

2.3. **Phi/c reduction:** Se utiliza este modelo de análisis, cuando se quiere determinar el factor de seguridad global para el modelo establecido.

2.4. **Dynamic analysis:** Se utiliza cuando se quieren analizar ondas a través del suelo, o es necesario considerar vibraciones en la masa sólida. [7]

Figura A-36 Selección en la ventana de cálculo general

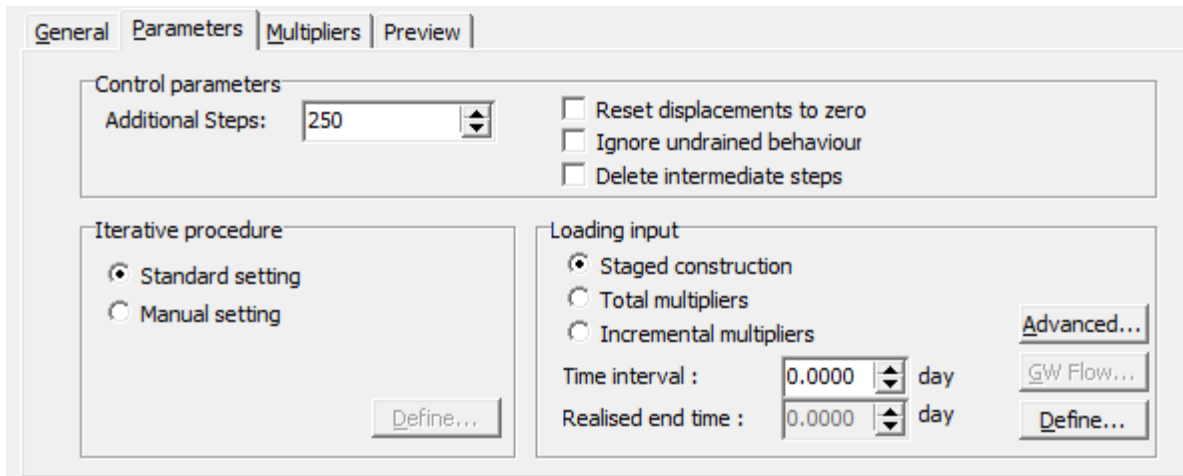


Figura A-37 Ventana de cálculos, pestaña de parámetros

- 1) **Control parameters:** Se designan la cantidad de cálculos o pasos totales que puede hacer en el análisis.
- 2) **Iterative procedure:** Se utiliza esta opción, para que los cálculos estén en el límite o permanezcan dentro de los errores aceptables. PLAXIS, ya trae una opción predeterminada, la cual funciona bien, de lo contrario, el usuario puede darle en Manual, para modificar los valores. Para comprender esto, dirigirse al Manual de Referencia donde explican más de esta parte.
- 3) **Loading input:** Se utiliza para especificar qué tipo de carga se considera en una fase de cálculo en particular. Tiene tres opciones:
 - 3.1. **Staged construction:** Se utiliza para definir las etapas de la construcción para cada fase de análisis en el modelo. Funciona para modificar cargas, propiedades, nivel freático, entre otras características, dándole clic en la opción Define.
 - 3.2. **Time interval:** se especifica el tiempo en días, para el análisis de cada etapa.
 - 3.3. **Incremental:** esta opción representa el incremento de carga para un paso de cálculo individual.

3.4. **Total, multipliers:** Esta opción representa el nivel total de la carga en un paso o una fase de cálculo en particular. [7]

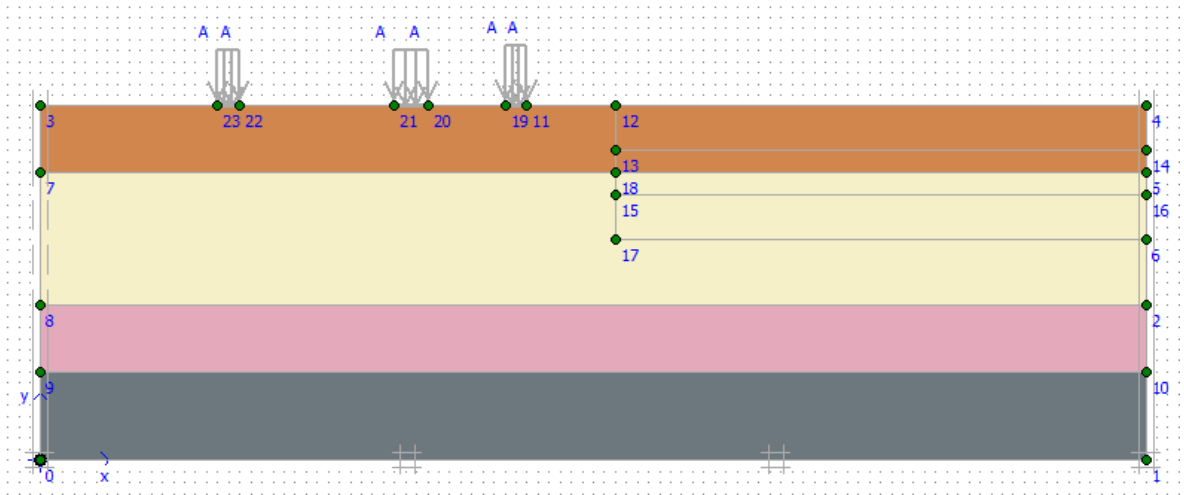


Figura A-38 fase inicial escenario de la excavación

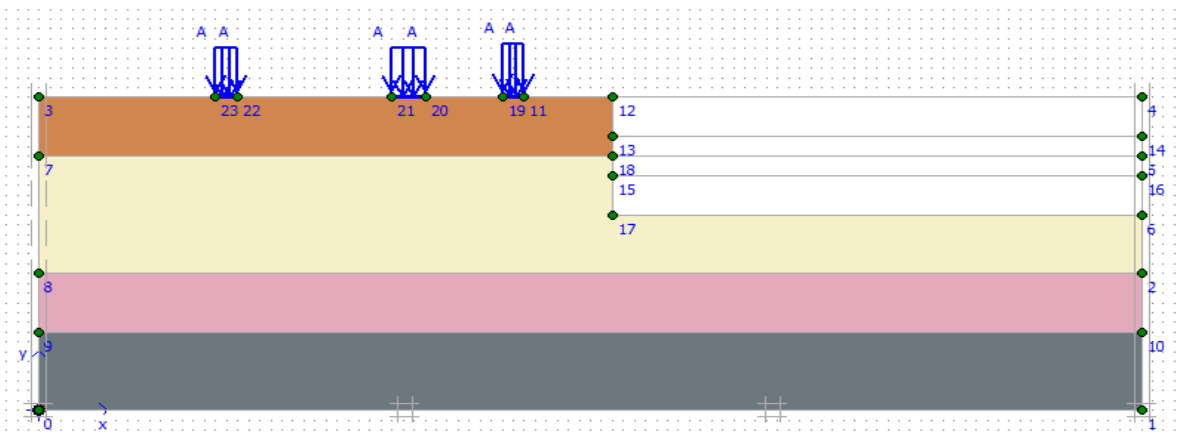


Figura A-39 fase final escenario de la excavación

Una vez lista esta fase, dar clic en Next, para crear una fase siguiente a la que se acabó de realizar. Insert es para agregar una fase nueva, ente otras ya creadas y Delete para borrar alguna si quedo mal. [7]

Las etapas que se van a desarrollar para el proyecto se pueden apreciar en la figura contemplando su duración, y en el modelo no le daremos que reinicie los

desplazamientos de cero, para que tenga en cuenta la deformación en cada etapa o fase.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	F
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	0	0
→ terreno natural	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 ...	1	1
→ zapatas	2	1	Consolidation	Staged Construction	15.0...	2	3
→ edificio	3	2	Consolidation	Staged Construction	730....	3	1
→ tiempo de consoli...	4	3	Consolidation	Staged Construction	1460...	4	2
→ exc 1	5	4	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	5	3
→ exc 2	6	5	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	6	4
✓ exc 3	7	6	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	7	5

Figura. A-40 Etapas definidas para el cálculo

Luego se definen los puntos de análisis para generar las gráficas y curvas, mediante la opción de *Select points for curves*. [7]



Figura. A-41 Selección de puntos

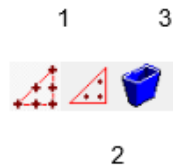


Figura. A-42 Opciones para introducir puntos de análisis

- 1) **Select nodes for load-displacement curves:** Puntos para generar graficas donde se analizan los desplazamientos en cada punto.
- 2) **Select stress point for Stress/Strain curves:** Puntos para generar graficas donde se analizan los esfuerzos dentro la masa del suelo.

3) **Deselect all nodes or stress points:** Borra los puntos realizados, para escoger unos nuevos. [7]

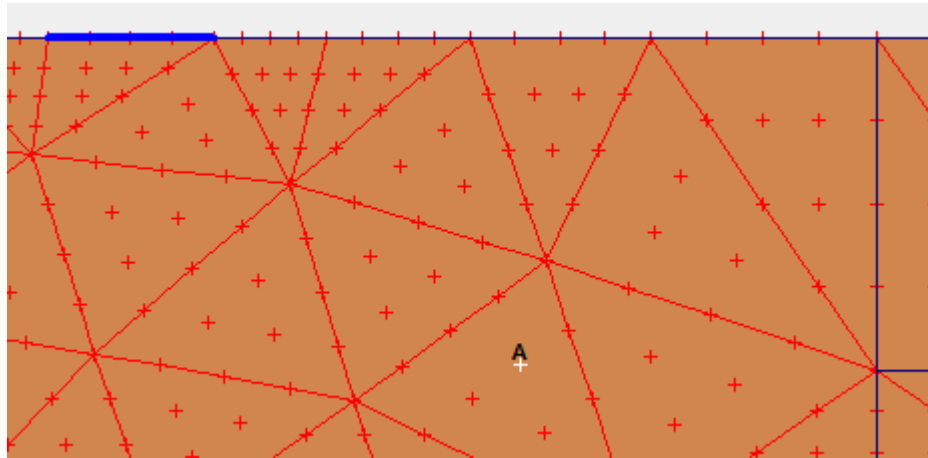


Figura.A-43 Puntos escogidos

El punto A estará ubicado en todos los modelos, con las mismas coordenadas, de tal manera que podamos verificar sus diferentes comportamientos.

Cuando todas las etapas estén listas como en la imagen anterior, se le dará en la opción Calculate, e iniciara el proceso para determinar las deformaciones. Terminará el proceso cuando todas las flechas azules se ven de la siguiente forma: [7]

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	0
✓ terreno natural	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 ...	1
✓ zapatas	2	1	Consolidation	Staged Construction	15.0...	2
✓ edificio	3	2	Consolidation	Staged Construction	730...	3
✓ tiempo de consoli...	4	3	Consolidation	Staged Construction	1460...	4
✓ exc 1	5	4	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	5
✓ exc 2	6	5	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	6
✓ exc 3	7	6	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	7

Figura. A-44 Etapa de cálculos finalizada

A.10 Curvas y gráficas Al seleccionar cualquiera de las etapas, y darle clic en la opción Output, se abre la ventana donde se observan los resultados obtenidos para la etapa seleccionada, podemos ver esfuerzos o deformaciones.

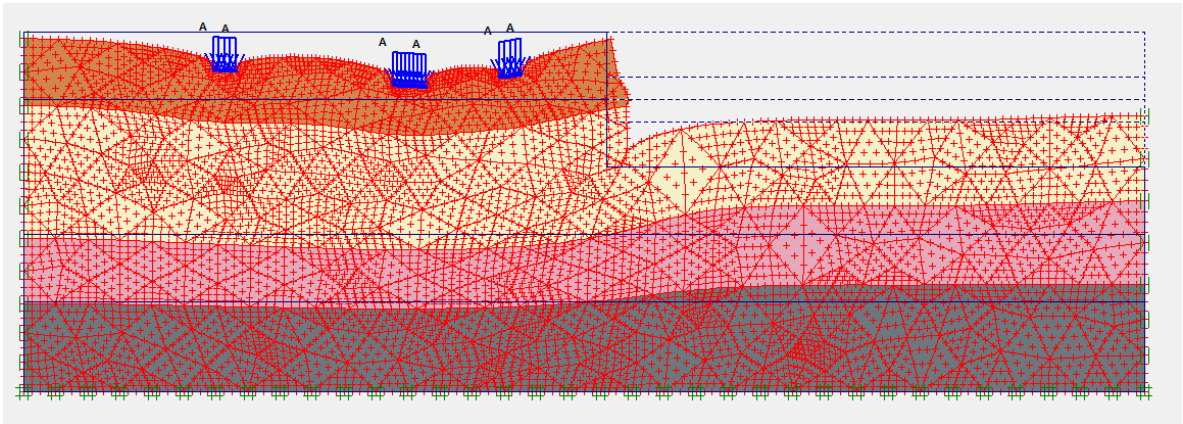


Figura A-45 Resultado, deformación de la malla

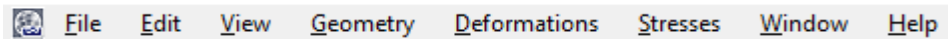


Figura. A-46 Barra de resultados

Al seleccionar cualquiera de las dos opciones en la barra, despliega una serie de opciones, dependiendo el resultado que quiera revisar.

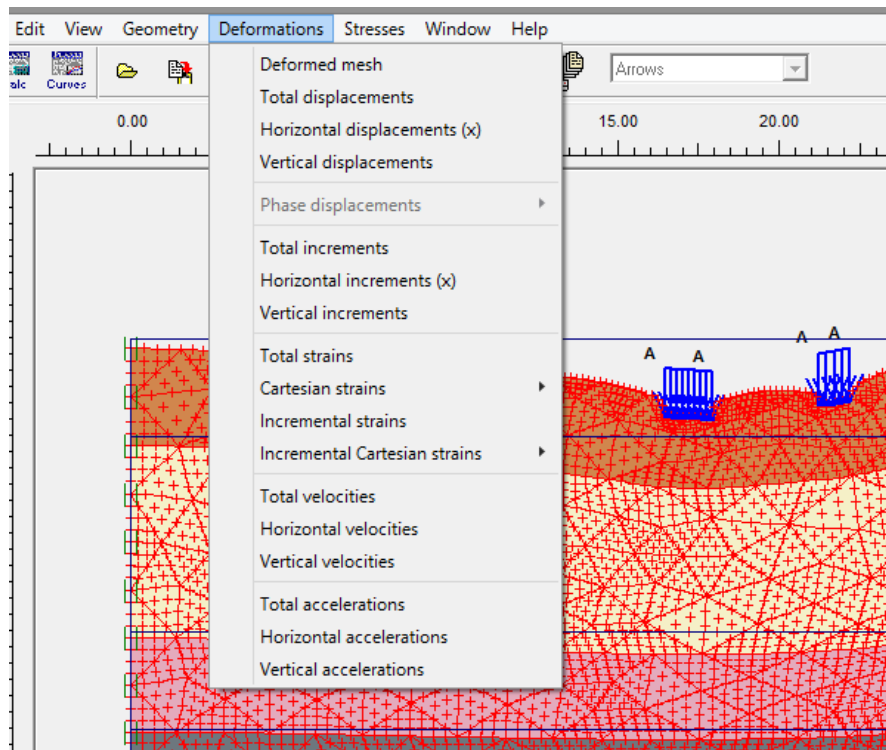


Figura.A-47 Opciones de resultados deformaciones.

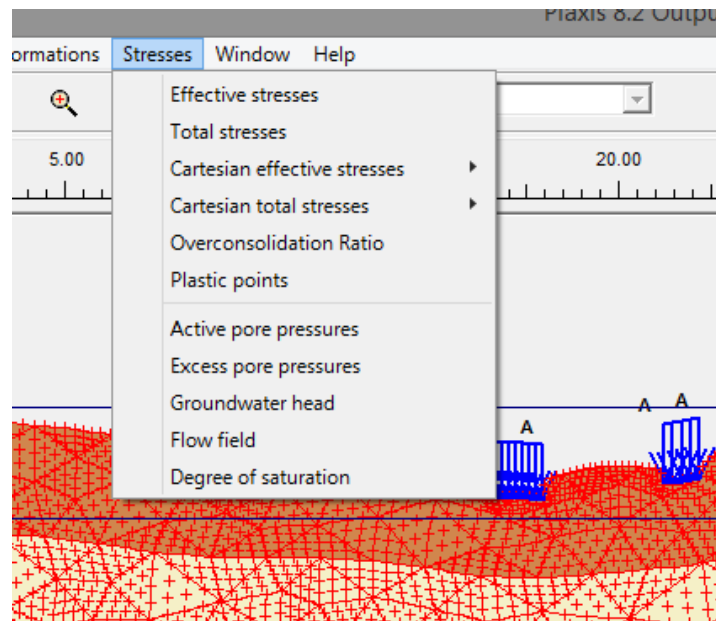


Figura.A-48 Opciones de resultados esfuerzos.

Estos son todos los resultados que podemos obtener mediante el programa PLAXIS 2D, versión 8.2.

Una vez obtenidos estos resultados abrimos el subprograma curves. [7]



Figura A-49 Botón para ingresar a curves

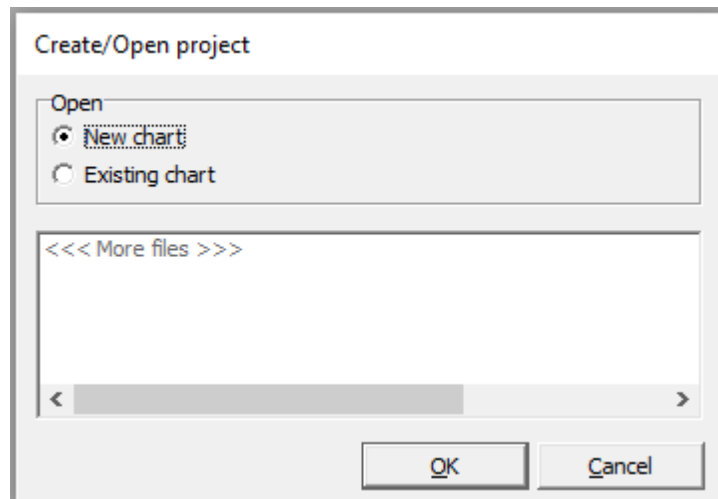


Figura. A-50 Creación de graficas

Una vez se le da Ok, abre la siguiente ventana, donde se puede seleccionar la variable en el eje X y en el eje Y, además el punto de análisis que queremos.

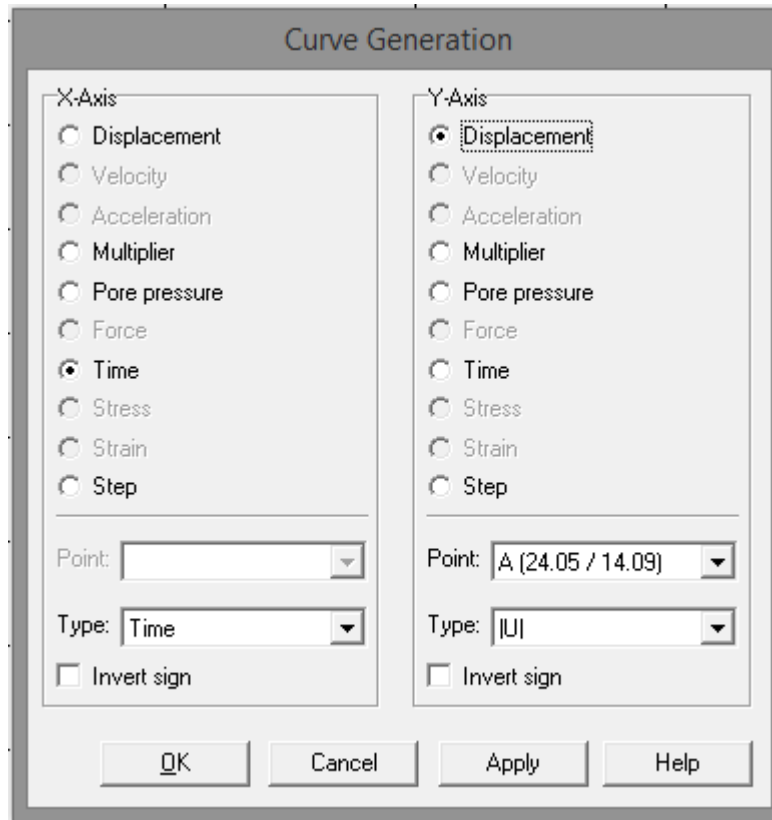


Figura. A-51 Generar grafica

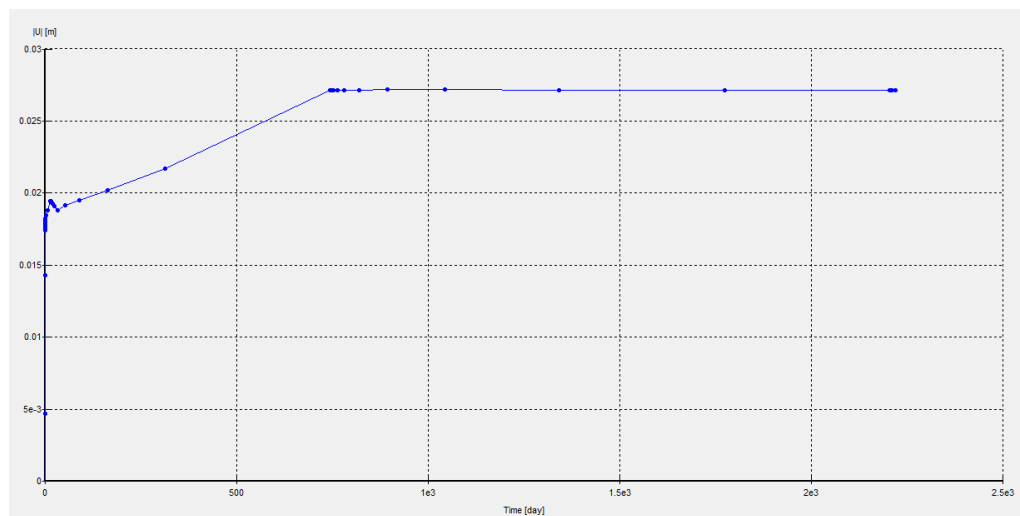


Figura A-52 Grafica generad

Se hace el procedimiento para cada uno de los puntos, y al final se vera de la siguiente forma:

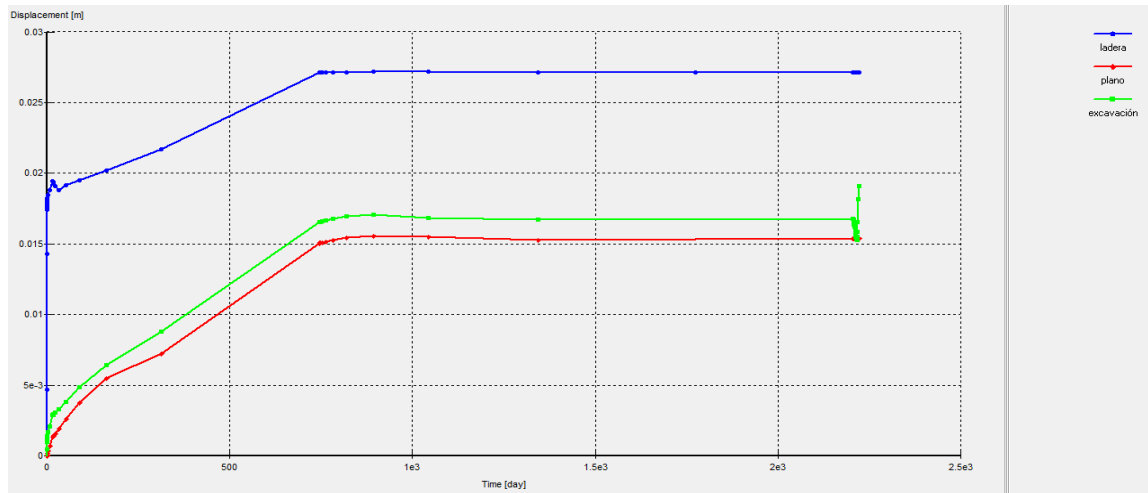


Figura. A-53 Grafica final

ANEXO B CÁLCULO DE PARÁMETROS O CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.

Los valores de Ángulo de rozamiento interno (ϕ), Cohesión (c), Peso específico saturado (γ_{sat}) y el peso específico (γ), se obtuvieron a partir de ensayos de laboratorios ya existentes de un talud de Rio de Oro, Santander, conformado por tres tipos de arenas limosas y un limo.

El valor del módulo de Young (E) se obtuvo a partir de la Tabla B-1

Tabla B-1 Valores típicos del módulo de elasticidad (E) Según Kezdi-1975. [11]

SUELO	E (Kg/cm ²)
Arcilla muy suelta	3.5 a 30
Arcilla suelta	20 a 50
Arcilla media	40 a 80
Arcilla dura	70 a 180
Arcilla arenosa	300 a 400
Arena limosa	70 a 200
Arena suelta	100 a 200
Arena densa	500 a 800
Arena densa y grava	1000 a 2000

El valor de la permeabilidad se obtuvo a partir de la Tabla B-2

Tabla B-2 Permeabilidades típicas de algunos tipos de suelos [11]

SUELO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD K en cm/seg	DRENAJE
Grvas limpias	10 ² a 1	Bueno
Arenas limpias	1 a 10 ⁻¹	Bueno
Mezcla de arena y grava	10 ⁻¹ a 10 ⁻⁴	Bueno
Arenas muy finas	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁶	Pobre
Limos y mezclas de arena y arcilla	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁷	Muy pobre
Arcillas	10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁹	Impermeable

Los cálculos presentados a continuación están aproximados, debido a que los cálculos se realizaron en las tablas que se encuentran en el programa Excel, el cual toma todos los decimales.

Calcularemos de forma teórica los parámetros siguientes:

- Rigidez secante en ensayos triaxiales (E_{50ref}).
- Rigidez tangente en ensayos edométricos (E_{oedRef}).
- Rigidez en carga - recarga (E_{urRef}).
- Coeficiente de Poisson en carga - recarga (ν_{ur}).

Calculo tipo del estrato 1:

Como datos fiables para el desarrollo y cálculo de las demás propiedades tenemos:

$$m=0.5$$

$$H_{media}= 1.5m$$

$$C=40.94$$

$$\phi= 41^\circ$$

$$\gamma_{sat} = 18.6 \text{ KN}/m^2$$

$$E_{50}=14000 \text{ KN}/m^2$$

$$P_{ref}=100 \text{ KN}/m^2$$

Para el cálculo de estos parámetros se utilizó dos procedimientos de los cuales los resultados se promedian para obtener valores más fiables.

Para estos procedimientos se necesitan los valores de K_o , ν y σ .

Se inicia con el cálculo de uno de los parámetros más importantes que es la Relación de Poisson ν . Estos parámetros tienen ecuaciones que los relacionan

entre sí, para poder determinar algunos otros que sean necesarios, ya que, en ciertas ocasiones no se tienen todas las características que pide el programa.

Se supone que “El coeficiente de empuje al reposo K_o , es decir, con desplazamiento nulo, se puede calcular bajo una hipótesis muy simple, que sólo existan deformaciones verticales (lo que se viene llamando deformación plana)”¹.

$$K_o = 1 - \text{sen}(\phi) = 1 - \text{sen}(41) = 0.344$$

Calculo de ν la relación de Poisson:

$$\nu = \frac{K_o}{1 + K_o} = \frac{0.344}{1 + 0.344} = 0.26$$

$$\sigma = H_{media} * \gamma_{sat} * K_o = (1.5m) \left(\frac{18.6KN}{m^3} \right) (0.344) = 9.596KN/m^2$$

Obteniendo estos parámetros hallamos E_{50ref} , E_{oedRef} y E_{urRef} . por los dos procedimientos de cálculo.

Primer procedimiento:

De la ecuación $E_{50} = E_{50ref} \sqrt{\frac{\sigma}{P_{ref}}}$ despejamos E_{50ref}

$$14000 = E_{50ref} \sqrt{\frac{9.596}{100}}$$

Donde $E_{50ref} = 45194 KN/m^2$

$$E_{oedRef} = \frac{E_{50ref}}{2} = \frac{45194KN/m^2}{2} = 22597KN/m^2$$

$$E_{urRef} = E_{50ref} * 3 = 45194KN/m^2 * 3 = 135583KN/m^2$$

¹Jaky, J. (1944). “The coefficient of earth pressure at rest. In Hungarian (A nyugalmi nyomas tenyezoje).” Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineering, 355–358.

Segundo procedimiento:

De la ecuación $E_{50} = E_{50ref} \left(\frac{C \cos(\phi) - \sigma \text{sen}(\phi)}{C \cos(\phi) + P_{ref} \text{sen}(\phi)} \right)^m$ despejamos E_{50ref}

$$14000 = E_{50ref} \left(\frac{40.94 \cos(41) - 9.596 \text{sen}(41)}{40.94 \cos(41) + 100 \text{sen}(41)} \right)^{0.5}$$

Donde $E_{50ref} = 27727.6 \text{KN/m}^2$

$$E_{oedRef} = \frac{E_{50ref}}{2} = \frac{27727.6 \text{KN/m}^2}{2} = 13863.8 \text{KN/m}^2$$

$$E_{urRef} = E_{50ref} * 3 = 27727.6 * 3 = 83182.79 \text{KN/m}^2$$

Se obtiene como resultado los siguientes valores promedio:

$$E_{50ref \text{ Promedio}} = 36461 \text{KN/m}^2$$

$$E_{oedRef} = 18230 \text{KN/m}^2$$

$$E_{urRef} = 109383 \text{KN/m}^2$$

En la Tabla B-3, se especifican los valores calculados para cada uno de los parámetros que establece el modelo de Mohr coulomb en la introducción de PLAXIS 2D.

Tabla B-3 Parámetros del modelo Mohr Coulomb para el PLAXIS 2D.

Muestra	Parámetros modelo Mohr Coulomb					
	ϕ	Cohesión [Kpa]	γ_s [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	Módulo de Young E [Mpa]	Coefficiente de Poisson [ν]
M1	41	40.94	17,55266667	18.6	14	0.26
M2	41	35.70	15,942	17.0	14	0.26
M3	45	15.17	16,2104	17.2	14	0.226
M4	29	12.81	17,87403333	21.2	14	0.34

En la Tabla B-4, se especifican los valores calculados para cada uno de los parámetros que establece el modelo de Hardening Soil .

Tabla B-3 Parámetros del modelo Hardening Soil model para el PLAXIS 2D.

Muestra	Parámetros modelo Hardening Soil model							
	ϕ °	Cohesión [Kpa}	γ_s [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	E 50 ref. [Mpa]	E oed ref. [Mpa]	E ur ref. [Mpa]	K onc
M1	41	40.94	17,55266667	18.6	14	0.26	0.26	0,344
M2	41	35.70	15,942	17.0	14	0.26	0.26	0,344
M3	45	15.17	16,2104	17.2	14	0.226	0.226	0,293
M4	29	12.81	17,87403333	21.2	14	0.34	0.34	0,515

Anexo C Cálculos de los parámetros de las zapatas.

Calculo tipo de los parámetros de las zapatas necesarios para los modelos

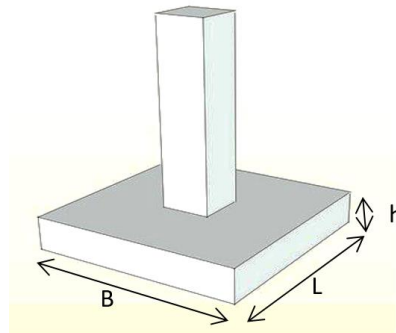


Figura C-1 diseño de zapatas empleadas para ambas estructuras

Parámetros solicitados:

- E: módulo de elasticidad del concreto.
- I: inercia
- A: área
- B: base
- L: largo
- ν : coeficiente de Poisson del concreto

Calculo tipo Zapata # 36 del edificio de 6 pisos:

Todos los valores presentados a continuación, se aproximaron en el trabajo escrito para no extenderlo mucho, debido a que todos los cálculos al ser introducidos a Excel, toma muchos más decimales, por lo cual los valores varían. Los datos mostrados son los resultados de la hoja de Excel.

Datos requeridos para el desarrollo y cálculo de las demás propiedades:

v: 0.15; L: 3m; B: 1.5m; E: $20 \times 10^6 \text{ pa}$

A: $B \times L = 4.5\text{m}$

$$I = \frac{B \times L^3}{12} = 3.380\text{m}^4$$

$$EA = (4.5\text{m}) \times (20 \times 10^6 \text{ pa}) = 90 \times 10^6 \text{ N}$$

$$EI = (20 \times 10^6 \text{ pa})(3.38\text{m}) = 67.50 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Para los modelos se emplearon dos estructuras:

Estructura 1: Edificio de 6 pisos

Estructura 2: Casa de dos pisos

Estos mismos cálculos se utilizaron para las otras zapatas empleadas del edificio de 6 pisos y de la casa de dos pisos, a las cuales se les asignaron las cargas correspondientes. Las cargas y dimensiones de las zapatas de la *estructura 1* fueron tomadas de una edificación existente en la ciudad de Bucaramanga; las cargas y dimensiones de la *estructura 2* se diseñaron con el fin de simular y aproximar valores de una casa promedio de dos pisos.

Dando como resultado la siguiente tabla con los datos ingresados al programa para cada una de las Zapatas estudiadas

Tabla C-1 Datos para las cargas y zapatas de las estructuras 1 y dos.

Edificación	DATOS DE LAS ZAPATAS				PARÁMETROS PARA INGRESAR EN EL PROGRAMA				
	Zapatas tipo	E Mpa	A [m ²]	I [m ⁴]	EA [KN]	EI [KN*m ²]	Peso [KN]	Coefficiente de Poisson del concreto ν	Cargas [KN/m ²]
Edificio 6 pisos	1	20	4,5	3,38	90000	67500	54	0,15	346
	2	20	5,78	5,57	115600	111361	69,4	0,15	382
	3	20	5,78	5,57	115600	111361	69,4	0,15	361
	4	20	5,12	4,37	102400	87381	61,4	0,15	354
Casa 2 pisos	1'	20	2	0,67	40000	13333	24	0,15	157
	2'	20	4,5	3,38	90000	67500	30	0,15	145
	3'	20	3,38	1,9	67600	38081	25	0,15	146

ANEXO D RESULTADOS DE LAS DEFORMACIONES EN PLAXIS 2D.

D.1 Resultados Modelo de Mohr Coulomb

A continuación, se mostrará a través de resultados arrojados por el programa PLAXIS 2D el comportamiento de los asentamientos para los tres escenarios planteados con la influencia de las dos estructuras por el método de Mohr Coulomb dando como un total de 6 modelos.

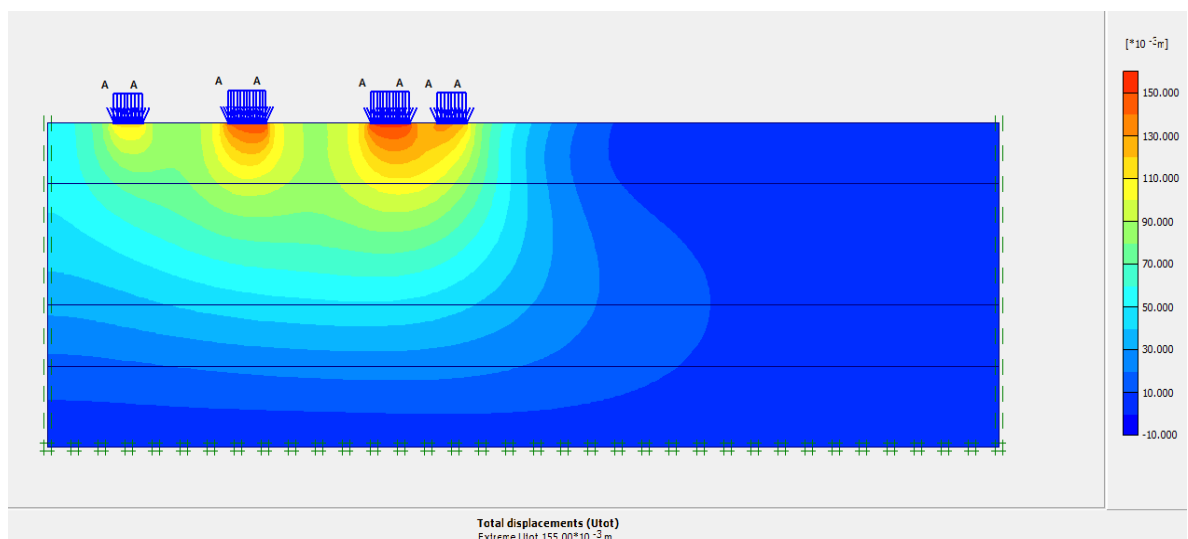


Figura D.1-1 Modelo plano edificio

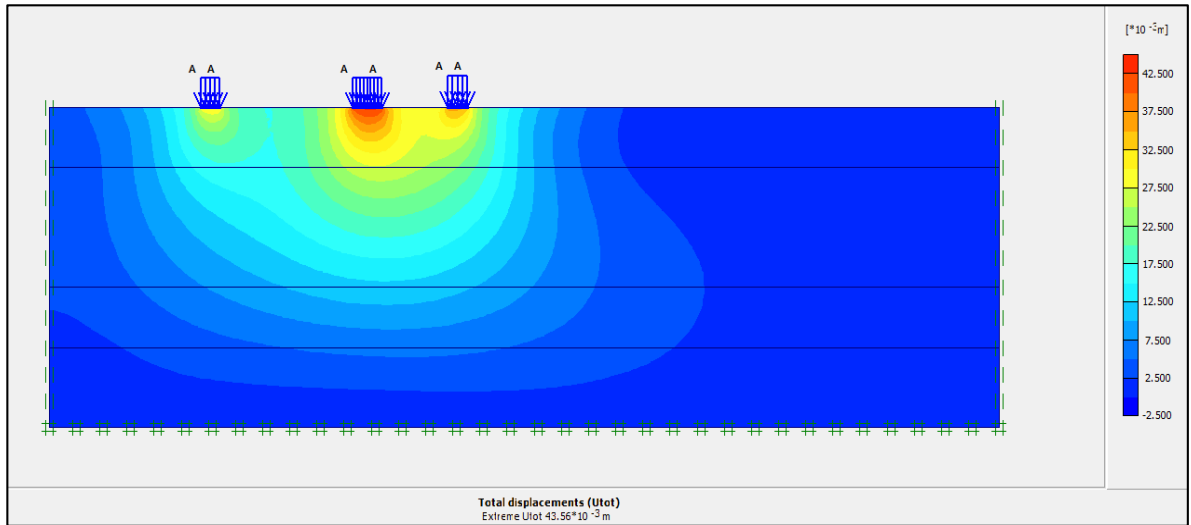


Figura D.1-2 Modelo plano casa

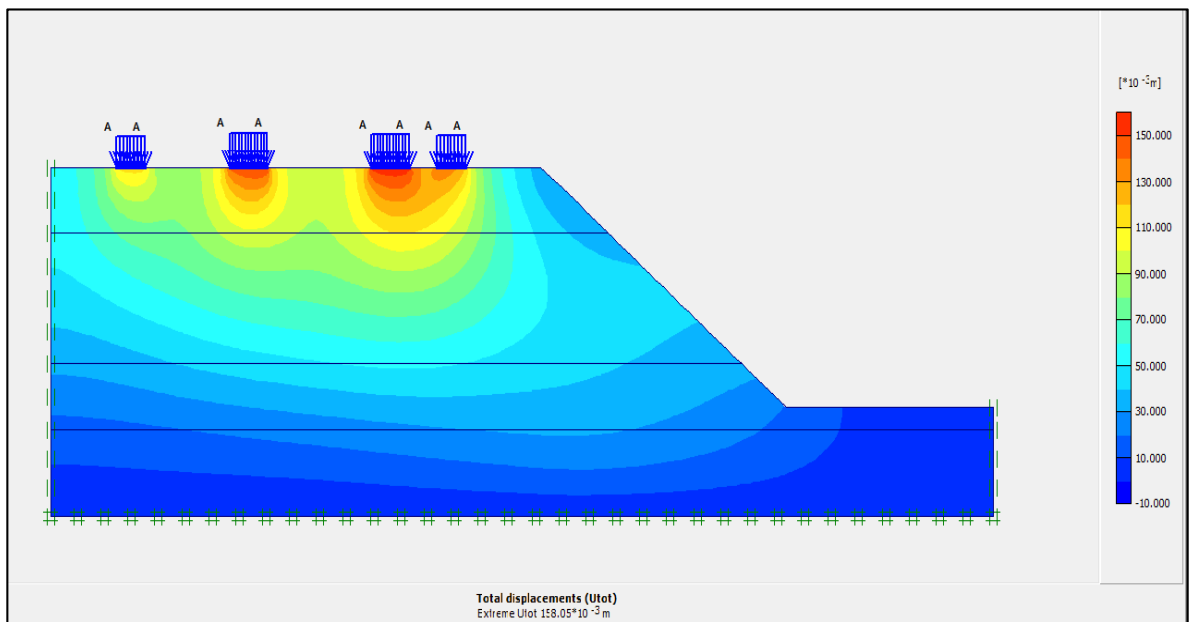


Figura D.1-3 Modelo ladera edificio

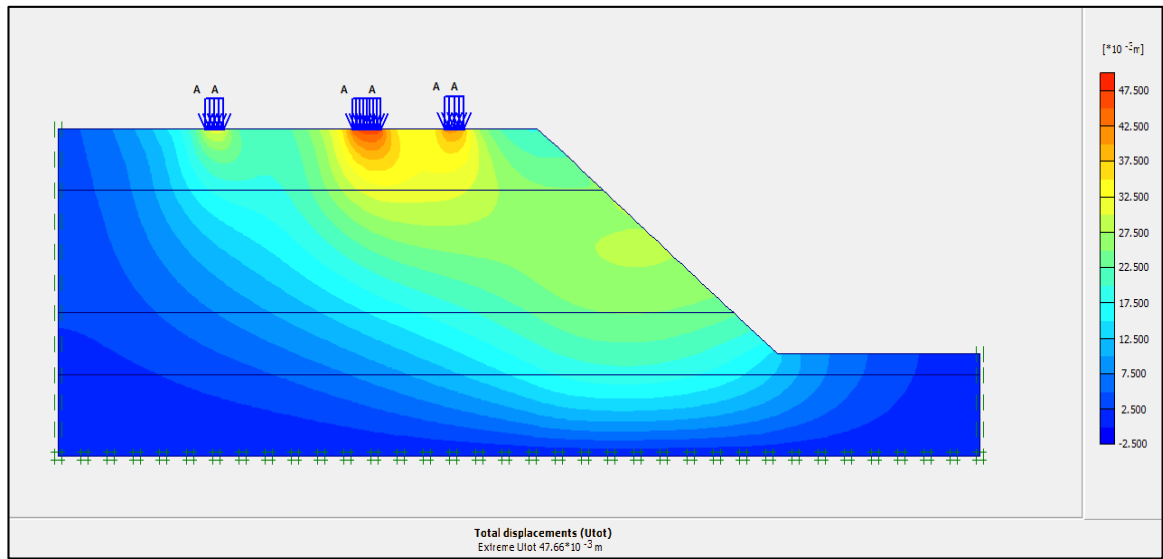


Figura D.1-4 Modelo ladera casa

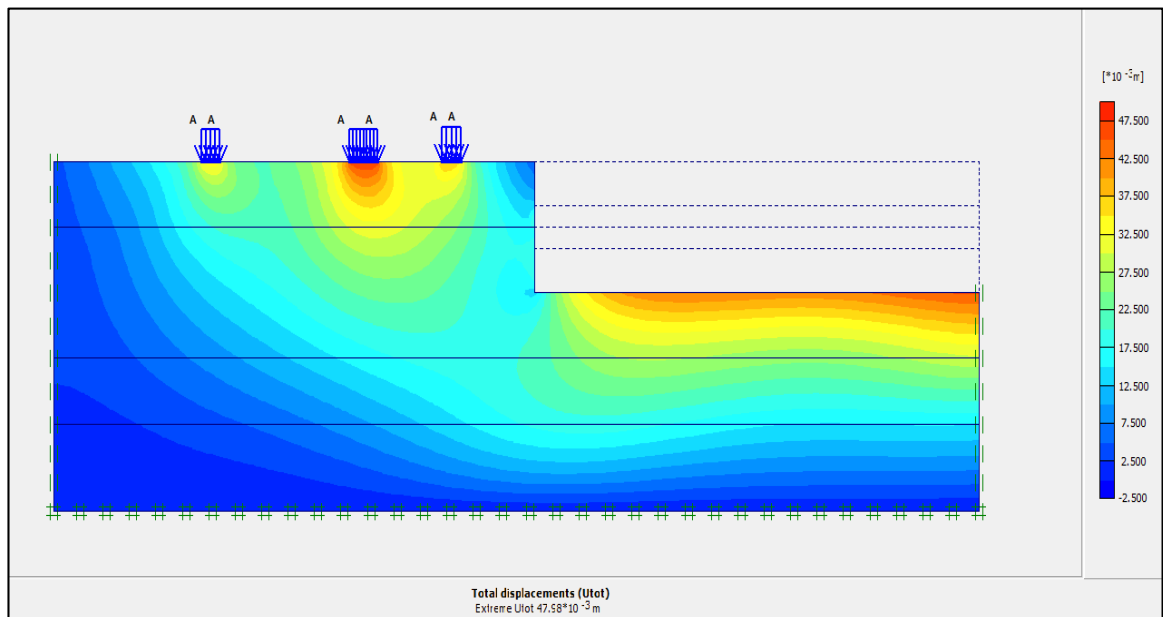


Figura D.1-5 Modelo excavación casa

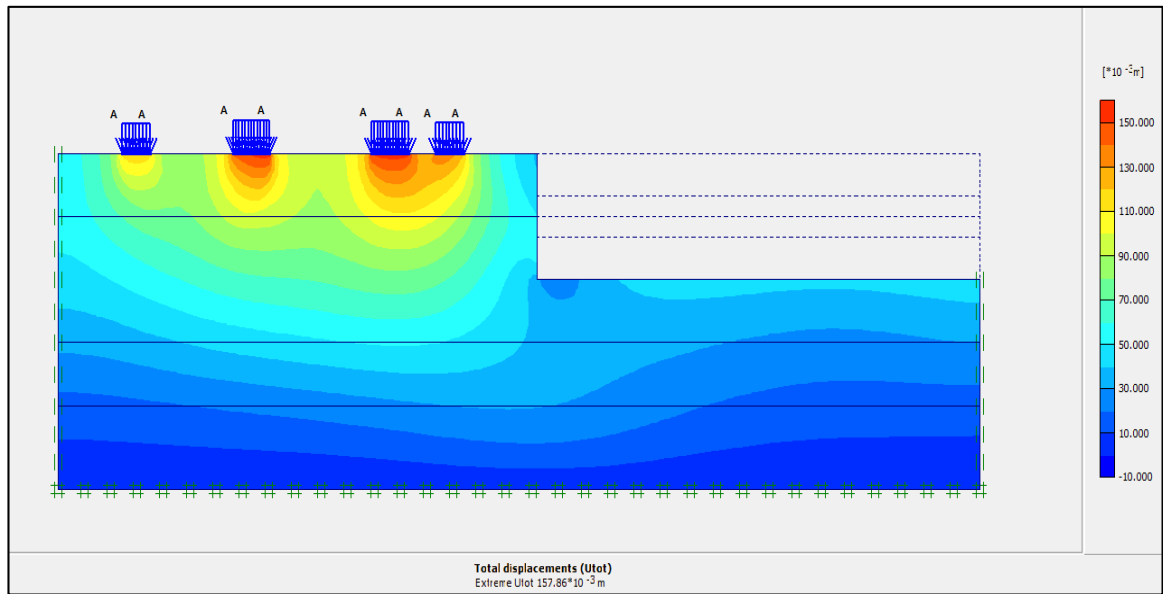


Figura D.1-6 Modelo excavación edificio

D.2 Resultados Modelo hardening soil.

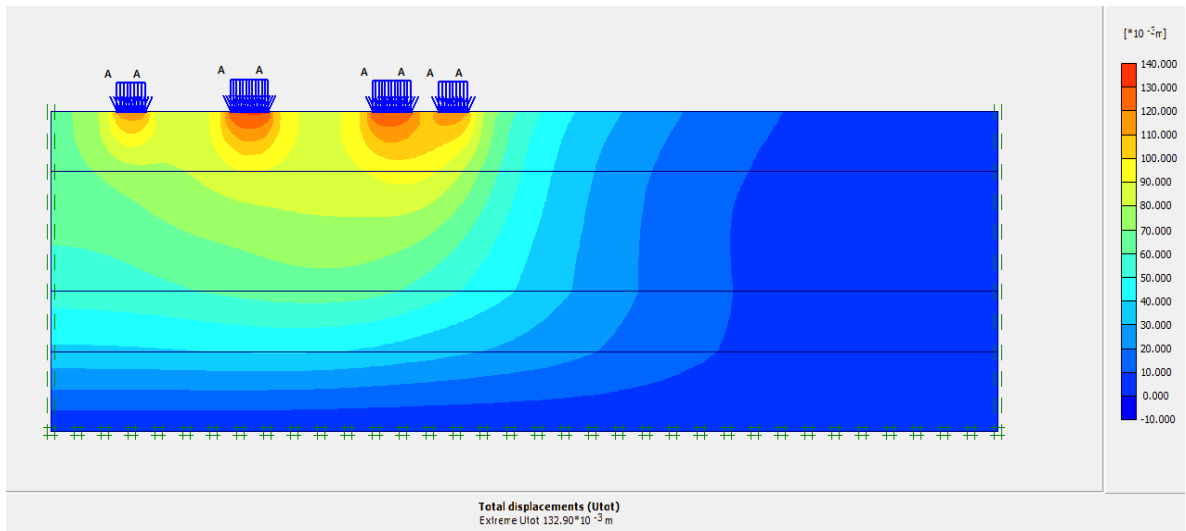


Figura D.2-1 Modelo plano edificio

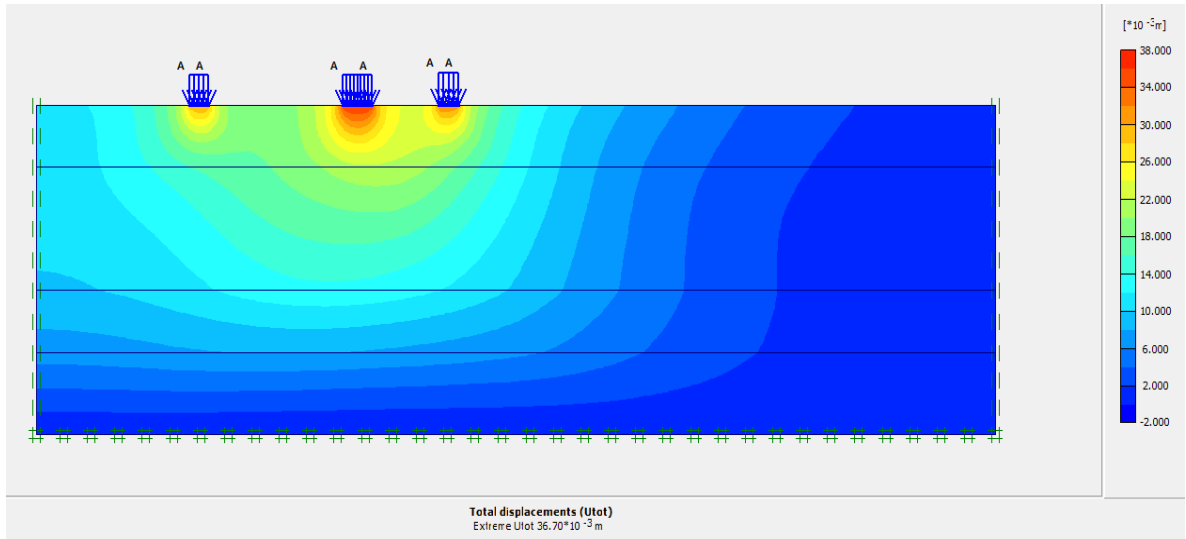


Figura D.2-2 Modelo plano casa

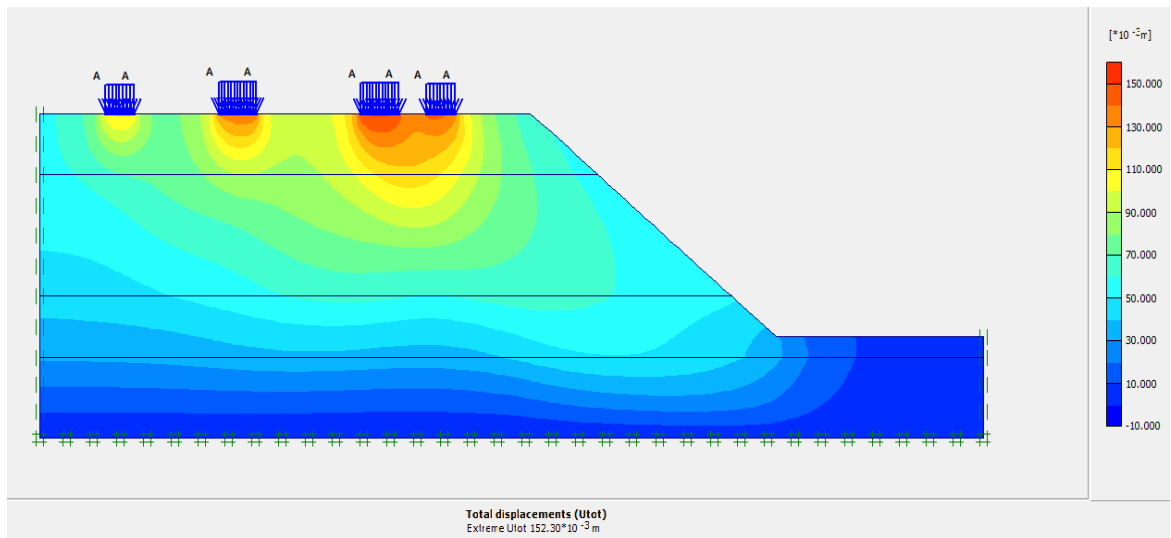


Figura D.2-3 Modelo ladera edificio

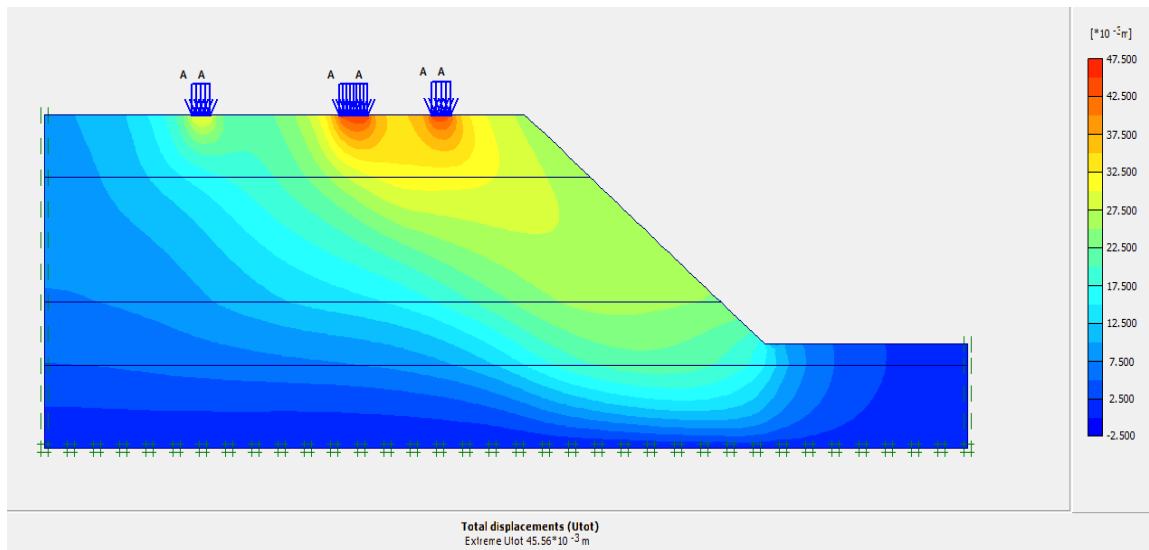


Figura D.2-4 Modelo ladera casa

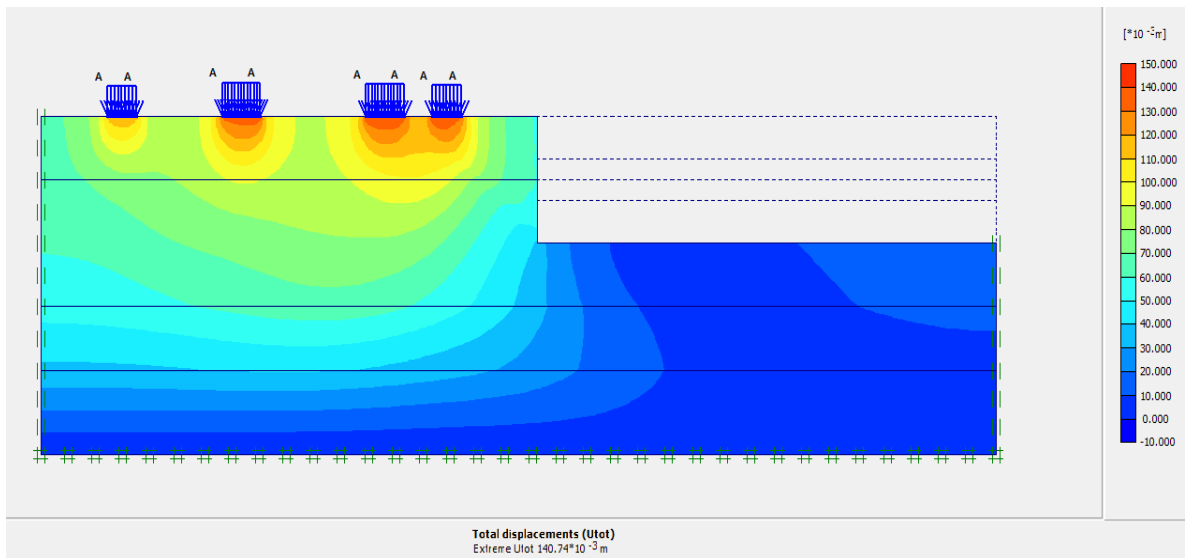


Figura D.2-6 Modelo excavación edificio

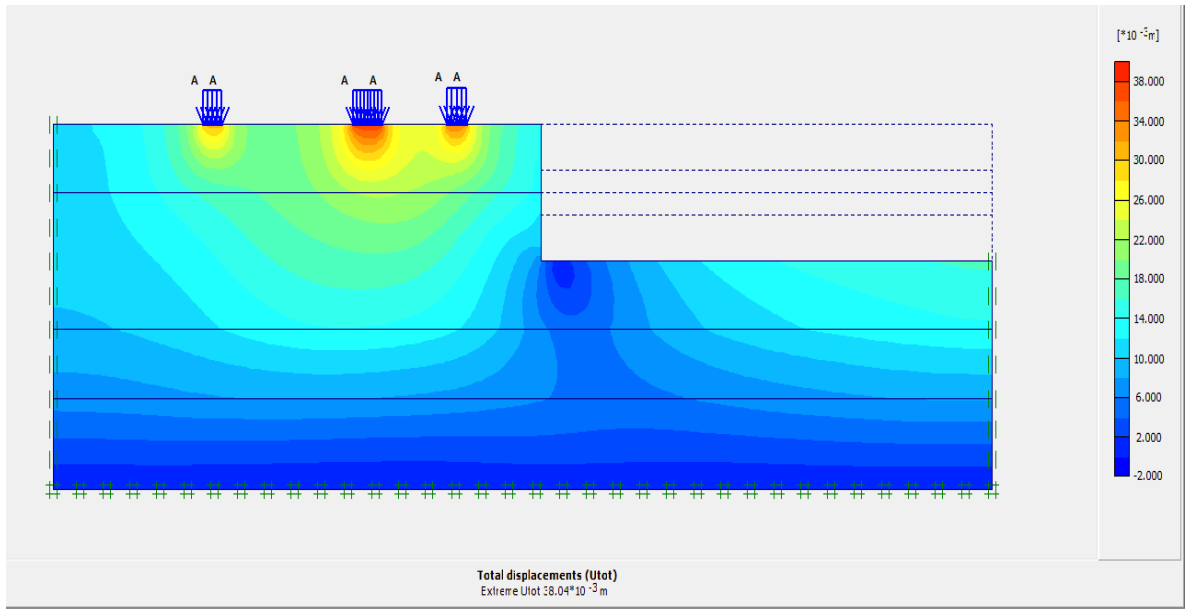


Figura D.2-5 Modelo excavación casa

