

**ANÁLISIS DE MÉTODOS DE EXCAVACIÓN FACTIBLES DE REALIZAR EN EL  
ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA. CASO DE ESTUDIO:  
INTERCAMBIADOR VIAL DEL MESÓN DE LOS BUCAROS.**

**MAYERLI CHACÓN MUÑOZ  
CESAR WILIAN SANTOS VILLAMIL**

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

**2014**

**ANÁLISIS DE MÉTODOS DE EXCAVACIÓN FACTIBLES DE REALIZAR EN EL  
ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA. CASO DE ESTUDIO:  
INTERCAMBIADOR VIAL DEL MESÓN DE LOS BUCAROS.**

**MAYERLI CHACÓN MUÑOZ  
CESAR WILIAN SANTOS VILLAMIL**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero civil**

**Director  
WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ  
Ingeniero Civil, M.Sc.**

**CO-DIRECTOR  
OMAR GIOVANNY SÁNCHEZ RIVERA  
Ingeniero Civil**

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

**2014**

## DEDICATORIA

*A quienes me han heredado el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo: amor. A quienes sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme. A quienes la ilusión de su vida ha sido en convertirme en persona de provecho y lograr así cumplir mi sueño de ser ingeniera civil. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos ni aun con las riquezas más grandes del mundo.*

*A mis hermanos y mis amigos.*

*A quien fue, es y siempre será mi gran inspiración, mi ángel. Hermano querido te dedico mi esfuerzo.*

## DEDICATORIA

*A Dios.*

*A mis padres a quienes les agradezco todo el esfuerzo y amor puesto en mí y mis hermanos por formarnos como profesionales, a mis hermanos por apoyarme y a mis compañeros de carrera quienes estuvieron conmigo durante estos años de universidad brindándome el valioso regalo de la amistad.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos al Ingeniero Civil y director de proyecto Wilfredo del Toro y al Ingeniero civil y co-director Omar Giovanni Sánchez, por sus asesorías y disponibilidad ante el desarrollo de las actividades, también agradecer al grupo de investigación Geomática, al diplomado Modelado y Gestión De la Construcción, por los conocimientos adquiridos y disponibilidad de equipos de cómputo y *software*.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1. Objetivo General	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Definición de Excavación	18
2.2. Comportamiento de las Excavaciones	18
2.3. Seguridad en las Excavaciones	19
2.4. Factor de Seguridad	20
2.5. Análisis por Elementos Finitos	20
2.6. <i>Software</i> PLAXIS 2D	21
2.7. Métodos de Excavación	21
2.7.1. Abatimiento de la Pendiente del Talud	21
2.7.2. Bermas	21
2.7.3. Tablestacas Metálicas	22
2.7.3.1. Auto portante	22
2.7.3.2. Arriostradas	22
3. METODOLOGÍA	24
4. RESULTADOS	28
4.1. Análisis de Estabilidad	28
4.2. Selección de los Métodos de Excavación	32
4.3. Modelamiento de cada uno de los Métodos en PLAXIS 2D	32
4.3.1. Abatimiento de la Pendiente del Talud	32
4.3.2. Excavación por Medio de Bermas.	36
4.3.3. Paredes de Tablestacas Metálicas	39
4.4. Cálculo de los Costos de Ejecución	43
4.5. Análisis de Ventajas y Desventajas de Cada Método	46
5. CONCLUSIONES	47
6. RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXOS	51

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Perfil representativo	28
<b>Tabla 2.</b> Secciones representativas con su respectiva profundidad de excavación.	29
<b>Tabla 3.</b> Deformaciones máximas y factor de seguridad dinámico para cada Sección	32
<b>Tabla 4.</b> Angulo de inclinación de la excavación para cada sección	33
<b>Tabla 5.</b> Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección método abatimiento de la pendiente del talud	34
<b>Tabla 6.</b> Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección método abatimiento de la pendiente del talud modificado	36
<b>Tabla 7.</b> Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección con el método de bermas.	39
<b>Tabla 9.</b> Deformaciones máximas y factores de seguridad dinámicos para las tablestacas	42
<b>Tabla 9.</b> Deformaciones máximas y factores de seguridad dinámicos para las tablestacas	42
<b>Tabla 10.</b> Presupuesto de excavación ideal	44
<b>Tabla 11.</b> Presupuesto para método por abatimiento en la pendiente del talud	44
<b>Tabla 12.</b> Presupuesto por método de Bermas	45
<b>Tabla 13.</b> Presupuesto para método por Tablestacas	45
<b>Tabla 14.</b> Tabla de ventajas y desventajas para cada método	46

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Comportamiento general de la excavación	18
<b>Figura 2.</b> Imagen del modelo en 3D realizado en Revit 2014.	25
<b>Figura 3.</b> Ubicación de las secciones representativas.	29
<b>Figura 4.</b> Colapso de la excavación en la primera etapa de excavación para la sección 3.	30
<b>Figura 5.</b> Resultados de PLAXIS deformación máxima para la excavación libre Sección 12.	31
<b>Figura 6.</b> Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 12.	31
<b>Figura 7.</b> Zonas del proyecto en las cuales es posible emplear excavación sin protección.	32
<b>Figura 8.</b> Resultados de PLAXIS 2D deformación máxima para la excavación libre Sección 3.	34
<b>Figura 9.</b> Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3.	34
<b>Figura 10.</b> Modelo abatimiento en PLAXIS 2D sección 3	25
<b>Figura 11.</b> Resultados de PLAXIS deformación máxima para la excavación libre Sección 3. para la inclinación modificada	35
<b>Figura 12.</b> Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3. Para la inclinación modificada	36
<b>Figura 13.</b> Dimensiones de las bermas para cada sección	37
<b>Figura 14.</b> Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3	38
<b>Figura 15.</b> Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3. Deformación máxima	38
<b>Figura 16.</b> Grafica de factor de seguridad para la sección 3	39
<b>Figura 17.</b> Modelo de tablestaca en PLAXIS 2D sección 3	40
<b>Figura 18.</b> Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3. Deformación máxima	41
<b>Figura 19.</b> Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3	42
<b>Figura 20.</b> Zonas de tablestacas auto portantes y tablestacas arriostradas	43

## RESUMEN

**TITULO:** ANÁLISIS DE MÉTODOS DE EXCAVACIÓN FACTIBLES DE REALIZAR EN EL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA. CASO DE ESTUDIO: INTERCAMBIADOR VIAL DEL MESÓN DE LOS BUCAROS \*

**AUTORES:** MAYERLI CHACÓN MUÑOZ  
CESAR WILIAN SANTOS VILLAMIL \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Métodos de excavación, factor de seguridad, Deformación, talud, Presupuesto.

## DESCRIPCIÓN

La siguiente investigación consiste en evaluar métodos de excavación factibles de realizar en la ciudad de Bucaramanga con caso de estudio Intercambiador vial Mesón de los Búcaros, para lo cual se evaluarán dos variables de gran importancia: la seguridad de la excavación y el costo de ejecución de cada uno de los métodos, utilizando herramientas computacionales que brinden una aproximación a lo que serían los resultados reales al momento de ejecutar el proyecto, esto con el fin de obtener un análisis de ventajas y desventajas de la implementación de los diferentes métodos y conocer que tan factible resultara su utilización.

Inicialmente se brinda una revisión bibliográfica sobre todos aquellos temas relacionados con estabilidad de excavaciones a cielo abierto, la cuales proporcionan las bases para el desarrollo del proyecto de investigación, posteriormente se realiza un análisis de los parámetros de resistencia del suelo para observar su comportamiento al momento de realizar excavaciones y se plantean las diferentes alternativas de excavación, para las cuales se hace un modelamiento en el software PLAXIS 2D con el fin de obtener valores de factor de seguridad y deformaciones máximas; dichos valores darán un indicativo de la estabilidad del método, con esto se realiza una comparación de los métodos en cuanto a estabilidad, costos y viabilidad en su implementación, ya que en nuestro medio ha cobrado gran importancia debido a accidentes que han ocurrido poniendo en riesgo la vida de los trabajadores, por la mala implementación de un método de excavación.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de ingenierías Físico mecánicas. Escuela de ingeniería civil Director: Wilfredo Deltoro Rodríguez Ingeniero Civil, M.Sc., CO-DIRECTOR: Omar Giovanni Sánchez Rivera Ingeniero Civil

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF EXCAVATION METHODS FEASIBLE OF PERFORM IN URBAN AREA OF THE CITY OF BUCARAMANGA. CASE STUDY: EXCHANGE ROAD MESÓN DE LOS BÚCAROS \*

**AUTHORS:** MAYERLI CHACÓN MUÑOZ  
CESAR WILIAN SANTOS VILLAMIL\*\*

**KEYWORDS:** Excavation methods, safety factor, deformation, slope, Budget.

## DESCRIPTION

The following research consists in evaluate feasible methods to perform excavation in the city of Bucaramanga with case of study Exchanger vial Meson de los Bucaros, For this purpose two important variables were evaluated: the safety of the excavation and the cost of implementation of each of the different methods, using computational tools that provide an approximation of what would be the actual results when running the project, this in order to obtain an analysis of the advantages and disadvantages of implementing different methods and know how feasible it is your implementation.

Initially a literature review on all issues related to stability of open pits is provided, which provide the basis for the development of the research project, then an analysis of the soil strength parameters is performed to observe their behavior at the time of excavation and are pose different alternatives of Excavation, for which a modeling is done in the software PLAXIS 2D in order to obtain safety factor values and maximum strain; these values give an indication of the stability of the method, with this a comparison is made of the methods in terms of stability, costs and feasibility in implementation, since in our environment has become very important due to accidents that have occurred putting the lives of workers at risk due to poor implementation of a method of excavation.

---

\*Work Degree

\*\* Faculty of Physicist \_ Mechanics school of civil engineering Director: Wilfredo Deltoro Rodríguez Ingeniero Civil, M.Sc., CO-DIRECTOR: Omar Giovanni Sánchez Rivera Ingeniero Civil

## INTRODUCCIÓN

Las excavaciones profundas a cielo abierto de proyectos de construcción se constituyen en importantes obras de ingeniería que requieren de estudios detallados de estabilidad de taludes, debido a las cargas estáticas y dinámicas, para garantizar un seguro comportamiento durante construcción, a mediano y a largo plazo.

En nuestro medio es muy frecuente realizar excavaciones profundas para desplantar cimentaciones en zonas urbanas, debido a la escasez de espacio, por lo cual los métodos de estabilización para construcción de obras civiles que requieren del uso del suelo subterráneo han cobrado gran importancia.

Las excavaciones profundas se utilizan a menudo en zonas urbanas, por ejemplo en los sistemas de transporte subterráneos, sótanos y las redes de distribución de agua. Ellos pueden inducir deformaciones de tierra desfavorables que pueden afectar a estructuras adyacentes, especialmente en los terrenos blandos. En la mayoría de edificios, vías y en general obras civiles de la ciudad de Bucaramanga, cada vez aumenta la problemática de búsqueda de lugares utilizables. Debido a esto es fundamental determinar métodos de excavación adecuados y sistemas seguros de sostenimiento, para garantizar la protección de las paredes de la excavación, evitando posibles fallas.

En general, cuando empieza una nueva estructura a edificarse y si esta requiere una excavación profunda para su cimentación, es estrictamente necesario estudiar bajo qué condiciones se realizaran los trabajos de excavación, ya que la misma podría causar pérdida de capacidad de carga, asentamientos, movimientos laterales en edificaciones colindantes, etc. Por esto es obligatorio determinar soluciones accesibles para realizar trabajos de excavaciones seguros y económicos. Hoy en día con el avance de la tecnología existen herramientas computacionales que permiten realizar cálculos de forma rápida y confiable; que facilita a los profesionales de la ingeniería tomar decisiones efectivas y acertadas, es por esta razón que el ingeniero requiere del dominio de estas herramientas.

En el análisis de perfiles estratigráficos es común que sea necesario realizar un gran volumen de cálculos repetitivos, es por esto que resulta indispensable la utilización de una herramienta computacional; el software PLAXIS 2D permite analizar la estabilidad de taludes por el método de elementos finitos.

En este trabajo de investigación se analizaron métodos de excavación factibles de realizar en el área urbana de la ciudad de Bucaramanga, teniendo en cuenta las variables de estabilidad de los taludes y el costo monetario de las actividades a realizar. El caso de aplicación fue el Parque Intercambiador Vial del Mesón de los

Búcaros el cual está localizado hacia el norte de la meseta de Bucaramanga, en la intersección de la Carrera 27, la Avenida Quebrada seca y el Bulevar Bolívar; este proyecto requiere excavaciones de gran profundidad que se deben realizar durante la construcción de los pasos deprimidos, en donde la seguridad de los trabajadores encargados de la ejecución de la obra se verá comprometida en el caso de la utilización de un método no adecuado y el costo de las excavaciones es un porcentaje considerable en el presupuesto de construcción del proyecto; finalmente, se realizó un análisis sobre las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas para la excavación y se elaboraron 5 videos tutoriales sobre la utilización del programa PLAXIS 2D.

## 1. OBJETIVOS

- **OBJETIVO GENERAL**

Analizar técnicas de excavación factibles de realizar en el área urbana de la ciudad de Bucaramanga, estudiando las variables de la estabilidad de los taludes en el proceso de construcción y el costo monetario de las actividades a realizar.

- **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Proponer alternativas de excavación factibles de realizar en la ciudad de Bucaramanga con caso de aplicación en la construcción del Intercambiador del Mesón de los Búcaros.
- ✓ Modelar y simular la estabilidad de los taludes representativos, resultantes de las alternativas de excavación propuestas, en el software PLAXIS 2D.
- ✓ Calcular los costos de ejecución de las actividades a realizar en las alternativas de excavación propuestas.
- ✓ Realizar un análisis sobre las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas para la excavación en la construcción del Intercambiador del Mesón de los Búcaros.
- ✓ Elaborar video - tutoriales sobre el modelamiento y simulación de taludes en el software PLAXIS 2D.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Definición de Excavación

Las excavaciones consisten en un corte del suelo por debajo del nivel original del terreno, siguiendo un diseño previamente elaborado y utilizando métodos y recursos, también previamente determinados, para obtener los espacios necesarios que permitan reemplazar la superficie de rodadura y sus elementos complementarios.

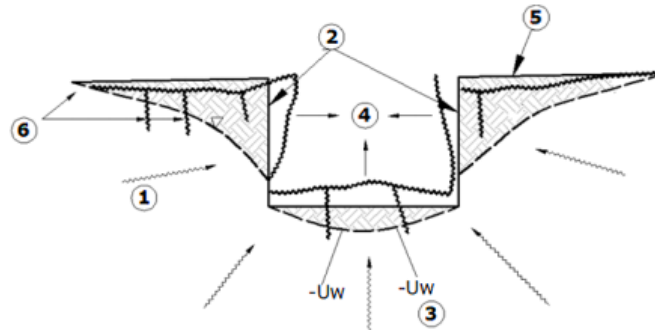
### 2.2. Comportamiento de las Excavaciones

Excavar en un terreno genera cambios significativos en las características mecánicas y la forma del suelo lo cual genera un proceso de descarga que produce en el terreno dos efectos principales:

- **Cambios de la geometría del terreno**

Este primer efecto conlleva a reducir la cota inferior y por consecuencia el incremento del gradiente gravitacional como se observa en la figura 1.

**Figura 1.** *Comportamiento general de la excavación*



**Fuente:** Álvaro J Gonzales, escuela Colombiana de ingeniería primer encuentro nacional de ingenieros de suelos 1992

Leyenda:

#### **Cambio de la Geometría**

1. Drenaje.
2. Taludes.

## **Cambio de Esfuerzos**

3. Reducción de  $U_w$  (presión de poros).
4. Deformaciones convergentes.
5. Asentamientos.
6. Grietas.

- **Redistribución de esfuerzos y deformaciones**

La descarga del suelo produce una alteración en la distribución de esfuerzos y deformaciones generando reducción de la presión de poros y algunos efectos mecánicos los cuales pueden resumirse así:

Reducción de los esfuerzos totales con la correspondiente reducción de presión de poros y La variación de esfuerzos por descarga y el cambio de geometría inducen redistribuciones de esfuerzos y deformaciones, de los cuales los principales pueden ser:

- Deformación vertical de la superficie inmediatamente por encima de la excavación y deformación de las paredes hacia el centro de la excavación.
- Aparición de esfuerzos de tracción y sus correspondientes grietas en la superficie por encima de la excavación, en el piso y algo menos en las paredes.
- Incremento de esfuerzos de corte en el pie de la excavación.

Si los esfuerzos inducidos exceden la resistencia del material de excavación se producirán fallas, usualmente irreversibles, si las deformaciones del material térreo se dejan pasar de límites tolerables se presentarán daños.

### **2.3. Seguridad en las Excavaciones**

Las excavaciones son una obra civil muy susceptible a la falla, cualquier detalle que no funcione en una excavación puede generar colapso. La OSHA (Occupational Safety and Health Administration) es la entidad de los EEUU que se

ocupa del tema de la seguridad en las excavaciones, especialmente para evitar la pérdida de vidas humanas. Salvo en roca estable, la OSHA requiere que los trabajadores estén protegidos contra el peligro de derrumbes en las zanjas o excavaciones con una profundidad de cinco pies o más. Hay cuatro métodos reconocidos de protección: declives, escalonadas, apuntalamiento y broqueles (cajas de zanjas). El uso de cualquier método o combinación entre estos depende de factores tales como espacio, tipos de suelo, profundidad y costo.

## **2.4. Factor de Seguridad**

En Ingeniería Civil en general el Factor de Seguridad FS se define como la relación entre fuerzas resistentes FR y actuantes FA

$$F_s = \frac{FR}{FA} \quad (1)$$

La norma colombiana exige un factor de seguridad para una excavación temporal estático de 1.25 y dinámico de 1.00.

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña.

## **2.5. Análisis por Elementos Finitos**

El análisis de elementos finitos consiste en la implementación de los métodos numéricos para la resolución de un problema físico determinado.

Este método numérico se basa en dividir la geometría en donde se encuentra el problema físico en pequeñas regiones o elementos en las cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo (la temperatura en transmisión del calor, el campo magnético en electromagnetismo, el campo de velocidades en mecánica de fluidos, etc.) de una forma discreta teniendo en cuenta cada una de las características físicas de los materiales empleados, los elementos de las fronteras, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo, la resolución de estas ecuaciones se lleva a cabo por el método iterativo hasta alcanzar la convergencia en la solución.

Existen herramientas computacionales o Software que implementan este método de forma eficiente, estas herramientas son denominadas herramientas de análisis por elementos finitos.

## **2.6. Software PLAXIS 2D**

PLAXIS es un programa de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelables corresponden a problemas de deformación plana o con asimetría. La interface gráfica del programa permite al usuario crear fácilmente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema en estudio

El método empleado por el programa de elementos finitos es una herramienta útil en el análisis de problemas geotécnicos, y la fiabilidad de este método para excavaciones profunda ha sido verificada ampliamente por investigadores.

## **2.7. Métodos de Excavación**

### **2.7.1. Abatimiento de la Pendiente del Talud**

El método consiste en disminuir la pendiente del talud hasta cierto ángulo, el cual garantice que la excavación permanecerá estable durante todo el proceso garantizando la seguridad de quienes allí laboran, este ángulo depende de las propiedades de cada uno de los estratos que se hallen en el terreno. El método funciona debido a que Cuando se disminuye la pendiente del talud, el talud pierde peso y el círculo crítico de falla se hace más largo y profundo para el caso de un talud estable, y de esta forma se aumenta el factor de seguridad. El abatimiento de un talud se puede lograr por corte o por relleno.

### **2.7.2. Bermas**

Las bermas son utilizadas en gran medida como sistema económico para estabilizar taludes en la construcción geotécnica, ya que este método resuelve con facilidad la inestabilidad en las paredes de una excavación porque permite la pérdida de peso al talud, aumentando la estabilidad.

El método de bermas también llamado Excavación con terrazas tiene como finalidad dividir las paredes de la excavación en varios taludes de comportamiento independiente, esta división se hace escalonando las paredes logrando con esto dividir a su vez el empuje del suelo lo cual genera una mayor estabilidad de la excavación, el método es utilizado principalmente con el propósito de controlar la erosión.

### **2.7.3. Tablestacas Metálicas**

Las pantallas de tablestacas, es un método de estabilización de tierras permanente o temporal, que permite realizar excavaciones verticales de cualquier tipo, ya sea zanjas, talud, pozo o sótano, evitando la inclinación del terreno, lo cual resulta de gran utilidad sobre todo en aquellos terrenos donde el espacio de excavación es limitado.

Este método consiste en tablonces metálicos hincados en los linderos del terreno a excavar, los cuales se unen entre sí para formar una pared flexible que logre soportar las fuerzas que ocasiona el corte en el suelo, la profundidad de hincado de estos tablonces debe superar la profundidad de la excavación cuya distancia después de este nivel depende del tipo de suelo que este soportando y del tipo de tablestacado que se utilice.

Para el método de tablestacado existen varias tipologías que dependen del proyecto:

#### **2.7.3.1. Auto portante**

Este tipo de tablestacado consiste en hincar las pantallas hasta cierta profundidad debajo del nivel de excavación, cuya distancia asegure un empotramiento en la base del tablón que le dé la estabilidad suficiente haciendo sumatoria de fuerzas igual a cero, para soportar el empuje del terreno sin necesidad de algún tipo de apoyo, son muy utilizada en excavaciones poco profundas, resulta muy eficiente debido a que al no necesitar ningún apoyo este método deja totalmente libre el área a excavar permitiendo el ingreso de maquinaria, que generalmente es de gran tamaño o de personal y además permite realizar la excavación en una sola fase.

#### **2.7.3.2. Arriostradas**

Cuando la profundidad de excavación es tal que resulte inviable realizar una tablestacado auto portante, se hace necesario el uso de apoyos a las paredes para garantizar la estabilidad, a este método se le conoce como tablestacado arriostrado, el cual consiste en proporcionarle a la pantalla un apoyo que haga oposición a la fuerza de empuje que el terreno ejerce sobre esta, existen tres maneras de arriostras las paredes:

- Con perfiles metálicos o apuntalamiento.

Consiste en darle estabilidad a las paredes del tablestacado con unos elementos metálicos que funcionan como puntales, los cuales soportan la fuerza a compresión, estos son ubicados de tal modo que sirvan de soporte, son de gran utilidad en aquellos proyectos en los cuales la excavación sea temporal ya que luego de terminar esta, cada uno de los elementos pueden ser retirados.

- Con Anclajes

Consiste en brindarle a la pantalla apoyo por medio de anclajes, este método al igual que el de pantallas auto portantes, permite dejar el espacio de excavación completamente libre, el proceso de excavación debe realizarse en más de una fase, para permitir el proceso de instalación de los anclajes.

- Con Tirantes

Consiste en brindarle apoyo a la pantalla por medio de tirantes metálicos, los cuales son principalmente barras de acero que trabajan a tensión, estas, en un extremo están sujetas a la pantalla de tablestaca y en el otro a un apoyo que también puede ser una tablestaca, pero esta va incida a una profundidad menor, este método permite alcanzar grandes profundidades sin necesidad de apuntalar, brindando un espacio libre en el interior de la excavación, y al igual que el arrostroamiento por perfilaría metálica, todos los elementos son recuperables haciéndolo muy atractivo para aquellos proyectos en donde la excavación es temporal y en las cuales no hay linderos cercanos a la excavación, ya que el método exige que haya cierta distancia libre después del límite de la excavación.

### 3. METODOLOGÍA

Para la elaboración del análisis de métodos de excavación factibles de realizar en la ciudad de Bucaramanga, con caso de estudio Parque Intercambiador vial Mesón de los Búcaros, fue necesario realizar una metodología que se encuentra dividida en 6 etapas que son: análisis de estabilidad, selección de los métodos de excavación, modelado de cada uno de estos métodos en el Software PLAXIS 2D, cálculo de los costos de ejecución de las actividades a realizar en las alternativas de excavación seleccionadas, análisis sobre las ventajas y desventajas de las alternativas propuestas para la excavación y elaboración de video - tutoriales sobre el modelamiento y simulación de taludes en el *software* PLAXIS 2D.

Cada una de estas etapas se explica detalladamente a continuación:

- **ETAPA 1: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD**

Esta etapa consiste en analizar qué tan estable es el terreno al realizarse una excavación sin ningún tipo de protección, esto con el fin de comprobarse la necesidad de implementar o no métodos de excavación en los diferentes sectores del caso de estudio Intercambiador Vial Mesón de los Bucaros. En esta etapa se seleccionaron los lugares de la excavación que son representativos, con el fin de obtener perfiles de la excavación en diferentes puntos para lograr realizar un modelo que se ajuste a toda la excavación, puesto que el diseño de los deprimidos viales exige que la profundidad varíe, aumentando a medida que se acerca la intersección entre las arterias viales que se pretenden enviar subterráneamente.

- **ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN**

La selección de un método adecuado de excavación para la elaboración de proyectos de ingeniería civil debe ir de la mano principalmente de la seguridad [6], ya que la protección de la vida de las personas que laboraran dentro de ella debe ser el principal objetivo de quien seleccione el procedimiento para excavar.

Teniendo como punto de partida todos los datos referentes a los estudios Geotécnicos elaborados en el Caso de estudio Intercambiador vial Mesón de los Búcaros, se procedió a estudiar los métodos de excavación que pueden ser utilizados en dicho proyecto, teniendo en cuenta la tipología del suelo y las características de los deprimidos que se deben construir.

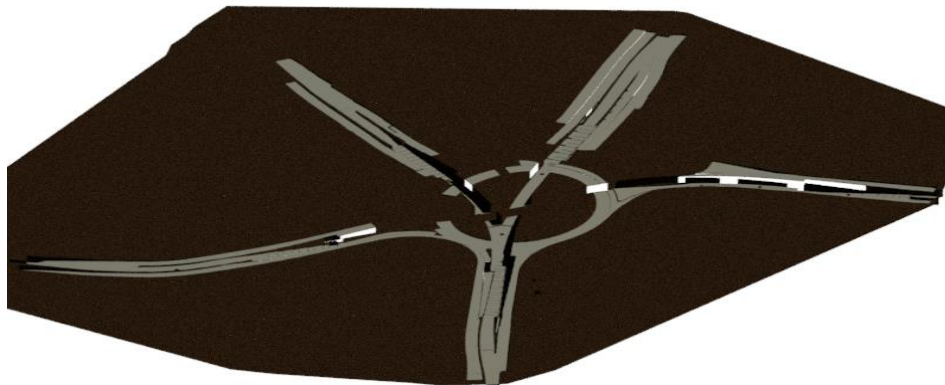
- **ETAPA 3: MODELAMIENTO DE CADA UNO DE LOS MÉTODOS DE EXCAVACIÓN EN EL SOFTWARE PLAXIS 2D**

El uso de herramientas computacionales para la solución de proyectos en la ingeniería se ha convertido día a día en un aliado imprescindible para los profesionales, puesto que estas herramientas les permiten realizar el trabajo de una manera rápida y oportuna facilitando la realización de grandes cálculos que sin estas tomarían una gran cantidad de tiempo.

El primer paso para realizar el modelado de cada método de excavación es conocer la topografía tanto del terreno como de la excavación, para poder obtener las diferentes secciones transversales verticales representativas del proyecto.

Para esto se empleó el software Revit 2014, de la casa Autodesk, ya que la topografía del caso de estudio, intercambiador vial mesón de los Búcaros, se encuentra modelada en este *software* por el grupo de investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander como se ve en la figura 2.

**Figura 2.** Imagen del modelo en 3D realizado en Revit 2014.



Con la identificación de las secciones representativas de los taludes provisionales durante la construcción del proyecto, elaborados en el *software* Autodesk Revit 2014, y exportarlos al *software* AutoCAD Civil 3D 2014, en donde se adecuó la Geometría de cada uno de los perfiles, perfiles que posteriormente fueron exportados al *software* PLAXIS 2D, donde es posible realizar el análisis de esfuerzos y deformaciones del suelo.

La geometría de cada una de las excavaciones también puede ser modelada en el *software* PLAXIS 2D, el *software* AutoCAD 2014 brinda una interface gráfica amigable con el usuario, por tanto permite un mejor nivel de detalle en la elaboración de los perfiles de los taludes.

En el *software* PLAXIS 2D se importó la geometría del perfil transversal que se tiene en formato CAD, para iniciar con el modelado de la excavación.

El siguiente paso que se realizó fue asignar las propiedades de los diferentes estratos que van en cada una de las secciones, para conocer que estratos se encontraron en el terreno, se analizan los estudios geotécnicos que fueron realizados en el sector por el ingeniero Wilfredo Del Toro de la Universidad Industrial de Santander, estos estudios contienen la información detallada de cada una de las propiedades de los suelos necesarios para modelar en el programa, en dicho estudio de geotecnia se realizaron sondeos en diferentes sitios, para asignar las propiedades a cada excavación, se escoge el sondeo que se encuentre más cercano a la sección transversal de la excavación que se va a analizar.

Finalmente se procedió con la prueba modelado de cada uno de los métodos seleccionados en PLAXIS 2D.

#### ● **ETAPA 4: CALCULO DE LOS COSTOS DE EJECUCIÓN**

El costo monetario es uno de los factores más importantes que define cada proyecto en la ingeniería, pues este nos indica que tan factible resultaría la ejecución de dicho proyecto [7], es por este motivo que el conocer que tanto dinero consumirá cada uno de los métodos ayuda a identificar que tan apropiado resulte su implementación.

Para el cálculo de los costos de ejecución de este proyecto utilizando cada uno de los métodos de excavación, fue necesario contar con dos factores de gran importancia como son: las cantidades de obra y los costos de cada una de las actividades, estos factores son hallados de la siguiente manera:

##### - **CALCULO DE LAS CANTIDADES**

El cálculo de las cantidades de cada uno de los ítems que hacen parte de las etapas del proyecto son halladas teniendo en cuenta el método de excavación implementado, se obtienen todas aquellas cantidades que produzcan un costo en la ejecución del método de excavación, para finalmente obtener un costo que de una idea de que tanto dinero consumirá cada método.

##### - **COSTOS DE CADA UNA DE LAS ACTIVIDADES**

El cálculo de los costos de cada uno de los ítems a los cuales se les hallan las cantidades son elaborados teniendo en cuenta el costo unitario de cada uno, es decir el valor de realizar una unidad de cada ítem con el fin de multiplicarlo por la cantidad total para encontrar el costo absoluto de realizar la actividad.

Para el cálculo del costo unitario se tienen en cuenta el costo de cada material empleado, el equipo que se debe emplear es decir cada máquina y herramienta

empleada en el proceso constructivo de la actividad, también la mano de obra que debe ser utilizada al igual que el rendimiento que esta tenga en la realización de la actividad.

- **ETAPA 5: ANÁLISIS SOBRE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA LA EXCAVACIÓN**

Teniendo en cuenta los resultados de las etapas anteriores se realizó una comparación de cada uno de los métodos analizando las ventajas y desventajas de su implementación.

- **ETAPA 6: ELABORACIÓN DE VIDEOS - TUTORIALES SOBRE EL MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE TALUDES EN EL SOFTWARE PLAXIS 2D**

Para la elaboración de los videos – tutoriales se utilizó la herramienta CamStudio que es un software de código abierto que permite grabar la pantalla.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

De los estudios de suelos que se realizaron se obtuvieron las propiedades de los suelos que se introducen al PLAXIS, en la tabla 1 se muestran las propiedades de un perfil de suelo representativo para el área del proyecto, en donde se muestra el tipo de suelo, el peso específico del suelo en Ton/m<sup>3</sup>, cohesión en KN/m<sup>2</sup>, y el Angulo de fricción en grados.

También para efectos de diseño se tuvo en cuenta una carga distribuida de 1 Ton/m en los bordes de la excavación, con el fin de cubrir la sobrecarga que ejercerán los equipos de excavación.

**Tabla 1.** Perfil representativo

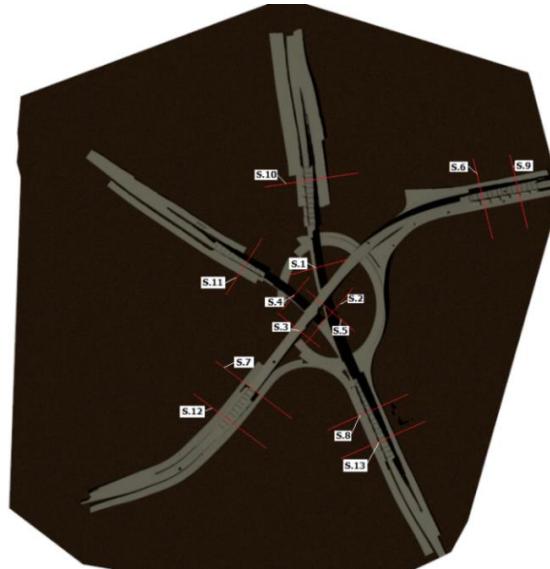
PERFIL ESTRATIGRÁFICO REPRESENTATIVO		
Profundidad	Clasificación USC.	Propiedades
0 a 4m	limos arenosos con grava color gris	$\gamma$ : 1,8
		C: 15
		$\Phi$ : 35
4 a 8m	arcilla inorgánica	$\gamma$ : 1,9
		C: 20
		$\Phi$ : 44
8 a 12m	arena limosa	$\gamma$ : 1,9
		C: 20
		$\Phi$ : 42
12 a 16m	grava arcillosa	$\gamma$ : 2
		C: 10
		$\Phi$ : 45
16 a 20m	arena arcillosa	$\gamma$ : 3
		C: 11
		$\Phi$ : 46

Las secciones seleccionadas, las cuales representan la excavación se observan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Secciones representativas con su respectiva profundidad de excavación.

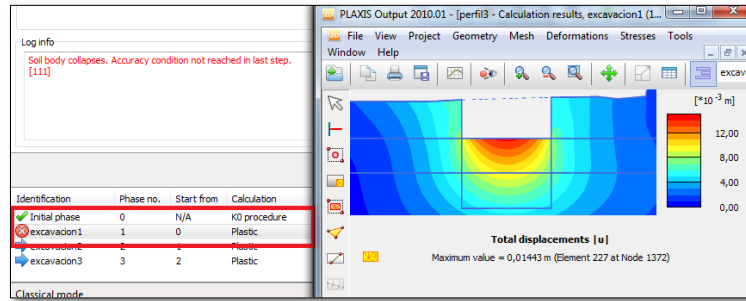
Sección	Profundidad [M]
S. 1	7,05
S. 2	8,17
S. 3	12,65
S. 4	7,09
S. 5	13,18
S. 6	8,57
S. 7	5,89
S. 8	6,75
S. 9	4,94
S. 10	4,06
S. 11	4,08
S. 12	4,00
S. 13	4,08

**Figura 3.** Ubicación de las secciones representativas.



Al modelar las secciones más profundas con su respectiva excavación sin ningún tipo de protección, el software dio como resultado que dicho proceso colapsa antes de llegar al nivel final como se observa en la figura 4, indicando que se debe emplear un método de estabilización.

**Figura 4.** Colapso de la excavación en la primera etapa de excavación para la sección 3.



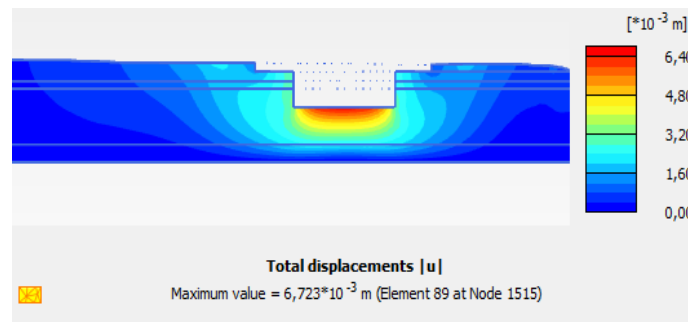
Cuando se deben realizar excavaciones profundas mayores a 1.20 m y las condiciones del entorno permitan o exigen realizar excavaciones con talud vertical, esta puede hacerse sin ningún tipo de protección hasta cierta profundidad, a esta se le denomina altura crítica Hc.

Teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas del suelo que se encuentra en el terreno a excavar, en el caso de estudio intercambiador vial Mesón de los Búcaros, dichas condiciones muestran que el suelo en aquel sector tiene una resistencia alta, por este motivo se estimó una Hc de aproximadamente 4.0 m, por consiguiente todas las excavaciones que sean menores a esta altura no necesitaran ningún tipo de protección.

Para cada uno de estos sectores se modeló en PLAXIS la sección más crítica, es decir la más profunda, con el fin de comprobar su estabilidad, para el proyecto se empleó una profundidad crítica de 4.0 m, con excepción de la sección pues para esta altura se comprobó estabilidad como se muestra en la figura 5.

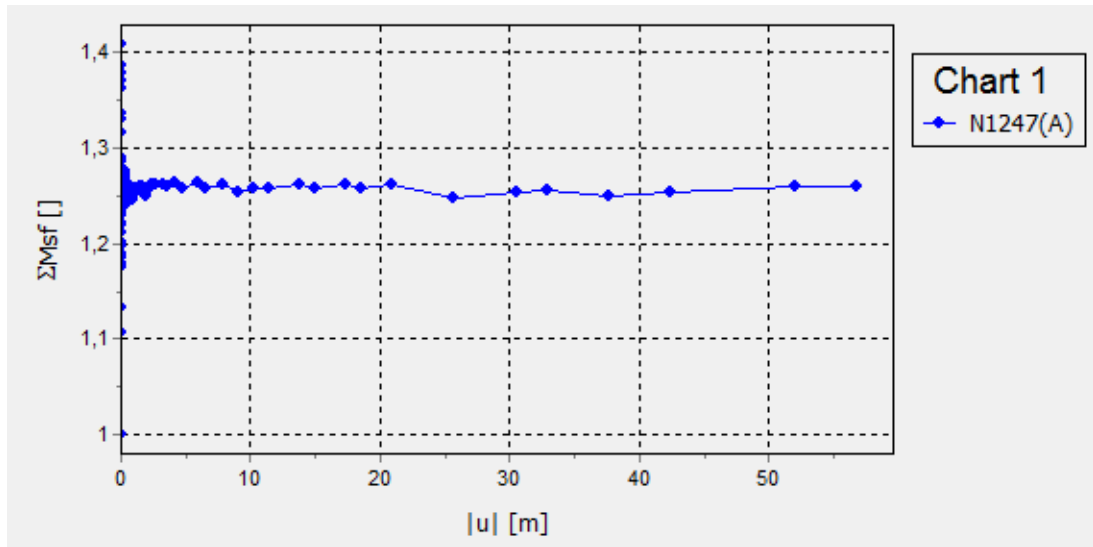
El límite de las profundidades está enmarcado por las secciones de la 9 a la 13.

**Figura 5.** Resultados de PLAXIS deformación máxima para la excavación libre Sección 12.



En la figura 6 se muestra la gráfica del factor de seguridad dinámico para la sección 12.

**Figura 6.** Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 12.



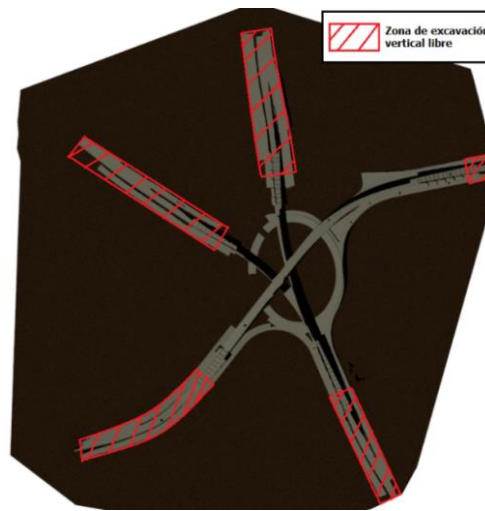
Los resultados de dichos modelamientos son mostrados en la tabla 3, en la cual se muestran las deformaciones máximas, dichas deformaciones máximas se definen como el asentamiento máximo de la superficie del terreno sobre la deflexión máxima de la pared.

**Tabla 3.** Deformaciones máximas y factor de seguridad dinámico para cada sección.

Sección	Deformación Max [M]	Factor de seguridad
S. 9	5,82E-03	1,15
S. 10	0,05179	1,66
S. 11	0,01252	1,06
S. 12	6,72E-03	1,26
S. 13	7,93E-03	1,09

Debido a que el factor de seguridad dinámico dio por encima del requerido por la norma se considera que la excavación es estable.

**Figura 7.** Zonas del proyecto en las cuales es posible emplear excavación sin protección.



## **4.2. Selección de los Métodos de Excavación**

Luego de un análisis de los métodos posibles a utilizar, se lograron identificar 3 métodos que se adaptan a las características del proyecto, los cuales son: Abatimiento de las pendientes del talud, Bermas y Tablestacas metálicas (auto portante y atirantado).

Cada uno de los métodos fueron escogidos debido a que presentan las características óptimas para ser utilizados, debido a que se requiere realizar una excavación para construir un Box Culvert por donde irán los carriles viales subterráneos del deprimido y posteriormente estas excavaciones serán rellenas, por lo cual el método empleado para la excavación debe ser temporal, esta característica es común en cada método seleccionado.

## **4.3. Modelamiento de cada uno de los métodos en PLAXIS 2D**

### **4.3.1. Abatimiento de la Pendiente del Talud**

Conociendo cada uno de los ángulos de fricción de los diferentes estratos encontrados en los sondeos, estos suministrados por los estudios Geotécnicos, se escoge el Angulo que proporcione una mayor inclinación en el talud, esto con el fin de garantizar la seguridad de cada estrato, pues ya que si se cumple para el más crítico, se cumplirá para las demás.

Para cada sección se seleccionan los ángulos de inclinación mostrados en la tabla 4.

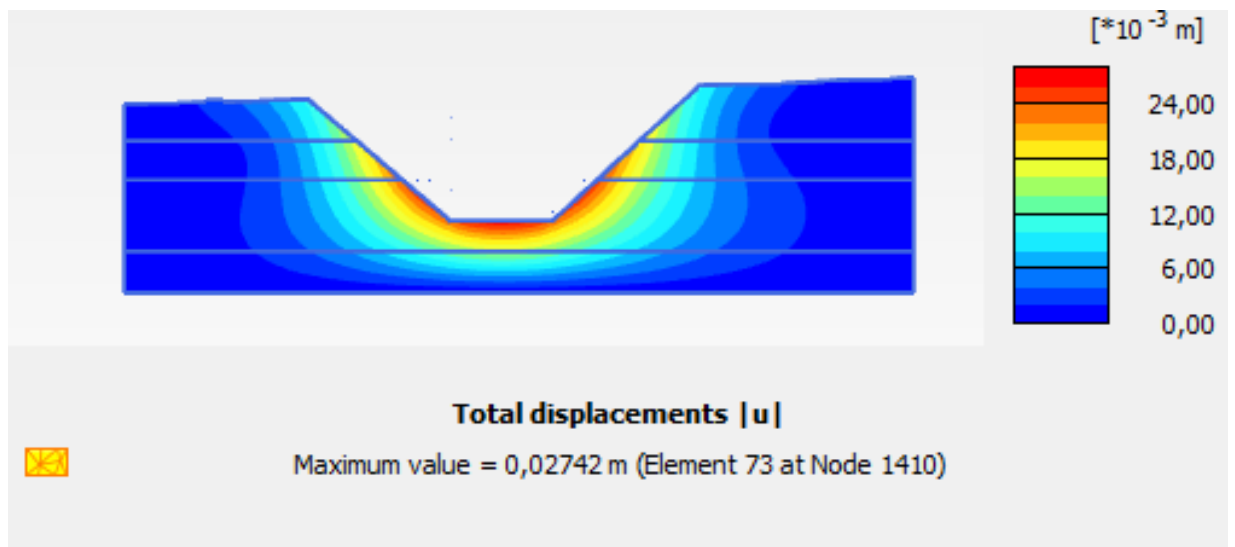
**Tabla 4.** Angulo de inclinación de la excavación para cada sección.

Sección	Angulo de inclinación en Grados
S. 1	40
S. 2	41
S. 3	41
S. 4	50
S. 5	50

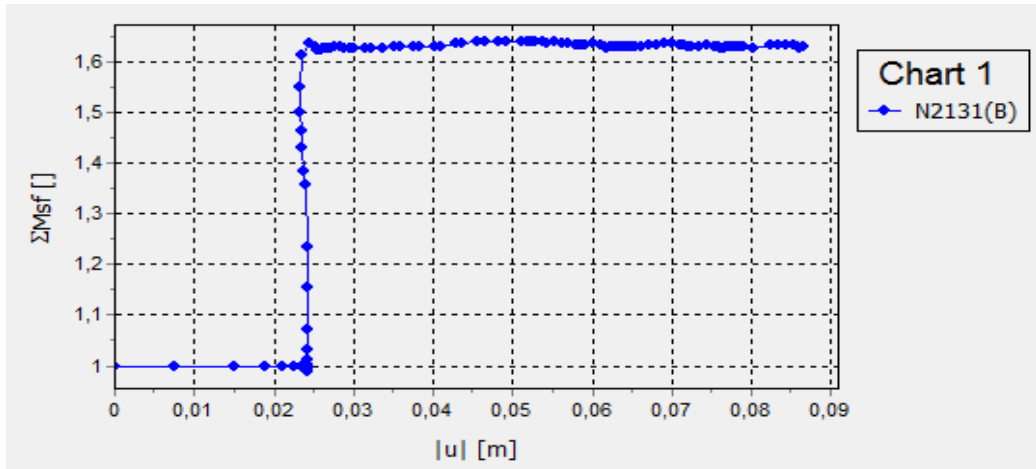
Teniendo cada Angulo de inclinación para cada una de las secciones se asigna gráficamente este Angulo al PLAXIS 2D.

Luego de haber modelado cada sección en el software PLAXIS 2D se pudo conocer la deformación máxima que sufrirá la excavación, figura 9, así como el factor de seguridad que cada uno de ellos tendrá, figura 8.

**Figura 8.** Resultados de PLAXIS 2D deformación máxima para la excavación libre Sección 3.



**Figura 9.** Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3.



**Fuente.** Elaboración propia.

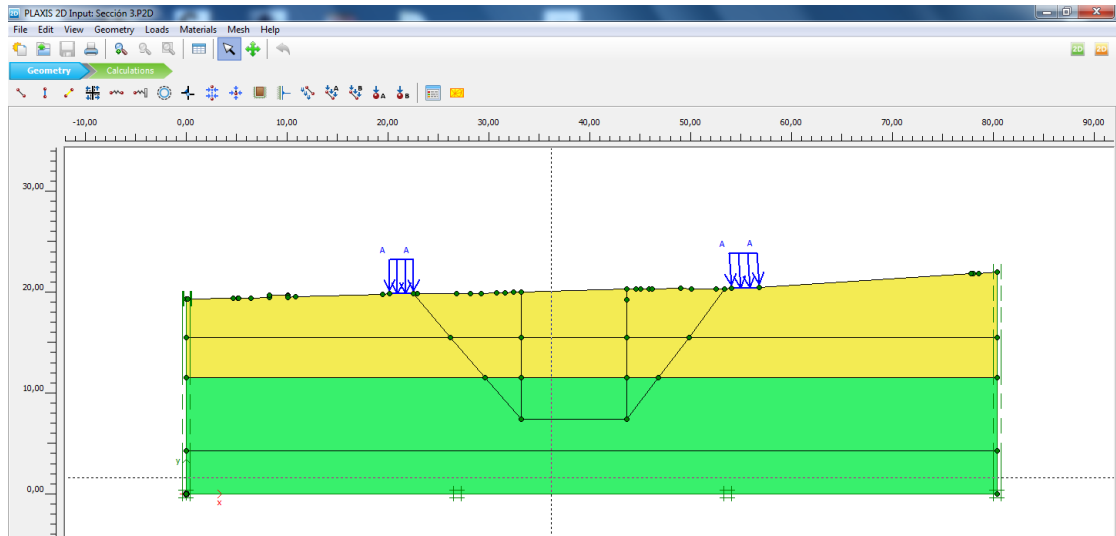
Los valores correspondientes a las deformaciones máximas y factores de seguridad para cada una de las secciones son mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección método abatimiento de la pendiente del talud

Sección	Deformación Max. [M]	F.S.
S. 1	0,069	3
S. 2	0,0252	1,62
S. 3	2,74E-02	1,62
S. 4	0,692	3
S. 5	3,27E-03	4,1

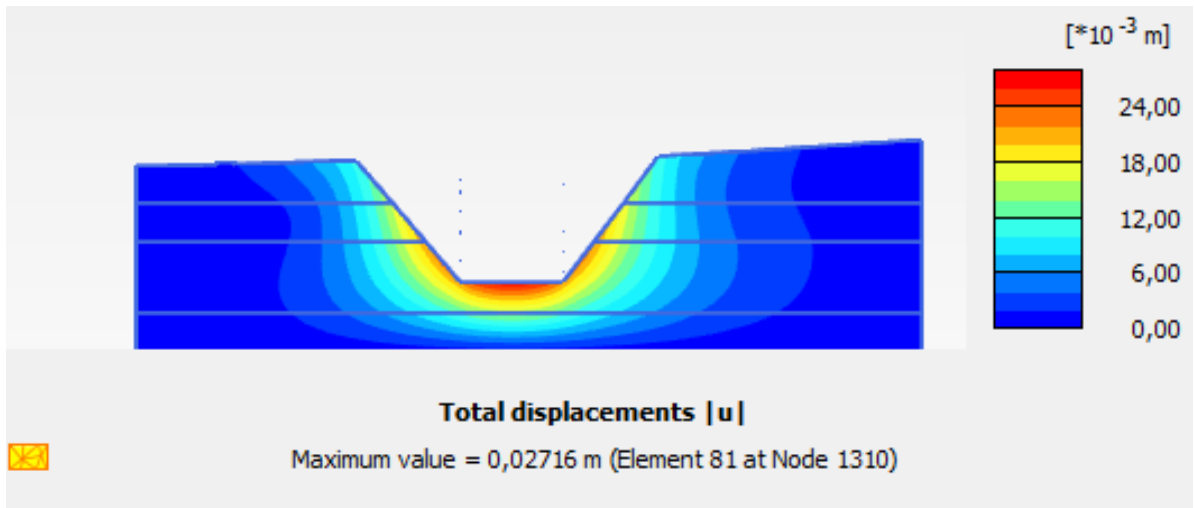
Debido a que PLAXIS arrojó un factor de seguridad muy elevado, se procedió a aumentar el ángulo de inclinación como se observa en la figura 10 de la pared del talud dejando un valor constante para cada una de las secciones de 60 grados y se modeló nuevamente.

**Figura 10.** Modelo abatimiento en PLAXIS 2D sección 3

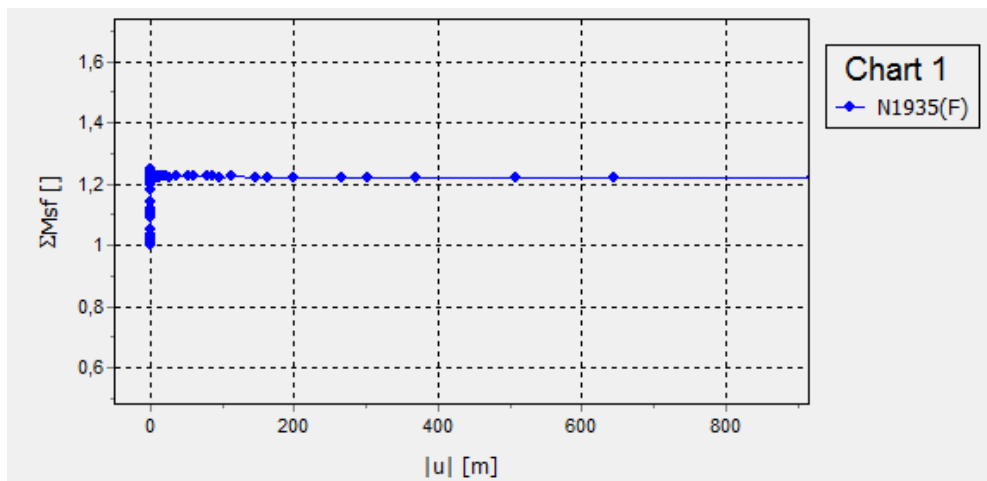


La figura 11 muestra el resultado de este nuevo modelamiento, y la gráfica de factor de seguridad figura 12.

**Figura 11.** Resultados de PLAXIS deformación máxima para la excavación libre Sección 3. para la inclinación modificada.



**Figura 12.** Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3. Para la inclinación modificada.



**Fuente.** Elaboración propia.

Los resultados del modelado se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6.** Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección método abatimiento de la pendiente del talud modificado.

Sección	Deformación Max. [M]	F.S.
S. 1	0,06614	1,82
S. 2	0,0252	1,066
S. 3	2,72E-02	1,23
S. 4	0,06614	1,88
S. 5	3,29E-02	1,05

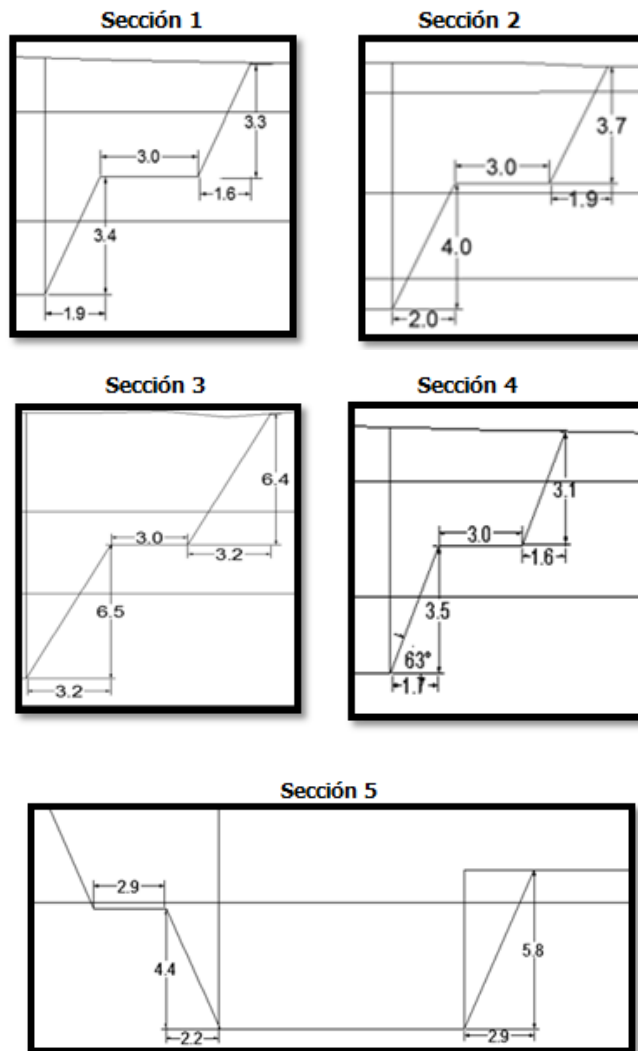
#### 4.3.2. Excavación por Medio de Bermas.

Se propuso realizar el dimensionamiento de las bermas con un proceso iterativo partiendo de los valores mínimos que se establecen en el informe del estudio geotécnico donde se recomiendan taludes mínimos 0.5H: 1.0V, con berma mínima de 3.0 metros y altura máxima de 7.0 metros.

Las medias de cada una de las Bermas de las diferentes secciones son estimadas de tal manera que se acomodan a la altura de la excavación, variando la altura entre bermas para cada sección.

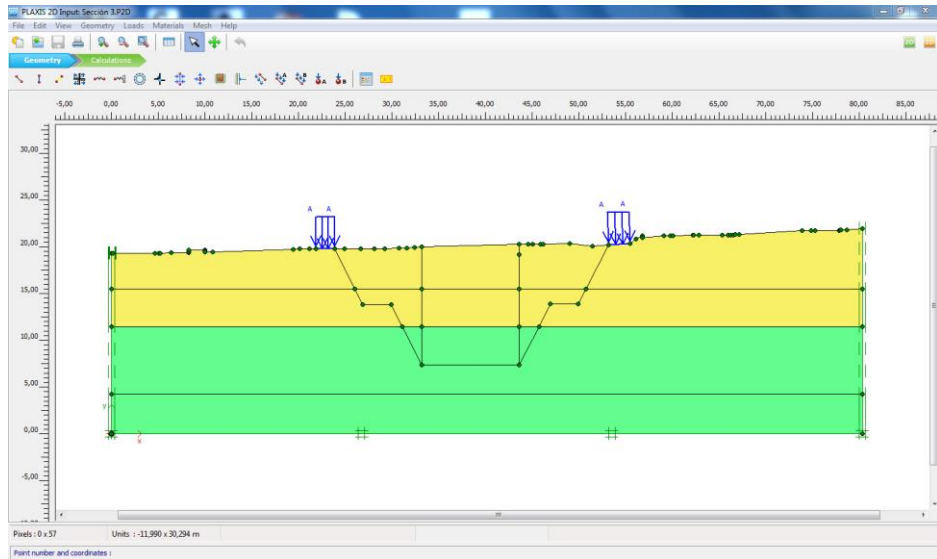
En la figura 13 se pueden ver las dimensiones de las bermas para cada sección.

**Figura 13.** Dimensiones de las bermas para cada sección.



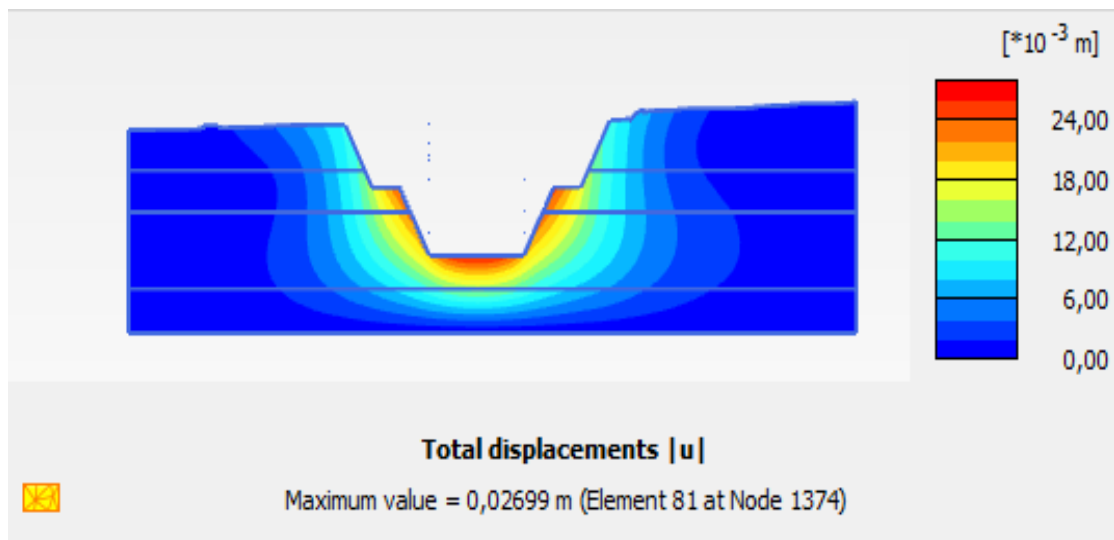
Posteriormente se modelan gráficamente como se ve en la figura 14, cada una de estas secciones en el software PLAXIS 2D

**Figura 14.** Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3.

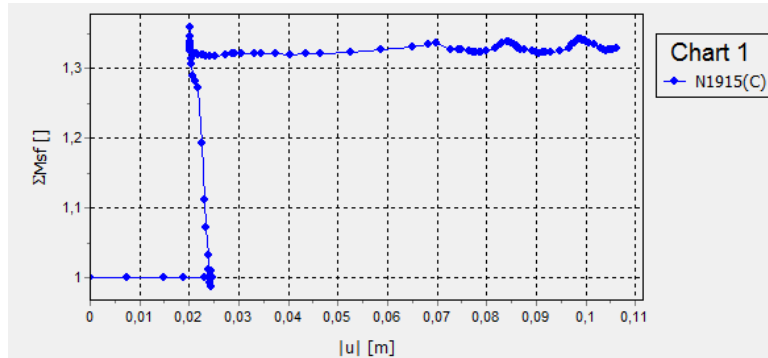


Luego del dimensionamiento se procede a modelar en PLAXIS arrojando los resultados de deformaciones máximas y factores de seguridad mostrados en la tabla 7, en las figuras 15 y 16 podemos ver los resultados arrojados por el software para la sección 3.

**Figura 15.** Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3. Deformación máxima.



**Figura 16.** Grafica de factor de seguridad para la sección 3.



**Fuente.** Elaboración propia.

**Tabla 7.** Deformación máxima y factor de seguridad dinámico para cada sección con el método de bermas.

Sección	Deformación Max. [M]	F.S.
S. 1	0,06635	2,4
S. 2	0,02519	1,4
S. 3	2,70E-02	1,33
S. 4	0,06606	2,65
S. 5	0,03275	1,46

#### 4.3.3. Paredes de Tablestacas Metálicas

El tipo de sección de tablestaca utilizado es el AZ-50 para el cual se extrajeron las respectivas propiedades mostradas en la tabla 6, que exige PLAXIS 2D.

**Tabla 6.** Propiedades de tablestaca para la sección AZ.

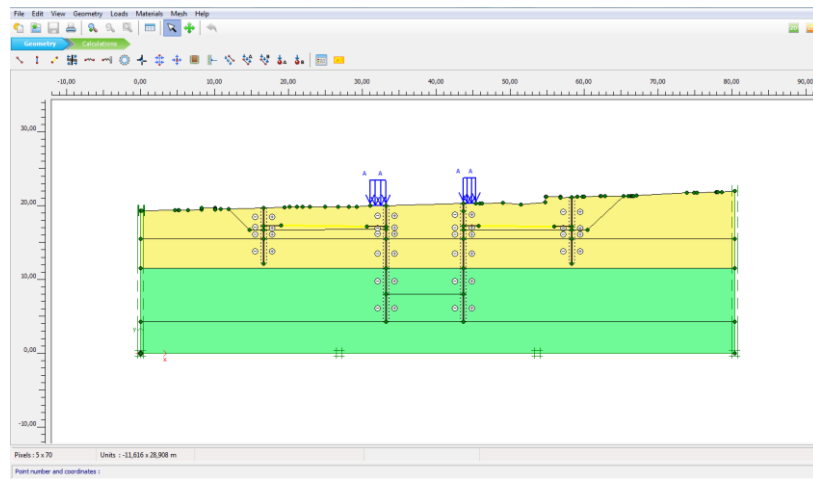
Área:	322	cm <sup>2</sup> /m
Masa:	253	Kg/m <sup>2</sup> de pantalla
Momento de inercia:	121060	cm <sup>4</sup> /m
Modulo resistente elástico:	5015	cm <sup>3</sup> /m

Halladas ya las dimensiones de las tablestacas se precede a modelarlas en PLAXIS, estas se modelan como muros de contención, pero asignándoles las

propiedades físicas de la tablestaca tales como: momentos de inercia y módulo de elasticidad.

Para las atirantadas se modela el tirante como un perno de una sola varilla de acero, la cual va desde la pantalla hasta la tablestaca incida a cierta longitud de la excavación como se muestra en la figura 17.

**Figura 17.** Modelo de tablestaca en PLAXIS 2D sección 3



La ubicación del tirante que sirve de riostra para las más profundas es de aproximadamente 2 metros por debajo de la superficie del terreno,

En la tabla 8 se puede observar la longitud de la tablestaca para cada una de las secciones:

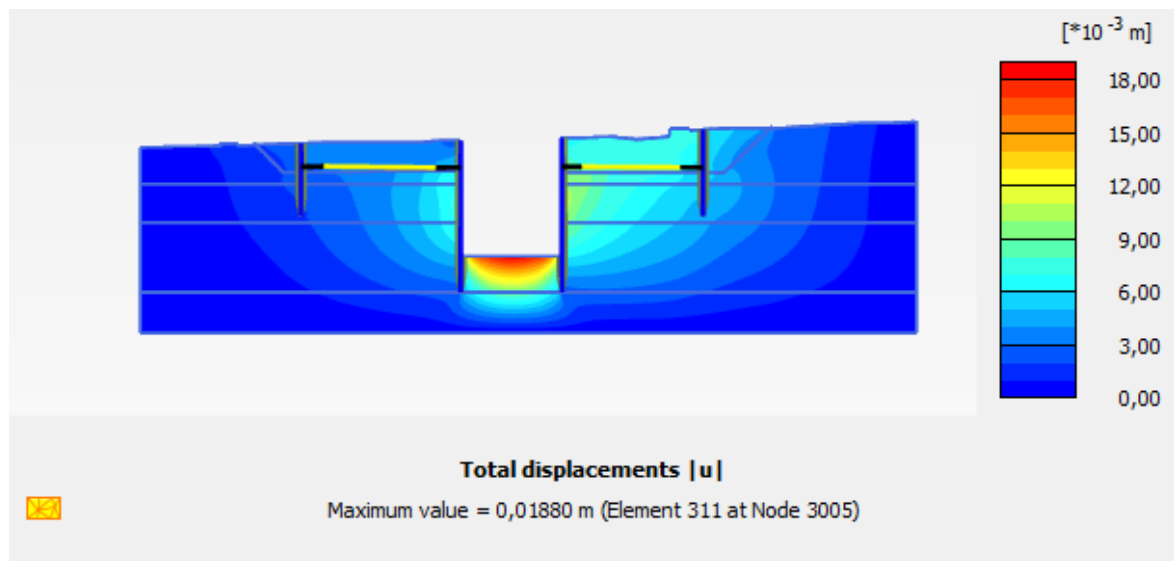
**Tabla 8.** Longitud de tablestaca en cada sección

Sección	Longitud de tablestaca [M]
S. 1	11.05
S. 2	13.67
S. 3	16.55
S. 4	9.59
S. 5	18.18
S. 6	13.57
S. 7	9.39
S. 8	10.25

El tirante de la arriostrada es básicamente un perno compuesto por una varilla de acero de diámetro 32 milímetros.

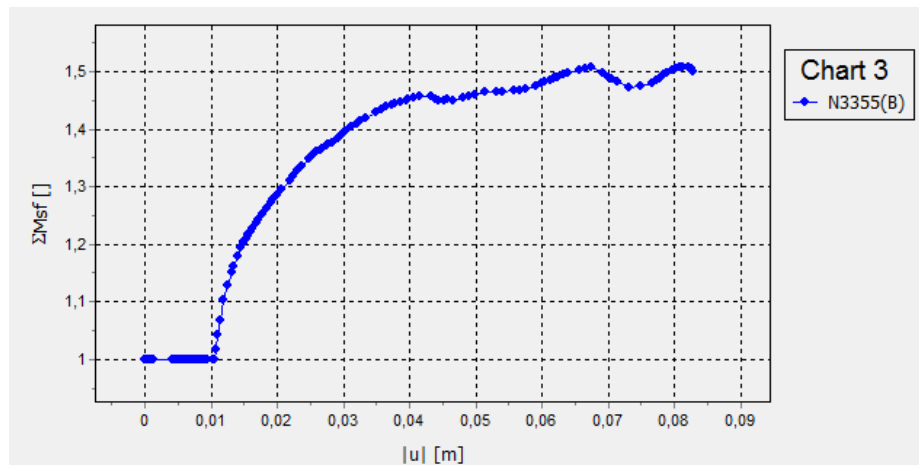
Los resultados del modelado de las tablestacas de cada sección en PLAXIS arrojó como resultado las deformaciones máximas como se observa en la figura 18, y los factores de seguridad que se muestran en la tabla 9 para cada sección:

**Figura 18.** Modelo de bermas en PLAXIS 2D. Sección 3. Deformación máxima.



La figura 19 muestra la gráfica de la cual se obtiene el factor de seguridad para la sección 3

**Figura 19.** Grafica de factor de seguridad dinámico para la sección 3.



**Tabla 9.** Deformaciones máximas y factores de seguridad dinámicos para las tablestacas.

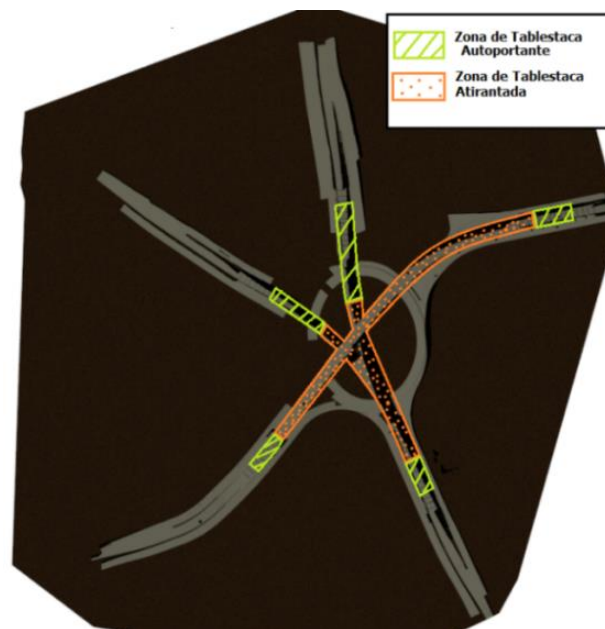
Sección	F. S.	Deformación Max. [M]
S. 1	2.10	0.006351
S. 2	3.50	0.011490
S. 3	1.45	0.018810
S. 4	1.4	0.066360
S. 5	1.55	0.031300
S. 6	1.25	0.012180
S. 7	1.24	0.005733
S. 8	1.80	0.001922

Los pernos que funcionan como tirantes fueron espaciados a una distancia de 1,5 m

El tipo de tablestacado que se utilizó varía dependiendo de la profundidad de la excavación, es decir para aquellas secciones donde la profundidad no supera los 8 m se empleó el tipo de tablestacado auto portante, y para las superiores a esta medida se empleó tablestacado arriostrado con tirantes.

La figura 20 muestra las zonas en donde se emplearon cada uno de estos tipos de tablestacado en el caso de estudio:

**Figura 20.** Zonas de tablestacas auto portantes y tablestacas arriostradas



Para corroborar cada uno de estos datos de factores de seguridad fueron modeladas las secciones más críticas en el software SLOPEW con el fin de obtener un punto de referencia, dichos modelamientos arrojaron resultados de factores de seguridad que se asemejan en gran medida con los resultados obtenidos por PLAXIS 2D.

#### **4.4. Calculo de los Costos de Ejecución**

Se inició con el cálculo de las cantidades de cada una de las actividades para cada método

El ítem más importante del caso de estudio intercambiador vial Mesón de los Búcaros fue el volumen de excavación, pues este es común en cada uno de los métodos e incluso es la única cantidad que se calculó para los métodos de: abatimiento de las pendientes del talud y método de Bermas. Esta cantidad fue hallada con las dimensiones de la geometría de cada uno de los deprimidos viales, teniendo en cuenta el ancho, el largo y principalmente la profundidad de cada uno de estos.

Para el método de tablestacas basto con calcular el volumen de excavación en forma vertical ya que este método garantiza que el avance va a ser de este modo.

En los dos métodos faltantes el volumen de excavación se calculó adicionando al volumen calculado para el tablestacado el volumen que se debe extraer en los laterales de la excavación, al igual que para este, el volumen fue hallado teniendo en cuenta las dimensiones de la geometría según el diseño para cada uno de los métodos.

Para las cantidades de tablestacas, se halló el área de las paredes que deben ser estabilizadas en la excavación y adicionalmente la profundidad a la que deben ser empotradas, con el fin de obtener el área total que debe llevar tablestacado, posteriormente se halla el número de pernos que componen el atirantado para las excavaciones más profundas, teniendo en cuenta el espaciamiento entre estos, y finalmente el área de tablestaca que componen el soporte de los pernos en el extremo contrario de la excavación, al igual que para el tablestacado en las paredes de la excavación, para estas se tiene en cuenta la profundidad a la cual son llevadas, dicha profundidad, colocadas en PLAXIS fueron interpoladas con el fin de obtener una cantidad que se aproxime a la real.

Inicialmente se estableció el presupuesto para excavación ideal, es decir aquella en donde el proceso se realiza de forma vertical sin ningún tratamiento en las paredes, esto con el fin de tener una estimación de cuanto aumenta el costo al utilizar un método de excavación.

Las tablas 10, 11,12 y 13 muestran el presupuesto para cada uno de los métodos.

**Tabla 10.** Presupuesto de excavación ideal

<b>Excavación con taludes verticales</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Un</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario en pesos</b>	<b>Total en pesos</b>
Excavación en material común	m <sup>3</sup>	60974,4	6.870	<b>418.894.128</b>

**Tabla 11.** Presupuesto para método por abatimiento en la pendiente del talud.

<b>Excavación con abatimiento de la pendiente del talud</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Un</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario en pesos</b>	<b>Total en pesos</b>
Excavación en material común	m <sup>3</sup>	90309	6.870,00	<b>620.422.830,00</b>

**Tabla 12.** Presupuesto por método de Bermas.

<b>Excavación con bermas</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Un</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario en pesos</b>	<b>Total en pesos</b>
Excavación en material común	m <sup>3</sup>	90569,13	6.870,00	<b>622.209.957,4</b>

**Tabla 13.** Presupuesto para método por Tablestacas

<b>Excavación con Tablestacas.</b>				
<b>Ítem</b>	<b>Un</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario en pesos</b>	<b>Sub total en pesos</b>
Excavación en material común	m3	60935	6.870	418.623.450
Tablestaca	m2	19259.6	161.456	3.109.577.043
Pernos	Un	375	145.000	54.375.000
<b>Costo Total</b>			<b>3,582,575,493.20</b>	

#### 4.5. Análisis de Ventajas y Desventajas de Cada Método

En la tabla 14 se observa un análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de excavación. Tabla 14. Tabla de ventajas y desventajas para cada método.

**Tabla 14.** Tabla de ventajas y desventajas para cada método.

<b>MÉTODO DE EXCAVACIÓN</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Abatimiento de la pendiente del talud</b>	El costo de la implementación es relativamente bajo.	Mayor tiempo de ejecución
	requerimientos bajos en tipo de maquinaria, solo se requiere retroexcavadora	Necesidad de espacio en los linderos de la excavación.
	Proceso de excavación en una sola etapa	Mayor volumen de relleno en comparación con tablestacas.
	Es un método fácil de implementar	Brinda menor seguridad, debido a que los factores de seguridad son los más bajos.
<b>Bermas</b>	El costo de la implementación es relativamente bajo.	Mayor tiempo de ejecución.
	Requerimientos bajos en tipo de maquinaria, solo se requiere retroexcavadora.	Requiere sistema de drenaje para el manejo de aguas superficiales en cada berma.
	Debido a que el método divide la altura del talud en taludes más pequeños brinda mayor estabilidad y por lo tanto seguridad.	Necesidad de espacio en los linderos de la excavación.
	Bajo tiempo de	Costo elevado de los

<b>Paredes de tablestacas metálicas</b>	ejecución.	perfiles metálicos.
	Mayor seguridad.	Dificultad para la obtención de los materiales.
	Menor volumen de relleno.	Necesidad de implementar varias etapas para la instalación de los tirantes.
	Necesidad baja de espacio en los linderos de la excavación.	Se necesita variado tipo de maquinaria especializada.
	Materiales totalmente recuperables.	Necesidad de mano de obra especializada.

## 5. CONCLUSIONES

Para la selección del método de excavación se deben tener en cuenta factores de la resistencia del suelo entre los cuales se encuentran: el ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso específico, los cuales pueden ser obtenidos de las muestras recuperadas de los ensayos de penetración estándar (SPT), y el factor más importante que define la selección del método para el intercambiador vial mesón de los búcaros es la profundidad a la cual se debe excavar.

El software PLAXIS 2D permite realizar cálculos de estabilidad en procesos de excavación por fases, obteniéndose factores de seguridad y deformaciones máximas.

La veracidad de los resultados obtenidos por el software PLAXIS 2D dependen en gran medida de los datos de entrada y estos de la exactitud con la que son determinados en los estudios de suelos. Se considera conveniente contar con una referencia, para la comprobación de los resultados, que para el caso se obtuvo con el software Slope/W, con el cual se obtuvieron resultados similares.

La selección del ángulo de inclinación para las paredes de la excavación es un proceso iterativo que permite obtener un valor apropiado, el cual dé como resultado el menor volumen de excavación posible, un factor de seguridad adecuado y a su vez menor costo.

La implementación de métodos de excavación de taludes inclinados y bermas requieren que los espacios vecinos a la excavación sean amplios, en contraste con el método de tablestaca metálica, el cual es más adecuado cuando no se cuenta con espacio disponible.

## **6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda, para las excavaciones de profundidad entre 0.0 y 4.0 m la implementación de excavación libre, para las excavaciones entre 4.0 y 9.0 m la utilización de abatimiento de las paredes del talud o bermas, y para las excavaciones superiores a 9 m excavar con tablestacas metálicas, siempre teniendo en cuenta que hay que verificar durante el proceso constructivo las propiedades de resistencia del suelo y así garantizar la estabilidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORJA Ronaldo I. (1990). "Analysis of Incremental Excavation Based on Critical State Theory." J. Geotech. Engrg., 116(6), 964–985.

Bucaramanga Crece hacia Arriba <http://unab.edu.co/portal/page/portal/UNAB/Actualidad-UNAB/Desarrollo?codigonoticia=1164&envia=PCOM> [citado 3 de Junio de 2014].

El análisis por elementos Finitos. <http://www.uv.es/asepuma/XIV/comunica/117.pdf>. [citado 4 de mayo de 2014].

Estabilidad de Taludes. <http://www.slideee.com/slide/practica-calificada-de-estabilidad-de-taludes>. [citado 10 de Julio de 2014].

FINNO RJ, Harahap IS. Finite element analysis of HDR-4 excavation. J Geotech Eng 1991;117(10):1590–609.

GONZALES G. Alvaro J. Comportamiento de Excavaciones y Métodos de Análisis. En: PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS (1: 4-6, septiembre, 1991: Bogotá, Colombia), Escuela Colombiana de ingeniería, 1991, 9 p.

GORDON T.C. Kung, Evan C.L. Hsiao, Matt Schuster, C. Hsein Juang. A neural network approach to estimating deflection of diaphragm walls caused by excavation in clays. Elsevier Computers and Geotechnics. 2009 pp. 385-396.

Herramientas Computacionales para Ingenieros. <http://www.unitecnologica.edu.co/> - [citado 8 de Junio de 2014].

Ing. Jaime Suárez Díaz. Seguridad de excavaciones. <http://www.erosion.com.co/excavaciones.html>. - [citado 10 de Julio de 2014].

MEMBREÑO A. Donald F. Análisis de estabilidad de taludes por el método de elementos finitos: aplicación al terraplén de entrada viaducto de más Rubio. [Especialidad ingeniería geotécnica]. 03 de octubre de 2012

Modelo de la Berma de Cortante para Análisis de Estabilidad a Corto plazo en Condiciones no Drenadas de Taludes Homogéneos y Verticales. <http://academic.uprm.edu/laccei/index.php/RIDNAIC/article/viewFile/128/127>. [citado 8 de mayo de 2014].

NSR\_10 Titulo H estudios Geotécnicos H.2.4 Factores de seguridad. P.7 [9]

Pantalla de Tablestacas. <http://victoryepes.blogs.upv.es/2013/05/12/pantallas-de-tablestacas-arriostradas-con-tirantes/>. [citado 24 de Junio de 2014].

RALPH B. PECK, WALTER E. HANSON, THOMAS H. THORNBURN. Ingeniería de Cimentaciones, primera edición. Limusa. Mexico 2009. Capítulo 8. Excavaciones y Ademes p.43

RODRIGUEZ G. Eduardo, SANCHEZ S. Miguel A. Análisis de respuesta dinámica tridimensional para excavaciones profundas. En: seminario internacional de ingeniería sísmica y geotecnia. (3: 31 Octubre, 1-2 Noviembre, 2013: Paipa, Boyacá- Colombia.) Curso en ingeniería sísmica y dinámica de suelos, 2013.

ROSALES G. Sergio e. Desarrollo de una Herramienta Para Diseño de Falsos Túneles como Protección Contra Impacto de Caída de Rocas Usando Redes Neuronales Artificiales. Trabajo de Grado Magister en Ingeniería Geotécnica, Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil, 2012. 28 p.

SANTOS Tatiana. Estudio de Factibilidad de un Proyecto de Inversión: Etapas en su Estudio. Contribuciones a la Economía. <http://www.eumed.net/ce/>. [citado 10 de Julio de 2014].

TAMEZ G. E. "Ingeniería de Cimentaciones". 1 ed. Mexico.: T.G.C. 2001. P.71

**ANEXO A: (modelos en el *software*  
PLAXIS 2D de cada uno de los  
métodos de excavación para cada  
sección).**

(Ver archivo anexo en CD solicitar en Biblioteca UIS.)

## **ANEXO B: (VIDEO TUTORIALES de cada uno de los Métodos)**

(Ver archivo anexo solicitar en Biblioteca UIS)