

**CONTROL DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DESPLAZAMIENTO DE  
LAS ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE LOS TALUDES DE EXCAVACIÓN  
MEDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS Y TEORIA DEL  
EQUILIBRIO LÍMITE**

**ANYI CATHERINE GUTIERREZ TOVAR**

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

**2016**

**CONTROL DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DESPLAZAMIENTO DE  
LAS ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE LOS TALUDES DE EXCAVACIÓN  
MEDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS Y TEORIA DEL  
EQUILIBRIO LÍMITE**

**ANYI CATHERINE GUTIERREZ TOVAR**

**Trabajo de Grado para optar al Título de  
Magíster en Geotecnia**

**DIRECTOR**

**WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ**

**MSc. En Geotecnia**

**CODIRECTOR**

**CARLOS ANDRES BUENAHORA BALLESTEROS**

**MSc. Ingeniería Civil**

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

**2016**

A Dios ser maravilloso que guía mi camino, A mi madre, por su inagotable amor y apoyo incondicional, por enseñarme que aunque el viaje parezca largo, siempre se debe hacer lo posible por llegar y a mi hermano Sebastián, pues él fue mi mayor motivación para la construcción de mi vida profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por sus bendiciones que hacen posible cada meta propuesta y proyecto emprendido.

A mi mamá y a mi hermano, ustedes son artífices de cada uno de mis logros.

Al Director del Proyecto MSc. Wilfredo Del Toro Rodríguez, encargado de brindarme su colaboración a través de sus amplios conocimientos.

Al Codirector del proyecto MSc. Carlos Andrés Buenahora Ballesteros por la oportunidad brindada, tiempo de enseñanza y formación, para el desarrollo de esta investigación y para mi futuro como MSc. en Geotecnia.

A el equipo de ingenieros de E.D. INGEOTECNIA S.A.S a Julián Fonseca por su colaboración y paciencia en este proceso

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	15
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....	16
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO .....	16
1.3. METODOLOGIA .....	17
1.4. ORGANIZACION DEL DOCUMENTO .....	19
1.5 GENERALIDADES .....	20
2 MARCO DE REFERENCIA.....	21
2.1 MARCO CONCEPTUAL .....	21
2.2. MARCO TEÓRICO .....	24
2.2.1 Método de equilibrio límite (MEL). .....	24
2.2.2 Comparación de los diversos métodos de Equilibrio Limite .....	31
2.2.3 Criterios de falla de Mohr-Coulomb .....	33
2.2.4. Método de Elementos Finitos.....	35
2.3 MARCO DE ANTECEDENTES.....	38
3. FORMULACION DE LA SIMULACION .....	46
3.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS .....	47
3.2 LOS VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD GEOTÉCNICO BÁSICO FSB.....	49
4. RESULTADOS Y ANALISIS .....	54
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN DE LOS TALUDES: .....	54
4.1.1. Propiedades de los materiales utilizados son: .....	55
4.1.2. Características de la Pantalla. ....	55

4.1.3. Propiedades de los anclajes. ....	56
4.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA PANTALLA .....	57
4.3. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.....	62
4.3.1. Análisis de los desplazamientos de la estructura.....	63
4.4. CONTROL PROPUESTO DE ESTABILIDAD .....	65
4.4.1. Control De Factore De Seguridad.....	65
4.4.2. Control Directo de desplazamientos .....	66
4.4.3 Procedimiento Propuesto para el Control de la Estabilidad .....	67
4.4.4. Posibles Soluciones para los Excesos de Deformación. ....	67
4.5. ANALISIS DE ESTABILIDAD.....	68
4.5 ANALISIS DE DEFORMACIONES .....	78
4.6. PROCESO CONSTRUCTIVO .....	92
4.7 ANALISIS DE LOS RESULTADOS .....	93
5. CONCLUSIONES .....	96
6. RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS .....	98
ANEXOS.....	101

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Influencia de sismos en el factor de seguridad, analizado Con el programa de cómputo “SLOPE/W” .....	39
Tabla 2. Influencia de sismos en el factor de seguridad, analizado Utilizando el Hardware PLAXIS 2D .....	40
Tabla 3. Propiedades de los estratos de suelo .....	47
Tabla 4. Propiedades de los suelos .....	48
Tabla 5. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos.....	49
Tabla 6. Valores de KST/amax Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes .....	50
Tabla 7. Propiedades de los Anclajes.....	56
Tabla 8. Dimensionamiento de los Torones.....	57
Tabla 9. Coeficientes de Presión .....	58
Tabla 10. Calculo de Presiones Efectivas.....	59
Tabla 11. Capacidad ultima del bulbo en suelos y rocas .....	60
Tabla 12. Características de los anclajes .....	61
Tabla 13. Dimensionamiento y distribución de los anclajes.....	61
Tabla 14. Parámetros y Características .....	63
Tabla 15. Parámetros y Características del suelo Aluvial .....	64
Tabla 16. Parámetros y Características del suelo Suelto .....	64
Tabla 17. Propiedades de la Pantalla .....	65
Tabla 18. Propiedades del Bulbo .....	65
Tabla 19. Propiedades del Anclaje .....	65
Tabla 20. Procedimiento para el control de estabilidad. ....	67
Tabla 21. Factores de Seguridad.....	69

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Figura 1. Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas...	25
Figura 2. Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius .....	26
Figura 3. Esquemas de las fuerzas que actúan en la $\psi$ dovela, de acuerdo al método de Fellenius.....	27
Figura 4. Diagrama del factor $f_0$ utilizado en el método de Janbú .....	29
Figura 5. Esquema estático del Método de Spencer .....	30
Figura 6. Esquema estático del Método Morgenstern Price .....	31
Figura 7. Falla del talud .....	33
Figura 8. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb. ..	34
Figura 9. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb . .	35
Figura 10. Comparación de resultados de la influencia de sismos en el factor de seguridad para los programas de cómputo SLOPE/W y PLAXIS .....	41
Figura 11. Comparación de factores de seguridad entre el método de elementos finitos y el método de equilibrio limite usando los parámetros de resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo triaxial.....	43
Figura 12. Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud (Sección a).....	45
Figura 13. Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de la Sección A, bajo el efecto del sismo.....	45
Figura 14. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático.....	51
Figura 15. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámica .....	52
Figura 16. Localización de las Pantallas.....	54
Figura 17. Pantalla Norte propuesta en concreto con anclajes pre-tensionados ..	55
Figura 18. Alzada de la Pantalla .....	56
Figura 19. Diagrama de Presiones .....	58

Figura 20. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 1) .....	70
Figura 21. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 1) .....	70
Figura 22. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 2) .....	71
Figura 23. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 2) .....	71
Figura 24. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 3) .....	72
Figura 25. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 3) .....	72
Figura 26. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 4) .....	73
Figura 27. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 4) .....	73
Figura 28. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 1) .....	74
Figura 29. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 1) .....	74
Figura 30. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 2) .....	75
Figura 31. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 2) .....	75
Figura 32. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 3) .....	76
Figura 33. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 3) .....	76
Figura 34. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 4) .....	77

Figura 35. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 4) .....	77
Figura 36. Desplazamiento Excavación Etapa 1.....	78
Figura 37. Excavación 1 con Anclaje .....	79
Figura 38. Desplazamiento Excavación Etapa 2.....	79
Figura 39. Excavación 2 con Anclaje .....	80
Figura 40. Desplazamiento Excavación Etapa 3.....	80
Figura 41. Excavación 3 con Anclaje .....	81
Figura 42. Desplazamiento Excavación Etapa 4.....	81
Figura 43. Excavación 4 con Anclaje .....	82
Figura 44. Desplazamiento Excavación Etapa 4.....	82
Figura 45. Excavación 4 con Anclaje .....	83
Figura 46. Modelo Geométrico.....	83
Figura 47. Factor de seguridad excavación Etapa 1 .....	84
Figura 48. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 2 .....	84
Figura 49. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 3 .....	85
Figura 50. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 4 .....	85
Figura 51. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 5 .....	86
Figura 52. Diagrama de Cortante.....	87
Figura 53. Diagrama de Momento .....	87
Figura 54. Diagrama de Fuerza Axial .....	88
Figura 55. Puntos de control de desplazamiento de la estructura .....	89
Figura 56. Punto de control lde desplaamiento de la estructura “A.....	90
Figura 57. Punto de control de desplazamiento de la estructura “D” .....	90
Figura 58. Punto de control lde desplaamiento de la estructura “F” .....	91
Figura 59. Punto de control lde desplaamiento de la estructura “G” .....	91
Figura 60. Punto de control lde desplaamiento de la estructura “i” .....	92
Figura 61. Esquema de procedimiento de excavación utilizando la metodología “uno si, uno no” .....	93

## RESUMEN

**TÍTULO:** Control de los factores de seguridad y desplazamiento de las estructuras de cimentación de los taludes de excavación mediante el método de elementos finitos y teoría del equilibrio límite.

**AUTOR:** Anyi Catherine Gutiérrez Tovar \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Talud, Excavación, Elementos Finitos, Equilibrio limite, Mohr Coulomb.

### DESCRIPCIÓN

El Concepto de estabilidad es indeterminado, ya que ningún talud de roca o suelo se puede garantizar como estable durante su vida útil en un periodo de muchos años. En el presente trabajo se realiza la verificación de los diseños elaborados por E.D. INGEOTECNIA SAS, realizando un control de los factores de seguridad y desplazamientos de la estructura de cimentación de un talud de excavación mediante el método de elementos finitos y teoría del equilibrio límite; en una construcción de la ciudad de Bucaramanga de un proyecto de edificación de 31 niveles y 3 sótanos, con una máxima profundidad de excavación aproximada de 9 metros más la altura de cimentación.

El análisis de estabilidad se realizó en 4 etapas utilizando el sistema de parámetros totales de resistencia, de acuerdo a la teoría del Sistema de Mohr-Coulomb y en el análisis del modelo de desplazamientos se utilizó el método de los Elementos Finitos para calcular los esfuerzos y deformaciones.

Se obtuvo que la totalidad de los desplazamientos calculados en las diferentes etapas cumplen con el criterio de máximo desplazamiento de dos centímetros, además se puede concluir que es muy importante realizar controles y mayores cuidados en las primeras etapas de excavación la cual determinara el buen funcionamiento de la estructura. Cuando los desplazamientos reales de la estructura son inferiores a los desplazamientos teóricos de los modelos se pueden realizar ajustes que permitan la optimización de los recursos.

---

\* Proyecto de grado para optar al título de Magíster en Geotecnia

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez

## ABSTRACT

**TÍTULO:** Control of safety factors and displacement of foundation structures of slope excavation by finite element method and limit equilibrium theory.\*

**AUTHOR:** Anyi Catherine Gutierrez Tovar\*\*

**KEYWORDS:** Slope , excavation, finite element , Balance limits , Mohr Coulomb.

### DESCRIPTION

The concept of stability is unknown, as no soil or rock slope can be guaranteed to be stable over its lifetime in a period of many years. In this paper verification elaborate designs it is by ED INGEOTECNIA SAS, performing a control safety factors and displacement of the foundation structure of a slope excavation by finite element method and limit equilibrium theory; in a building in the city of Bucaramanga in a building project of 31 levels and 3 basements, with a maximum depth of excavation of approximately 9 meters height over foundation.

The stability analysis was performed in 4 stages using the system total resistance parameters, according to the theory of Mohr-Coulomb system and analysis of model shifts the finite element method was used to calculate the efforts and deformations. It was found that all the displacements calculated at different stages meet the criteria of maximum displacement of two centimeters, and it can be concluded that it is very important to perform controls and more care in the early stages of excavation which determines the proper functioning of the structure. When the actual displacement of the structure are lower than the theoretical movement models you can make adjustments to optimize resources.

---

\* Graduation project to qualify the title of Master of geotechnics

\*\* Faculty of Physical Mechanical. School of Civil Engineering: Director: Wilfredo del Toro Rodriguez

## INTRODUCCIÓN

El análisis de estabilidad de taludes debe considerar los numerosos factores de afectación en los cuales incluyen: la geometría de la superficie de falla, la no homogeneidad de las capas de suelo, las grietas de tensión, las cargas dinámicas o terremotos y flujo de agua subterránea. Por lo tanto se deben combinar todos estos factores para obtener el factor de seguridad.

Para determinar el factor de seguridad se dispone de numerosos métodos; la mayoría de estos están categorizados como métodos de equilibrio límite. El fundamento más claro del método de equilibrio límite es satisfacer el criterio de falla de Coulomb a lo largo de la superficie de falla impuesta la cual puede ser una línea recta, un arco circular, una espiral logarítmica, o cualquier otra superficie irregular; Un diagrama de cuerpo libre es tomado del talud y comenzando de los valores conocidos o valores asumidos de las fuerzas actuantes sobre el cuerpo libre, la resistencia al corte del suelo necesario para el equilibrio es calculado. Esta resistencia al corte es comparada con la resistencia al corte estimada o disponible del suelo que da una indicación del factor de seguridad.

En el presente trabajo se establece un procedimiento que permite garantizar el cumplimiento de los factores de seguridad y el control de los desplazamientos del terreno y la estructura en cada una de las etapas de construcción de un proyecto, presentando metodologías actuales para el análisis de taludes. El objetivo general de este trabajo es realizar el análisis de estabilidad del talud de una cimentación profunda mediante el uso de elementos finitos y teoría del equilibrio límite para el control de las deformaciones y del factor de seguridad

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1. JUSTIFICACIÓN**

En los diseños de las estructuras para el manejo de las excavaciones generalmente se realizan verificaciones del cumplimiento de los factores de seguridad, sin embargo, ante un valor admisible se pueden presentar desplazamientos que afecten la integridad de la obra; debido a esto en el presente trabajo se realiza el control de los factores de seguridad y del desplazamiento de las estructuras de contención de los taludes de excavación mediante el método de elementos finitos y teoría del equilibrio límite en el proyecto de vivienda en estudio

### **1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO**

Realizar el control de los factores de seguridad y desplazamiento de las estructuras de contención de los taludes de excavación mediante el método de elementos finitos y teoría del equilibrio límite.

Para lograr este objetivo se formularon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el análisis de la estabilidad del talud mediante la teoría del equilibrio límite.
- Realizar un modelo del comportamiento de los desplazamientos del terreno y la estructura proyectada mediante el método de elementos finitos.

- Establecer un procedimiento que garantice el cumplimiento de los factores de seguridad y el control de los desplazamientos del terreno y estructura en cada una de las etapas de construcción.

### **1.3. METODOLOGIA**

La metodología propuesta para desarrollar el presente trabajo permite entender la manera como se desarrolla el trabajo y como se obtienen los resultados.

- Recopilación de información

La recopilación de información está relacionada con la obtención de los estudios de suelos, de tal forma que sea posible conocer las propiedades físicas y de resistencia del subsuelo, niveles y geometría de la excavación, dimensiones de los elementos estructurales.

- Análisis de información existente

Una vez recopilada la información, los estudios de suelos fueron analizadas las propiedades físicas y de resistencia del subsuelo. Verificando el perfil estratigráfico y definición de las propiedades geomecánicas para cada uno de los estratos; este perfil se utilizó en los análisis de esfuerzos y deformaciones usando el programa PLAXIS 2D.

- Variables estudiadas

Las variables utilizadas en el análisis de las excavaciones son datos de entrada en los programas PLAXIS 2D y SLOPE/W y los parámetros de suelo se definieron teniendo en cuenta que el modelo constitutivo a utilizar corresponde a un modelo "Circular Elástico". Las propiedades de las pantallas y puntales se calcularon tomando como referencia que el material del cual están constituidas corresponde

a concreto reforzado. La geometría de las excavaciones se adoptó según la información recopilada con los diferentes directores de los proyectos y planos existentes.

- Modelación Numérica

Para obtener los desplazamientos en las pantallas y los esfuerzos en el suelo en cada una de las etapas de excavación, se realizó la modelación numérica usando los programas de elementos finitos llamado PLAXIS 2D y Teoría del equilibrio limite SLOPE/W. Primero, se realizó el análisis de estabilidad del talud mediante la teoría del equilibrio limite y luego obtuvieron los desplazamientos horizontales en la pantalla para cada una de las etapas de excavación utilizando los parámetros del suelo determinados a partir de los estudios de suelos.

- Análisis de Resultados

Los esfuerzos obtenidos, por medio del programa PLAXIS 2D, y los factores de seguridad obtenidos mediante el Programa SLOPE/W cumplieron los factores mínimos de seguridad de la NSR-10. Sin embargo se plantea realizar un control de factores de seguridad del terreno y en la estructura en cada una de las etapas de construcción con un inclinómetro y extensómetro con una periodicidad semanal para luego ser comparada con los resultados teóricos de los modelos realizados en los Softwares; para garantizar la seguridad, reducir al mínimo los costos de construcción, control en los procedimientos constructivos, protección legal, mejorar las relaciones públicas, y avanzar en la técnica de la instrumentación. De manera que los resultados de los desplazamientos reales de la estructura sean menores a los desplazamientos teóricos de los modelos se pueden realizar ajustes que permitan la optimización de los recursos.

## **1.4. ORGANIZACION DEL DOCUMENTO**

Este documento está dividido en 7 capítulos así:

En el Capítulo 1, Introducción, Objetivos, Metodología, Justificación y Generalidades, se define el ámbito del estudio, se presenta el objetivo principal y los objetivos específicos, y se presenta la forma en que se ha estructurado el documento.

En el Capítulo 2, se realiza la descripción del marco de referencia del trabajo, el cual contiene la descripción de la terminología y la teoría, así como los antecedentes sobre los cuales se basó el contenido del trabajo.

En el Capítulo 3, Formulación de la Simulación, se presenta la metodología que se siguió para la concepción de la rutina de análisis en los programas GEO-SLOPE Y PLAXIS 2D.

En el Capítulo 4, Resultados y Análisis, en este capítulo se analizan los resultados de las simulaciones realizadas.

En el Capítulo 5, Conclusiones, se presentan las conclusiones de los análisis y resultados obtenidos.

En el Capítulo 6, Recomendaciones, presentan algunas recomendaciones para futuros trabajos.

En el Capítulo 7, Bibliografía.

## 1.5 GENERALIDADES

El lote del estudio se encuentra localizado en la Comuna 12 Cabecera del Llano, al oriente del municipio de Bucaramanga, en el departamento de Santander, en el barrio Sotomayor, en la Calle 51 No. 23 – 37, 23 – 45, 23 – 57 y 23 – 59.

El lote está conformado actualmente por cuatro casas de un solo nivel.

En el proyecto se construirá una edificación de 31 niveles y 3 sótanos, con una máxima profundidad de excavación aproximada de 9 metros más la profundidad de cimentación.

En el área de estudio se presenta básicamente una intercalación de niveles limo arenosos y arenas limosas con gravas medias, angulares de areniscas y niveles limo arcillosos con abundantes bloques subangulares de areniscas cuarzosas duras, cremas a claras, de 5 a 30 centímetros de longitud y presencia de grandes bloques de areniscas de hasta 1 m de espesor.

Suprayace al segmento gravoso y su contacto con éste es gradacional. La parte más superficial de este Miembro se encuentra altamente meteorizada, formándose en algunos sectores niveles de oxidación que le ayudan a incrementar su compactación y resistencia a la erosión. El ambiente de depositación indica un dominio de flujo de lodos combinados con caídas de bloques de la pendiente del macizo.

En el lote aparecen aproximadamente 8.5 metros entre material suelto y aluviales de baja consistencia; el nivel freático no apareció en los sondeos realizados.

## 2 MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 MARCO CONCEPTUAL

Definiciones de los términos clave en el desarrollo de esta propuesta.

- Equilibrio Límite

Consiste en estudiar el equilibrio de un cuerpo rígido, constituido por el talud y por una superficie de deslizamiento de cualquier forma (línea recta, arco circular, espiral logarítmica). Con tal equilibrio se calculan las tensiones de corte ( $\tau$ ) y se comparan con la resistencia disponible ( $\tau_f$ ), valorada según el criterio de rotura de Mohr Coulomb; de tal comparación se deriva la primera indicación sobre la estabilidad con el coeficiente de seguridad  $F = \tau_f / \tau$ .<sup>1</sup>

- Elementos Finitos:

Proceso de modelización de un cuerpo para dividirlo en un sistema equivalente de pequeños cuerpos o unidades (elementos finitos), interconectados en los puntos comunes a dos o más elementos (puntos nodales o nodos). Se formulan las ecuaciones para cada elemento finito y combinarlos para obtener la solución del conjunto<sup>2</sup>.

- Factor de Seguridad:

Es la relación de la resistencia movilizada o resistencia actuante de una estructura para resistir cargas; “la resistencia real debe ser mayor”.

---

<sup>1</sup> LÓPEZ PINEDA Germán. Curso de métodos numéricos aplicados a la ingeniería del terreno, Departamento de Mecánica, Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Córdoba, 2007.

<sup>2</sup> CANDO Gabriela. Método de elementos finitos, Universidad técnica de Ambato, Facultad de ingeniería civil, Noviembre de 2012.

- **Modelo Constitutivo Mohr-Coulomb:**

El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo<sup>3</sup>.

- **Talud:**

Superficie inclinada en una excavación o en una explanación de roca o de suelo, de cualquier tamaño y forma (normalmente angulares y grueso granulares) derivados de y acumulados al pie de un escarpe o de una pendiente rocosa empinada sin intervención de agua en el proceso de transporte<sup>4</sup>.

- **Estabilidad:**

Es la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento<sup>5</sup>.

- **Cohesión:**

Es una característica propia de los materiales que presentan resistencia al corte bajo un esfuerzo normal nulo (un término equivalente en mecánica de rocas es resistencia al corte).

- **Fricción:**

Es la fuerza que actúa en el entrelazamiento de las partículas de suelo o de roca.

- **Excavación:**

La excavación es el movimiento de tierras realizado a cielo abierto y por medios manuales, utilizando pico y palas, o en forma mecánica con excavadoras, y cuyo

---

<sup>3</sup> MITCHELL, J. K., & SOGA, K. Fundamentals of Soil Behavior - Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2005

<sup>4</sup> HOYOS PATIÑO Fabián, Diccionario Básico geotecnia, Escuela de ingeniería Civil, universidad nacional de Colombia, Medellín, 2001.

<sup>5</sup> MATTEIS Alvaro, Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Cs, Exactas, ingeniería y agrimensura, Agosto de 2013.

objeto consiste en alcanzar el plano de arranque de la edificación, es decir las cimentaciones

- **Módulo de Elasticidad:**

Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria de un material en el rango de su comportamiento elástico. Numéricamente es igual a la pendiente de la tangente o de la secante de una curva esfuerzo/deformación.

- **Tensión:**

Fuerza por unidad de área sobre la que es aplicada dicha fuerza, las tensiones pueden ser normales, cortantes o torsionales. En algunos medios es preferido el uso de este término en lugar de esfuerzo.

- **Anclaje Pretensionado:**

Es una instalación capaz de transmitir una carga de tensión a un manto de soporte a profundidad, se coloca sobre la cara de un muro o sobre un elemento de concreto en el talud, una carga de tensión a través de un cable de acero anclado a un bulbo cementado a profundidad dentro del talud, tienen la ventaja de que no son pasivos como la estructura de gravedad sino que al pre-tensarse se les coloca una carga que se opone a la acción del deslizamiento. Las fuerzas de las anclas se oponen al movimiento de la superficie del talud ayudando a proveer estabilidad contra deslizamientos<sup>6</sup>.

- **Pantalla:**

Estructura de sección rectangular que sirve para recoger las cargas verticales que pueden transmitir otros elementos estructurales y constituyen una solución eficaz

---

<sup>6</sup> SABATINI, P. J., TANYU, B., ARMOUR, T., GRONECK, P., KEELEY J. "Micropile Design and Construction (Reference Manual for NHI Course 132078)". U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication. 2005

para limitar los movimientos del terreno, consecuentes a toda la excavación y reducir el riesgo de daños a construcciones próximas.

- brown skin friction:

Fricción entre un fluido y la superficie de un sólido en movimiento a través de él o entre un fluido en movimiento y su superficie envolvente.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

**2.2.1 Método de equilibrio límite (MEL).** Toda inestabilidad es consecuencia de la ruptura de las condiciones de equilibrio límite en un talud<sup>7</sup>.

Los métodos precursores del equilibrio límite consideran la masa potencial de falla como un cuerpo libre y aplican las ecuaciones de equilibrio global. Esta teoría de cuerpo libre ha sido implementada en el método del Talud Infinito (Taylor, 1948), Método de Cuña (Sherard y col., 1963) y Método Ordinario (Fellenius, 1922), entre otros. Actualmente, la mayoría de métodos de equilibrio límite dividen a la masa potencial de falla en un número finito de dovelas. Luego, las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o de momentos son aplicadas a cada dovela. Generalmente, dovelas verticales son empleadas para dividir la masa de suelo; sin embargo, dovelas horizontales o inclinadas han sido usadas en algunas aplicaciones (Shahgholi y col),

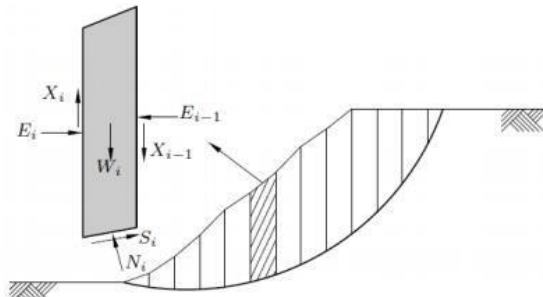
2001; Sarma y Tan, 2006). En la Figura 1, se presenta la manera tradicional de dividir la masa de falla en dovelas verticales; además, se incluyen las fuerzas actuantes en una dovela (fuerzas interdovelas)<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Manual de Ingeniería de Taludes, , Serie Guía y Manuales N° 3, 2006.

<sup>8</sup> BOJORQUE IÑEGUEZ Jaime, Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes, MASKANA, Vol 2, n° 2, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2011.

**Figura 1. Masa deslizante dividida en dovelas verticales y fuerzas interdovelas.**



Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes, Bohorquez, 2011

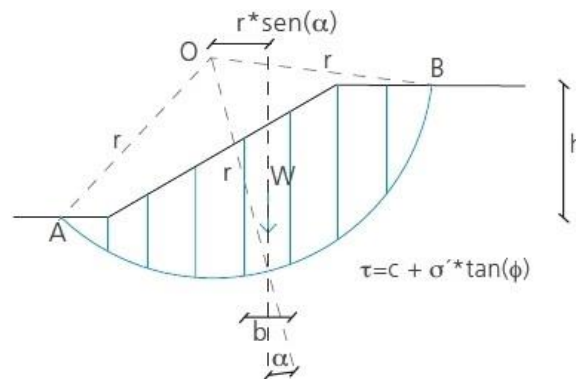
En esta metodología MEL, hay tres ecuaciones de equilibrio que pueden ser empleadas, estas son: equilibrio de fuerzas horizontales, equilibrio de fuerzas verticales y equilibrio de momentos. Algunas de las técnicas de dovelas usan una o dos ecuaciones de equilibrio haciendo la solución “no rigurosa”. Sin importar el procedimiento empleado para resolver el sistema de ecuaciones en los métodos de equilibrio límite, existirán más incógnitas que número de ecuaciones de equilibrio, haciendo la resolución de la estabilidad un problema estáticamente indeterminado. Generalmente, esta desigualdad es resuelta introduciendo arbitrariamente algunas simplificaciones en la ubicación y/o en la inclinación de las fuerzas interdovelas. Todos los métodos “rigurosos”, aquellos que satisfacen las tres ecuaciones de equilibrio, como el método de Spencer (1967) y de Morgenstern y Price (1965), entre otros, determinan valores del factor de seguridad ( $F_s$ ) muy similares entre ellos (Duncan y Wright, 1980; Duncan, 1996). Para el caso en el que la superficie de falla sea circular, el método Simplificado de Bishop (1955) que emplea únicamente dos ecuaciones de equilibrio (fuerzas verticales y momentos), produce valores del factor de seguridad que están en correspondencia con los métodos rigurosos, siendo las diferencias máximas alrededor del 6% para una variedad de casos (Duncan, 1996). Esto es, debido a que para una superficie de falla circular, el valor del factor de seguridad es

afectado de una manera marginal por la simplificación de las fuerzas interdovelas (Espinoza y col., 1994). Cuando no se conoce de antemano el tipo de falla, como es en la mayoría de los casos prácticos, los métodos rigurosos como el de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967) deben ser usados, pues se obtienen valores consistentes y no presentan mayores dificultades numéricas. Krahn (2003) ha revisado los fundamentos de los MEL basados en dovelas y las MASKANA, Vol. 2, No. 2, 2011.

- Método ordinario o de Fellenius

En la Figura 2, se muestra un talud con una superficie potencial de falla definida con el arco AB. La masa de suelo que se encuentra dentro de esta superficie de rotura es dividida en varias dovelas. El talud considerado debe ser una sección transversal representativa del talud real, el que será estudiado por cada metro lineal<sup>9</sup>.

**Figura 2. Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius**



Fuente: Revista de la Construcción Vol. 12 n° 1

<sup>9</sup> RODRÍGUEZ CIFUENTES L Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, Revista de la construcción Vol. 12 n°1, Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile, 2013.

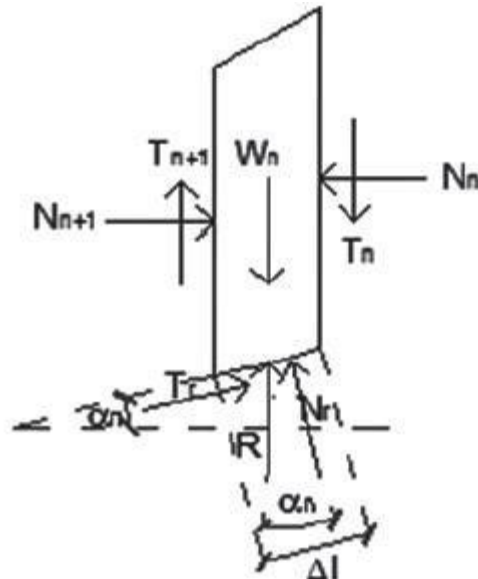
Las fuerzas que actúan sobre el talud, se pueden apreciar en la figura 3, donde se toma la  $n$ ma dovela como ejemplo:

Donde,

- $W$  : Resultante peso dovela
- $R$  : Fuerza que actúa como reacción al peso de la dovela
- $N_n$  y  $N_{(n+1)}$  : Fuerzas normales que actúan en cada lado de la dovela
- $T_n$  y  $T_{(n+1)}$  : Fuerza tangenciales que actúan en cada lado de la dovela
- $N_r$  : Componente normal de la reacción  $R$
- $T_r$  : Componente tangencial de la reacción  $R$

En la figura 3, se presenta el esquema de las fuerzas que actúan en la dovela de acuerdo al método de Fellenius.

**Figura 3. Esquemas de las fuerzas que actúan en la  $n$  dovela, de acuerdo al método de Fellenius**



Fuente: Revista de la Construcción Vol. 12 n° 1

Como las fuerzas  $N_n$ ,  $N_{(n+1)}$ ,  $T_n$  y  $T_{(n+1)}$  son complejas de determinar, es posible tomar como consideración que las resultantes de  $N_n$  y  $T_n$  son iguales en magnitud a las resultantes de  $N_{(n+1)}$  y  $T_{(n+1)}$ , y que sus líneas de acción coinciden.

Dentro de las características del método de Fellenius, está el hecho de que este satisface el equilibrio de momentos, por lo que al considerar esta condición, se tiene que el momento producto de las fuerzas movilizadas sobre el centro O del círculo de falla, es igual al momento que resulta del actuar de las fuerzas resistentes.

- Método de Bishop.

Bishop (1955) propuso un método más riguroso de análisis para deslizamientos en superficies de falla esférica. Él supuso, en una versión simplificada de su método, que la resultante de las fuerzas a ambos lados de una dovela es horizontal y que el factor de seguridad encontrado es el mismo para todas las fajas. Por otra parte, la resistencia al cortante utilizada en el análisis del método es la resistencia solicitada en lugar de la resistencia máxima; la relación entre una y otra es igual al inverso del factor de seguridad. El método supone que  $\beta$  es igual a 0 para cada dovela.<sup>10</sup> La ecuación se reduce a:

$$F.S. = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

- Método de Janbú

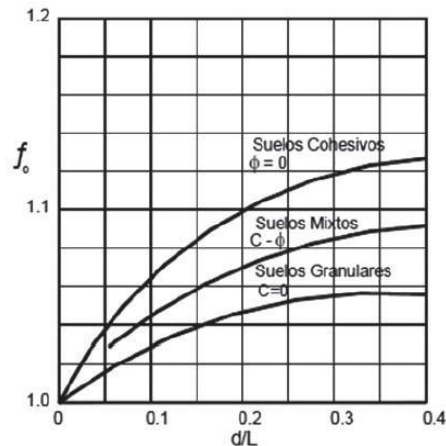
La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia de los métodos anteriores, en este caso la SPF no debe ser obligatoriamente circular.

---

<sup>10</sup> ALE VÉLIZ, José Daniel. «Análisis de estabilidad de taludes.» Alicante, España, 2002. [en línea] [citados 10 de 2016] Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/148327821/53170729-Analisis-deEstabilidad-de-Taludes>.

Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección  $f_0$ , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura, a continuación en la figura 4 se muestra el factor  $f_0$  utilizado en el método de Janbú<sup>11</sup>

**Figura 4. Diagrama del factor  $f_0$  utilizado en el método de Janbú**



Fuente: (Suárez, 2011)

Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos.

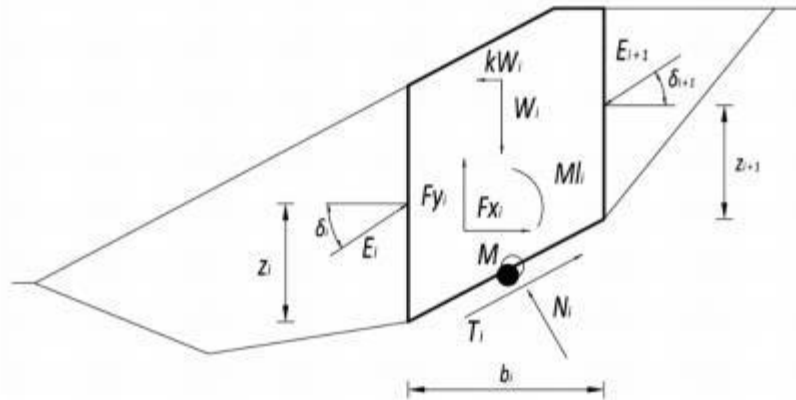
- Método de Spencer:

El método de Spencer es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Se requiere satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. El bloque es creado mediante la división del suelo sobre la superficie de deslizamiento dividiendo planos. Las fuerzas actuando en bloques individuales se muestran en la Figura 5<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamiento y estabilización de taludes en zonas tropicales. Colombia, 1998. Capítulo IV. 27 de Agosto de 2013. [en línea] [citado 12 de marzo de 2016] Disponible en: «[http://albatros.uis.edu.co/~pagina/profesores/planta/jsuarez/publicaciones/libro\\_taludes/](http://albatros.uis.edu.co/~pagina/profesores/planta/jsuarez/publicaciones/libro_taludes/).»

<sup>12</sup> SPENCER, E. «A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces.» Géotechnique (1967): pág. 11-26.

**Figura 5. Esquema estático del Método de Spencer**



Fuente: SPENCER, E, Géotechnique (1967)

Spencer plantea dos ecuaciones, una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad  $F$  y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas  $\theta$ .

$$N + F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha - Q \sin (\alpha - \theta) = 0 ;$$

$$S + F_v \sin \alpha + F_h \cos \alpha + Q \cos (\alpha - \theta) = 0$$

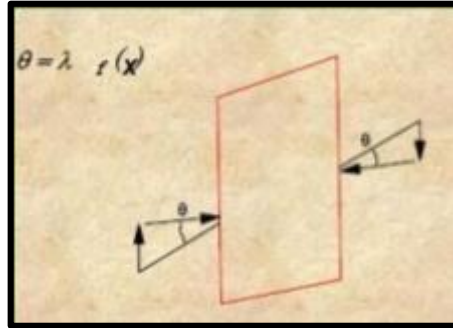
$$Q = \frac{-F_v \sin \alpha - F_h \cos \alpha - (c' \Delta l / F) + (F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha + u \Delta l)(\tan \phi' / F)}{\cos(\alpha - \theta) + [\sin(\alpha - \theta) \tan \phi' / F]}$$

- Método Morgenstern-Price

Es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie terrestre en

planos. Las fuerzas actuando en bloques individuales se muestran en la Figura 6<sup>13</sup>.

**Figura 6. Esquema estático del Método Morgenstern Price**



Fuente: MORGENSTERN, N.R. y V.E. PRICE. (1965)

Es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles del suelo:

$$X = \lambda f(x)E$$

Donde X y E son las fuerzas verticales y horizontales entre rebanadas,  $\lambda$  es un factor de escala desconocida que es el resultado por parte de las incógnitas, y  $F(x)$  es una función que asume las fuerzas laterales.

**2.2.2 Comparación de los diversos métodos de Equilibrio Limite.** La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad. Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de

<sup>13</sup> MORGENSTERN , N.R. y V.E. PRICE. «The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces.» Géotechnique (1965): pág. 79-93.

factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price. Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%. Esta aseveración fue documentada por Fredlund y Krahn (1977). Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de FS. Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos pero más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú<sup>14</sup>.

Factor de Seguridad Se define como la relación entre la resistencia cortante promedio del suelo y el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla supuesta, en la figura 7 se presenta una falla del talud<sup>15</sup>.

Ecuación de Factor de seguridad.

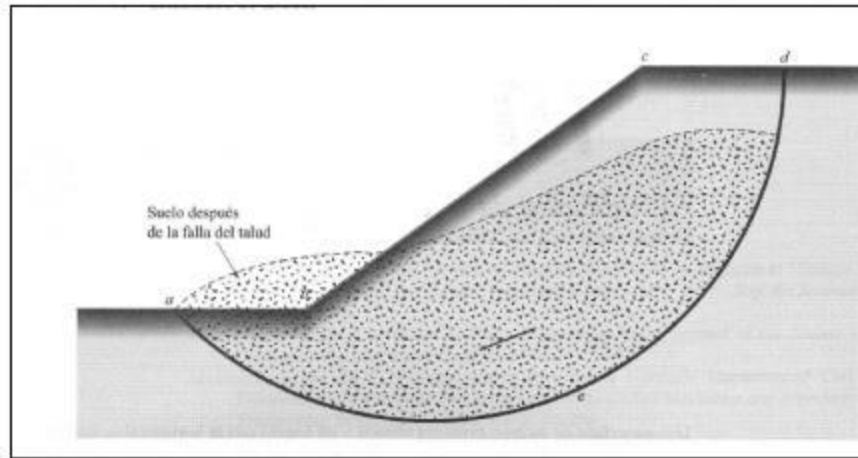
$$F_S = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

---

<sup>14</sup> JANBÚ N. "Slopes Stability Computations. Embankment Dam Engineering". Casa grande Volume, New York, John Wiley.1973

<sup>15</sup> DAS, Braja M. «Fundamentos de ingeniería geotécnica.» California State University, Sacramento: CENGAGE LEARNING / THOMSON INTERNACIONAL, 2001. Primera Edición.

**Figura 7. Falla del talud**



Fuente: Das, B. M. (2001)

Es así, que si el factor de seguridad calculado es igual a 1, el talud está en estado de falla inminente, por el contrario si el factor de seguridad llega a un valor de 1,5 o superior este se considera estable y seguro.

**2.2.3 Criterios de falla de Mohr-Coulomb.** Mohr (1900) presentó una teoría sobre la ruptura de los materiales que afirma que éstos fallan debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solamente por la presencia de un esfuerzo máximo de uno de éstos. De tal manera que la relación funcional entre estos esfuerzos sobre un plano de falla se expresa de la forma<sup>16</sup>.

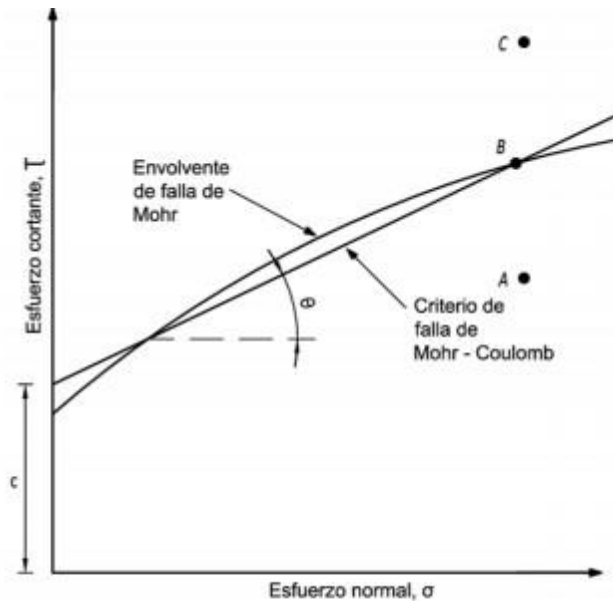
$\tau = f(\theta)$  siendo:  $\tau$  = esfuerzo cortante sobre el plano de falla,  $\theta$  = esfuerzo normal sobre el plano de falla. La envolvente de falla definida por esta ecuación es una línea curva, pero en la práctica es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776). Tal

---

<sup>16</sup> ALAM PASTOR; María A. SOSA CONTRERAS Grelys A. y ELBERG ROJAS. María E. Aplicación del método de elementos finitos en la simulación de zonas de riesgo geológico, Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, 2007.

relación se escribe como:  $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ . Siendo:  $c$  = cohesión,  $\phi$  = ángulo de fricción interna y esfuerzo de confinamiento Esta ecuación es conocida como criterio de falla de Mohr-Coulomb

**Figura 8. Envoltente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb.**



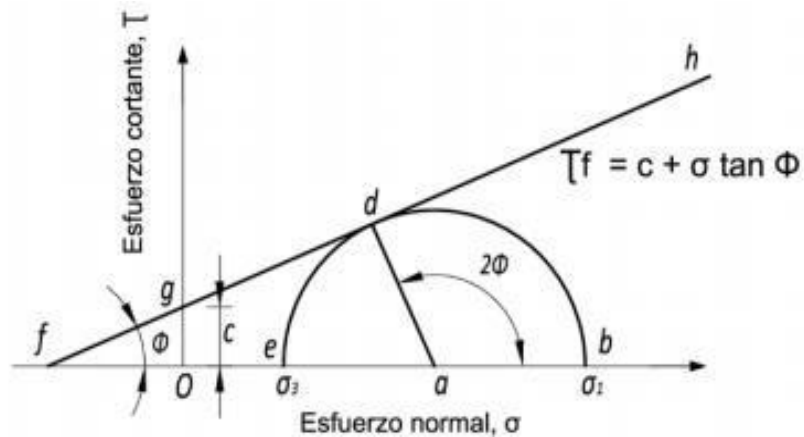
Fuente: DAS, Braja M. 2001

La Figura 8 nos muestra que si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A, entonces no ocurrirá una falla a cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante pueden ser representados por el punto B, ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si un estado de esfuerzos se representa por el punto C, no existe falla ya que este se encuentra arriba de la envolvente de falla, por lo que la falla a cortante ya habría ocurrido antes.

La falla por cortante ocurre cuando el esfuerzo cortante sobre un plano alcanza un valor dado por la ecuación de Coulomb. Para determinar la inclinación del plano

de falla respecto al plano principal mayor,  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  los esfuerzos principales mayor y menor. El plano de falla EF forma un ángulo  $\phi$  con el plano principal mayor. Para determinar el ángulo  $\phi$  y la relación entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se utiliza el Círculo de Mohr y la envolvente de falla,<sup>17</sup>.

**Figura 9. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb .**



Fuente: DAS, Braja M. 2001.

La Figura 9 muestra la envolvente de falla definida por la relación  $\tau = c + \sigma \tan \phi$ . El  $\phi$  radio del círculo define el plano principal mayor, y la línea radial  $ad$  define el plano de falla. Ley de falla por cortante en suelo saturado En un suelo saturado el esfuerzo normal total en un punto es la suma del esfuerzo efectivo y la presión de poro, como sigue:  $\sigma = \sigma' + u$  (2.3) El esfuerzo efectivo  $\sigma'$  es recibido por los sólidos del suelo.

**2.2.4. Método de Elementos Finitos.** Es un método numérico empleado ampliamente en ciencia e ingeniería ya que permite resolver de manera aproximada, problemas de diversa índole, estudiándose procesos como esfuerzos de tensión, transmisión de calor, comportamientos geológicos, etc., en medios

<sup>17</sup> Ibid

continuos. El método inicialmente discretiza el sólido para adaptarlo a un número finito de partes llamadas elementos, los cuales, tienen una serie de puntos interconectados entre si llamados nodos, estos están colocados en las esquinas de los elementos, también en los puntos medios de las caras o aristas y dentro de ellos. Al ensamblaje de elementos-nodos se le conoce como malla o mallado. Es importante destacar que la interpolación es un elemento clave del método de elementos finitos, ya que a través de este procedimiento se pueden determinar todos los desplazamientos que ocurran en cualquier zona del modelo. Esta interpolación se lleva a cabo mediante funciones que reflejan el movimiento de los nodos, y éstas son consideradas como funciones de forma, las cuales, pueden ser calculadas ya sea por el uso de derivadas e integrales o éstas pueden constituir polinomios completos que reflejen la movilidad de dichos nodos.

La complejidad de las ecuaciones que se utilizan en este método cambia según si el estudio es unidimensional, bidimensional o tridimensional, ya que una de las variables fundamentales a la hora de analizar las deformaciones son los desplazamientos, denotados con la letra  $u$ , por tanto, el análisis matricial es mucho más sencillo para estudios unidimensionales que sólo conllevan movimientos en la dirección del eje  $X$ , mientras que para estudios bidimensionales y tridimensionales las ecuaciones se complican al considerar desplazamientos en  $u_X$  y  $u_Y$  o  $u_X$ ,  $u_Y$  y  $u_Z$  respectivamente. Por ejemplo, en el estudio de la rigidez directa en resortes, para un elemento cualquiera, la matriz de rigidez  $[k]$  está relacionada con los desplazamientos nodales en una dimensión  $\{u\}$  estableciendo el valor de las fuerzas locales que actúan sobre el resorte  $\{f\}$ , esto es:

$$\{f\} = [k] \{u\}$$

En este caso (unidimensional) la fórmula se resuelve de manera directa como si fuese un producto. Sin embargo, para el caso de un elemento bidimensional el

desplazamiento  $u$  no se expresaría como un módulo sino como un vector con coordenadas en  $X$  y  $Y$ , es decir, la fórmula sería ahora:

$$\{ f \} = [k] \{ u_x, u_y \}$$

La solución obtenida por el método de elementos finitos es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos.

Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

En cualquier sistema se puede identificar los siguientes conceptos:

**- Dominio:**

Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema, el cual se divide mediante regiones con formas sencillas o "elementos". El dominio se divide mediante la discretización de rectas (una dimensión), triángulo o cuadrilátero (dos dimensiones) y un cubo (tres dimensiones).

**- Condiciones del contorno:**

Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperatura, voltaje, focos de calor, entre otros).

Incógnitas: variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones del entorno han actuado sobre el sistema (desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.).

Los elementos finitos permiten evaluar cualquier superficie de falla, analizando los esfuerzos y las deformaciones del talud, satisfaciendo todas las condiciones de esfuerzos en cada uno de los nodos

### **2.3 MARCO DE ANTECEDENTES**

A Continuación se hace la selección de trabajos que tienen relación con el presente documento.

- Los investigadores Dr. Paul Garnica Anguas, M. en I. José Antonio Gómez López, Ing. Mayra Flores Flores, Ing. Alfonso Pérez Salazar e Ing. José Islam López Bazán, realizaron la tesis de Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Chihuahua en el año 2002. El título del proyecto es: ESTABILIDAD DE TALUDES SUMERGIDOS APLICACION A LA ESTABILIDAD DE ESCOLLERAS EN PUERTOS MEXICANOS<sup>18</sup>.

En el trabajo se presentan las metodologías actuales para el análisis de taludes en obras portuarias, método de equilibrio límite, solución con mecánica de medios continuos y análisis y método de elemento finito, que están sujetos a fuerzas gravitacionales, hidráulicas y de sismo. Se utilizaron los programas de cómputo “SLOPE/W” y “PLAXIS” con los que se realizó un análisis considerando la influencia de los parámetros del suelo, altura de marea, longitud de ola, altura e

---

<sup>18</sup> GARNICA ANGUAS Paul, et al. Estabilidad de taludes sumergidos aplicación a la estabilidad de escolleras en puertos mexicanos, Universidad Autónoma de Chihuahua, Publicación Técnica No.199, 2002.

inclinación del talud y ubicación de escolleras. Además, se analizó la susceptibilidad a la licuación por oleaje y sismo.

Para fines de comparación se consideró la profundidad de dragado de 16 m, con pendiente 5:1, el ángulo de fricción interna de 35°, cohesión cero y peso específico saturado de 20 kN/m<sup>3</sup> que se obtuvieron del estudio geotécnico previo, del análisis anterior se considerará una altura de marea de cero m por ser la más desfavorable. Los máximos sismos registrados en el Pacífico en la zona de Chiapas corresponden aceleraciones de 250 cm/s<sup>2</sup>, 0.25 de la gravedad. Para el análisis se consideraron aceleraciones de 0.15, 0.25 y 0.35 g. Se analizó el caso para 0.35 g, que corresponde a valores de aceleración horizontal en condiciones extremas:

**Tabla 1. Influencia de sismos en el factor de seguridad, analizado Con el programa de cómputo “SLOPE/W”**

Pendiente	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	H (m)	Altura de marea (m)	n	$\phi$	FACTOR DE SEGURIDAD					
						Ordinario	Bishop	Janbu	M.P	Spencer	GLE
5:1	20.00	16.00	0.00	0.15	35°	4.063	4.480	4.111	4.487	4.487	4.487
5:1	20.00	16.00	0.00	0.25	35°	2.829	3.143	2.877	3.154	3.154	3.155
5:1	20.00	16.00	0.00	0.35	35°	2.048	2.188	2.068	2.432	2.432	2.200

M.P Morgensten - Price

GLE Método general de equilibrio límite.

H Altura del talud

$\phi$  Angulo de fricción interna.

n Coeficiente sísmico horizontal

**Tabla 2. Influencia de sismos en el factor de seguridad, analizado Utilizando el Hardware PLAXIS 2D**

Pendiente	$\gamma_{cat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{soso}$ (kN/m <sup>3</sup> )	H (m)	Altura de marea (m)	n	$\phi$	Permeabilidad (m/día)		E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	F:S
							Kx	Ky			
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.10	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.916
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.12	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.724
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.15	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.405
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.16	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.405
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.18	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.289
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.20	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.187
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.22	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.053
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.24	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	1.039
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.25	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	0.979
5:1	20.00	16.00	16.00	0.00	0.26	35°	0.300	0.300	300,000.00	0.350	Colapso

$\nu$  Relación de Poisson

$\phi$  Angulo de fricción interna

H Altura del talud

E Módulo de Young.

n Coeficiente sísmico horizontal.

F.S Factor de seguridad

Fuente: GARNICA ANGUAS Paul Estabilidad de taludes sumergidos aplicación a la estabilidad de escolleras en puertos mexicanos,

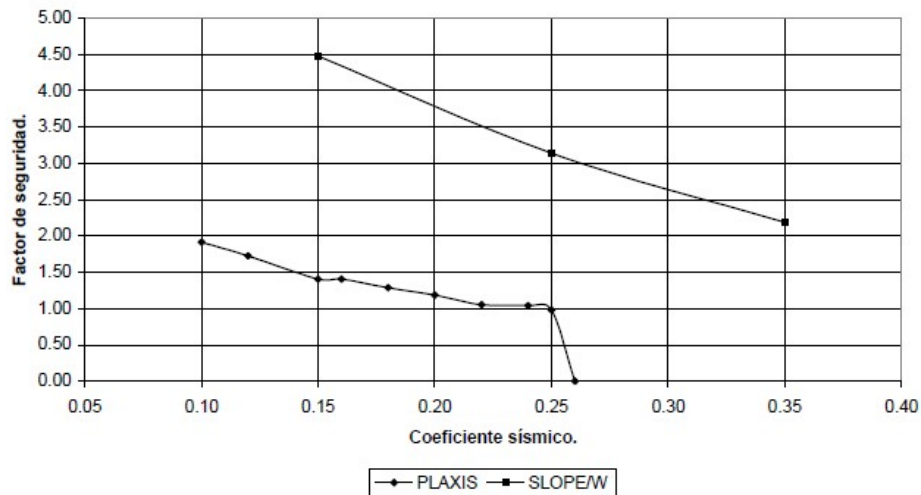
El análisis hecho con el programa de cómputo SLOPE/W muestra una disminución importante en el factor de seguridad debido a la aceleración horizontal inducida por la acción del sismo, para una aceleración de 0.35 se nota una disminución del 84% en el valor del factor de seguridad mientras que disminuye el 77 y el 33% para aceleraciones de 0.25 y 0.15 g respectivamente.

A pesar de lo drástico que resulta la disminución del factor de seguridad para aceleraciones de 0.35 g el talud sigue siendo estable, cabe recordar que este valor se consideró únicamente como una posibilidad remota y que el valor máximo histórico es de 0.25 g.

Los datos tabulados para el método de Bishop realizados con el programa de cómputo SLOPE/W y los resultados obtenidos con el programa de cómputo

PLAXIS, para analizar la influencia de sismo en el factor de seguridad se representan en la Figura 10.

**Figura 10. Comparación de resultados de la influencia de sismos en el factor de seguridad para los programas de cómputo SLOPE/W y PLAXIS**



Fuente: Estabilidad de taludes sumergidos aplicación a la estabilidad de escolleras en puertos mexicanos, Paul Garnica Anguas

De lo anterior de se puede concluir que la estabilidad de los taludes es crítica para los valores del coeficiente de aceleración sísmico utilizado (hasta 0.24 g). Esto implica que exista la probabilidad de que, ante sismos mayores, se produzcan asentamientos y reacomodos en el material del talud. Dichas deformaciones serían provocadas por fallas locales de los taludes en cuyo caso será necesario efectuar trabajos de mantenimiento

- La ingeniera Karla María Orozco Olarte de la universidad EAFIT en la ciudad de MEDELLÍN en el año 2013, realizó el trabajo de grado: ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS RESIDUALES EVALUADO EN EL CORTO Y LARGO PLAZO.

En este trabajo se presentan los resultados de los análisis de estabilidad de taludes obtenidos mediante la comparación en términos del factor de seguridad, con base en los métodos de equilibrio límite y el método de elemento finito, para lo cual, además de considerar diferentes procedimientos de cálculo, se incorporó los aspectos relacionados con los esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.

Los análisis se desarrollaron para suelos residuales provenientes de rocas volcánicas de la formación Quebradagrande considerando valores pico y residual en seis casos con estado de esfuerzo diferentes, cuyos parámetros se obtuvieron a través de pruebas triaxiales en diferentes modalidades de carga y drenaje.

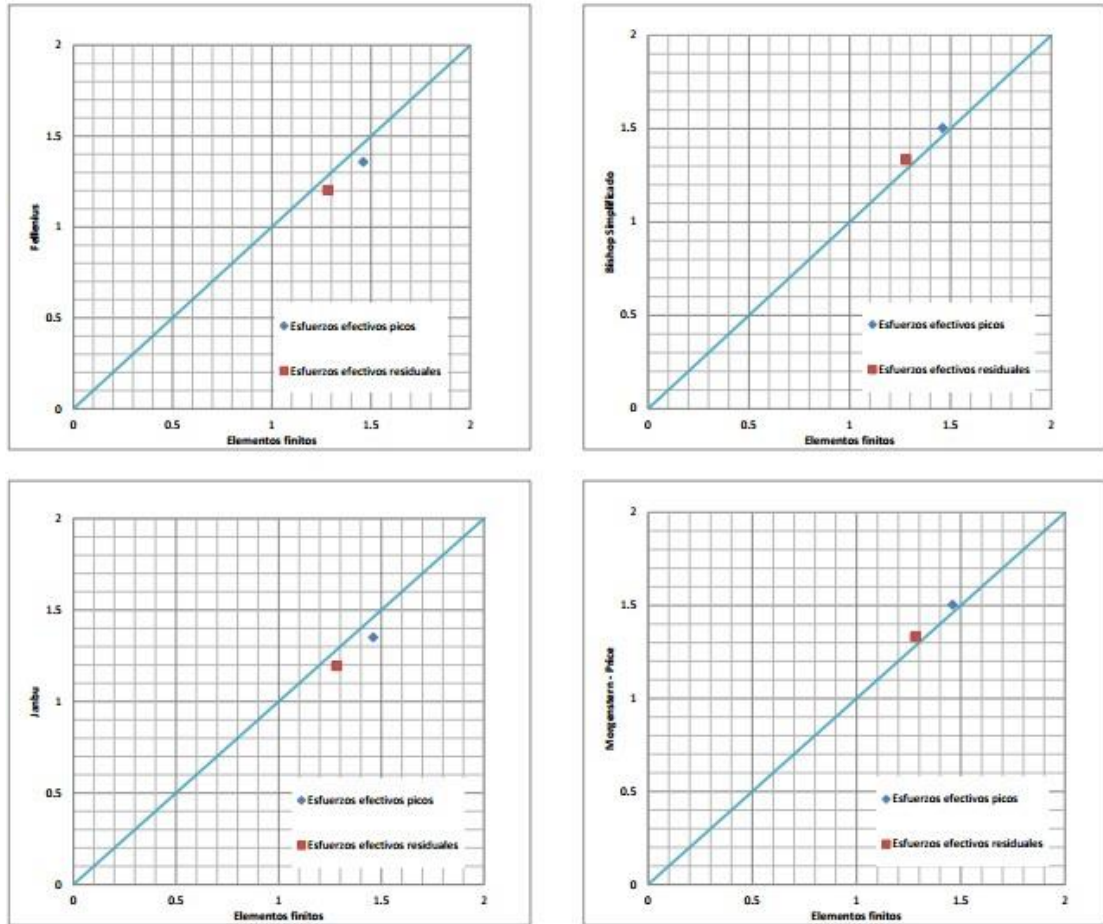
Basados en las modelaciones realizadas por el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos se obtiene que las diferencias del factor de seguridad calculado no fueran significativas y se evidencia la importancia de una correcta determinación de los parámetros de resistencia para poder obtener resultados razonables<sup>19</sup>.

En la figura 11 se observa la comparación de factores de seguridad entre el método de elementos finitos y el método de equilibrio límite usando los parámetros de resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo triaxial, en donde se puede determinar la variabilidad de los parámetros de resistencia para cada uno de los triaxiales en diferentes modalidades presentan variaciones altas, demostrando que la historia de carga, las condiciones de drenaje, las perturbaciones externas e internan determinan la estabilidad de la ladera; por lo cual se hace necesario realizar una caracterización detallada del perfil estratigráfico y escoger los ensayos pertinentes para determinar la resistencia al corte del suelo obteniendo una mayor precisión y confiabilidad en los resultados de análisis.

---

<sup>19</sup> OROZCO OLARTE Karla Maria. Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en el corto y largo plazo, UNIVERSIDAD EAFIT, Escuela De Ingeniería, Medellín, 2013.

**Figura 11. Comparación de factores de seguridad entre el método de elementos finitos y el método de equilibrio limite usando los parámetros de resistencia al corte obtenidos a partir del ensayo triaxial**



Fuente: Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en el corto y largo plazo, Orozco 2013

- El ingeniero civil Pablo Urrita Verase, realizó el Análisis Dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores, Perú, en el año 2008. La tesis realizó por el método de elementos finitos, para lo cual se utilizó el programa GEO-SLOPE. El objetivo de un análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos es determinar los excesos de presión de poros, las resistencias post-sísmicas, la deformación

permanente y las posibles zonas de licuefacción desarrolladas en la estructura analizada, como resultado de la aplicación de uno o varios sismos de diseño.

Son dos los tipos de resultados los que se obtuvo de SLOPE/W al final del análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos: la variación del factor de seguridad durante el sismo y la deformación permanente que sufrirá la estructura, ambos para cada una de las superficies de falla analizadas.

De las 216 superficies de falla generadas en los modelos se eligió dos, consideradas críticas, para analizar la variación del factor de seguridad y la deformación en la falla. Los criterios para seleccionar las superficies de falla críticas fueron: la falla que presente los menores factores de seguridad a lo largo de todo el sismo y la forma de la superficie de falla (se buscó una falla que atravesase al talud en toda su altura y otra que abarcara aproximadamente la mitad del talud). La Figuras 12 y 13 muestran las dos superficies de falla seleccionadas en las secciones A<sup>20</sup>.

De los resultados de los análisis dinámicos de estabilidad de taludes por elementos finitos realizados para esta tesis se puede concluir que:

Los factores de seguridad en ningún momento del sismo caen por debajo de 1, por lo que se puede concluir que los taludes son estables bajo las condiciones analizadas, es decir, para los parámetros geotécnicos asumidos para los materiales, la geometría modelada y los registros sísmicos utilizados.

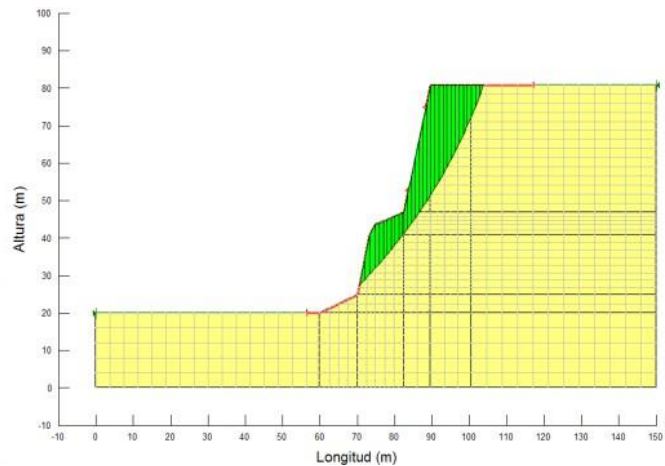
Los factores de seguridad obtenidos por el método de elementos finitos con el

---

<sup>20</sup> URRITA VERASE Pablo Análisis Dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores, , Perú, 2008. [20]. TÍTULO H ESTUDIOS GEOTÉCNICOS. NSR-10.

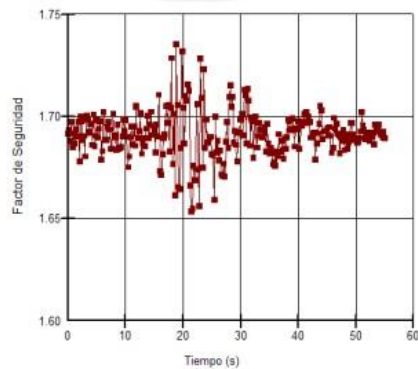
Análisis estático inicial concuerdan con los resultados del análisis de estabilidad estática convencional (método de Spencer).

**Figura 12. Superficie de falla que atraviesa al talud en toda su longitud (Sección a)**



Fuente: Análisis Dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores

**Figura 13. Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo para la superficie de la Sección A, bajo el efecto del sismo.**



Fuente: Análisis Dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores

### 3. FORMULACION DE LA SIMULACION

Para el proyecto de construcción del edificio en estudio fue realizado un análisis estudio geotécnico y un diseño de la estructura de contención de los taludes de la excavación por parte de la empresa E.D. INGEOTECNIA SAS. Como parte de este trabajo de grado se realizó la verificación del diseño de uno de los taludes (costado norte) mediante la elaboración y análisis de resultados de modelos por computador.

A continuación se presenta las características geotécnicas del proyecto:

El lote está conformado por suelos aluviales sueltos poco competentes a una profundidad variable desde 0.5 metros hasta una profundidad de 1.0 metro. Por debajo de este nivel aparecen suelos aluviales densos a muy densos y competentes.

Las condiciones del terreno son aptas para la construcción del proyecto y no se deben esperar problemas geotécnicos, si se tienen en cuenta las recomendaciones realizadas en el presente estudio.

De acuerdo a los diferentes estratos y sus respectivas características, se escogieron los parámetros geotécnicos obteniendo para el área de estudio las siguientes propiedades.

### 3.1. PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Los parámetros utilizados para los diferentes tipos de suelos identificados en el área de estudio son los determinados en el estudio geotécnico realizado, así como la experiencia en el comportamiento de los suelos del sector de estudio. Se utilizaron parámetros totales de resistencia de acuerdo al sistema de Mohr-Coulomb. Los espesores de los estratos fueron determinados a partir de los sondeos geotécnicos realizados. De acuerdo al análisis de los resultados del ensayos SPT y teniendo en cuenta las propiedades características de los suelos de la región, se determinaron los valores de peso unitario para los diferentes tipos de suelo identificados en las exploraciones geotécnicas. En la tablas 3 y 4 se presentan las propiedades de los suelos.

**Tabla 3. Propiedades de los estratos de suelo**

Tipo de suelo	Profundidad (m)	Angulo de fricción (°)	Ka	Kp
Tipo 1 (Aluviales sueltos)	0.0 - 1.0	25.0°	0.406	2.464
Tipo 2 (Aluviales densos a muy densos)	1.0 - Hasta una profundidad no determinada mayor a 17.0	36.0°	0.260	3.852

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Tabla 4. Propiedades de los suelos**

Prof. (m)	Tipo de suelo	Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Angulo de fricción (°)	Cohesión (KN/m <sup>2</sup> )	E (KN/m <sup>2</sup> )
1.0	Tipo 1 (Aluviales sueltos)	17.0	25.0°	15.0	11400
Hasta una profundidad no determinada mayor a 17.0	Tipo 2 (Aluviales densos a muy densos)	18.9	36.0°	20.0	62800

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

Para el análisis de factor de seguridad del modelo geotécnico se utilizó el software para computador SLOPE/W, Versión 5 de GEO-SLOPE International Ltda., Calgary Alberta, Canadá. SLOPE/W es un producto de Software que utiliza la teoría de equilibrio límite para obtener los factores de seguridad al deslizamiento de los taludes.

Este programa es una solución gráfica de 32 bits, la cual opera dentro de la interface gráfica de Microsoft Windows. Aunque el programa permite trabajar con doce diferentes métodos de análisis, para objeto del presente estudio se trabajó conjuntamente con los siguientes cuatro métodos:

- Método ordinario o de Fellenius
- Método Bishop simplificado
- Método de Janbú simplificado
- Método de Spencer

### 3.2 LOS VALORES DEL FACTOR DE SEGURIDAD GEOTÉCNICO BÁSICO FSB

La selección de los factores de seguridad debe justificarse plenamente teniendo en cuenta:

- (a) La magnitud de la obra.
- (b) Las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones.
- (c) La calidad de la información disponible en materia de suelos.

En cualquier caso los Factores de Seguridad Básicos FSB aplicados al material térreo (suelo, roca o material intermedio) no deben ser inferiores a los Factores de Seguridad Básicos Mínimos FSBM o FSBUM, en la cual las cargas se refieren a valores nominales sin coeficientes de mayoración, para los cimientos y el material térreo de cimentación se empleará para las fuerzas sísmicas E un factor R 1.0. En ningún caso el factor de seguridad básico mínimo FSBM podrá ser inferior a 1.00 [20].

En la tabla 5 se observa los factores de seguridad básicos mínimos directos; Para la presente verificación de diseño se realizó el análisis para condición estática de 1.5 y para condición seudo estática 1.05.

**Tabla 5. Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos**

Condición	F <sub>SBM</sub>		F <sub>SBUM</sub>	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(\*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

Fuente: NSR-10 Tabla H.2.4-1

Para efectos del análisis y diseño de taludes, se debe emplear la aceleración máxima del terreno,  $a_{max}$  obtenida bien sea de un espectro (aceleración del espectro de diseño para periodo cero) o por medio de análisis de amplificación de onda unidimensional o bidimensional, correspondiente a los movimientos sísmicos. En caso de que el sitio objeto de análisis haga parte de un estudio de microzonificación sísmica aprobado, se utilizará la aceleración máxima superficial del terreno; El coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes  $K_{ST}$  tiene valor inferior o igual al de  $a_{max}$  y se admiten los siguientes valores mínimos de  $K_{ST}/a_{max}$  dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis<sup>21</sup>.

**Tabla 6. Valores de  $K_{ST}/a_{max}$  Mínimos para Análisis Pseudoestático de Taludes**

Material	$K_{ST}/a_{max}$ Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Fuente: NSR-10 – Tabla H.5.2-1

- **Superficies de falla**

Se utilizó el criterio de la falla circular, generando una malla de 100 centros de giro, y 10 líneas de superficie de tangencia, para un total de 1331 círculos de falla analizados.

---

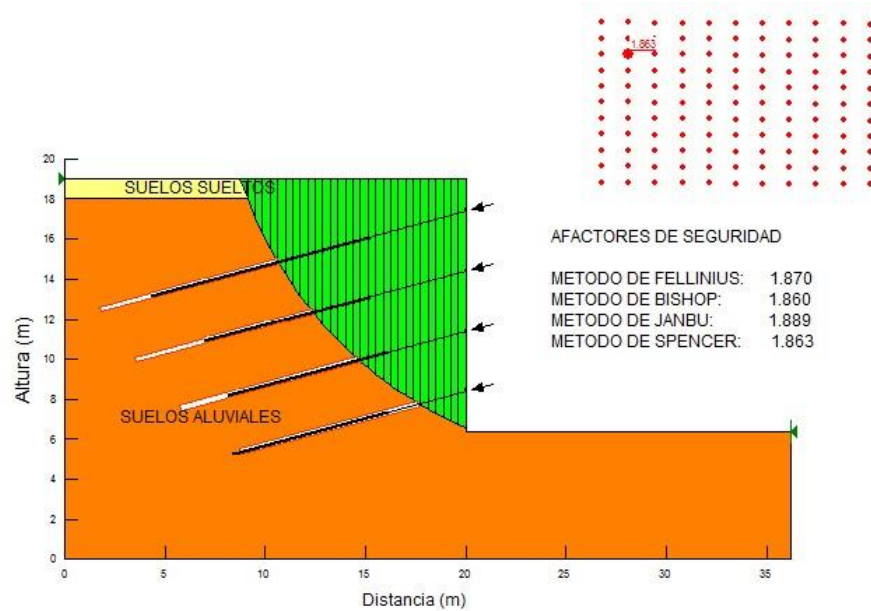
<sup>21</sup> Ibid

- **Propiedades del suelo**

Se utilizó el sistema de parámetros totales de resistencia, de acuerdo al Sistema de Mohr-Coulomb obtenidos en el ensayo de Corte Directo Drenado.

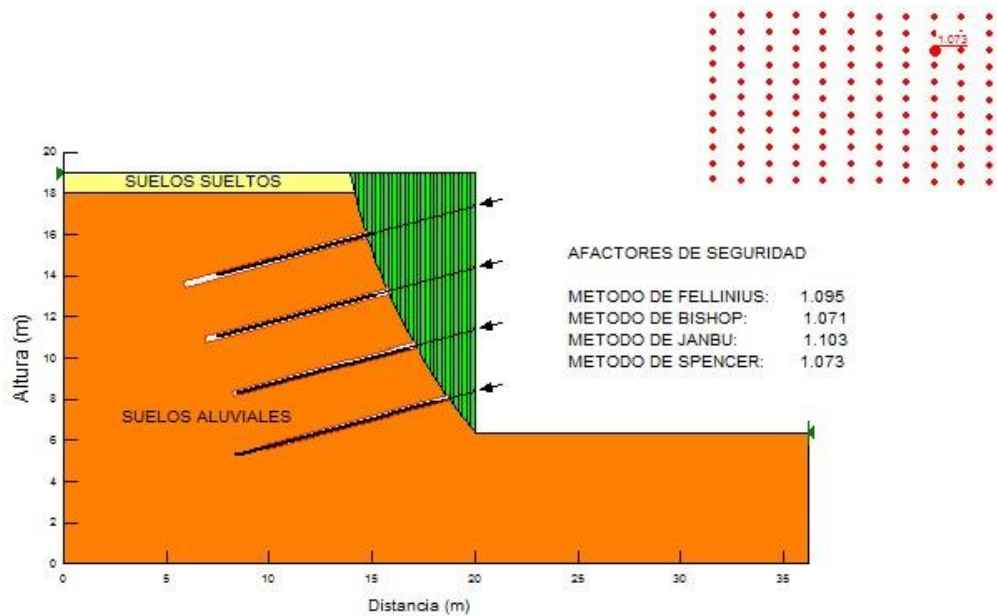
El análisis se realizó en cuatro etapas con el concepto de equilibrio límite y el Software SLOPE/W; en las figuras 14 y 15 se presentan las pantallas en condición estática y condición dinámica, respectivamente.

**Figura 14. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático**



Fuente: Propia

**Figura 15. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámica**



Fuente: Propia

Seguidamente se presentan los cálculos de los desplazamientos para la pantalla propuesta del proyecto.

Para el análisis del modelo de desplazamientos se utilizó el software para computador PLAXIS 2D FOUNDATION PLAXIS. Es un programa computacional que utiliza el método numérico de elementos finitos, para el cálculo de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos de distintas naturalezas. Este fue creado en la universidad Técnica de Delft, a partir de una iniciativa del Departamento de Trabajos Públicos y Dirección del Agua, en el año 1987.

Las situaciones modelables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate. El menú principal del programa, está constituido por cuatro sub-programas:

1. Input (Entrada): introducción de la geometría y datos de los materiales.
2. Calculations (Cálculos): cálculo del problema mediante elementos finitos.
3. Output (Resultados): análisis de los resultados.
4. Curves (Curvas): elaboración de gráficas e informes.

PLAXIS funciona mediante el método de elementos finitos, técnica que consiste en Subdividir la estructura a diseñar en un número reducido de elementos de geometría regular manejables que mantienen las propiedades de la estructura general y al trabajar de manera conjunta estos elementos, se predice el comportamiento de la estructura general.

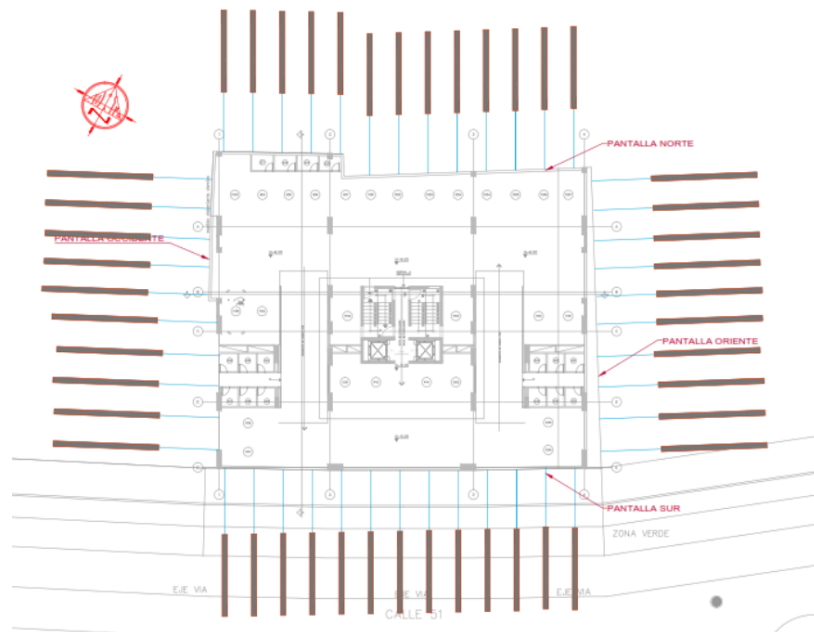
A continuación se presenta la estimación de deformaciones máximas en el muro:

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN DE LOS TALUDES:

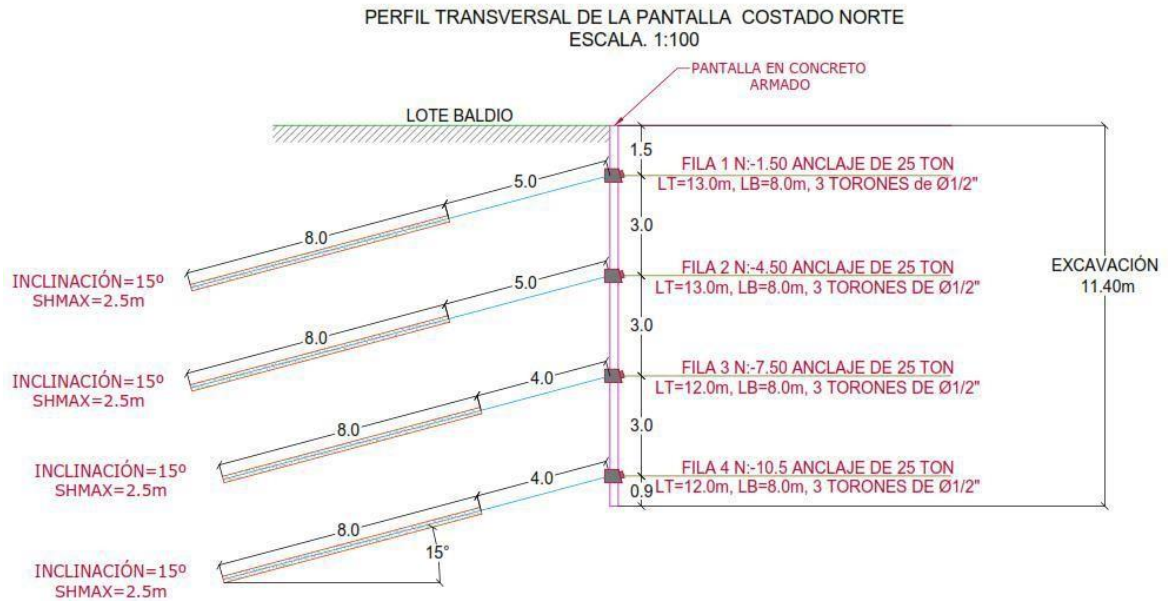
Se plantea diseñar la estructura presentada en la Figura 17, para el manejo de excavación del proyecto consiste en la construcción de una pantalla de concreto reforzado con una longitud aproximada de 31.9 m y una altura de 11.40 metros, con cuatro filas de anclajes pre-tensionados separados horizontalmente cada 3.0, en la figura 16 se presenta la localización de las pantallas y en la figura 18 se presenta el perfil transversal de la pantalla del costado norte.

**Figura 16. Localización de las Pantallas**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

**Figura 17. Pantalla Norte propuesta en concreto con anclajes pretensionados**



Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

#### 4.1.1. Propiedades de los materiales utilizados son:

Acero  $f_y = 420$  Mpa (60000 psi).

Concreto  $f'_c = 21$  Mpa a los 28 días.

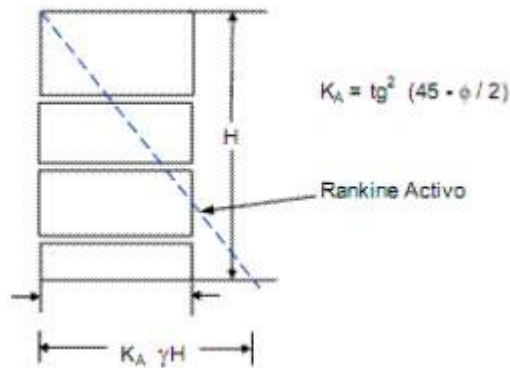
**4.1.2. Características de la Pantalla.** En la pantalla se recomiendan construir anclajes pretensionados de 13.0 a 12 metros de longitud, de los cuales 8.0 metros corresponden al bulbo. Los anclajes se encuentran unidos mediante vigas de concreto reforzado, las cuales están embebidas en la pantalla. El diámetro de los anclajes es de 10 centímetros y las cargas de tensionamiento son de 25 Toneladas. El diámetro de los torones a utilizar deben ser de tal manera que trabajen al 70% de su capacidad última.



- Diagrama de presiones

Para el análisis de presión de tierras se utilizó el definido por Terzaghi y Peck para el caso de arenas, de acuerdo a recomendación del manual de la FHWA para sistemas de pantalla anclada.

Figura 19. Distribución de Presiones



Fuente: Manual de la FHWA para sistemas de pantalla anclada.

## 4.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA PANTALLA

Tabla 8. Dimensionamiento de los Torones

<b>No. de filas de Anclajes</b>	4	
<b>No. de Torones y Diámetro por Anclaje</b>	Se sugiere 3 de 1/2" para 25 Ton, sin embargo queda a criterio del constructor, de tal manera que se garanticen las 25 Toneladas de carga.	
<b>Resistencia a la Rotura</b>	11.3	Toneladas
<b>F.S.</b>	1.3	

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

La tensión activa efectiva recomendada es de 25 Ton por ancla.

El Cálculo de la presión que actúa sobre la pantalla se determina de acuerdo a la teoría tradicional de Rankine, donde los coeficientes activo y pasivo de tierras se expresan a continuación:

$$K_A = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad K_P = \frac{1}{K_A}$$

Dónde:

KA= Coeficiente de presión Activo.

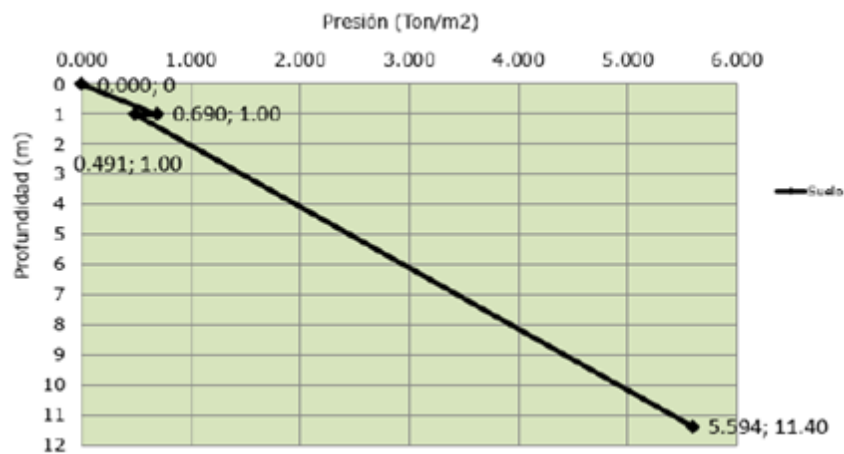
Kp= Coeficiente de presión Pasivo.

**Tabla 9. Coeficientes de Presión**

Tipo de Suelo	KA	KP
Suelos sueltos	0.406	2.464
Suelos duros	0.260	3.852

Fuente: E.D. Ingeotecnica S.A.S.

**Figura 19. Diagrama de Presiones**



Fuente: E.D. Ingeotecnica S.A.S.

**Tabla 10. Calculo de Presiones Efectivas**

<b>Figura</b>	<b>P<sub>Ai</sub></b>	<b>Y<sub>i</sub></b>	<b>P<sub>Ai</sub>X Y<sub>i</sub></b>
1	31.98	3.82	122.23
<b>Σ</b>	<b>31.98</b>	<b>Σ</b>	<b>122.23</b>

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

PA= Debe calcularse de acuerdo al perfil del suelo.

PA= 31.38

YA= Debe calcularse de acuerdo al perfil del suelo. YA= 3.82

- Incremento de presiones activas de tierras debido a la acción sísmica

El método de Mononobe-Okabe, es un método pseudo-estático que considera el incremento de presiones activas como la fuerza inercial de la cuña de falla debida a la aceleración sísmica.

KH = Aceleración sísmica horizontal expresada como fracción de la aceleración de la gravedad,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ .

KV = Aceleración sísmica vertical expresada como fracción de la aceleración de la gravedad,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ .

Kn = Coeficiente sísmico, para muros donde no se permite desplazamiento horizontales,  $Kn = 1.5 KH$ .

Incremento de empuje activo y punto de aplicación

$$\Delta P_{ae} = \frac{3}{8} * K_n * (\gamma_{prom} * H^2)$$

$$\Delta P_{ae} = 6.85 \text{ Ton/m}$$

$$Y_a = \frac{3}{5} H = 6.84 \text{ m}$$

- Dimensionamiento de los Anclajes

Para determinar la capacidad de los anclajes, se tiene en cuenta las características físicas y mecánicas del suelo donde se construirá el bulbo, utilizando los valores de capacidad última del bulbo estimado en Geotechnical Engineering Circular No. 4 GROUND ANCHORS AND ANCHORED SYSTEMS, U.S Department of transportation, Federal Highway Administration.

**Tabla 11. Capacidad ultima del bulbo en suelos y rocas**

Material	Método de Construcción	Consistencia (Rango SPT)	Capacidad Ultima del Bulbo qu (Kpa)
Arenas y limos	Perforación a rotación	Baja (4-10)	70
		Media (11-30)	100
		<b>Densa (31-50)</b>	<b>130</b>

Fuente: Proposed Specifications for LRFD Soil-nailing Design and Construction

Se utilizó 130 kPa, ya que es el valor que mejor representa a los suelos del área estudiada.

*P=Carga pretensionamiento KN*

*qu=Capacidad ultima del bulbo KN/m2*

*p=Perimetro de la perforación*

*LBulbo=Longitud deBulbo*

*Fseguridad=Factor de seguridad,,S=1.3*

*LBulbo=PFSqup*

**Tabla 12. Características de los anclajes**

Carga de pretensionamiento (KN)	Capacidad ultima del bulbo qu (KN/m <sup>2</sup> )	Perímetro de la perforación (m)	Longitud del bulbo teórica (m)
250	260	0.10	8.0

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

Se debe garantizar equilibrio estático de las cargas actuantes sobre la pantalla, de esta manera se determina la separación horizontal [S] del grupo de anclajes.

$$S = \frac{\sum T_i * \text{Cose}\epsilon}{P_A + \Delta P_{AE}} = 2.50 \text{ m}$$

Para el diseño de esta pantalla se toma una separación horizontal máxima de 2.5 metros.

- **Longitudes de cuerpo del anclaje o longitudes libre de anclaje LL**

Se localiza el bulbo de presiones de los anclajes por fuera de la cuña de falla activa de Rankine, esta superficie de falla forma con la horizontal un ángulo de  $45+\phi/2$ , para que el ancla desarrolle la resistencia total pasiva se adiciona una distancia X que debe ser mayor o igual a 1.50 metros y se determina en función de la altura de la pantalla así,  $X= 0.2*H$ , se recomienda una longitud libre de anclaje mínima de 4.5 metros, sin embargo en algunos caso se podrá trabajar con una longitud libre menor, dependiendo de las condiciones del proyecto

**Tabla 13. Dimensionamiento y distribución de los anclajes**

Y (m)	Longitud total (m)	Longitud libre (m)	Longitud bulbo (m)	Carga (Ton)	Separación horizontal (m)
-1.50	13.0	5.0	8.0	25	2.5
-4.50	12.0	4.0	8.0	25	2.5
-7.50	12.0	4.0	8.0	25	2.5
-10.50	12.0	4.0	8.0	25	2.5

Fuente: E.D. Ingeotecnia S.A.S.

- Estabilidad al Volcamiento

Los momentos resistentes generados por los anclajes deben ser mayores o iguales a los inducidos por la sobrecarga, empuje de tierra e incremento de presión activa debido al sismo.

$$P_A S \cdot Y_A + \Delta P_{AE} \cdot S \cdot Y_{AE} \leq \sum Y_i \cos \epsilon \cdot T_i$$

$$422.66 \leq 579.56$$

A continuación se describe el procedimiento realizado para el análisis de estabilidad y determinación de los desplazamientos de la estructura proyectada.

#### **4.3. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES**

- Análisis de Estabilidad y cálculo del Factor de seguridad.

A continuación en la tabla 14 se presentan los parámetros utilizados en la generación de los modelos de verificación del diseño realizado por E.D. INGEOECNIA SAS

**Tabla 14. Parámetros y Características**

Parametros y características	
Longitud de Bulbo	8.0 metros
Diametro de Perforacion de Bulbo	4 "
Longitud Libre:	5 a 4 metros
Numero de Torones	3 Torones de ½", sin embargo puede ser que se garantice la carga de tensionamiento de diseño trabajando al 70% de la carga ultima
Carga de Pretensionamiento	25 Toneladas
Angulo de Inclinacion	15 grados
Separacion Horizontal	2.5 metros
Separacion Vertical	3 metros
Longitud Pantalla	31.7 metros
Bond Skin Friction (F/Area)	130 KPa
Capacidad de Barras	162.54 KN
Factor de Seguridad	1
Carga sismica (Condicion dinamica)	1.8

Fuente: Propia

**4.3.1. Análisis de los desplazamientos de la estructura.** Los principales resultados de un programa de elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y las tensiones en los puntos de tensión, incluyendo además los esfuerzos en los diferentes elementos estructurales que aparezcan.

La simulación de pantallas en Plaxis implica la intervención de numerosos parámetros, tanto del terreno como de las estructuras y cargas, necesarios para un cálculo completo y a medida que se va construyendo el modelo se van introduciendo datos geométricos y geotécnicos. A continuación en las tablas 15 a la 19, se presentan los parámetros utilizados en los cálculos de desplazamiento de la estructura de los modelos de verificación del diseño realizado por E.D. INGEOTECNIA SAS:

**Tabla 15. Parámetros y Características del suelo Aluvial**

Parámetros y características del Suelo Aluvial	
$\gamma_{unsat}$	18,900 kn/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	19,500 kn/m <sup>3</sup>
Eref:	6,280E+04 kn/m <sup>2</sup>
V(un)	0,300
cref:	20,000 kn/m <sup>2</sup>
$\phi$ (phi)	36,000°
$\psi$ (psi)	0°
G ref:	2,415E+04 kn/m <sup>2</sup>
Eoed:	8,454E+04 kn/m <sup>2</sup>
Vs:	111,900 m/s
Vp:	209,400 m/s
Fuerza:	Rigido

Fuente: Propia

**Tabla 16. Parámetros y Características del suelo Suelto**

Parámetros y características del Suelo Suelto	
$\gamma_{unsat}$	17,000 kn/m <sup>3</sup>
$\gamma_{sat}$	19,000 kn/m <sup>3</sup>
Eref:	2,2000E+04 kn/m <sup>2</sup>
V(un)	0,350
cref:	14,000 kn/m <sup>2</sup>
$\phi$ (phi)	25,000°
$\psi$ (psi)	0°
G ref:	8148,148 kn/m <sup>2</sup>
Eoed:	3,53E+04 kn/m <sup>2</sup>
Vs:	68,540 m/s
Vp:	142,700 m/s
Fuerza:	Rigido

Fuente: Propia

**Tabla 17. Propiedades de la Pantalla**

<b>Propiedades de la Pantalla</b>	
<b>EA:</b>	<b>6,000E+07 KN/M</b>
<b>EI:</b>	<b>4,400E+0,5 KN/M2</b>
<b>d:</b>	<b>0,297 m</b>
<b>W:</b>	<b>10,000 kn/m/m</b>

Fuente: Propia

**Tabla 18. Propiedades del Bulbo**

<b>Propiedades del Bulbo</b>	
<b>EA:</b>	<b>10,000E+05 KN/M</b>

Fuente: Propia

**Tabla 19. Propiedades del Anclaje**

<b>Propiedades del Anclaje</b>	
<b>EA:</b>	<b>7,981E+07 KN/M</b>
<b>Lspacing:</b>	<b>3m</b>

Fuente: Propia

#### **4.4. CONTROL PROPUESTO DE ESTABILIDAD**

**4.4.1. Control De Factore De Seguridad.** Para proceder al control de la evolución del factor de seguridad del talud, se plantea realizar el análisis por etapas que coincida con el proceso constructivo, que tiene en cuenta el avance en la excavación sin anclar y posteriormente anclada.

Es importante tener presente que al momento de dar solución a la inestabilidad de un talud, es necesario para cualquier obra de estabilización tener en cuenta los tres factores primordiales: la seguridad, funcionalidad y la economía.

En caso de que se determine un evento de inestabilidad se deben identificar los agentes que contribuyen en el para realizar actividades de recuperación de las condiciones de estabilidad y la mitigación de los efectos adversos que materializan la amenaza y pueden acarrear sobre otro tipo de estructura y los usuarios.

**4.4.2. Control Directo de desplazamientos.** Los deslizamientos o movimientos en masa no son iguales en todos los casos. Para evitarlos o mitigarlos (reducir el riesgo) es indispensable realizar control directo en obra, realizando la medición de desplazamientos en superficie y en el interior del terreno que permita detectar el movimiento de una zona determinada del talud o de todo el conjunto, y conocer la dirección y velocidad del mismo. Los sistemas de medida de desplazamientos en superficie estarán condicionados por la precisión que se pretenda y por la magnitud de los movimientos.

Los movimientos en el interior se miden con inclinómetros y extensómetro. Además, de ser útiles para la medida de la velocidad y dirección del movimiento, estos sistemas permiten localizar las superficies de rotura.

La medida de las presiones intersticiales en el interior del talud se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetro en sondeos de reconocimiento.

Los controles directos se deben realizar semanalmente y posteriormente compararlos con los resultados teóricos del modelo realizado en el software PLAXIS 2d para garantizar la seguridad, reducir al mínimo los costos de

construcción, control en los procedimientos constructivos, protección legal, mejorar las relaciones públicas y avanzar en la técnica de la instrumentación.

En la medida en que los resultados de los desplazamientos reales de la estructura sean menores que los desplazamientos teóricos de los modelos, se podrían proponer ajustes que permitan la optimización de los recursos.

**4.4.3 Procedimiento Propuesto para el Control de la Estabilidad.** El procedimiento propuesto para el control de la estabilidad en obra, se basa en realizar el chequeo a medida que se vaya ejecutando el avance en cada etapa de construcción, verificando de esta manera que se cumplan los factores básicos mínimos directos de seguridad de la NSR-10; para condición estática 1.5 y para condición seudo estática 1.05, especialmente para las etapas sin anclaje.

El chequeo de desplazamientos es conveniente realizarlo para las condiciones sin y con anclaje, con el fin de controlar su evolución durante todo el proceso de construcción. A Continuación en la tabla 20 se presenta el proceso de chequeo propuesto.

**Tabla 20. Procedimiento para el control de estabilidad.**

ETAPA	DESCIPCION DEL PROCESO	CHEQUEO
ETAPA 1	Excavación sin Anclaje.	Factor de Seguridad y Desplazamiento
	Excavación con Anclaje.	Desplazamiento
ETAPA 2	Excavación sin Anclaje.	Factor de Seguridad y Desplazamiento
	Excavación con Anclaje.	Desplazamiento
ETAPA 3	Excavación sin Anclaje.	Factor de Seguridad y Desplazamiento
	Excavación con Anclaje.	Desplazamiento
<b>Nota:</b> De la misma manera se debe continuar el proceso hasta la última etapa de construcción.		

Fuente: Propia

**4.4.4. Posibles Soluciones para los Excesos de Deformación.** Al realizar el control de deformaciones se pueden determinar desplazamientos del terreno que

afecten la estructura de contención; por consiguiente a continuación se plantean algunas soluciones de estabilización.

1. Deformaciones excesivas durante la construcción:

- Reformulación del sistema de anclaje, bien sea aumentando la tensión, por colocación de más anclajes y/o modificación de la posición de los mismos.

2. Deformación excesiva después de la construcción:

- Viga de Coronación con sección suficiente para disminuir la deformación en la parte superior.
- Colocar una viga cinturón con la finalidad de soportar de forma anular los esfuerzos y prevenir deformaciones excesivas en la parte central de la estructura.
- Colocación de puntales, cuando se considera inminente la falla por deformaciones excesivas.

#### **4.5. ANALISIS DE ESTABILIDAD**

Los métodos de equilibrio limite son los más utilizados ampliamente para el análisis de la estabilidad de taludes y han sido usados por varias décadas para taludes terrestres sujetos a fuerzas y el principio básico que incluye este tipo de análisis es el cálculo de los momentos o fuerzas actuantes y los momentos o fuerzas resistentes de un análisis determinístico, el factor de seguridad contra la falla es tomado como la relación entre las fuerzas resistentes y los momentos o fuerzas actuantes. El talud es considerado estable si el factor de seguridad es mayor que uno. La no determinación del factor del resultado de estos análisis es una relación entre la probabilidad de falla y el ancho y profundidad de la superficie de falla.

Para cada nivel del talud se realizó el análisis de estabilidad requerido con sus correspondientes resultados en términos del factor de seguridad, “cuatro niveles”, el cual se ha calculado utilizando los métodos de Fellenius, Bishop, Janbu y Spencer y el programa SLOPE/W.

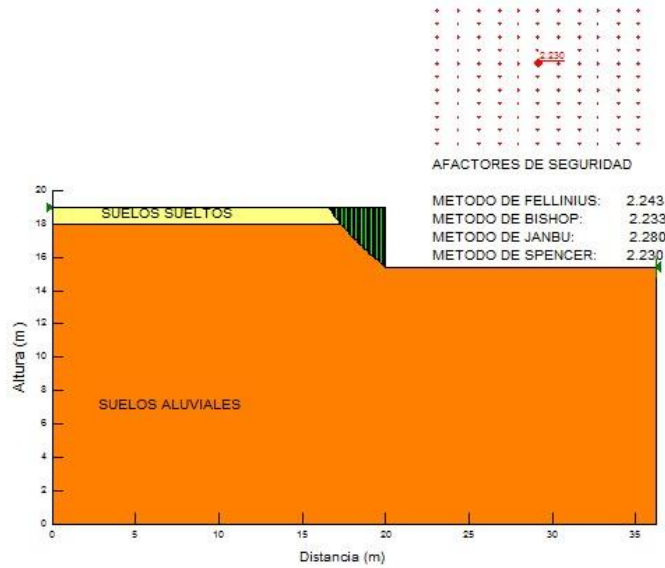
En el presente trabajo el análisis se hizo para el mecanismo de falla circular y los resultados obtenidos se indican en la Tabla 21 Con el fin de visualizar los resultados de las superficies de falla de la modelación para los diferentes métodos.

**Tabla 21. Factores de Seguridad**

ETAPAS		CONDICION	METODO DE FELLENIUS	METODO DE BISHOP	METODO DE JANBU	METODO DE SPENCER
ETAPA 1	SIN ANCLAJE	Estático	2.243	2.233	2.280	2.230
		Dinámico	1.400	1.408	1.443	1.405
	CON ANCLAJE	Estático	3.675	3.677	3.718	3.673
		Dinámico	2.470	2.482	2.493	2.476
ETAPA 2	SIN ANCLAJE	Estático	2.034	1.987	2.097	1.999
		Dinámico	1.276	1.239	1.292	1.293
	CON ANCLAJE	Estático	2.901	2.862	2.963	2.872
		Dinámico	1.731	1.701	1.738	1.709
ETAPA 3	SIN ANCLAJE	Estático	1.891	1.852	1.931	1.861
		Dinámico	1.064	1.022	1.074	1.031
	CON ANCLAJE	Estático	2.196	2.172	2.230	2.178
		Dinámico	1.263	1.247	1.259	1.250
ETAPA 4	SIN ANCLAJE	Estático	1.538	1.499	1.568	1.509
		Dinámico	0.977	0.933	0.981	0.948
	CON ANCLAJE	Estático	1.870	1.860	1.889	1.863
		Dinámico	1.095	1.071	1.103	1.073

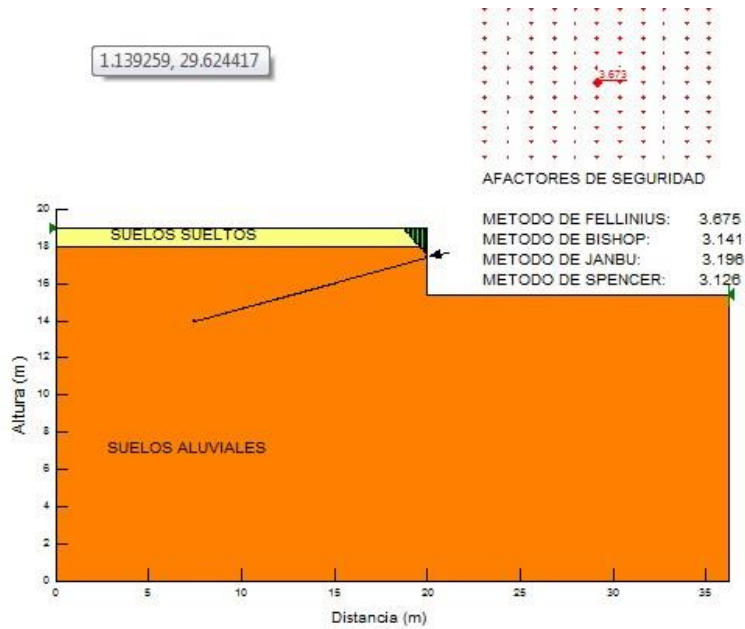
A continuación en las figuras de 20 a la 35 se presentan los resultados individuales para cada una de las etapas en condiciones estática, dinámica, con anclaje y sin anclajes para cada una de las etapas de construcción.

**Figura 20. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 1)**



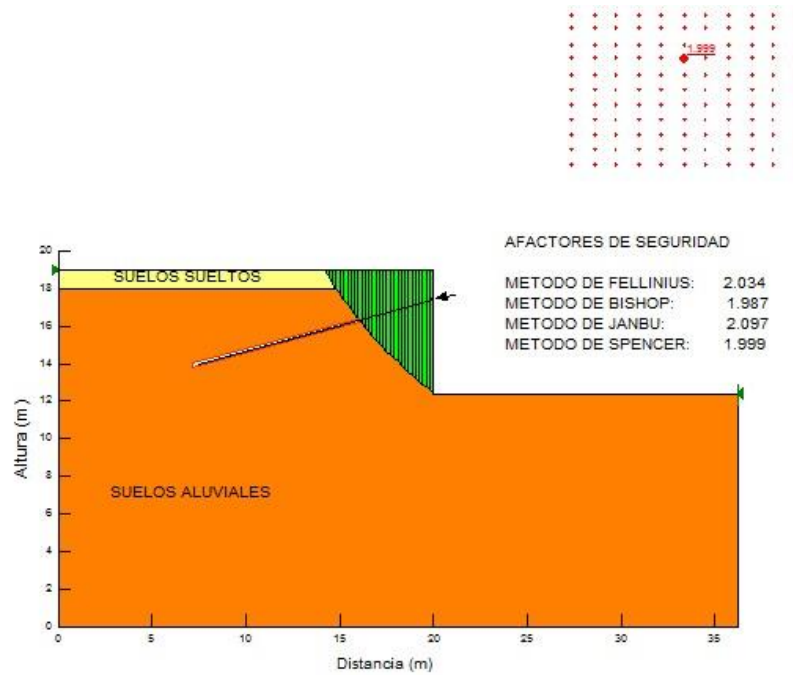
Fuente: Propia

**Figura 21. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 1)**



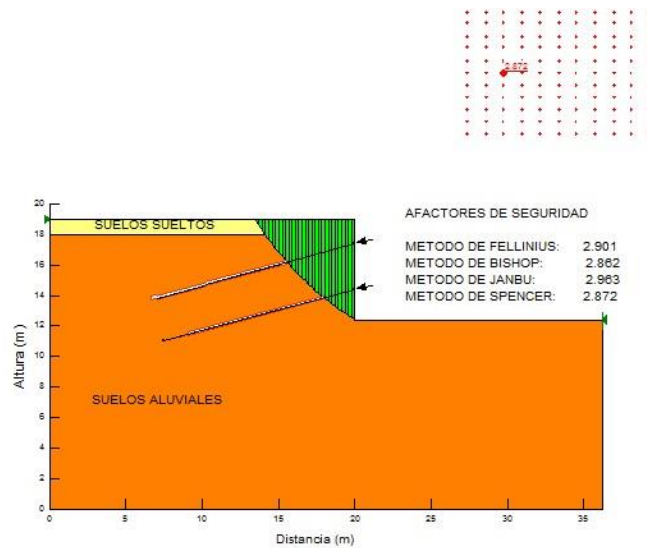
Fuente: Propia

**Figura 22. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 2)**



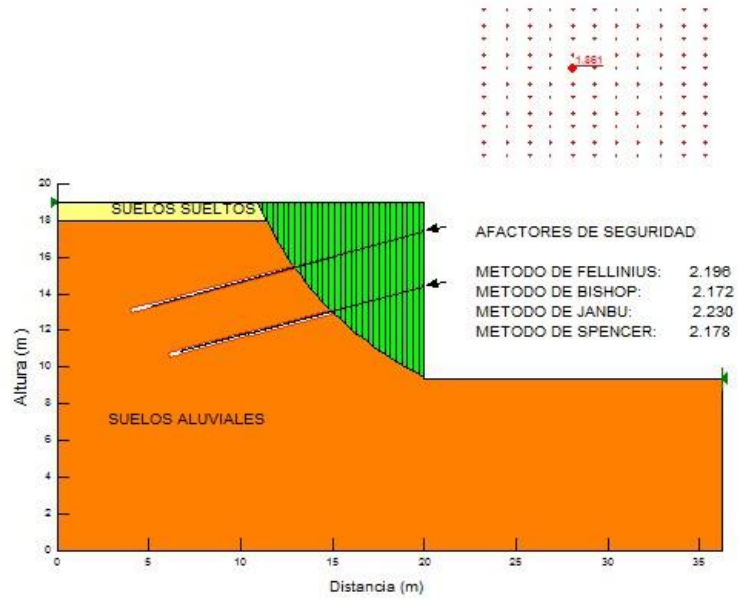
Fuente: Propia

**Figura 23. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 2)**



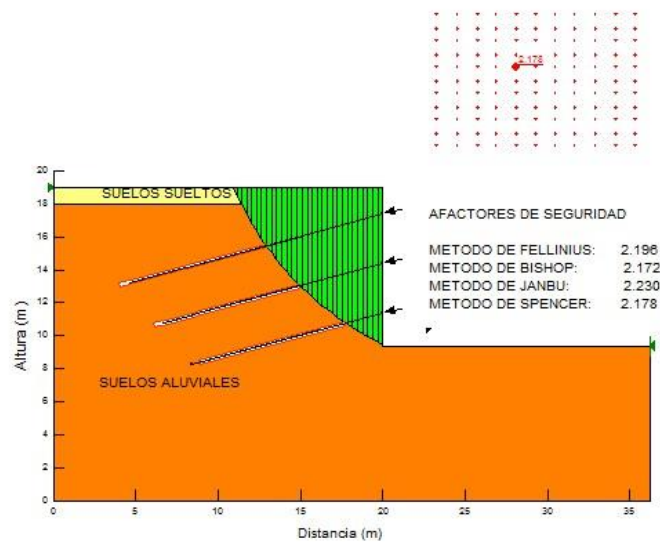
Fuente: Propia

**Figura 24. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 3)**



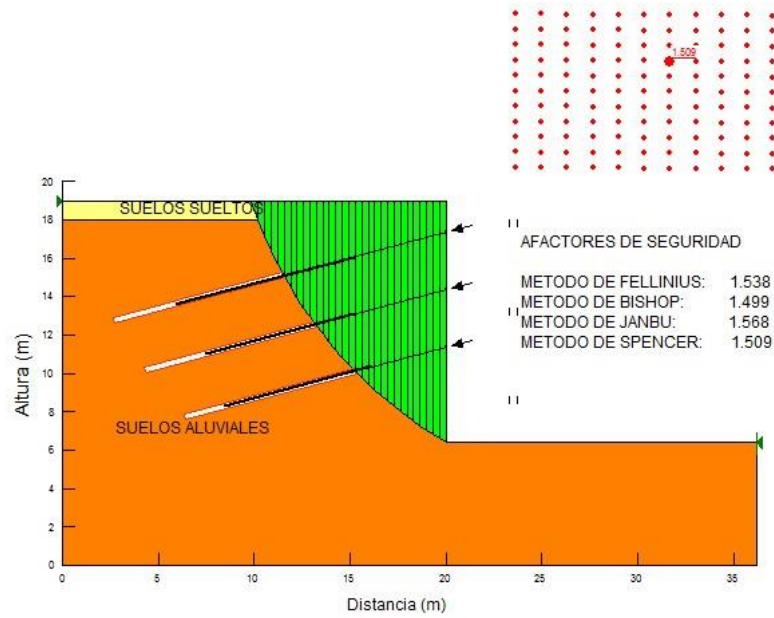
Fuente: Propia

**Figura 25. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 3)**



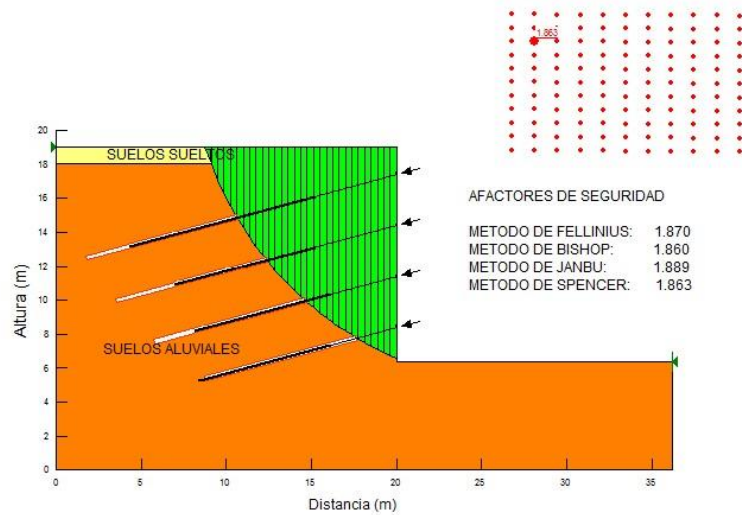
Fuente: Propia

**Figura 26. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Sin Anclaje (Etapa 4)**



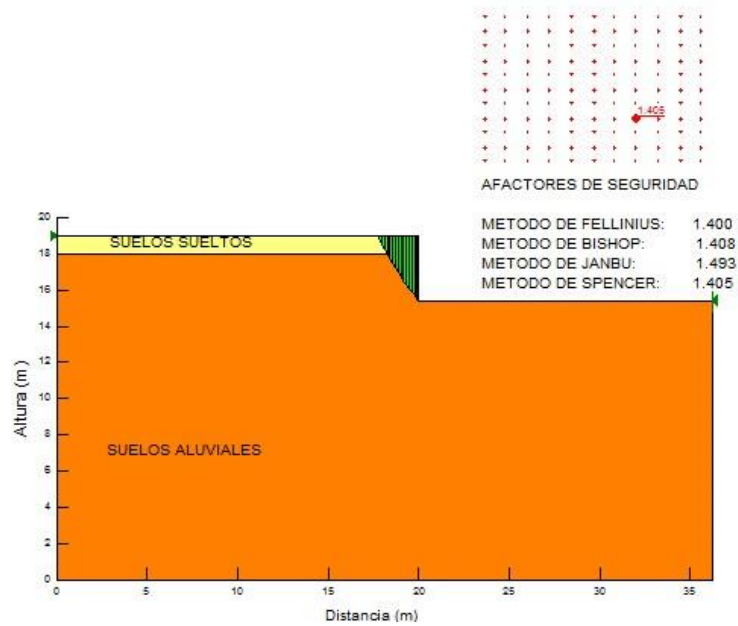
Fuente: Propia

**Figura 27. Análisis de estabilidad con pantalla condición estático- Con Anclaje (Etapa 4)**



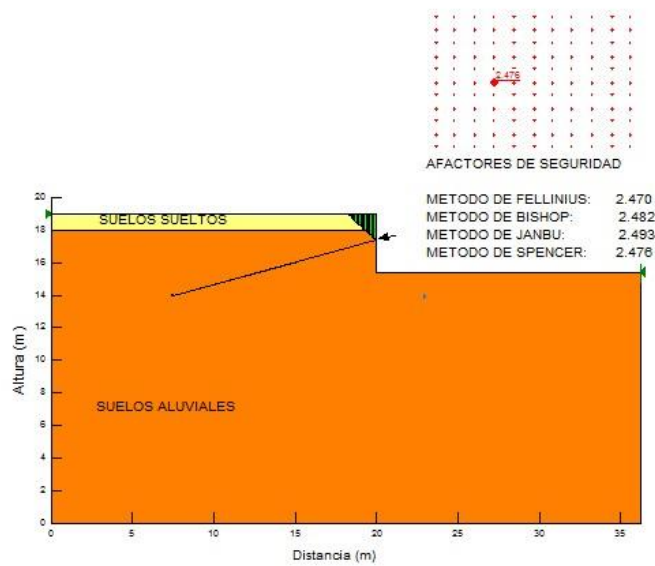
Fuente: Propia

**Figura 28. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 1)**



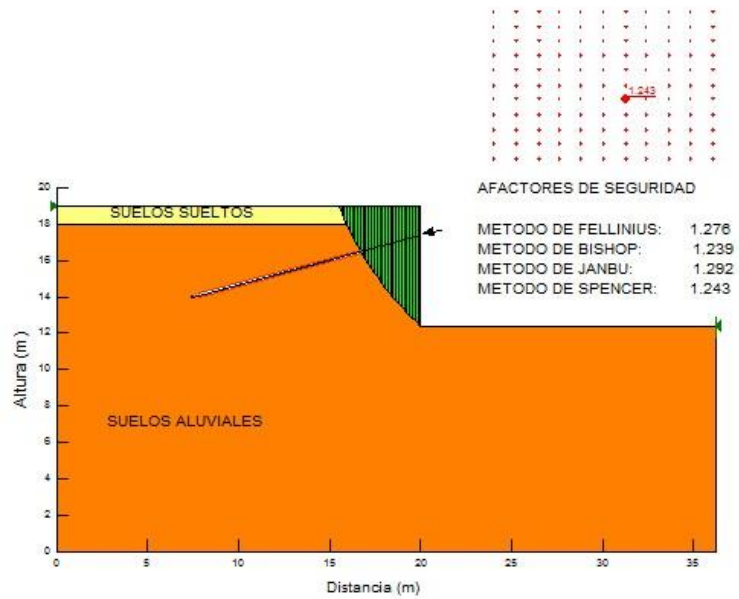
Fuente: Propia

**Figura 29. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 1)**



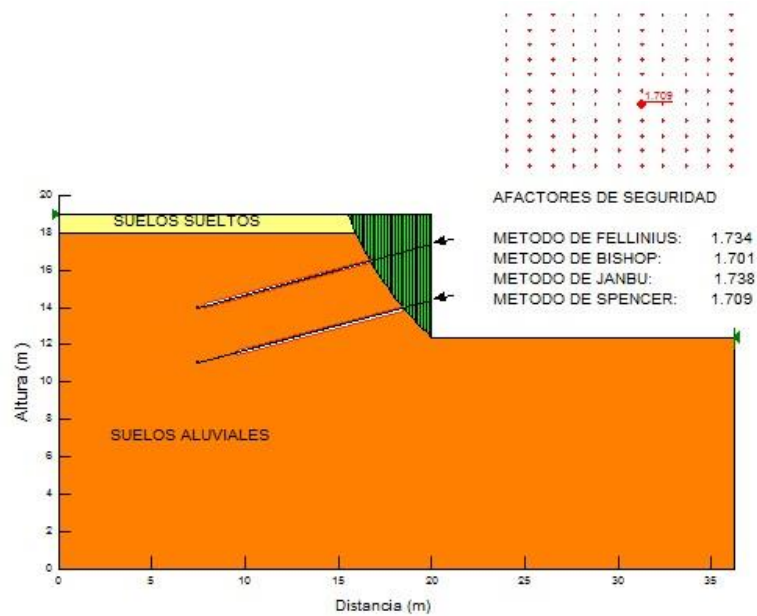
Fuente: Propia

**Figura 30. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 2)**



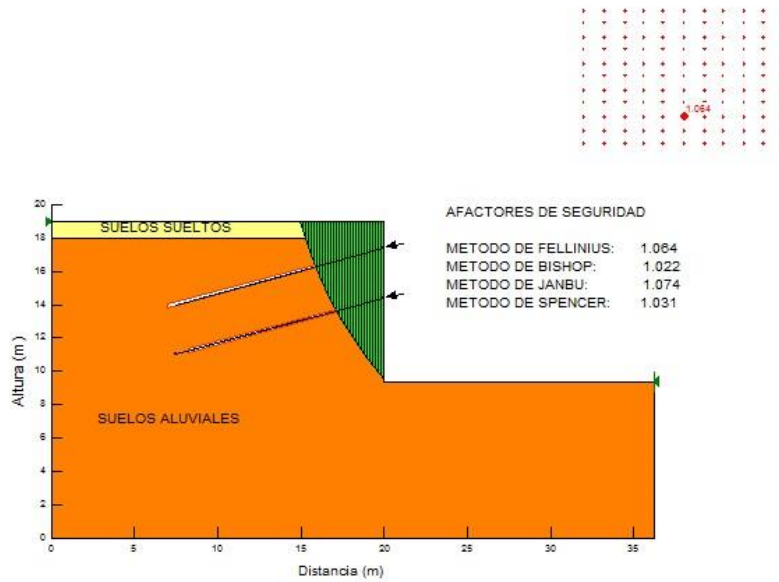
Fuente: Propia

**Figura 31. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 2)**



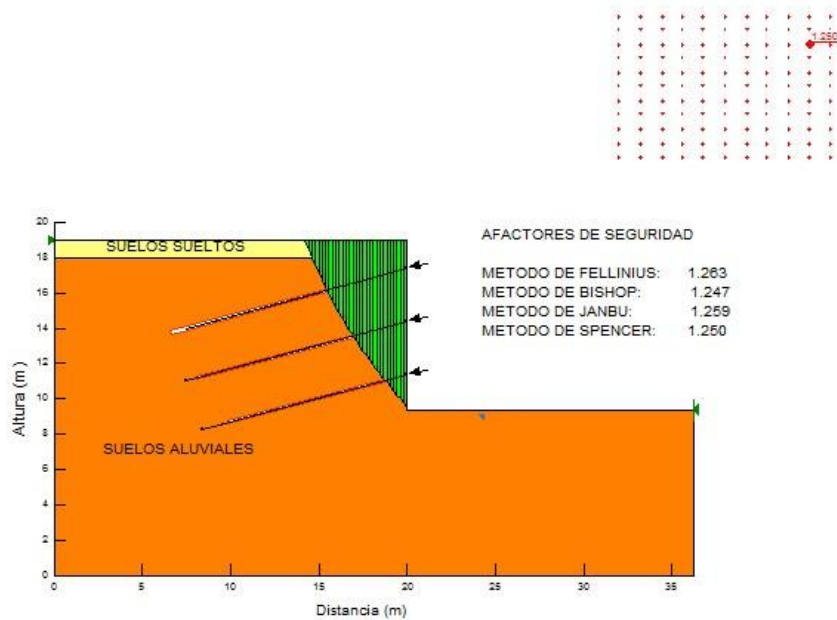
Fuente: Propia

**Figura 32. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 3)**



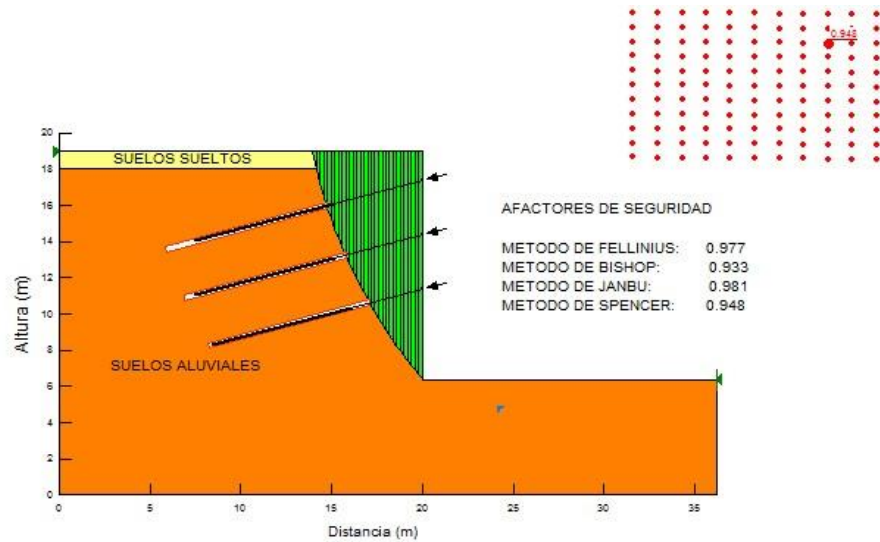
Fuente: Propia

**Figura 33. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 3)**



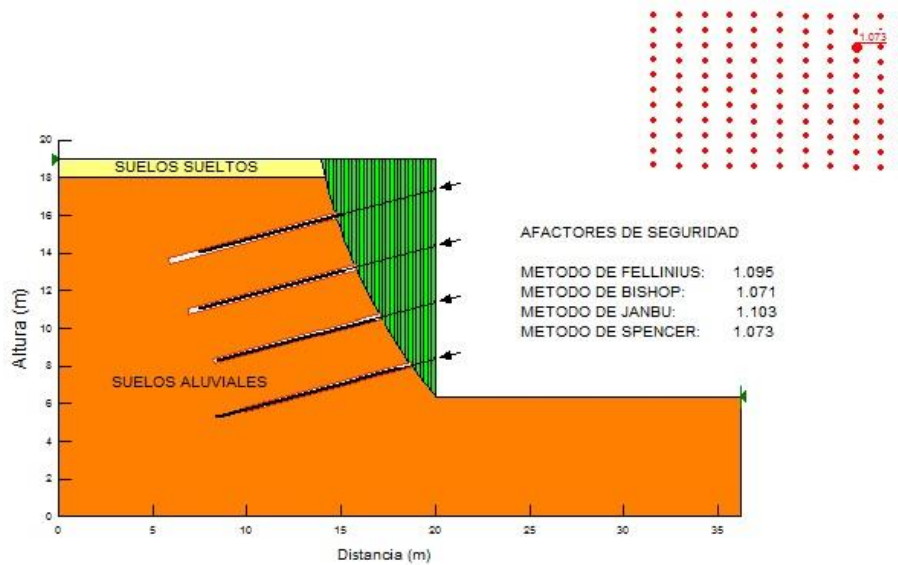
Fuente: Propia

**Figura 34. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Sin Anclaje (Etapa 4)**



Fuente: Propia

**Figura 35. Análisis de estabilidad con pantalla condición Dinámico- Con Anclaje (Etapa 4)**



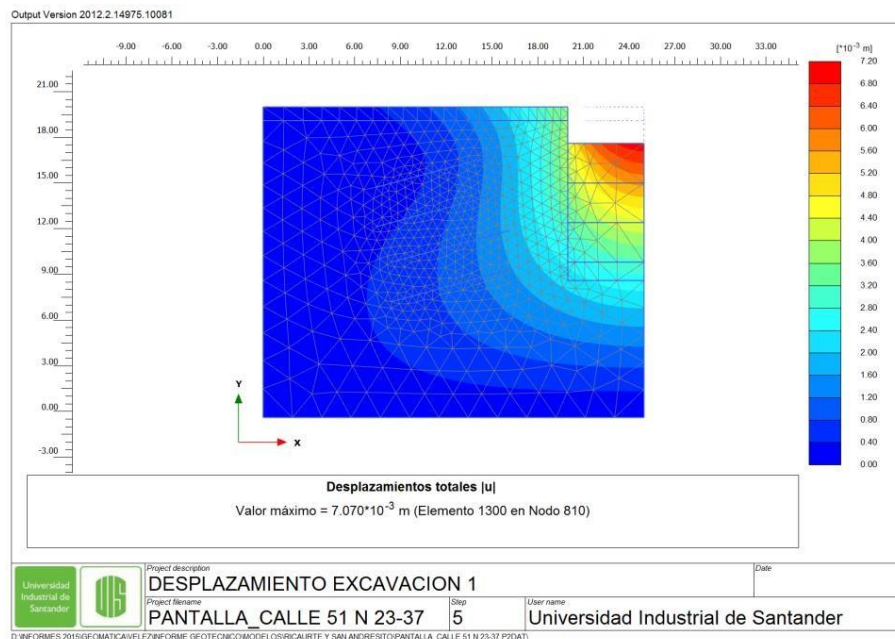
Fuente: Propia

## 4.5 ANALISIS DE DEFORMACIONES

Para obtener los desplazamientos en las pantallas y los esfuerzos en el suelo en cada una de las etapas de excavación, se realizó la modelación numérica obteniendo los desplazamientos horizontales utilizando los parámetros del terreno determinados a partir de los estudios de suelos.

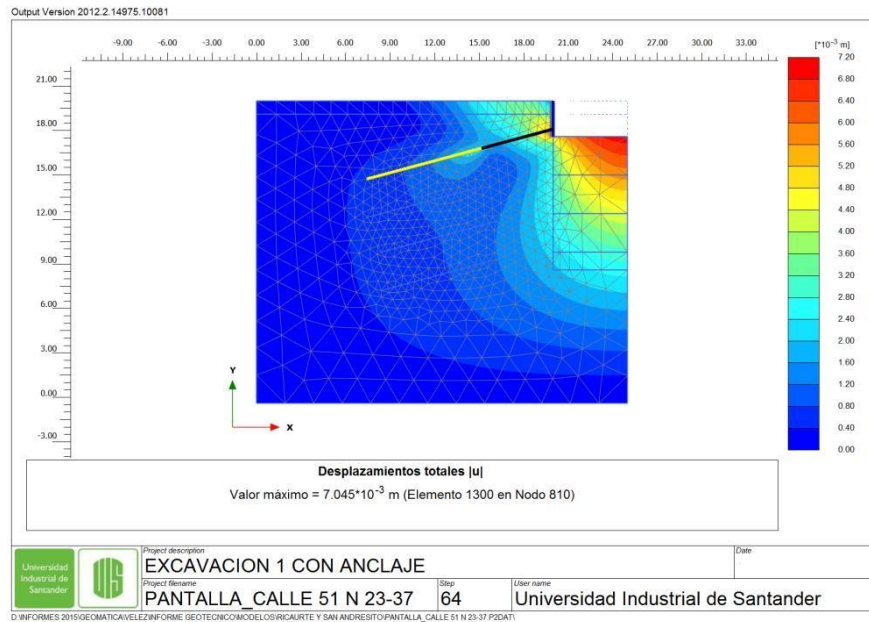
Resolviendo el modelo de elementos finitos, para el análisis de deformaciones se utilizó el programa Plaxis 2d, el cual permite determinar las deformaciones teóricas para cada una de las etapas de construcción. A continuación se muestra en las figuras 36 a la 45, Los desplazamientos totales más importantes se producen en la pantalla y son soportados por la misma luego de realizar la excavación. Los desplazamientos totales son obtenidos a partir de las componentes de desplazamiento horizontal (x) y vertical (y) en todos los nodos al final del cálculo.

**Figura 36. Desplazamiento Excavación Etapa 1**



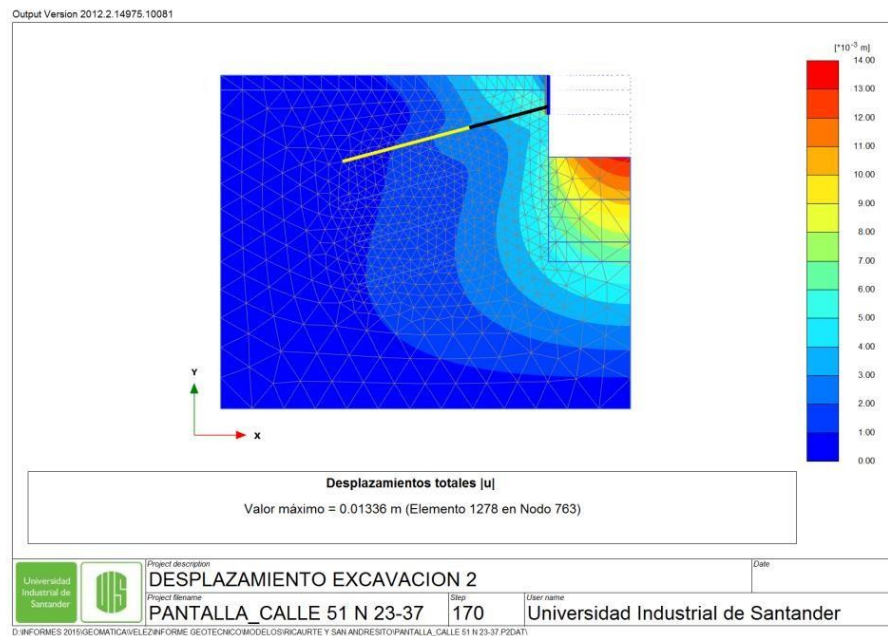
Fuente: Propia

**Figura 37. Excavación 1 con Anclaje**



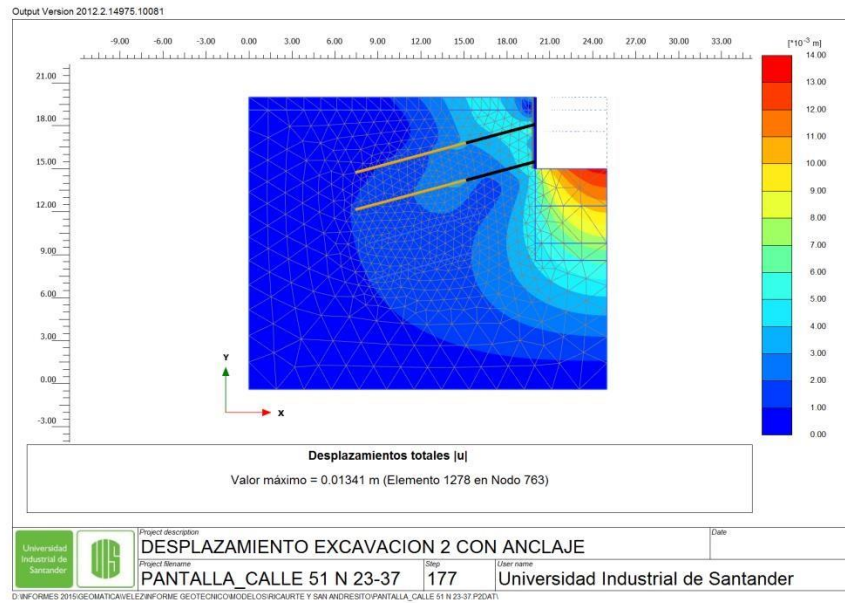
Fuente: Propia

**Figura 38. Desplazamiento Excavación Etapa 2**



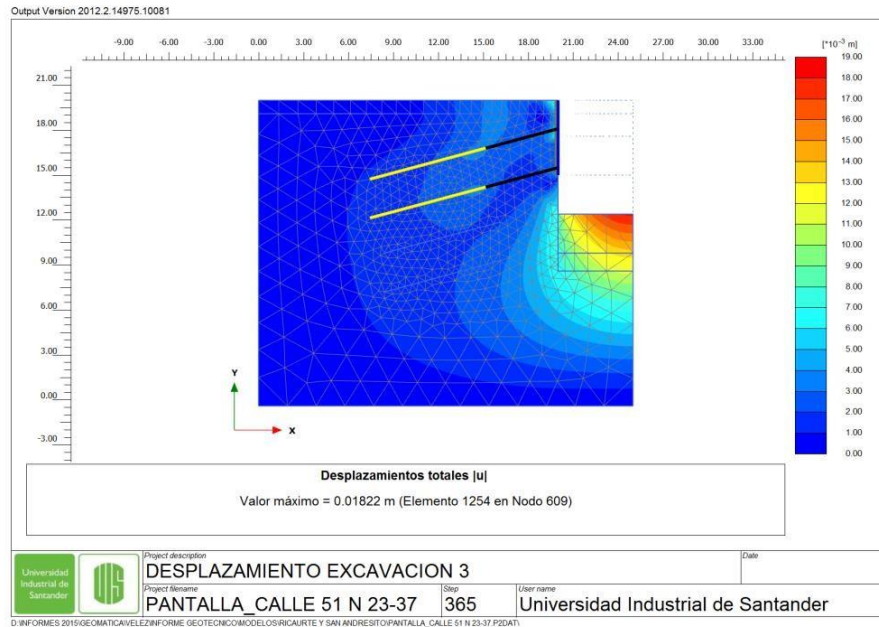
Fuente: Propia

**Figura 39. Excavación 2 con Anclaje**



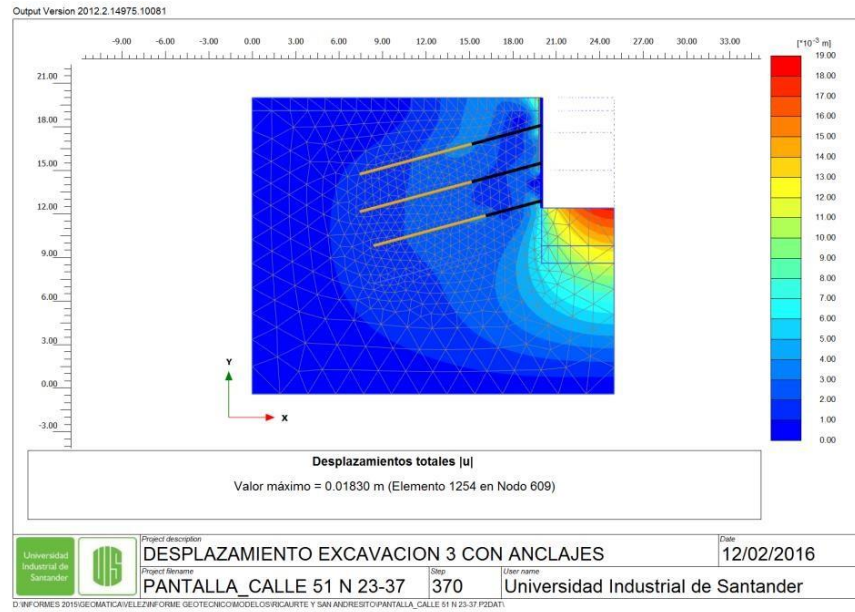
Fuente: Propia

**Figura 40. Desplazamiento Excavación Etapa 3**



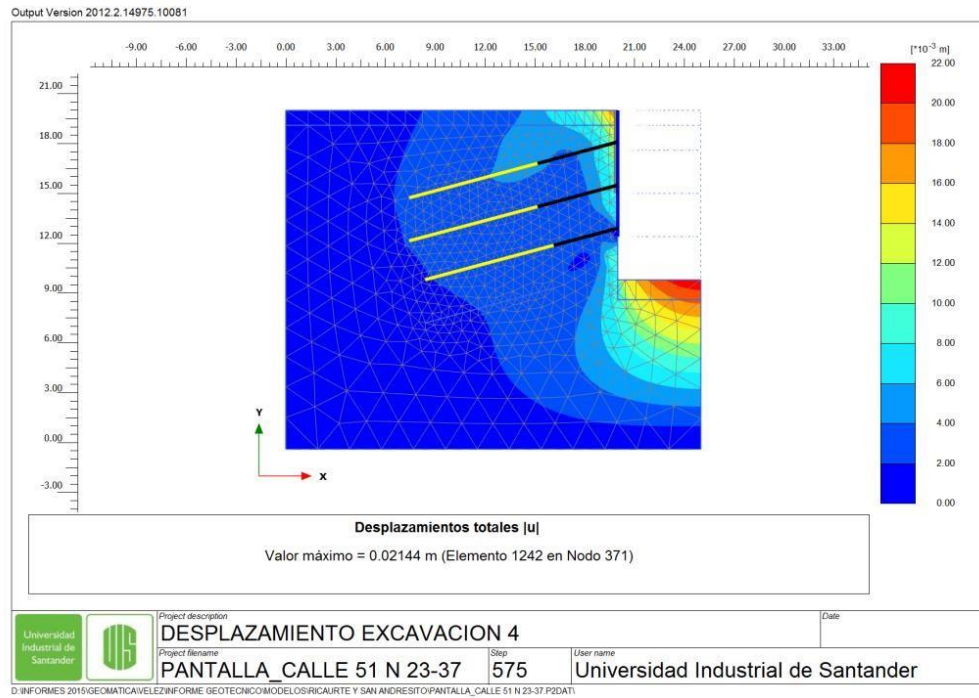
Fuente: Propia

**Figura 41. Excavación 3 con Anclaje**



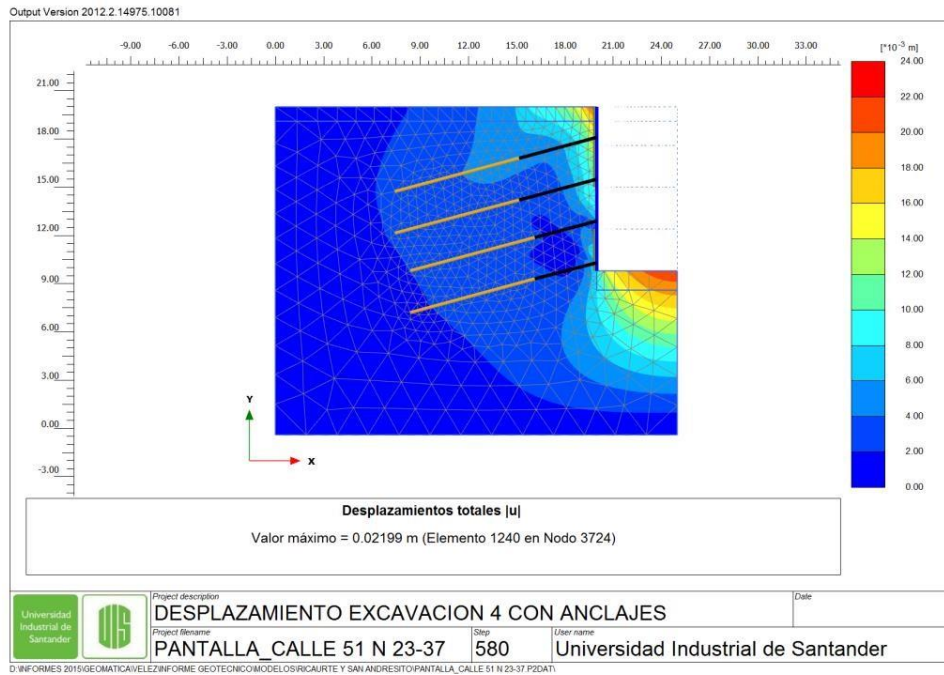
Fuente: Propia

**Figura 42. Desplazamiento Excavación Etapa 4**



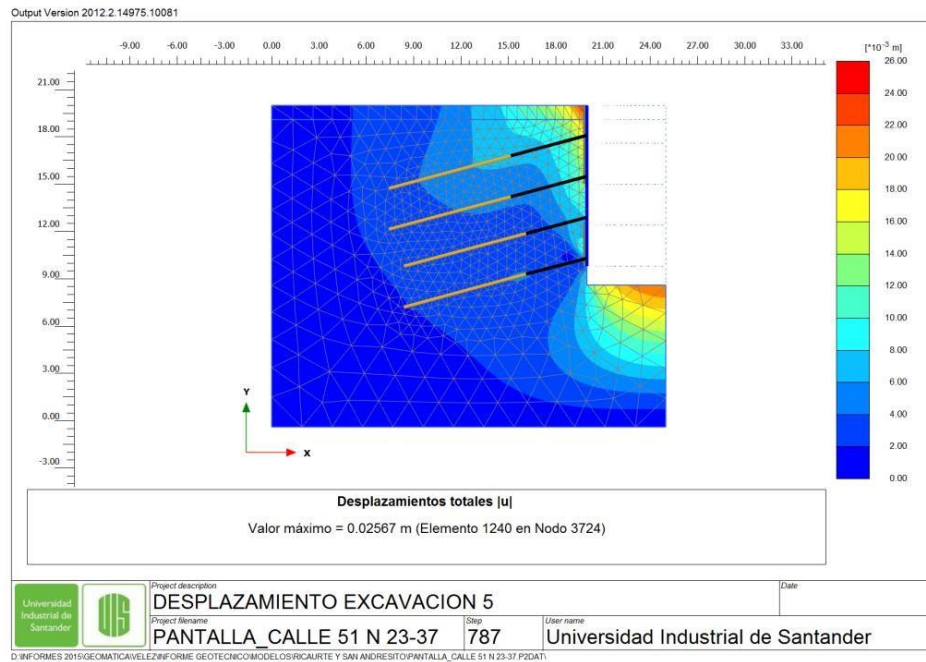
Fuente: Propia

**Figura 43. Excavación 4 con Anclaje**



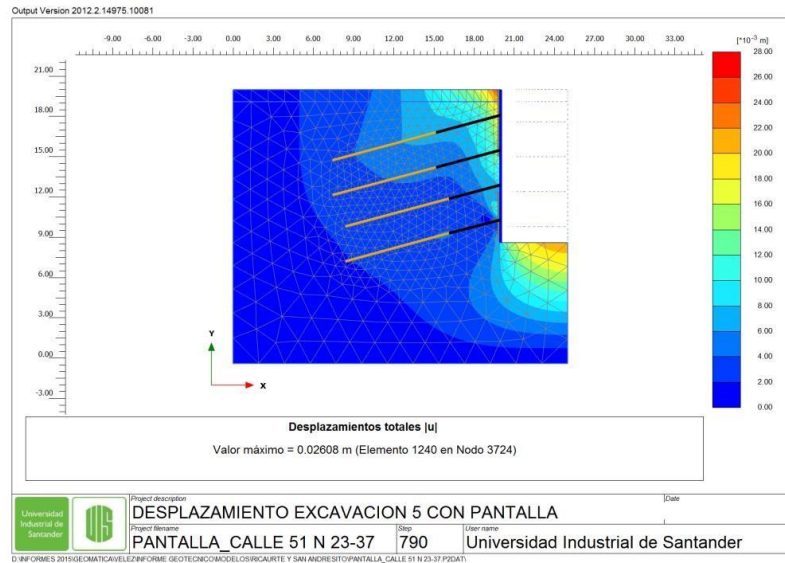
Fuente: Propia

**Figura 44. Desplazamiento Excavación Etapa 4**



Fuente: Propia

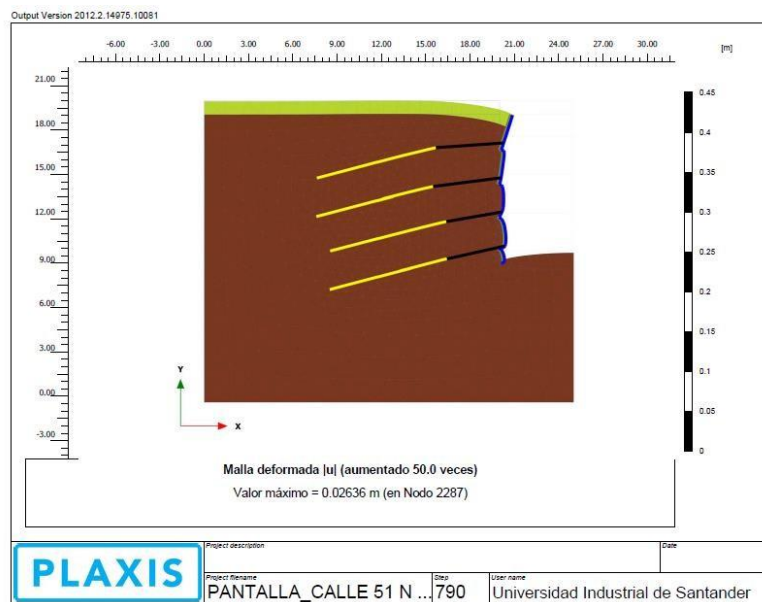
**Figura 45. Excavación 4 con Anclaje**



Fuente: Propia

En la figura 46 se muestra el modelo efectuado para la pantalla Norte por el método de elementos finitos.

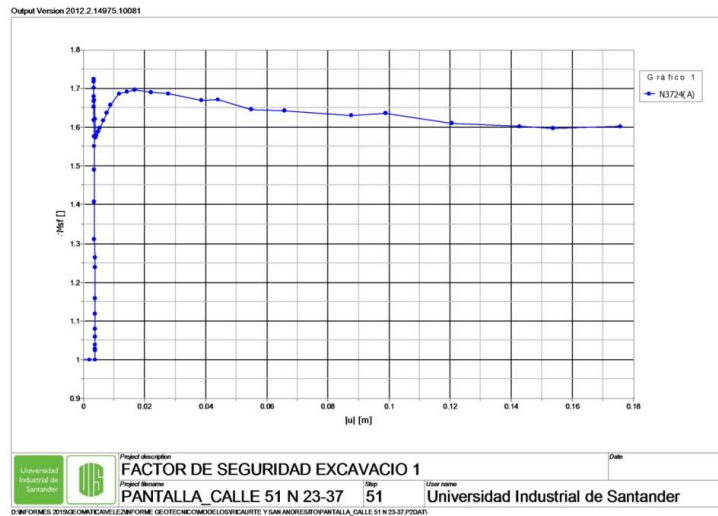
**Figura 46. Modelo Geométrico**



Fuente: Propia

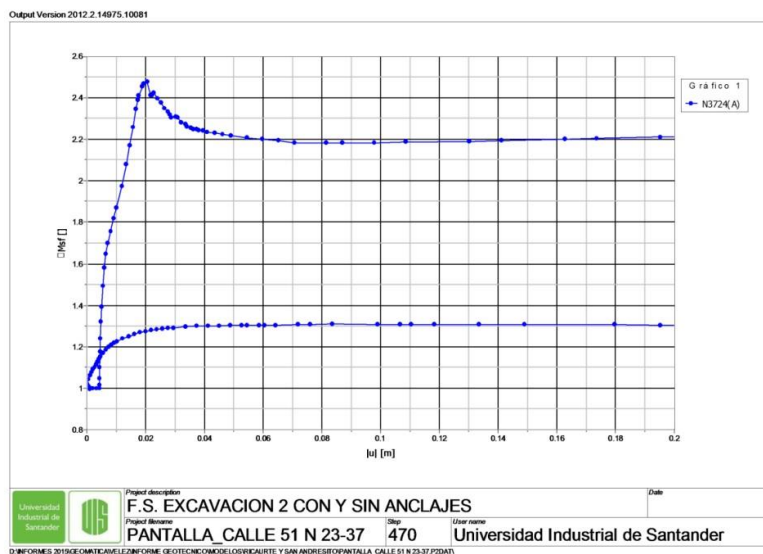
Los Factores seguridad cumplieron con la normativa NSR 10, a continuación en las figuras 47 a la 51 se muestra los factores de seguridad obtenidos mediante el método de elementos finitos para las condiciones estática, dinámica, con anclaje y sin anclajes para cada una de las etapas

**Figura 47. Factor de seguridad excavación Etapa 1**



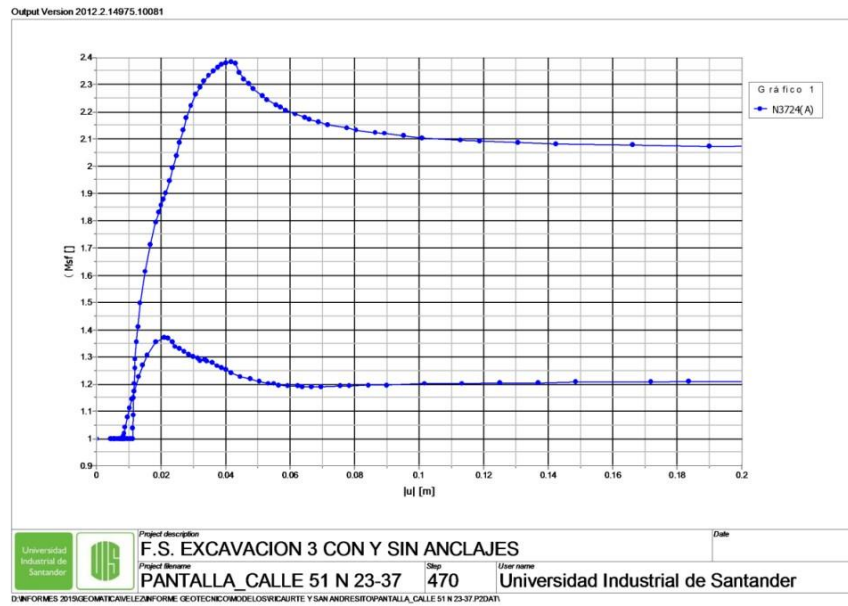
Fuente: Propia

**Figura 48. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 2**



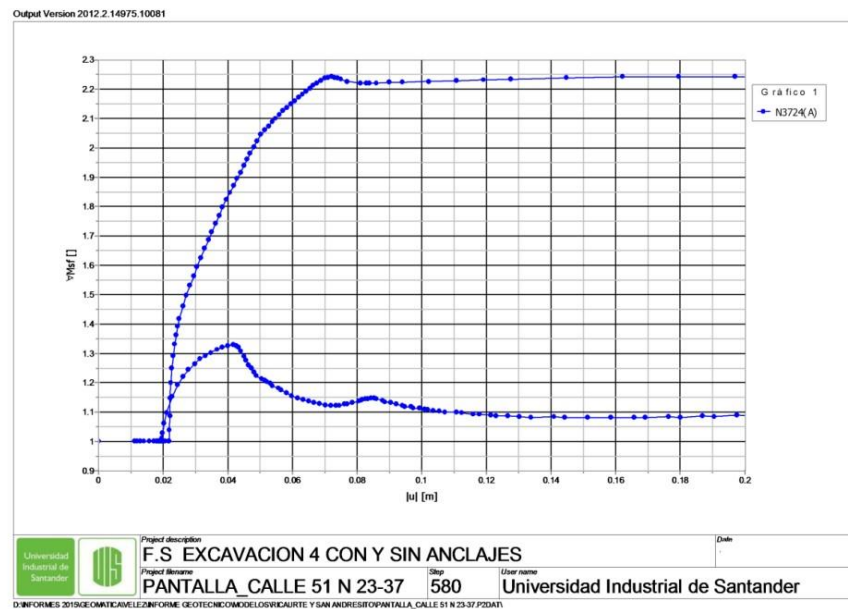
Fuente: Propia

**Figura 49. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 3**



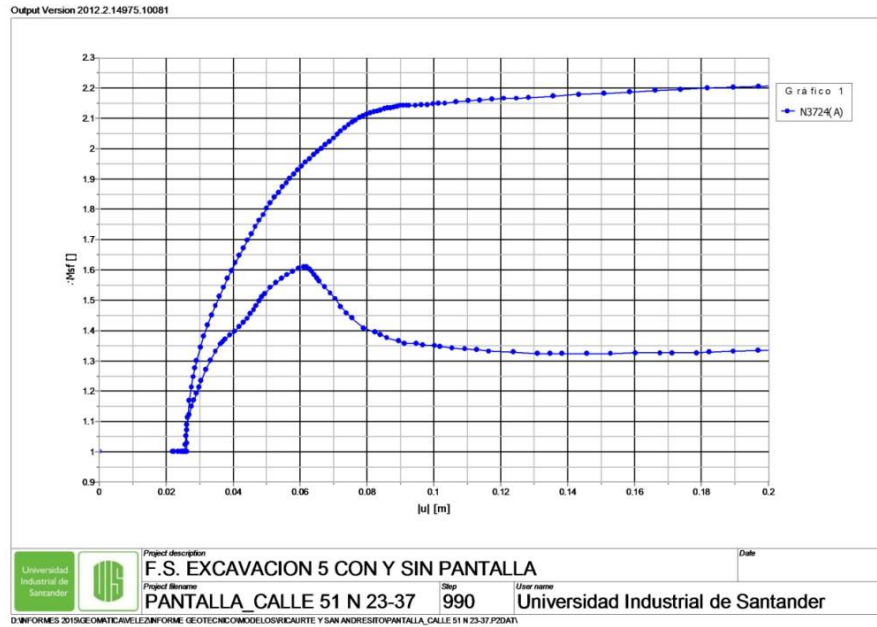
Fuente: Propia

**Figura 50. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 4**



Fuente: Propia

**Figura 51. Factor de seguridad excavación con Anclaje Etapa 5**

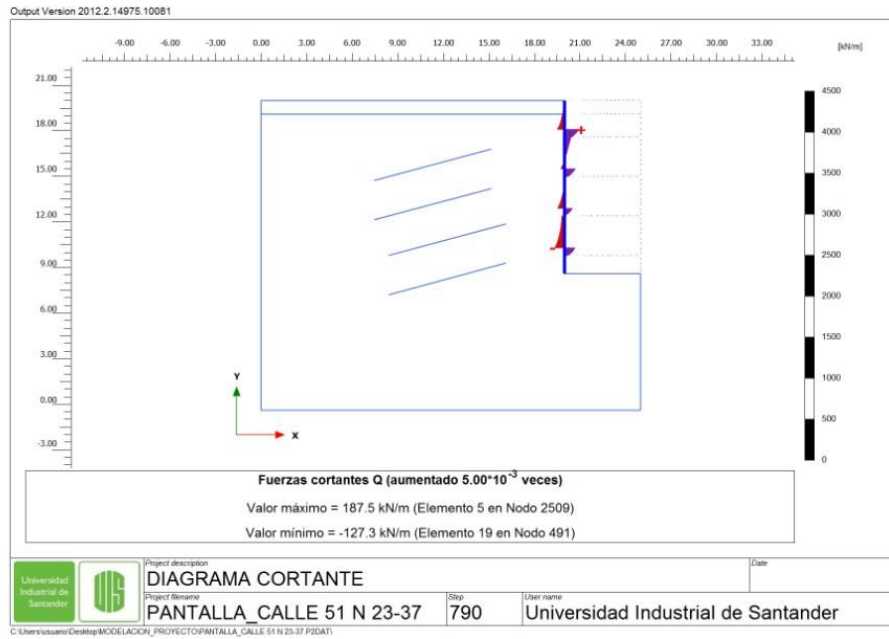


Fuente: Propia

Los modelos estudiados hasta ahora involucraban la estabilidad y equilibrio externo de la estructura. Para completar el análisis se hace necesario el conocimiento de las fuerzas internas en cada uno de los elementos que componen el sistema estructural.

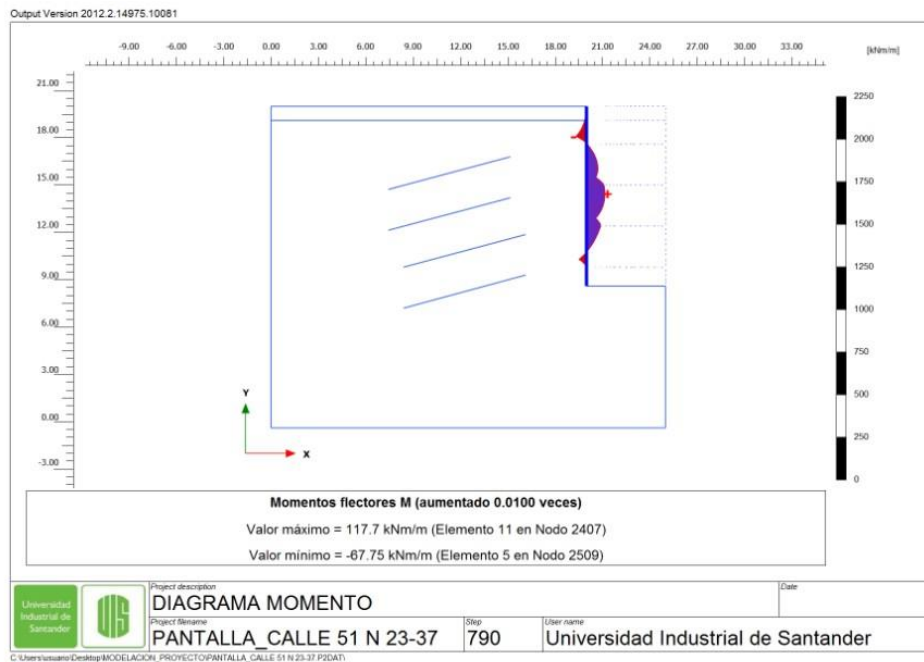
De acuerdo a los resultados de las modelaciones realizadas mediante los métodos elementos finitos, a continuación se presenta las figuras 52 a la 54 los diagramas de cortante, diagrama de momento y fuerza axial del presente estudio

**Figura 52. Diagrama de Cortante**



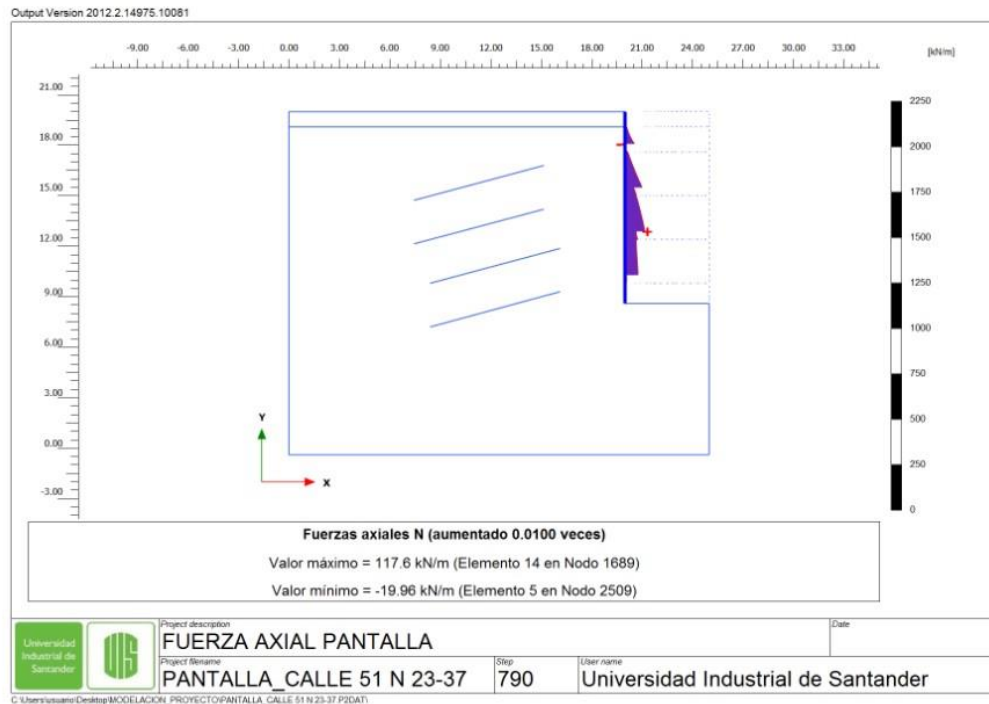
Fuente: Propia

**Figura 53. Diagrama de Momento**



Fuente: Propia

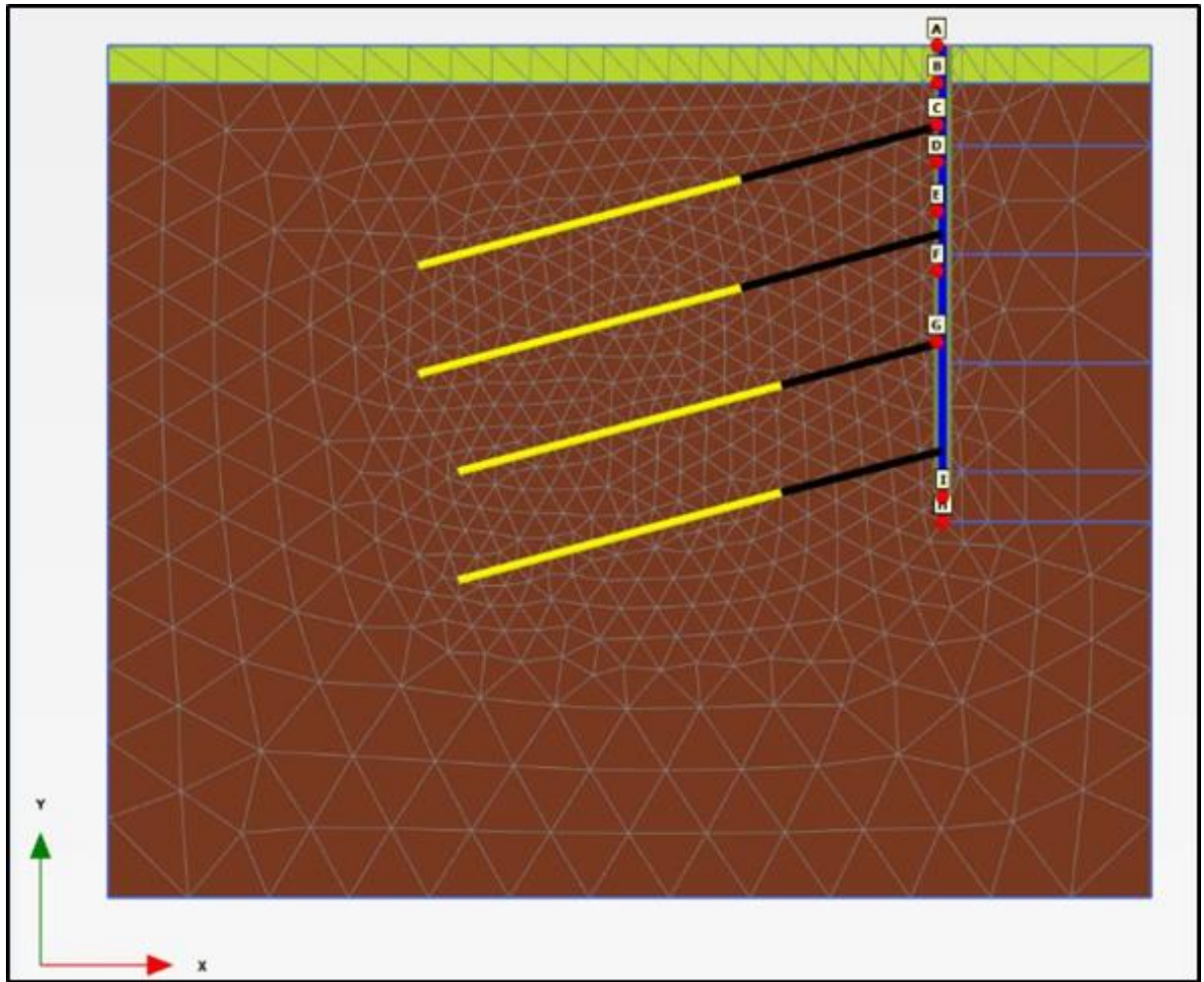
**Figura 54. Diagrama de Fuerza Axial**



Fuente: Propia

Para realizar un control de desplazamiento del suelo y de la estructura de contención proyectada, se tomaron cinco puntos (A, D, F, G, I) de control en el modelo. A continuación en la figura 55 se presenta la ubicación de cada uno

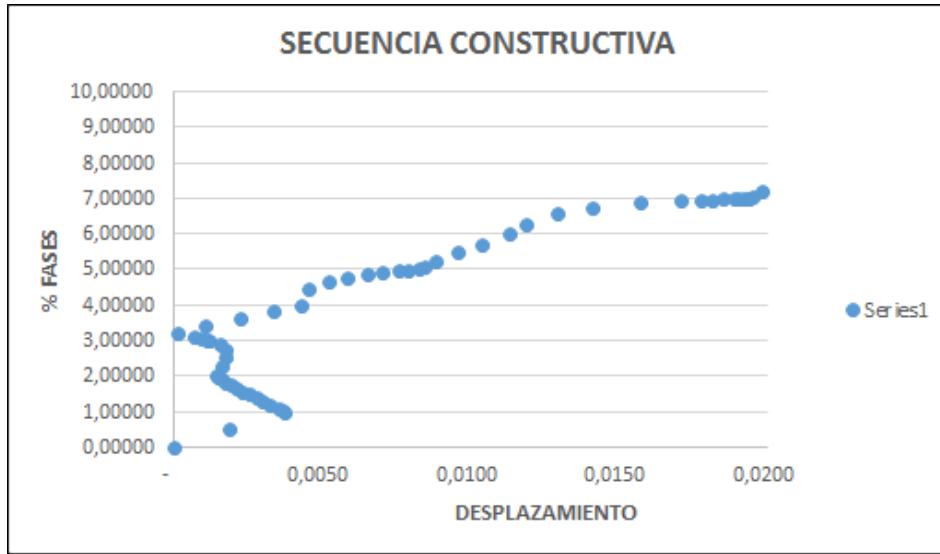
Figura 55. Puntos de control de desplazamiento de la estructura



Fuente: Propia

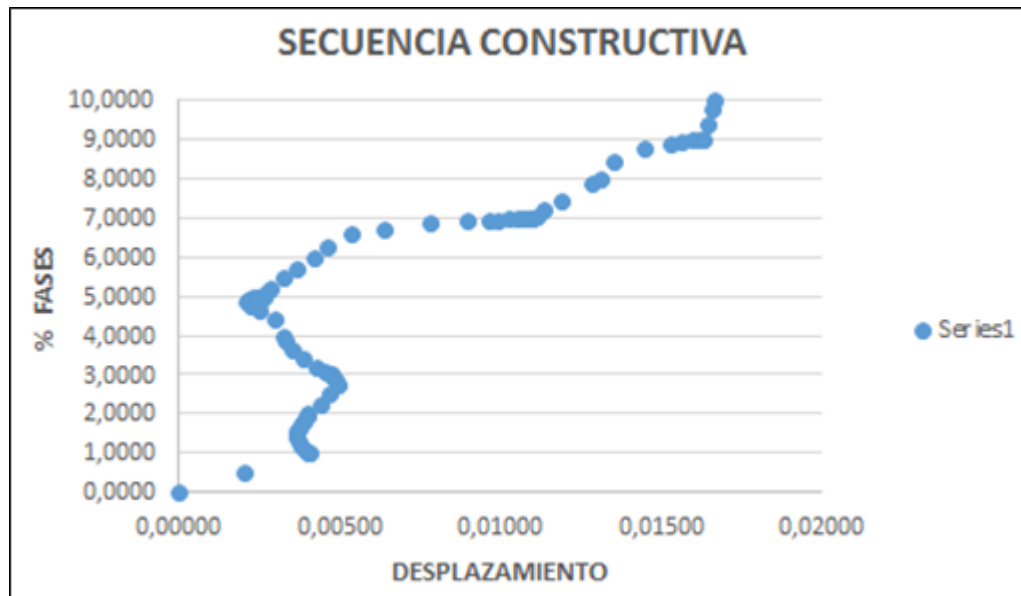
A continuación en las figuras de la 56 a la 60 se presenta el comportamiento de la estructura en los diferentes puntos de control, en el registro se observa que el punto crítico "A", presenta un máximo desplazamiento 0.026 m.

**Figura 56. Punto de control Ide desplaamiento de la estructura "A"**



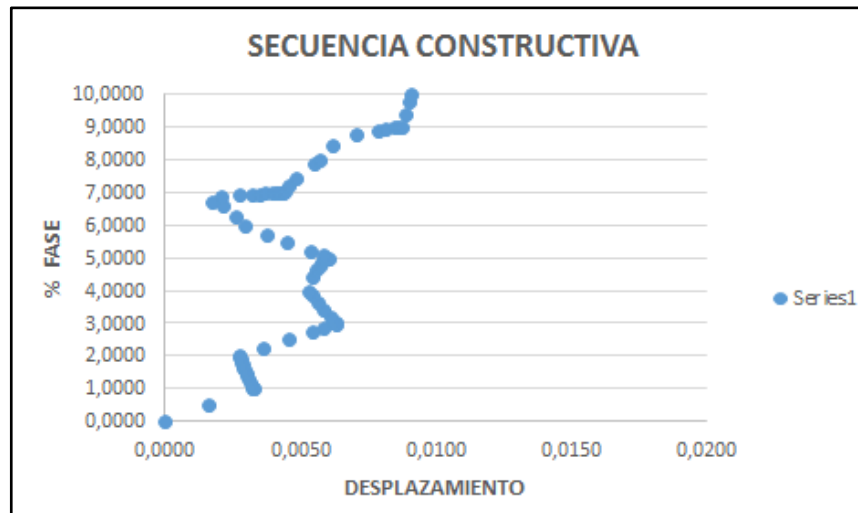
Fuente: Propia.

**Figura 57. Punto de control de desplazamiento de la estructura "D"**



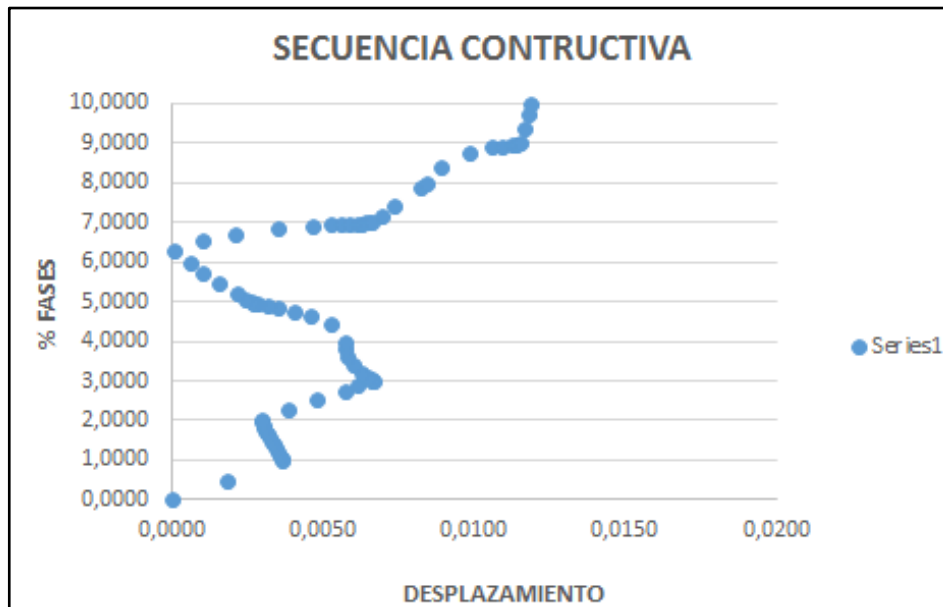
Fuente: Propia

**Figura 58. Punto de control Ide desplaamiento de la estructura “F”**



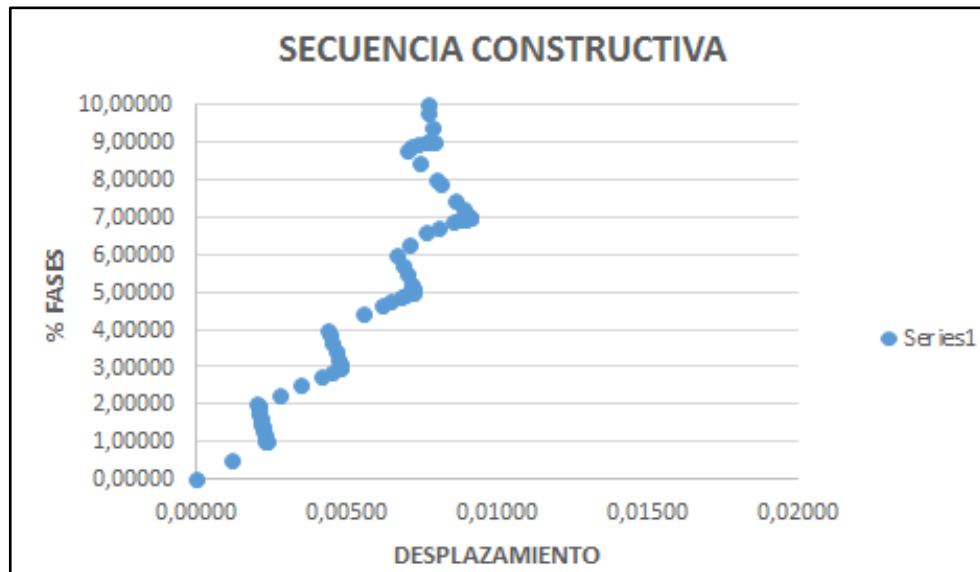
Fuente: Propia

**Figura 59. Punto de control Ide desplaamiento de la estructura “G”**



Fuente: Propia

**Figura 60. Punto de control Ide desplaamiento de la estructura “i”**



Fuente: Propia

#### **4.6. PROCESO CONSTRUCTIVO**

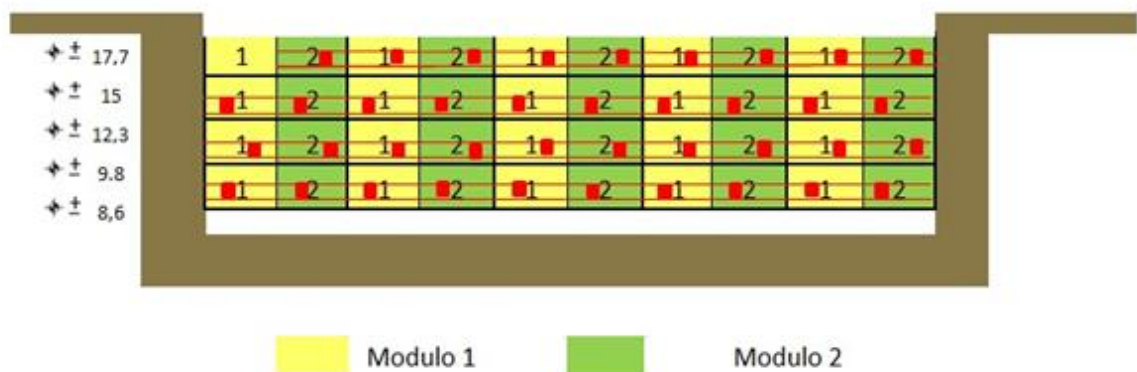
En la construcción de muros anclados de hormigón existen aspectos que deben ser contemplados como la secuencia de ejecución del muro.

A continuación se presentara la secuencia constructiva completa y detallada que se utiliza para este tipo de estructura.

1. Construir la cimentación lo más pronto posible para que esta sirva como apoyo a la parte inferior a la pantalla de contención.
2. Realizar excavaciones por módulos individuales de anclajes en tres etapas por nivel, de acuerdo a los esquemas adjuntos. Utilizar el sistema de trincheras “Uno si, uno no”.

3. Se realiza la excavación por etapas de acuerdo a los colores y a la numeración (ver esquema), se construyen los anclajes, se funde el tramo de la pantalla y la viga correspondiente y se dejan los traslapes del refuerzo de acero para el siguiente módulo.
4. No es viable continuar con la excavación del nivel siguiente hasta tanto no haber construido la totalidad del nivel anterior y haber tensionado los anclajes al 100% de la carga de diseño.
5. 5. En caso de realizarse modificaciones a los niveles de anclajes, se recomienda tener en cuenta los mismos criterios de espaciamiento en ambas direcciones. En la figura 61 se muestra el esquema de procedimiento de excavación utilizando la metodología “uno si, uno no”.

**Figura 61. Esquema de procedimiento de excavación utilizando la metodología “uno si, uno no”**



Fuente: Propia

#### 4.7 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos permite hacer los siguientes comentarios:

Es importante tener en cuenta que la obra proyectada para el manejo de los taludes corresponde a una obra temporal la cual se sostiene de manera definitiva al construir la estructura de la edificación.

Se obtuvo que los factores de seguridad de los modelos realizados disminuyen en la medida que se aumenta la altura de excavación, los cuales son consistentes desde el punto de vista de estabilidad de la obra. El método permite mantener un equilibrio entre la seguridad de la obra y la optimización del presupuesto.

Los factores de seguridad cumplen para cada una de las etapas de excavación, de acuerdo con el método de excavación propuesto, el cual se realiza por medio de trincheras que generan una condición de estabilidad más favorable. Para poder modelar cada etapa en condición más rigurosa, se requeriría modelos de estabilidad en 3 dimensiones lo cual no hace parte del alcance de este proyecto.

Se logró realizar una idealización de la estructura proyectada mediante la elaboración del modelo de elementos finitos, donde se incluyeron los anclajes, los elementos de pantalla y los parámetros de los suelos presentes en el sitio del proyecto para cada una de las etapas.

Para una misma etapa de construcción los desplazamientos de cada uno de los elementos de la estructura de contención disminuyen. Esto se debe posiblemente que a medida que se va conteniendo la altura de la excavación se disminuyen los esfuerzos en los niveles inferiores. Sin embargo, el desplazamiento final será el acumulado de todas las etapas en cada uno de los puntos de control.

El desplazamiento mayor de 0.026 metros, se presentó en el elemento de pantalla número uno (superior). Esto permite mostrar que es muy importante realizar controles y mayores cuidados en las primeras etapas de excavación la cual determinara el buen funcionamiento de la estructura. Cuando los desplazamientos

reales de la estructura son menores a los teóricos de los modelos se pueden realizar ajustes que permitan la optimización de los recursos. Es decir, la comparación entre el desplazamiento teórico del modelo y el desplazamiento medido en la estructura de la obra permite definir si se puede realizar una optimización como separación de anclajes o por el contrario ajustar el diseño, colocando más anclajes o mayor tensionamiento, en caso de que el desplazamiento real sea mayor que el desplazamiento teórico

## 5. CONCLUSIONES

La metodología aplicada tanto para el control de la estabilidad del talud como para las deformaciones, se muestra como un procedimiento adecuado, pues al permitir la observación de la evolución de los mismos, facilita la posibilidad de poder aplicar correctivos, dirigidos a mantener estas variables en los rangos mínimos requeridos, mediante ajustes a los diseños originales.

La evolución de los valores de los factores de seguridad se presenta coherente con el avance de la profundidad de excavación, mostrando valores muy seguros a poca profundidad y al límite a la profundidad máxima, al menos en el caso estático.

Igualmente es posible controlar las deformaciones mediante medición topográfica directa y comparación con los resultados teóricos, aplicando correctivos que pueden implicar la necesidad de aplicar mayores fuerzas de tensión, modificación de la distribución de los anclajes, apuntalamiento, vigas cinturón

## 6. RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las recomendaciones a tener en cuenta en futuros proyectos relacionados con este tema:

Realizar modelos en tres dimensiones que permitan verificar de manera más eficiente el efecto del procedimiento de construcción por etapas y con la implementación de trincheras intermedias.

Realizar controles en obra de las estructuras modeladas para establecer la veracidad de los resultados teóricos obtenidos. Esto es posible mediante la comparación de los desplazamientos de los modelos y los valores obtenidos mediante mojones topográficos e instalación de inclinómetros.

Realizar modelos con la implementación de otros tipos de obras tales como anclajes pasivos, micropilotes entre, otros

## REFERENCIAS

ALAM PASTOR; María A. SOSA CONTRERAS Grelys A. y ELBERG ROJAS. María E. Aplicación del método de elementos finitos en la simulación de zonas de riesgo geológico, , Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, 2007.

ALE VÉLIZ, José Daniel. «Análisis de estabilidad de taludes.» Alicante, España, 2002. [en línea] [citados 10 de 2016] Disponible en:<http://www.scribd.com/doc/148327821/53170729-Analisis-deEstabilidad-de-Taludes>.

BOJORQUE IÑEGUEZ Jaime, Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes, MASKANA, Vol 2, n° 2, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2011.

CANDO Gabriela. Método de elementos finitos, Universidad técnica de Ambato, Facultad de ingeniería civil, Noviembre de 2012.

DAS, Braja M. «Fundamentos de ingeniería geotécnica.» California State University, Sacramento: CENGAGE LEARNING / THOMSON INTERNACIONAL, 2001. Primera Edición.

GARNICA ANGUAS Paul, et al. Estabilidad de taludes sumergidos aplicación a la estabilidad de escolleras en puertos mexicanos, Universidad Autónoma de Chihuahua, Publicación Técnica No.199, 2002.

HOYOS PATIÑO Fabián, Diccionario Básico geotecnia, Escuela de ingeniería Civil, universidad nacional de Colombia, Medellín, 2001.

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Manual de Ingeniería de Taludes, , Serie Guía y Manuales N° 3, 2006.

JANBÚ N. "Slopes Stability Computations. Embankment Dam Engineering". Casa grande Volume, New York, John Wiley.1973

LÓPEZ PINEDA Germán. Curso de métodos numéricos aplicados a la ingeniería del terreno, Departamento de Mecánica, Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Córdoba, 2007.

MATTEIS Alvaro, Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Cs, Exactas, ingeniería y agrimensura, Agosto de 2013.

MITCHELL, J. K., & SOGA, K. Fundamentals of Soil Behavior - Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.2005

MORGENSTERN , N.R. y V.E. PRICE. «The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces.» Géotechnique (1965): pág. 79-93.

OROZCO OLARTE Karla Maria. Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en el corto y largo plazo, UNIVERSIDAD EAFIT, Escuela De Ingeniería, Medellín, 2013.

RODRÍGUEZ CIFUENTES L Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales, Revista de la construcción Vol. 12 n°1, Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile, 2013.

SABATINI, P. J., TANYU, B., ARMOUR, T., GRONECK, P., KEELEY J. "Micropile Design and Construction (Reference Manual for NHI Course 132078)". U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication. 2005

SPENCER, E. «A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces.» Géotechnique (1967): pág. 11-26.

SUAREZ DÍAZ, Jaime. Deslizamiento y estabilización de taludes en zonas tropicales. Colombia, 1998. Capítulo IV. 27 de Agosto de 2013. [en línea] [citado 12 de marzo de 2016] Disponible en: «<http://albatros.uis.edu.co/~pagina/profesores/planta/jsuarez/publicaciones/librotaludes/>.»

URRITA VERASE Pablo Análisis Dinámico de estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores, , Perú, 2008. [20]. TÍTULO H ESTUDIOS GEOTÉCNICOS. NSR-10.

# ANEXOS

Output Version 2012.2.14975.1.0081													
Project description : PANTALLA_CALLE 51 N 23-37													
User name : Universidad Industrial de Santander													
Project filename : PANTALLA_CALLE 51 N 23-37													
Output : Resultados del cálculo, Placa, <Fase 19> (19/790), Table of force envelopes plate													
Elemento estructural	Nodo	Número local	X [m]	Y [m]	N [kN/m]	N <sub>max</sub> [kN/m]	N <sub>min</sub> [kN/m]	Q [kN/m]	Q <sub>max</sub> [kN/m]	Q <sub>min</sub> [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>max</sub> [kNm/m]	M <sub>min</sub> [kNm/m]
Placa 1-3 (PANTALLA)	2542	1	20.000	19.100	9.146	-0.033	9.146	-25.748	0.000	-25.748	-12.689	0.000	-12.689
	2524	2	20.000	18.975	14.011	0.000	14.011	-33.394	0.000	-33.394	-16.410	0.000	-16.410
	2525	3	20.000	18.850	18.286	0.000	18.286	-39.564	0.000	-39.564	-20.969	0.000	-20.969
	2526	4	20.000	18.725	22.492	0.000	22.492	-45.213	0.000	-45.213	-26.281	0.000	-26.281
	2523	5	20.000	18.600	27.150	0.000	27.150	-51.299	0.000	-51.299	-32.297	0.000	-32.297
Placa 1-4 (PANTALLA)	2523	1	20.000	18.600	27.347	0.000	27.347	-51.564	0.000	-51.564	-32.297	0.000	-32.297
	2264	2	20.000	18.475	33.318	0.000	33.318	-59.573	0.000	-59.573	-39.223	0.000	-39.223
	2265	3	20.000	18.350	40.233	0.000	40.233	-69.503	0.000	-69.503	-47.269	0.000	-47.269
	2266	4	20.000	18.225	48.063	0.000	48.063	-81.545	0.000	-81.545	-56.691	0.000	-56.691
	2509	5	20.000	18.100	56.779	0.000	56.779	-95.889	0.000	-95.889	-67.752	0.000	-67.752
Placa 1-5 (PANTALLA)	2509	1	20.000	18.100	-19.957	-37.644	0.000	187.531	0.000	189.823	-67.752	0.000	-67.752
	2510	2	20.000	17.975	-10.242	-32.228	0.000	171.386	0.000	173.859	-45.277	0.000	-45.277
	2511	3	20.000	17.850	-1.055	-26.296	3.764	150.801	0.000	153.011	-25.093	0.229	-25.093
	2512	4	20.000	17.725	7.237	-20.091	11.589	125.928	0.000	127.495	-7.747	15.012	-7.747
	2508	5	20.000	17.600	14.271	-14.152	18.571	96.918	0.000	97.528	6.219	0.000	6.219
Placa 2-6 (PANTALLA)	2508	1	20.000	17.600	17.304	0.000	22.589	86.459	-0.163	86.592	6.219	0.000	6.219
	2489	2	20.000	17.469	21.939	0.000	24.250	78.227	-0.520	78.843	17.014	0.000	17.014
	2490	3	20.000	17.337	26.582	0.000	26.582	70.555	-1.291	71.717	26.780	0.000	26.780
	2491	4	20.000	17.206	31.303	0.000	31.303	63.119	-2.030	64.887	35.549	0.000	35.549
	2492	5	20.000	17.075	36.171	0.000	36.171	55.596	-4.982	58.029	43.943	0.000	43.943
Placa 2-7 (PANTALLA)	2492	1	20.000	17.075	36.126	0.000	36.126	55.882	-4.999	58.266	43.943	0.000	43.943
	2476	2	20.000	16.944	41.025	0.000	41.025	49.135	-8.261	52.129	50.233	0.000	50.233
	2477	3	20.000	16.813	46.020	0.000	46.020	42.383	-12.201	45.979	56.240	0.000	56.240
	2478	4	20.000	16.681	51.111	0.000	51.111	35.620	-16.841	39.809	61.361	0.000	61.361
	2475	5	20.000	16.550	56.297	0.000	56.297	28.838	-22.200	33.607	65.590	0.000	65.590
Placa 2-8 (PANTALLA)	2475	1	20.000	16.550	56.312	0.000	56.312	28.794	-22.233	33.523	65.590	0.000	65.590
	2458	2	20.000	16.419	61.653	0.000	61.653	21.822	-28.363	27.131	68.912	0.000	68.912
	2459	3	20.000	16.288	67.152	0.000	67.152	14.415	-35.396	20.160	71.298	-1.045	71.298
	2460	4	20.000	16.156	72.803	0.000	72.803	6.440	-43.371	12.505	72.673	-5.902	72.673
	2457	5	20.000	16.025	78.602	0.000	78.602	-2.198	-52.397	4.058	72.959	-12.038	72.959

Elemento estructural	Nodo	Número local	X [m]	Y [m]	N [kN/m]	N <sub>max</sub> [kN/m]	N <sub>min</sub> [kN/m]	Q [kN/m]	Q <sub>max</sub> [kN/m]	Q <sub>min</sub> [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>max</sub> [kNm/m]	M <sub>min</sub> [kNm/m]
Placa 2-9 (PANTALLA)	2457	1	20.000	16.025	78.569	0.000	78.569	-2.331	3.926	-52.489	72.959	-12.038	84.968
	2230	2	20.000	15.894	84.489	0.000	84.489	-11.964	0.000	-62.637	72.035	-19.526	84.870
	2231	3	20.000	15.762	90.408	0.000	90.408	-23.020	0.000	-74.287	69.757	-28.495	83.422
	2232	4	20.000	15.631	96.302	0.000	96.302	-35.668	0.000	-87.598	65.921	-39.104	80.404
	2427	5	20.000	15.500	102.148	0.000	102.148	-50.077	0.000	-102.723	60.317	-51.569	75.591
Placa 2-10 (PANTALLA)	2427	1	20.000	15.500	50.647	-34.942	50.647	139.989	0.000	0.000	60.317	-51.569	75.591
	2428	2	20.000	15.375	56.163	-31.632	56.163	124.611	0.000	0.000	76.884	-34.465	92.104
	2429	3	20.000	15.250	60.956	-27.540	60.956	104.997	0.000	0.000	91.299	-19.641	106.403
	2430	4	20.000	15.125	64.905	-22.707	64.905	80.147	0.000	0.000	102.921	-7.875	117.800
	2426	5	20.000	15.000	67.891	-17.172	67.891	49.065	0.000	0.000	111.070	0.000	125.561
Placa 3-11 (PANTALLA)	2426	1	20.000	15.000	67.020	0.000	67.020	20.973	20.973	-33.012	111.070	0.000	125.561
	2408	2	20.000	14.869	70.974	0.000	70.974	18.374	18.374	-35.478	113.690	0.000	127.426
	2409	3	20.000	14.738	74.793	0.000	74.793	13.434	13.434	-37.835	115.782	0.000	128.865
	2410	4	20.000	14.606	78.480	0.000	78.480	7.262	7.262	-40.327	117.163	0.000	129.719
	2407	5	20.000	14.475	82.036	0.000	82.036	0.967	0.967	-43.198	117.692	0.000	129.885
Placa 3-12 (PANTALLA)	2407	1	20.000	14.475	82.068	0.000	82.068	1.204	1.204	-43.196	117.692	0.000	129.885
	2134	2	20.000	14.344	85.339	0.000	85.339	-4.536	0.000	-46.470	117.470	0.000	129.435
	2135	3	20.000	14.213	88.565	0.000	88.565	-10.081	0.000	-50.221	116.510	0.000	128.363
	2136	4	20.000	14.081	91.753	0.000	91.753	-15.570	0.000	-54.481	114.825	0.000	126.657
	2133	5	20.000	13.950	94.912	0.000	94.912	-21.142	0.000	-59.277	112.419	0.000	124.301
Placa 3-13 (PANTALLA)	2133	1	20.000	13.950	94.902	0.000	94.902	-21.138	0.000	-59.283	112.419	0.000	124.301
	2094	2	20.000	13.819	98.076	0.000	98.076	-26.943	0.000	-64.684	109.267	0.000	121.248
	2095	3	20.000	13.688	101.227	0.000	101.227	-33.175	0.000	-70.735	105.329	0.000	117.440
	2096	4	20.000	13.556	104.336	0.000	104.336	-40.000	0.000	-77.513	100.531	0.000	112.791
	2093	5	20.000	13.425	107.383	0.000	107.383	-47.579	0.000	-85.092	94.795	0.000	107.211
Placa 3-14 (PANTALLA)	2093	1	20.000	13.425	107.399	0.000	107.399	-47.590	0.000	-85.097	94.795	0.000	107.211
	1690	2	20.000	13.294	110.261	0.000	110.261	-56.173	0.000	-93.638	87.996	-6.939	100.567
	1691	3	20.000	13.162	112.904	0.000	112.904	-65.920	0.000	-103.210	80.000	-19.542	92.720
	1692	4	20.000	13.031	115.345	0.000	115.345	-77.150	0.000	-114.038	70.623	-33.555	83.482
	1689	5	20.000	12.900	117.602	0.000	117.602	-90.180	0.000	-126.353	59.668	-49.170	72.653

Project description : PANTALLA\_CALLE 51 N 23x37  
 User name : Universidad Industrial de Santander  
 Project filename : PANTALLA\_CALLE 51 N 23x37  
 Output : Resultados del cálculo, Placa, «Fase 19» (19/790), Table of force envelopes plate

Output Version 2011.2.2.14975.10081  
 Step : 790  
 Date : 27/02/2016  
 Page : 3

Elemento estructural	Nodo	Número local	X [m]	Y [m]	N [kN/m]	N <sub>max</sub> [kN/m]	N <sub>min</sub> [kN/m]	Q [kN/m]	Q <sub>max</sub> [kN/m]	Q <sub>min</sub> [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>max</sub> [kNm/m]	M <sub>min</sub> [kNm/m]
Placa 3-15 (PANTALLA)	1689	1	20.000	12.900	67.235	67.235	+28.956	103.586	139.289	0.000	59.668	+49.170	72.653
	1460	2	20.000	12.775	67.537	67.537	+27.893	86.868	122.703	0.000	71.510	+32.851	84.353
	1461	3	20.000	12.650	68.442	68.442	+25.518	68.047	104.154	0.000	81.351	+18.528	94.042
	1462	4	20.000	12.525	71.421	71.421	+20.277	39.546	76.862	0.000	88.122	+7.282	100.644
	1459	5	20.000	12.400	77.943	77.943	+10.615	-6.210	38.614	-8.000	90.465	0.000	102.783
Placa 6-16 (PANTALLA)	1459	1	20.000	12.400	67.441	67.441	0.000	-34.203	-37.458	0.000	90.465	0.000	102.783
	1148	2	20.000	12.269	67.404	67.404	0.000	-36.388	-38.904	0.000	85.832	0.000	97.779
	1149	3	20.000	12.137	67.640	67.640	0.000	-38.587	-40.854	0.000	80.914	0.000	92.549
	1150	4	20.000	12.006	68.098	68.098	0.000	-40.996	-43.276	0.000	75.691	0.000	87.032
	1147	5	20.000	11.875	68.732	68.732	0.000	-43.809	-46.136	0.000	70.134	0.000	81.170
Placa 6-17 (PANTALLA)	1147	1	20.000	11.875	68.707	68.707	0.000	-43.794	-46.135	0.000	70.134	0.000	81.170
	716	2	20.000	11.744	69.407	69.407	0.000	-46.997	-49.376	0.000	64.182	0.000	74.009
	717	3	20.000	11.613	70.157	70.157	0.000	-50.691	-53.104	0.000	57.776	0.000	68.187
	718	4	20.000	11.481	70.953	70.953	0.000	-54.896	-57.333	0.000	50.851	0.000	60.944
	715	5	20.000	11.350	71.791	71.791	0.000	-59.631	-62.078	0.000	43.342	0.000	53.115
Placa 6-18 (PANTALLA)	715	1	20.000	11.350	71.781	71.781	0.000	-59.652	-62.095	0.000	43.342	0.000	53.115
	522	2	20.000	11.219	72.641	72.641	0.000	-64.984	-67.411	0.000	35.173	0.000	44.625
	523	3	20.000	11.088	73.496	73.496	0.000	-71.028	-73.396	0.000	26.253	0.000	35.390
	524	4	20.000	10.956	74.342	74.342	0.000	-77.813	-80.074	0.000	16.491	0.000	25.324
	521	5	20.000	10.825	75.174	75.174	0.000	-85.369	-87.467	0.000	5.793	0.000	14.340
Placa 6-19 (PANTALLA)	521	1	20.000	10.825	75.161	75.161	0.000	-85.438	-87.517	0.000	5.793	0.000	14.340
	492	2	20.000	10.694	75.943	75.943	0.000	-93.919	-95.753	0.000	-5.962	+7.343	2.226
	493	3	20.000	10.563	76.633	76.633	0.000	-103.631	-105.066	0.000	+18.914	+20.361	0.000
	494	4	20.000	10.431	77.231	77.231	0.000	-114.270	-115.567	0.000	+33.232	+34.742	0.000
	491	5	20.000	10.300	77.736	77.736	0.000	-127.330	-127.946	0.000	+49.095	+50.665	0.000
Placa 6-20 (PANTALLA)	491	1	20.000	10.300	9.027	9.027	-21.301	136.898	0.000	137.603	+49.095	+50.665	0.000
	304	2	20.000	10.175	9.468	9.468	-19.752	123.365	0.000	124.150	+22.792	+24.267	0.000
	305	3	20.000	10.050	9.654	9.654	-17.608	104.705	0.000	105.541	+18.461	+19.834	0.000
	306	4	20.000	9.925	9.543	9.543	-14.850	79.738	0.000	80.613	+6.873	+8.139	0.000
	303	5	20.000	9.800	9.093	9.093	-11.457	47.316	0.000	48.230	1.156	0.000	1.156

Project description : PANTALLA\_CALLE 51 N 23>37  
 User name : Universidad Industrial de Santander  
 Project filename : PANTALLA\_CALLE 51 N 23>37  
 Output : Resultados del cálculo, Placa, «Fase 19» (19/790), Tabla de force envelopes plate  
 Output Version 2013.2.14975.10081  
 Step : 790  
 Date : 27/02/2016  
 Page : 4

Elemento estructural	Nodo	Número local	X [m]	Y [m]	N [kN/m]	N <sub>max</sub> [kN/m]	Q [kN/m]	Q <sub>max</sub> [kN/m]	M [kNm/m]	M <sub>max</sub> [kNm/m]	M <sub>min</sub> [kNm/m]
Placa S-21 (PANTALLA)	303	1	20.000	9.800	5.353	5.353	-0.358	0.000	1.156	0.000	1.156
	290	2	20.000	9.700	4.474	4.474	-0.482	0.000	1.113	0.000	1.113
	291	3	20.000	9.600	3.630	3.630	-0.573	0.000	1.061	0.000	1.061
	292	4	20.000	9.500	2.823	2.823	-0.676	0.000	0.998	0.000	0.998
	289	5	20.000	9.400	2.053	2.053	-0.834	0.000	0.923	0.000	0.923
Placa S-22 (PANTALLA)	289	1	20.000	9.400	2.037	2.037	-0.817	0.000	0.923	0.000	0.923
	139	2	20.000	9.300	1.250	1.250	-0.927	0.000	0.836	0.000	0.836
	140	3	20.000	9.200	0.472	0.472	-1.012	0.000	0.739	0.000	0.739
	141	4	20.000	9.100	-0.296	0.000	-1.078	0.000	0.634	0.000	0.634
	138	5	20.000	9.000	-1.053	0.000	-1.135	0.000	0.524	0.000	0.524
Placa S-23 (PANTALLA)	138	1	20.000	9.000	-1.062	0.000	-1.141	0.000	0.524	0.000	0.524
	75	2	20.000	8.900	-1.779	0.000	-1.223	0.000	0.405	0.000	0.405
	76	3	20.000	8.800	-2.503	0.000	-1.310	0.000	0.279	0.000	0.279
	77	4	20.000	8.700	-3.253	0.000	-1.395	0.000	0.143	0.000	0.143
	269	5	20.000	8.600	-4.048	0.000	-1.472	0.000	0.000	0.000	0.000
Placa 1-2 (PANTALLA)	2543	1	20.000	19.550	3.883	3.883	-14.640	0.000	-3.869	-3.869	0.000
	2544	2	20.000	19.438	4.954	4.954	-16.913	0.000	-5.766	-5.766	0.000
	2545	3	20.000	19.325	6.157	6.157	-19.170	0.000	-7.792	-7.792	0.000
	2546	4	20.000	19.212	7.476	7.476	-21.671	0.000	-10.089	-10.089	0.000
	2542	5	20.000	19.100	8.896	8.896	-24.677	0.000	-12.689	-12.689	0.000
Placa 1-1 (PANTALLA)	2287	1	20.000	20.000	0.145	0.000	-0.744	0.000	0.000	0.000	0.000
	2288	2	20.000	19.887	1.093	-0.257	-5.795	0.000	-0.384	-0.384	0.000
	2289	3	20.000	19.775	2.014	-0.545	-4.495	0.000	-1.251	-1.251	0.000
	2290	4	20.000	19.663	2.929	-0.815	-3.248	0.000	-2.486	-2.486	0.000
	2543	5	20.000	19.550	3.860	-1.059	-14.460	0.000	-3.869	-3.869	0.000