

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Análisis de estabilidad de taludes para contenciones de excavaciones en sótanos de edificios en el Valle Central de Guatemala mediante el método de equilibrio límite y modelado numérico en elementos finitos

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Josué Daniel Fajardo Morales para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




Análisis de estabilidad de taludes para contenciones de excavaciones en sótanos de edificios en el Valle Central de Guatemala mediante el método de equilibrio límite y modelado numérico en elementos finitos

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Josué Daniel Fajardo Morales para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Arquitectónica

Guatemala,

2025

V.ºB.º

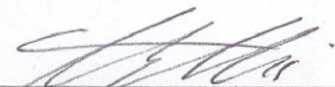


Ing. Alvaro José Rubio Haasler

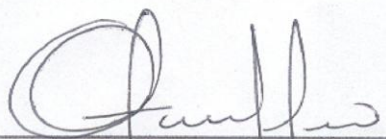
Tribunal examinador:



Ing. Alvaro José Rubio Haasler



Ing. Hugo Enrique Pallais Beteta



Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala, 17 de junio de 2025

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos	3
IV. MARCO TEÓRICO	4
A. Geología.....	4
1. Historia geológica del Valle Central de Guatemala.....	4
B. Mecánica de suelos	5
C. Estabilidad de taludes.....	5
1. Deslizamientos.....	5
2. Definición de talud	6
3. Tipos de taludes	6
4. Métodos para estabilizar taludes.....	6
D. Métodos de equilibrio límite	6
1. Resistencia al corte de los suelos.....	6
2. Descripción general	7
3. Métodos de cálculo.....	8
E. Métodos de esfuerzo deformación	9
1. Descripción general	9
2. Teoría básica de elasticidad y factor de seguridad	9
F. Software de estabilidad de taludes	10
1. Software de equilibrio límite	10

2.	Software de elementos finitos.....	11
G.	Protección de taludes con soil nailing	12
1.	Muros soil nailing	12
2.	Elementos constructivos del soil nailing	12
3.	Refuerzos.....	12
4.	Funcionamiento del soil nailing	12
5.	Estabilidad de muros de soil nailing.....	13
a.	Modos de falla internos	13
b.	Modos de falla en conexión anclaje-muro	13
c.	Modos de falla externos	13
6.	Metodología constructiva del muro soil nailing	14
V.	MARCO METODOLÓGICO	15
A.	Modelo geotécnico	15
B.	Secciones a analizar	15
1.	Colindancias	17
2.	Coefficientes sísmicos	17
3.	Factores de seguridad	18
C.	Propiedades de las barras de acero.....	19
1.	Resistencia a la fractura por tensión	19
2.	Resistencia al cortante	19
D.	Propiedades del muro soil nailing.....	20
1.	Módulo de elasticidad del muro	20
2.	Inercia.....	20
3.	Peso del muro	20
E.	Propiedades de la zapata	20
1.	Módulo de elasticidad del muro	20
2.	Inercia.....	20
3.	Peso de la zapata.....	21
F.	Análisis de equilibrio límite	21

1.	Método seleccionado	21
2.	Propiedades del suelo	21
a.	Capacidad friccionante del suelo.....	22
3.	Propiedades de las barras de acero	22
4.	Sobrecarga aplicada.....	23
5.	Coefficientes sísmicos	23
6.	Factores de seguridad	24
a.	Factor de seguridad estático en distintas alturas	24
b.	Factor de seguridad sísmico en distintas alturas	27
G.	Análisis de elementos finitos	30
1.	Método seleccionado	30
2.	Propiedades del suelo	30
3.	Propiedades de las barras de acero	31
4.	Propiedades del muro	31
5.	Propiedades de la zapata.....	31
6.	Sobrecarga aplicada.....	32
7.	Coefficientes sísmicos	32
8.	Factores de seguridad	32
a.	Factor de seguridad estático en distintas alturas	33
b.	Factor de seguridad sísmico en distintas alturas	34
VI.	RESULTADOS	36
A.	Discusión de metodologías	36
1.	Comparativa de metodología.....	36
2.	Ventajas y desventajas de metodologías.....	37
3.	Parámetros de reducción en Plaxis	38
VII.	CONCLUSIONES.....	42
VIII.	RECOMENDACIONES.....	43
IX.	BILIOGRAFÍA	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Propiedades de cada estrato del modelo geotécnico.....	15
Cuadro 2. Propiedades generales de la barra de acero No. 8 grado 60	19
Cuadro 3. Capacidad de tracción estimada en suelos sin cohesión (inclusiones llenadas con lechada)	22
Cuadro 4. Capacidad de tracción estimada en suelo cohesivos	22
Cuadro 5. Fricción desarrollada (qs) con base en pruebas.	22
Cuadro 6. Resumen de factor de seguridad estático y pseudo-estático con ambas metodologías en las distintas secciones	36
Cuadro 7. Deformaciones del muro <i>soil nailing</i> en las distintas profundidades.....	36
Cuadro 8. Comparativa entre método de equilibrio límite y elementos finitos	38
Cuadro 9. Esfuerzos en puntos críticos de falla en la sección estática de 6m de profundidad	40
Cuadro 10. Ángulo de fricción y cohesión ingresada en cada una de las condiciones de las secciones analizadas.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Modelo tectónico que interpreta la estructura del valle de Guatemala.....	4
Figura 2. Sección transversal esquemática del valle central de Guatemala con orientación E-W...	5
Figura 3. Representación de la ecuación de Coulomb	7
Figura 4. Fuerzas consideradas en un mecanismo de rotura circular.....	8
Figura 5. Trabajo de vector de fuerza y vector de desplazamiento virtual en cada punto nodal de un determinado elemento finito	10
Figura 6. Esquema de los tipos de clavo, con rosca y platina.....	12
Figura 7. Procedimiento constructivo del suelo claveteado.....	14
Figura 8. Sección típica 6 metros de profundidad.....	16
Figura 9. Sección típica 9 metros de profundidad.....	16
Figura 10. Sección típica 12 metros de profundidad.....	17
Figura 11. Factores k_d de acuerdo con el nivel de sismo	18
Figura 12. Factores de seguridad mínimos para estabilidad global.....	19
Figura 13. Estratigrafía asignada en software GeoSlope	21
Figura 14. Propiedades ingresadas del <i>nail</i> en software GeoSlope para las secciones a analizar..	23
Figura 15. Sobrecarga aplicada en software GeoSlope.....	23
Figura 16. Coeficientes sísmicos aplicados	24
Figura 17. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 6m.....	24
Figura 18. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 9m.....	25
Figura 19. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 12m.....	26
Figura 20. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 6m.	27
Figura 21. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 9m.	28
Figura 22. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 12m.	29
Figura 23. Estratigrafía asignada en software PLAXIS	30
Figura 24. Propiedades ingresadas del <i>nail</i> en PLAXIS	31
Figura 25. Propiedades ingresadas del muro en software PLAXIS	31
Figura 26. Propiedades ingresadas de la zapata en software PLAXIS	32
Figura 27. Sobrecarga aplicada en software PLAXIS.....	32
Figura 28. Coeficientes sísmicos aplicados	32
Figura 29. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 6m.....	33
Figura 30. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 9m.....	33
Figura 31. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 12m.....	34
Figura 32. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 6m.	34
Figura 33. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 9m.	35
Figura 34. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 12m.	35
Figura 35. Método de reducción Φ/c	39

Figura 36. Parámetros de reducción..... 39
Figura 37. Esfuerzo en punto crítico 20,834 en la sección estática de 6m..... 40

RESUMEN

La estabilidad de taludes consiste en un análisis geotécnico para obtener factores de seguridad mínimos, que permitan asegurar que sean estables tanto en situación estática como en pseudo estática, a fin de evitar accidentes que involucren pérdidas materiales y humanas.

El análisis de estabilidad de un talud depende de las propiedades del suelo tales como la cohesión, peso específico y el ángulo de fricción puesto que permiten establecer el comportamiento que tendrá un talud. Actualmente existen distintos métodos de cálculo para determinar la estabilidad, sin embargo, el método de dovelas y el de Bishop siguen siendo los de mayor uso en el campo de la geotecnia. Programas especializados en el área entregan la superficie de falla más desfavorable, la distribución de las dovelas consideradas dentro de la masa deslizante y los diagramas de cuerpo libre para cada una de las dovelas dentro de la superficie de falla estudiada. (Sanhueza & Rodríguez, 2013)

Con el desarrollo computacional acelerado se ha propuesto un nuevo método para el análisis de estabilidad de taludes, el cual es el método de elementos finitos introducido por Clough y Woodward. Este método consiste en dividir la masa de suelo en unidades discretas mediante una malla con nodos y bordes predefinidos. Luego se presentan los resultados en forma de esfuerzos y deformaciones a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. La técnica de reducción de la resistencia al corte fue propuesta por Zienkiewicz et al. (1975). Este método es efectivo para evaluar el desempeño junto con el factor de seguridad del talud y ubicar la superficie de falla. (Cervera, 2022)

Para asegurar la estabilidad de taludes existen distintos métodos de contención que son efectivos dependiendo de las condiciones del sitio y de las propiedades del suelo. Una de las soluciones geotécnicas más conocidas y empleadas son los muros clavados o soil nailing debido a su rápida y económica ejecución para la estabilidad de taludes y excavaciones de terreno. En la etapa de diseño, la verificación de la estabilidad externa del muro de clavado del suelo es uno de los criterios de aceptabilidad más importantes. (Villalobos, 2021)

El clavado del suelo permite formar una estructura equivalente de pared por gravedad, con mayor resistencia al cizallamiento en comparación con el suelo in situ original. El objetivo principal de esta metodología de contención es evaluar la estabilidad externa de los muros de clavado del suelo, considerando la influencia de la variabilidad de su altura y los parámetros geomecánicos del suelo in-situ. (Villalobos, 2021)

Es desde estos conceptos donde se establece esta investigación, en la cual se pretende analizar métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos en excavaciones de sótanos mediante programas especializados en geotecnia, con una protección típica de muro soil nailing. Esto con el objetivo de generar una comparativa entre los métodos al obtener factores de seguridad tanto en situación estática y pseudo estática y establecer ventajas y desventajas de cada método con base en las condiciones geológicas del área y las propiedades del suelo del Valle Central de Guatemala.

ABSTRACT

Slope stability consists of a geotechnical analysis to obtain minimum safety factors that ensure stability under both static and pseudo-static conditions, in order to prevent accidents involving material and human losses.

The stability analysis of a slope depends on soil properties such as cohesion, unit weight, and friction angle, as they help determine the behavior of the slope. Currently, there are different calculation methods to assess stability; however, the limit equilibrium methods, such as the method of slices and Bishop's method, remain the most widely used in geotechnical engineering. Specialized software provides the most critical failure surface, the distribution of the slices within the sliding mass, and free-body diagrams for each slice along the studied failure surface. (Sanhueza & Rodríguez, 2013)

With the rapid development of computational tools, a new approach for slope stability analysis has been proposed: the finite element method (FEM), introduced by Clough and Woodward. This method divides the soil mass into discrete units through a mesh with predefined nodes and edges. The results are presented as stresses and deformations at the nodal points. The failure condition obtained represents a progressive failure, where not all elements fail simultaneously. The shear strength reduction technique, proposed by Zienkiewicz et al. (1975), is an effective method for evaluating slope performance, determining the safety factor, and identifying the failure surface. (Cervera, 2022)

To ensure slope stability, various retaining methods are employed depending on site conditions and soil properties. One of the most well-known and widely used geotechnical solutions is soil nailing, due to its cost-effectiveness and rapid construction process for stabilizing slopes and excavations. In the design phase, verifying the external stability of the soil-nailed wall is one of the most important acceptance criteria. (Villalobos, 2021)

Soil nailing forms an equivalent gravity wall structure, providing greater shear resistance compared to the original in-situ soil. The primary objective of this retention methodology is to evaluate the external stability of soil-nailed walls while considering the influence of height variability and in-situ geomechanical parameters. (Villalobos, 2021)

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que garantiza la seguridad de estructuras construidas en terrenos inclinados o sometidos a excavaciones profundas. En el Valle Central de Guatemala, donde la actividad sísmica es considerable, evaluar la estabilidad de los taludes es esencial para prevenir fallas que puedan ocasionar pérdidas humanas y materiales. Para ello, se han desarrollado distintos métodos de análisis, siendo los más utilizados el método de equilibrio límite, que se basa en principios de estática, y el modelado numérico mediante elementos finitos, que permite evaluar esfuerzos y deformaciones en el suelo de manera más detallada.

En este estudio, se analizan y comparan ambos métodos aplicados a la estabilidad de excavaciones para sótanos de edificios en el Valle Central de Guatemala. Utilizando software especializado, se determinarán los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, con el fin de evaluar el comportamiento del suelo y la eficacia de las soluciones de contención. Además, se considerará la influencia de las propiedades geotécnicas del terreno y las condiciones sísmicas para determinar cuál de los enfoques proporciona resultados más confiables en el contexto local.

Los resultados obtenidos permiten comparar los factores de seguridad entre ambos métodos y evaluar su precisión en distintas condiciones de análisis. Se identificaron las ventajas y limitaciones de cada enfoque, destacando que el método de elementos finitos proporciona una mejor representación de la distribución de esfuerzos y deformaciones, mientras que el método de equilibrio límite sigue siendo una herramienta útil para análisis preliminares. A partir de esta comparación, se establecen criterios para la selección del método más adecuado según las características del suelo y las condiciones de carga, contribuyendo así a la optimización del diseño de muros de contención mediante soil nailing en excavaciones profundas.

II. JUSTIFICACIÓN

Actualmente Guatemala cuenta con un aumento de desarrollo en el sector de la construcción al ascender el PIB en 1018.5 (Banco de Guatemala, 2023) millones de quetzales respecto al primer trimestre del año 2022, el crecimiento poblacional con una tasa de 9.28% (El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, 2023) estimada para el 2025 crea la necesidad de generar nuevos proyectos. Es donde la estabilidad de taludes juega un rol importante en el desarrollo de cada proyecto, puesto que es una de las principales etapas para poder llevarlo a cabo.

Un análisis correcto y preciso para asegurar la estabilidad de un talud provee protección suficiente con la finalidad de evitar el colapso del suelo. En la ingeniería de taludes es de suma importancia saber qué método es el más apropiado para solventar un problema, por lo que estudiar métodos de equilibrio límite o modelado numérico en elementos finitos y determinar cuál se adapta de mejor manera dependiendo de la estratigrafía y propiedades de los suelos estudiados en la zona, asegura sistemas de protección eficientes, seguros y adaptables al área de estudio.

A manera de generar un análisis completo en la zona considerando que Guatemala es un país altamente sísmico, evaluar la condición cuando un talud se somete a cargas dinámicas resulta de suma importancia. Los software especializados en geotecnia con enfoque en estabilidad de taludes cuenta con la capacidad de utilizar una combinación de diferentes criterios de falla de las armaduras de las contenciones y del suelo para modelar con precisión todas las fuerzas movilizadas. Estas herramientas permiten ahorrar tiempo en el proceso de análisis y obtener factores de seguridad lo más cercanos posibles a las condiciones y factores que alteran el comportamiento de un talud en condiciones críticas para resguardar la integridad física de las personas que ocupan las edificaciones.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Analizar la estabilidad de taludes para contenciones de sótanos de edificios en el Valle Central de Guatemala mediante el método de equilibrio límite y modelado numérico en elementos finitos.

B. Objetivos específicos

- Generar un modelo base considerando un terreno medio del Valle Central de Guatemala con una protección típica de muro soil nailing.
- Calcular factores de seguridad en condición estática y pseudo estática tomando en cuenta coeficientes de aceleración sísmica, con cada método de análisis.
- Comparar los resultados generados por cada método análisis
- Determinar ventajas y desventajas de cada método, conforme a la respuesta del comportamiento de estabilidad del suelo en la zona de estudio.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Geología

1. Historia geológica del Valle Central de Guatemala

En Guatemala coexiste una zona de unión de placas, la de Norteamérica en el norte de Guatemala, la del Caribe hacia el Sur y la de Cocos en el piso oceánico del Pacífico. En el límite de las placas de Norteamérica y el Caribe se presentan fallas secundarias tales como Chixoy - Polochic, Motagua y Jocotán- Chamelecón, que presentan un movimiento de tipo sinistral. (Martínez et al., 2017)

El proceso de formación del valle de la ciudad de Guatemala surge con relación a las fallas transcurrentes de Motagua y Jalpatagua (Fig 01) y la zona de distensión que se forma en intersección de éstas. El aumento de la actividad de las fallas Motagua y Mioceno Medio (Weyl, 1980), propició una zona de debilidad que fue empleada para el ascenso de magmas que formaron las estructuras volcánicas del volcán Pinula y El Naranjo. Al continuar los movimientos de estas fallas en la zona de distensión, dio lugar a la falla de Mixco la cual sigue el contorno del volcán Pinula y que provoca la subsidencia del valle y de las estructuras volcánicas, mediante desplazamientos verticales continuos. (Pérez, 2019)

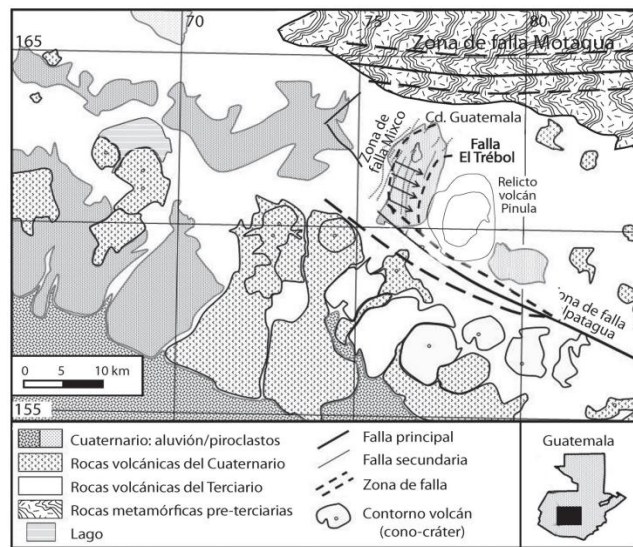


Figura 1. Modelo tectónico que interpreta la estructura del valle de Guatemala
Fuente: Pérez, 2009.

El borde entre la depresión y la estructura volcánica está formado por la Falla El trébol. El cerro El Naranjo se considera una estructura secundaria la cual se formó de una pequeña cámara magmática posterior al volcán Pinula. La actividad volcánica en esta área termina al migrar el vulcanismo hacia la zona de subducción. (Pérez, 2019)

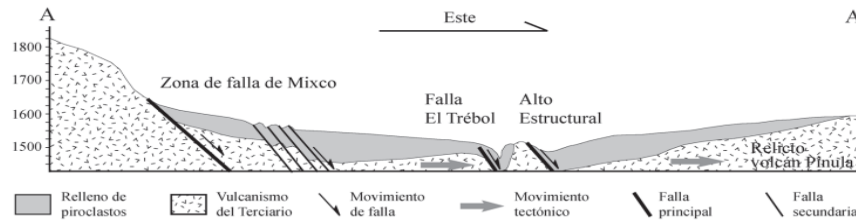


Figura 2. Sección transversal esquemática del valle central de Guatemala con orientación E-W
Fuente: Pérez, 2009.

B. Mecánica de suelos

La mecánica de suelos permite examinar las características de los diferentes tipos de suelos en función de factores tales como carga y tiempo, a manera de proporcionar información necesaria para evaluar su comportamiento y asegurar la estabilidad de las estructuras. El suelo es un factor que siempre debe ser tomado en cuenta, sea como soporte de fundaciones, como material de construcción o, en todo caso, como medio entre el agua y las estructuras. Además, estudia la firmeza del suelo, su deformación y el flujo de agua hacia su interior y exterior a través de su masa. (Marín, 1991)

Karl von Terzaghi y Arthur Casagrande se consideran los fundadores de los estudios en mecánica de suelos. Un estudio de mecánica de suelos se basa en un análisis que permite conocer el tipo de material del que está compuesto el terreno, puesto que pueden ser arenas, arcillas y rocas o una combinación. Con base en estos estudios es posible calcular y diseñar la cimentación y/o estructura adecuada para el proyecto.

El proceso de un estudio de suelos consiste en tomar muestras del suelo del terreno, para que luego sean analizadas en un laboratorio a modo de determinar las propiedades exactas del suelo y su capacidad de carga. Si se sobrepasa el límite de la capacidad resistente del suelo o si, aún sin llegar a este, se presentan deformaciones considerables, lo que resulta en esfuerzos secundarios en los elementos estructurales, produciendo fisuras, grietas, alabeo o desplomes que pueden conducir al colapso de la estructura. (Crespo, 2004)

C. Estabilidad de taludes

1. Deslizamientos

Un deslizamiento se refiere a un suelo que no es suficientemente firme por lo que ocurre movimiento de masa de suelo o roca en sentido de la pendiente de una ladera. En general, se presentan en época lluviosa o en eventos sísmicos. (Montoya, 2013)

Los movimientos de masa se dividen principalmente en tres tipos fundamentales:

1. Desprendimiento: ocurre cuando el movimiento implica caída libre de fragmentos sueltos de cualquier tamaño en pendientes muy pronunciadas.
2. Deslizamientos: se produce cuando el material que está unido se desplaza a lo largo de una superficie de debilidad como una falla.
3. Flujo: acontece cuando el material está saturado y se mueve pendiente abajo en forma de fluido viscoso.

(Universidad de Costa Rica, 2019)

2. Definición de talud

Un talud se caracteriza por una superficie de masa de tierra inclinada respecto a la horizontal. Los taludes pueden ser naturales o artificiales. Al primero se le conoce como ladera, pues son formados por la naturaleza a lo largo del tiempo sin injerencia del hombre. Al segundo tipo se le denomina talud puesto que son intervenidos por el hombre para su construcción. (Montoya, 2013)

3. Tipos de taludes

Los taludes se pueden conformar en tres categorías: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención; cabe resaltar que se pueden llegar a combinaciones de los distintos tipos de taludes. (Suárez, 1998)

4. Métodos para estabilizar taludes

Cuando se presenta un riesgo de inestabilidad en un talud, es necesario buscar una solución óptima. Se presentan tres soluciones para alcanzar la estabilidad de un talud:

- Aumento de la resistencia del suelo: se logra al aplicar drenajes en el suelo a modo de disminuir la altura del nivel freático o por medio de inyecciones de sustancias que incrementen la resistencia del suelo, como el cemento u algún otro conglomerante.
- Disminuir los esfuerzos actuantes en el talud: se obtiene con el cambio de la geometría del talud mediante un corte parcial o total de éste a un ángulo menor o por medio del retiro de la cresta para reducir su altura.
- Incrementar los esfuerzos de confinamiento del talud: es posible mediante la construcción de muros de gravedad, pantallas atirantadas o bermas hechas del mismo suelo.

D. Métodos de equilibrio límite

1. Resistencia al corte de los suelos

La resistencia al corte de los suelos es una representación de cómo se produce el deslizamiento de un talud. Este criterio se representa mediante la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, la cual depende de la resistencia a la cizalladura a la tensión normal total o efectiva en el plano de falla. Para el caso de esfuerzos totales, la resistencia al cizallamiento se expresa como: (Bowles, 1997)

$$\tau = c' + (\sigma - \mu)\tan(\phi)$$

Donde:

τ = esfuerzo de resistencia al corte

μ = presión del agua intersticial o de poros

c' = cohesión o cementación efectiva

ϕ = ángulo de fricción para presiones efectivas

σ = esfuerzo normal total

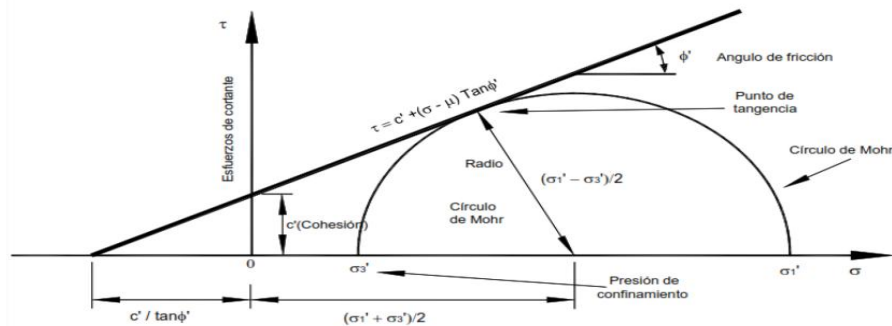


Figura 3. Representación de la ecuación de Coulomb
Fuente: Iñiguez, 2011.

2. Descripción general

El factor de seguridad es la forma práctica para establecer la estabilidad de un talud y se obtiene mediante un proceso matemático de forma manual o bien con la ayuda de software especializados. Resulta de suma importancia tomar en cuenta la mayor cantidad de factores que afectan la estabilidad en el análisis, tales como las propiedades de los suelos, geología local, sobrecargas, nivel freático, grietas de tensión, sobrecargas, etc. (Sanz, et al., 2015)

Los modelos de equilibrio límite consisten en las bases de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno que tiene indicios de inestabilidad. Estos métodos se caracterizan por su simplicidad, de los cuales se obtienen resultados razonables de factor de seguridad, al modelar geometrías complejas de manera rápida y fiable al reproducir la superficie de rotura más probable. Sin embargo, su principal limitación es que se asume que la resistencia al corte del terreno se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte, por lo que no se toma en cuenta el estado tensional ni la cuantía de las deformaciones. La movilización del terreno modifica las características resistentes, por lo que en estos modelos no los considera. (Sanz, et al., 2015)

Entre los métodos de equilibrio límite basado en dovelas existen consideraciones similares tales como:

- La zona de falla se divide en un número finito de dovelas
- Toda la zona de falla actúa como un cuerpo rígido
- La fuerza normal de cada dovela actúa en el centro de la base de cada una.
- El factor de seguridad obtenido se distribuye en una magnitud similar a lo largo de toda la superficie de falla.
- Las fuerzas interdovelas son supuestas para que el problema no sea indeterminado.
- Para la determinación del factor de seguridad se usa las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y/o momentos
- Los métodos iterativos se emplean para la determinación del factor de seguridad, el cual se define como las fuerzas/momentos resistentes y fuerzas/momentos desequilibrantes.

(Iñiguez, 2011)

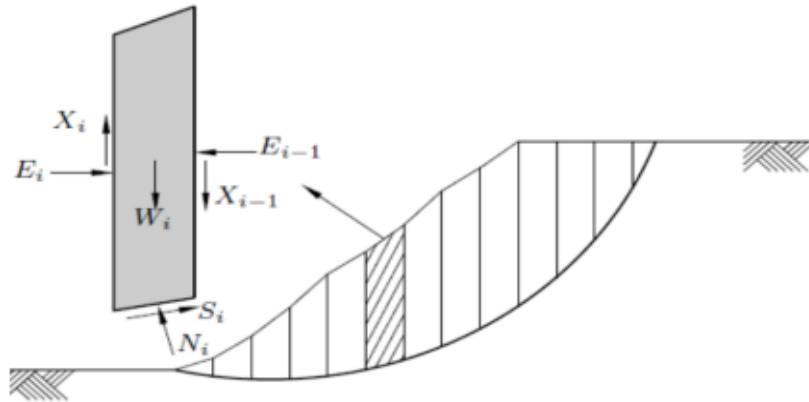


Figura 4. Fuerzas consideradas en un mecanismo de rotura circular
Fuente: Iñiguez, 2011.

La aplicación de estos métodos precisa de los siguientes pasos de diseño:

1. Como primer punto se ubica un mecanismo de falla, considerando que las masas de suelo se asumen rígidas y que sobre éstas se deslizan superficies plásticas susceptibles a rotura. Las formas geométricas que se pueden dar son rectas, circunferencias y espirales logarítmicas. No obstante, si los suelos no son homogéneos e isotrópicos estas superficies pueden variar.
2. Para determinar el coeficiente de seguridad se considera el concepto de resistencia al corte, donde el valor máximo de esfuerzo al corte de los suelos es dividido entre el coeficiente de seguridad, a manera de llevar a la masa potencialmente inestable a un equilibrio límite a lo largo de una superficie de deslizamiento.
3. Empleando los conceptos de estática se establecen relaciones entre las fuerzas y momentos que interactúan en el talud. Las fuerzas activas del desequilibrio (cargas, peso del suelo, presiones de agua, etc.) y las fuerzas internas resistentes, generan las siguientes condiciones de equilibrio.
 - a. Ecuaciones de equilibrio de fuerzas (horizontales y verticales)
 - b. Una ecuación de equilibrio de momentos
4. El factor de seguridad se obtiene al despejar F de las ecuaciones de equilibrio, con la tendencia a encontrar el factor de seguridad mínimo, al cambiar la geometría de la superficie de falla, por lo que este proceso es repetitivo.

(Iñiguez, 2011)

3. Métodos de cálculo

Las distintas técnicas de límite de equilibrio suponen que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla, por lo que el factor de seguridad es de 1.0. Estas técnicas son las más empleadas en la práctica común para el cálculo de estabilidad de taludes.

Conforme el avance de la tecnología se ha ido mejorando el sistema de dovelas desarrollado por Petterson y Fellenius (1936). Métodos como el de Bishop (1955) y Janbú (1954) pueden utilizarse sin la ayuda de un ordenador. Además, cuando estos métodos se implementan en programas informáticos tienen la ventaja de realizar un análisis de manera rápida al analizar un gran número de superficies de

deslizamiento. Sin embargo, métodos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer resultan más precisos y complejos que junto con programas, realizar análisis más rigurosos.

E. Métodos de esfuerzo deformación

1. Descripción general

En casos particulares resulta importante cuantificar las deformaciones producidas en el talud. Los modelos de equilibrio límite solamente aseguran la estabilidad del talud. Aunque se ha demostrado que son métodos ampliamente utilizados y exitosos para la evaluación de la estabilidad de una pendiente, cabe destacar no consideran la teoría de esfuerzo deformación. (Sanz, et al., 2015)

En la actualidad el método de elementos finitos (MEF) resulta una herramienta computacional competente en ingeniería. Los problemas de estabilidad de taludes en donde se emplea MEF tienen dos importantes distinciones respecto a los métodos de equilibrio límite.

1. La ecuación de estabilidad del talud por elementos finitos es determinada, por lo que no es necesario realizar suposiciones para poder completar los cálculos.
2. La ecuación del factor de seguridad es lineal, esto debido a que la tensión en la base de la faja es conocida.

El método de elementos finitos supone la definición de falla similar a la de los métodos de equilibrio límite, estos proponen en principio una superficie de deslizamiento que luego examina el valor del coeficiente de seguridad de la misma, este se define como la relación entre la resistencia de corte disponible y movilizador a lo largo de la superficie. (Beneyto, et al., 2011)

Este método precisa de una discretización previa del problema por medio de una malla. Por lo que en primer lugar se modela la sección tipo de estudio, considerando los parámetros del suelo tales como peso específico, cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson y se definen las condiciones iniciales que afectan la estabilidad del talud. Posteriormente, se simula la secuencia constructiva. (Sanz, et al., 2015)

Acorde a Griffiths & Marquez, (2007), el MEF tiene como serie de ventajas sobre el método tradicional de corte de análisis, las siguientes:

1. Eliminación de las hipótesis *a priori* sobre la forma y ubicación de las superficies de falla.
2. Descartar los supuestos relativos a las inclinaciones y ubicaciones de las fuerzas intersticiales.
3. Capacidad para modelar la falla progresiva.
4. Cálculo de deformaciones a niveles de tensión de pendiente.
5. Simulación de análisis considerando una secuencia constructiva.
6. Proyección de deformaciones en cada secuencia constructiva.

2. Teoría básica de elasticidad y factor de seguridad

La teoría de elasticidad empleada en elementos finitos se basa en el principio de trabajo virtual, en donde para una deformación virtual indefinidamente pequeña de un cuerpo que se encuentra en equilibrio, el trabajo virtual de las fuerzas exteriores es equivalente al trabajo virtual interno de

deformación. La siguiente figura muestra el diagrama de fuerzas y deformaciones presentes en el trabajo virtual de un elemento finito. (Joshi & Hayashi, 2010)

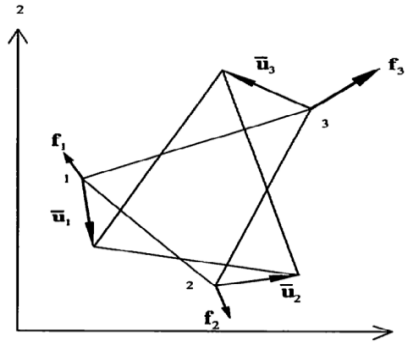


Figura 5. Trabajo de vector de fuerza y vector de desplazamiento virtual en cada punto nodal de un determinado elemento finito

Fuente: Hayashi, 2008.

Mientras se toma $\bar{\epsilon}$ como tensión virtual derivada del desplazamiento virtual y s como tensión, la energía de deformación del elemento se muestra como:

$$U = \int_S (\bar{\epsilon})^T s dS$$

Dentro de esta teoría se suman parámetros tales como el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson que son necesarios para llevar a cabo un modelo con elementos finitos, a diferencia del criterio de Mohr-Coulomb que se describe como una relación lineal entre el esfuerzo cortante y normal. (Das, 1985). Los métodos numéricos emplean el método “phi-reduction”, por lo que los materiales tienen una reducción de resistencia al corte aplicando un factor de seguridad (SRF), hasta alcanzar un valor en el cual el proceso no es convergente. (Sanz, et al., 2015)

$$c'_f = \frac{c'}{SRF} \quad \phi'_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi'}{SRF}\right)$$

A manera de obtener un factor de seguridad verdadero, el factor de reducción de resistencia se incrementa progresivamente hasta producir un fallo en la pendiente. Cuando ese valor crítico es encontrado, el factor de seguridad de la pendiente es igual al factor de reducción de resistencia, por lo que FS=SRF. (Griffiths & Marquez, 2007). Si el algoritmo supera el límite de iteración, resulta en que el algoritmo no puede encontrar una redistribución de tensiones que satisfaga tanto el equilibrio global como el criterio de fallo de Mohr-Coulomb con parámetros de resistencia reducidos

F. Software de estabilidad de taludes

1. Software de equilibrio límite

Una de las limitaciones de los software de equilibrio límite es que solo es posible llevar a cabo cálculos bidimensionales. Para calcular el factor de seguridad, los programas basados en el equilibrio límite dividen el suelo en rebanadas, mediante líneas verticales. Para cada rebanada se calcula el diagrama de fuerzas actuantes y se plantea un sistema de ecuaciones a resolver. Con los datos introducidos no es posible resolver el sistema de ecuaciones planteado, por lo que se realiza una

hipótesis respecto a la dirección, magnitud y/o punto de aplicación de algunas fuerzas. (González, 2018)

De los programas más empleados en el campo se describen los siguientes:

- GEO5 Software: este programa se utiliza para análisis de estabilidad de taludes, terraplenes, corte de tierra, estructuras de contención ancladas, muros de suelo reforzado, etc. La superficie de deslizamiento se considera circular o poligonal y se analiza por todos los métodos generales.
- GEOSTUDIO: diseñado para gran variedad de proyectos tales como problemas de estabilidad de taludes, construcciones y excavaciones, muros de contención, entre otros, basado en superficies de deslizamiento.
- SLIDE: es un software de análisis de estabilidad de taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite. Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas.
- GEOSTRU: permite realizar el análisis espacial de la caída de rocas y proyectar obras de protección optimizadas. Está provisto de un sofisticado algoritmo para el análisis espacial. La modelación del talud se realiza con un plano acotado que se puede importar de diversos formatos o software externos.

(EGSciences, 2023)

2. Software de elementos finitos

En general, los programas de MEF se emplean para cálculo de desplazamientos, fuerzas internas en elementos estructurales, tensiones y deformaciones, evaluación de zonas plásticas en el suelo, entre otros. Además, tienen la capacidad de evaluar cada una de estas características en las distintas etapas de construcción.

De los programas más empleados en el campo se describen los siguientes:

- Abaqus: brinda soluciones para problemas lineales y no lineales. Mediante este programa puede dársele solución a situaciones tradicionales del análisis de elementos finitos como: estáticas, dinámicas, térmicas, etc. (CIMWORKS, s.f.)
- Plaxis: es recomendado para problemas de excavaciones subterráneas, análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a grandes cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo acoplado. Plaxis permite el estudio de una gran variedad de modelos constitutivos. (Seequent, s.f.)
- Midas: GTS NX: se destaca por realizar un mallado automático, creación de geometrías 3D de forma sencilla y la facilidad de importarlas de otro programa. Posee un entorno versátil y la rapidez para resolver modelos dinámicos y estáticos por etapas constructivas. (Midas, s.f.)
- GEO5 MEF: permite modelar y analizar una amplia cantidad de problemas geotécnicos, que incluye asentamiento del terreno, muros diafragma/tablestacas, estabilidad de taludes, excavaciones, análisis de túneles. (Fine Software, s.f.)

G. Protección de taludes con soil nailing

1. Muros soil nailing

El método de soil nailing consiste en una técnica de refuerzo del terreno para estabilizar taludes. El sistema consiste en introducir anclajes de refuerzo pasivos que trabajan principalmente a tracción, pero también pueden tomar cargas de flexión y corte. Las barras se colocan en sondeos previamente perforados y luego se rellenan con lechada o mortero de inyección. El talud se completa con la ejecución de una pantalla vertical que se realiza con hormigón proyectado y con refuerzo de malla de acero. (Yepes,2019)

La separación de los anclajes suele ser de entre 1.50 a 2.00 m, con inclinaciones entre 10° y 25° respecto a la horizontal. Las condiciones del terreno indicarán la longitud del anclaje, puesto que disminuirá conforme el descenso del talud, dado a que la cuña de falla se acorta.

Cabe resaltar que este método no es aplicable en las siguientes condiciones:

- Bajo nivel freático y tampoco cuando el suelo es blando, en donde se requiera un control estricto de las deformaciones.
- En arenas y suelos sin cohesión, puesto que al perforar el suelo suele colapsar. Además, no resulta factible
- En taludes o deslizamientos muy altos, pues los anclajes serían de mucha longitud, lo que comercialmente no se encontraría en el mercado.

2. Elementos constructivos del soil nailing

Los nails fueron desarrollados por primera vez en Europa y la primera aplicación fue en Francia en 1972. En este sistema los refuerzos no son pretensados por lo que actúan de forma pasiva. A continuación, se muestran los elementos de un detalle típico de soil nailing. (Suárez, 2012)

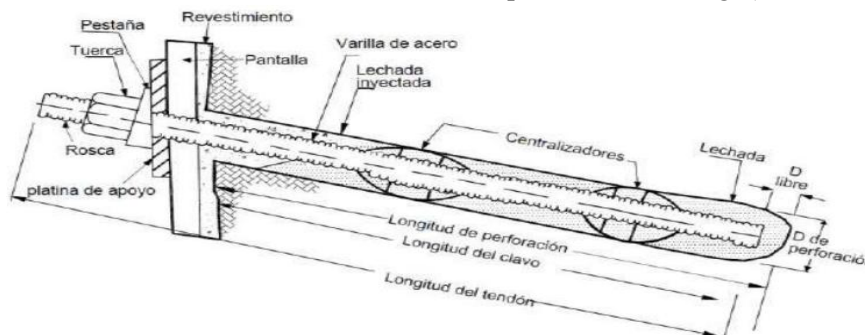


Figura 6. Esquema de los tipos de clavo, con rosca y platina

Fuente: Suárez, 2012.

3. Refuerzos

El componente principal de un clavo es una varilla de acero sólido. Generalmente se emplean varillas con resistencia a la tensión de 420 a 520 Mpa (grado 60 o 75) y van de varillas No.6 hasta No.10. (Caussin & Cruz, 2019)

4. Funcionamiento del soil nailing

Se consideran los siguientes factores para estabilizar una estructura de soil nailing:

- Transferencia de carga por medio de suelos sueltos o blandos a un material mucho más competente
- Resistencia pasiva desarrollada a lo largo de la superficie perpendicular a la dirección del nail.
- Desarrollo de fricción o adherencia en la interfaz suelo-nails. (refuerzo del suelo)

Conforme avanza la profundidad de la excavación los nails incrementan su carga de tensión. Esto genera mayor resistencia al corte en el suelo como a su vez los desplazamientos horizontales disminuyen en la corona de la pared de excavación.

(Caussin & Cruz, 2019)

5. Estabilidad de muros de soil nailing

a. Modos de falla internos

Las fallas suceden específicamente cuando los mecanismos de transferencia de carga entre el suelo y los anclajes son inadecuados. Los más concurrentes suceden por falta de resistencia en la capacidad de arranque del anclaje o por cargas de tracción mayores a la que puede soportar la barra de acero. A continuación, se describen algunas de las fallas más comunes.

- Falla por falta de adherencia del bulbo: corresponde a la adherencia entre el suelo y la lechada. Se puede deber a una mala estimación de la fricción del suelo, ejecución deficiente de los refuerzos o que los anclajes no tengan el largo suficiente en la zona pasiva. (Clouterre, 1991)
- Falla por tracción en el anclaje: sucede cuando la carga axial supera la capacidad de tracción del acero y al no aportar resistencia el sistema tiende a colapsar. Algunas de las causas son por sobrecargas no consideradas sobre el muro, corrosión en las barras y empleo inadecuado de la sección transversal del anclaje. (Cerde, 2020)

b. Modos de falla en conexión anclaje-muro

Generalmente ocurren debido a una resistencia al momento flector en el revestimiento y por el punzonamiento ubicado alrededor de la placa del anclaje, lo que resulta en un diseño poco apropiado de la conexión. Se mencionan algunas fallas.

- Falla por flexión en el revestimiento: cuando el momento de flexión sobre el muro debido a la presión lateral del suelo es excesivo, provoca la aparición de rotulas plásticas a lo largo de la línea de influencia.
- Falla por punzonamiento: las conexiones de los anclajes y el revestimiento están influenciadas por un estado límite de punzonamiento, dado a que la resistencia al corte del shotcrete alrededor de los refuerzos es insuficiente y se genera una superficie cónica en el revestimiento alrededor de la placa de soporte. (Lazarte, 2015)

c. Modos de falla externos

Se basan en las fallas producidas debido a la inestabilidad del suelo, generando una superficie potencial de falla con tendencia a deslizar por la plastificación del terreno en la zona adyacente a esta superficie.

- Falla por estabilidad global: corresponde cuando un anclaje puede ser interceptado por la falla. El aporte a la resistencia del suelo puede ser modelada como resistencia friccional, cohesiva o ambas.
- Falla por deslizamiento: en esta falla se considera al suelo como un muro gravitacional que resiste contra la presión lateral del terreno. La falla comienza a ocurrir cuando el empuje lateral del terreno excede la capacidad del deslizamiento a lo largo de la base.
- Falla por capacidad de soporte: ocurre ocasionalmente en suelos blandos de grano fino, por lo que si se generan excavaciones con profundidades excesivas puede suceder un desbalance de fuerzas en el pie de la excavación, resultando en un movimiento basal.

(Lazarte, 2015)

6. Metodología constructiva del muro soil nailing

La metodología consiste en realizar excavaciones por cortes de alrededor de 2.50m, luego se realiza la perforación para colocar la barra dentro de ésta y rellenar con lechada o mortero de inyección. El diámetro de la perforación oscila entre 50 y 150mm. Posteriormente, se ejecuta un revestimiento o pantalla a modo de impedir la caída de tierra. El proceso se repite hasta llegar al fondo de excavación. (Yepes, 2019)

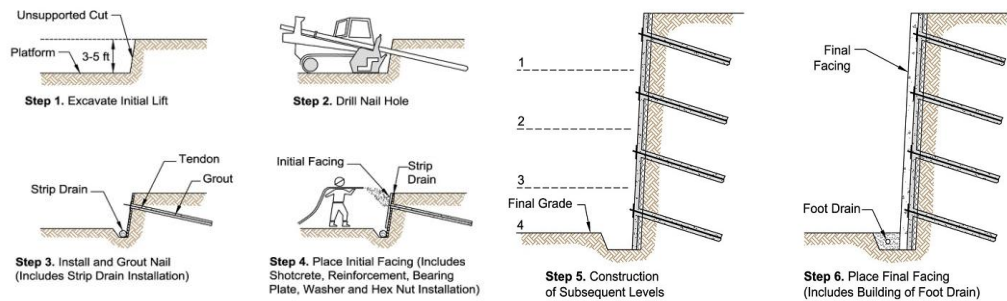


Figura 7. Procedimiento constructivo del suelo claveteado

Fuente: Yepes, 2019.

V. MARCO METODOLÓGICO

A. Modelo geotécnico

Con base en la información geológica y los estudios detallados de suelos realizados en el Valle Central de Guatemala, se identificaron y analizaron las propiedades predominantes de los diferentes tipos de estratos representativos de la región. Este análisis permitió obtener un panorama integral de las propiedades y comportamientos geotécnicos de los materiales presentes en el subsuelo. Como resultado de este proceso, se desarrolló un modelo geotécnico que describe de manera precisa las condiciones subyacentes y que sirve como base el desarrollo y evaluación de esta tesis. A continuación, se presenta dicho modelo.

Profundidad		Descripción	γ	φ	c'	E	Poisson
Inicial	Final		tonf/m ³	°	tonf/m ²	kN/m ²	
0.00	-0.50	Capa orgánica	1.60	20	1.00	10,000	0.30
-0.50	-3.50	Talpetate	1.40	28	2.00	15,000	0.30
-3.50	-4.50	Polvillo	1.30	37	1.50	30,000	0.25
-4.50	-10	Limo arenoso	1.50	30	2.00	40,000	0.30
-10	-20	Selecto	1.40	38	2.50	70,000	0.25

Cuadro 1. Propiedades de cada estrato del modelo geotécnico

Fuente: Elaboración propia, 2025.

B. Secciones a analizar

Se propuso llevar a cabo una evaluación detallada considerando tres profundidades específicas: 6, 9 y 12 metros. Para la estabilización mediante el sistema de soil nailing, se planteó el uso de barras de acero de especificación No. 8, grado 60 con 15° de inclinación. Estas barras están distribuidas siguiendo un patrón de espaciamiento uniforme, tanto en sentido vertical como horizontal, con una separación máxima de 1.75 metros.

Este criterio uniforme tiene como propósito garantizar la consistencia en el diseño y asegurar que las tres secciones propuestas cumplan con los mismos estándares técnicos y estructurales. A continuación, se presentan las secciones típicas correspondientes, donde se detalla la disposición de las barras de anclaje y otros elementos relevantes del sistema.

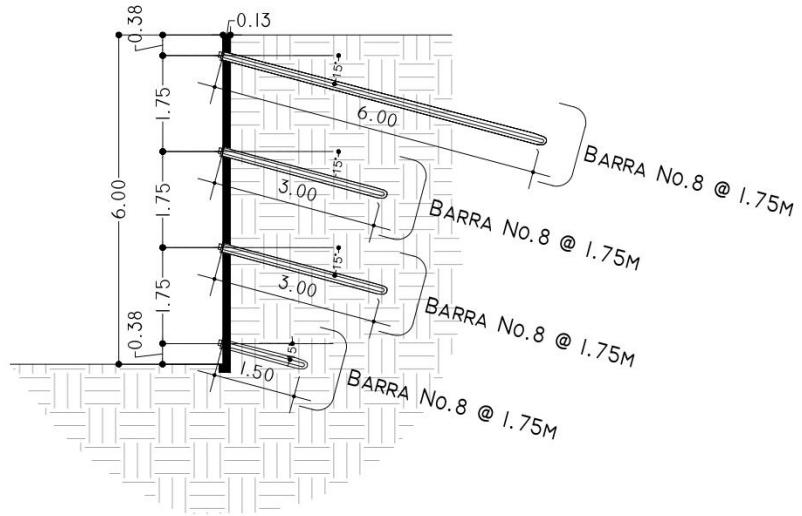


Figura 8. Sección típica 6 metros de profundidad

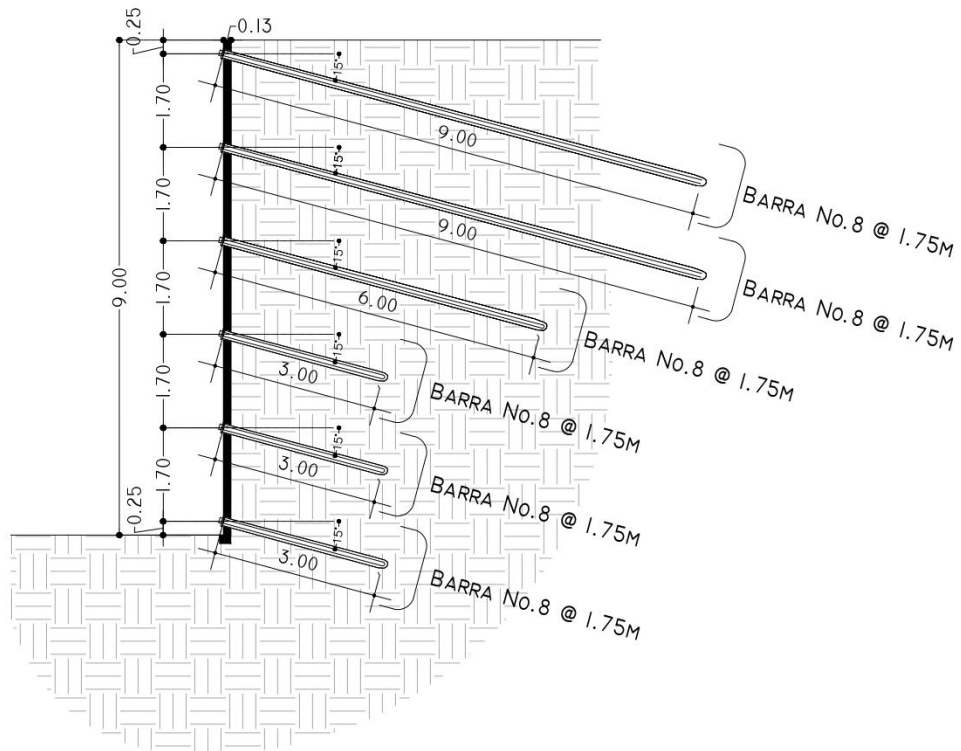


Figura 9. Sección típica 9 metros de profundidad

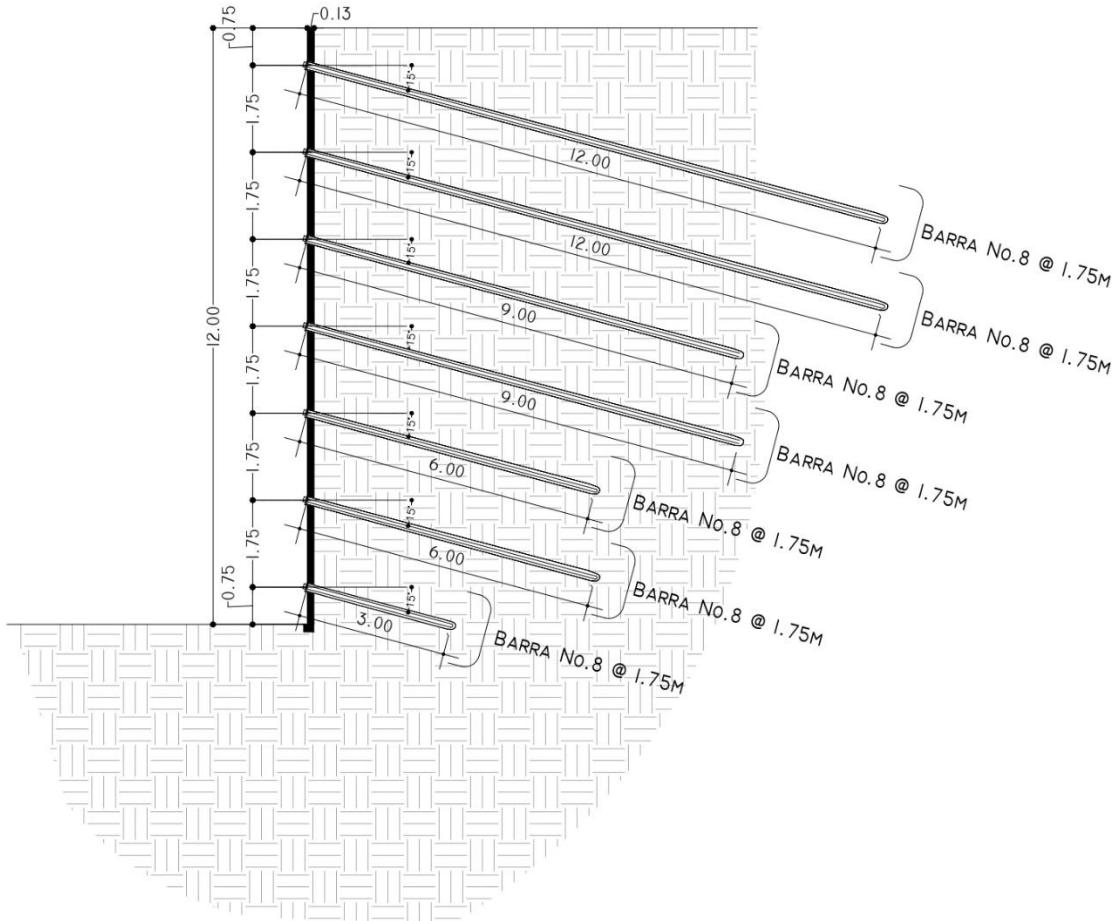


Figura 10. Sección típica 12 metros de profundidad

1. Colindancias

Se consideró que todas las secciones propuestas para el análisis presentan colindancia directa con una calle, lo que implica que están sujetas a las cargas adicionales derivadas del tránsito vehicular y otros factores asociados al uso de esta infraestructura vial. En consecuencia, se definió una sobrecarga uniforme de 1 tonelada por metro cuadrado (1 ton/m²) para representar estas condiciones en el diseño. (SE-AE, 2009)

2. Coeficientes sísmicos

A manera de determinar los coeficientes sísmicos a emplear en este estudio se consultaron las normas AGIES NSE 2: Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio y AGIES NSE 5.3: Obras de retención, el procedimiento se detalla a continuación.

Se establece que la probabilidad nominal de ocurrencia de los sismos es de 5% en 50 años, por lo que el factor $k_d = 0.80$.

Nivel de sismo	Factor K_d
Sismo ordinario — 10% probabilidad de ser excedido en 50 años	0.66
Sismo severo — 5% probabilidad de ser excedido en 50 años	0.80
Sismo extremo — 2% probabilidad de ser excedido en 50 años	1.00
Sismo mínimo — condición de excepción	0.55

Figura 11. Factores k_d de acuerdo con el nivel de sismo
Fuente: AGIES NSE 2 Demandas estructurales y condiciones de sitio.

El factor de amplificación del suelo para deformaciones elásticas en el diseño sísmico S_{cd} , es el siguiente:

$$S_{cd} = k_d \cdot S_{cr}$$

Donde S_{cr} = factor de amplificación del suelo para la aceleración espectral de diseño reducido. Para la Ciudad de Guatemala considerando un suelo tipo D $S_{cr} = 1.461$ respecto a la Tabla A-1 Listado de amenaza sísmica y velocidad básica del viento por municipio para la República de Guatemala de la norma AGIES NSE 2

$$S_{cd} = 0.80 \cdot 1.461 = 1.17$$

La aceleración máxima del suelo corresponde a:

$$AMS_d = 0.40 \cdot S_{cd} \rightarrow AMS_d = 0.40 \cdot 1.17 = 0.47$$

El coeficiente de la aceleración del suelo, la cual actúa en el centroide de la masa de suelo se define como:

$$A_m = (1.45 - AMS_d) \cdot AMS_d \rightarrow (1.45 - 0.47) \cdot 0.47 = 0.46$$

A continuación, se detallan los coeficientes sísmicos verticales y horizontales del suelo.

$$k_h = 0.50 \cdot A_m \rightarrow 0.50 \cdot 0.46 = 0.24$$

$$k_v = 0.50 \cdot k_h \rightarrow 0.50 \cdot 0.24 = 0.12$$

3. Factores de seguridad

Con el objetivo de asegurar el cumplimiento de la norma AGIES NSE 5.3: Obras de retención, se han definido y adoptado los siguientes factores de seguridad para garantizar la estabilidad global de la estructura.

FS para muro permanente en condición de servicio = 1.50

FS para muro permanente en condición de servicio y sismo = 1.10

Tabla 5.1.4.2-1 — Factores de Seguridad Mínimos para Estabilidad Global

Condición de carga	F.S. mínimo	F.S. mínimo (durante proceso constructivo)
Servicio (muro permanente)	1.50	1.30
Servicio + Sismo (muro permanente)	1.10	1.00
Servicio (muro temporal)	1.35	1.30
Servicio + Sismo (muro temporal)	1.00	1.00

Figura 12. Factores de seguridad mínimos para estabilidad global
Fuente: AGIES NSE 5.3 Obras de retención.

C. Propiedades de las barras de acero

Como se mencionó con anterioridad se emplearon barras No.8 de acero grado 60 por lo que sus propiedades generales son:

Esfuerzo de fluencia f_y (Mpa)	420
Diámetro de la barra (mm)	25.4
Módulo de elasticidad (Gpa)	200

Cuadro 2. Propiedades generales de la barra de acero No. 8 grado 60
Fuente: Grupo Aceros de Guatemala.

1. Resistencia a la fractura por tensión

La resistencia a la fractura por tensión de un miembro de acero se puede calcular de la siguiente manera considerando que el factor $\phi_t = 0.75$ según la tabla 6.3 del FHWA NHI 14-007.

$$\phi_t \cdot P_n = \phi_t \cdot f_y \cdot A_g$$

Donde:

ϕ_t : 0.75

f_y : esfuerzo de fluencia

A_g : área gruesa

$$P_n = 0.75 \cdot 420 \text{Mpa} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (25.4 \text{mm})^2 = 157.21 \text{kN}$$

2. Resistencia al cortante

Considerando el supuesto que la barra es corta y no es susceptible al pandeo la resistencia se calcula con la siguiente ecuación, con la diferencia que ahora el factor $\phi_c = 0.40$ según el apartado 2 de la sección J4 del AISC 360-10.

$$P_n = 0.40 \cdot 420 \text{Mpa} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (25.4 \text{mm})^2 = 83.85 \text{kN}$$

D. Propiedades del muro soil nailing

El muro nailing presenta dos condiciones diferenciadas: una de sus caras está en contacto permanente con el suelo, lo que, según la tabla 20.6.1.3.1 de la norma ACI 318-14, requiere un recubrimiento mínimo de 3 pulgadas (7.5 cm). La otra cara del muro, expuesta al clima, demanda un recubrimiento de 2 pulgadas (5 cm). En función de estas exigencias, se propone un espesor total del muro de 13 cm.

1. Módulo de elasticidad del muro

Puesto que se trata de un muro lanzado con lechada se asumió un concreto de 210 kgf/cm² (3000psi). Según el ACI 318-14 en la sección 19.2.2 el módulo de elasticidad para concreto de peso normal se determina de la siguiente manera.

$$E_c = 14000 \cdot \sqrt{f'_c} \rightarrow 14000 \cdot \sqrt{\frac{210kg}{cm^2}} = 19938.25MPa$$

2. Inercia

Considerando la altura como unitaria, se calcula la inercia considerando el muro como un rectángulo.

$$I_{muro} = \frac{1}{12} b^3 h \rightarrow \frac{1}{12} \cdot (13cm)^3 \cdot 100cm = 18308.33cm^4$$

3. Peso del muro

Empleando un peso específico del concreto con agregado de peso normal (McCormac, 2018) de 24kN/m³, se determina el peso del muro por ancho unitario.

$$W_{muro} = A_{muro} \cdot \gamma_c \rightarrow 0.13m \cdot 1m \cdot 24 \frac{kN}{m^3} = 3.12 \frac{kN}{m}$$

E. Propiedades de la zapata

Dado que la zapata está en contacto permanente con el suelo, se debe garantizar un recubrimiento mínimo de 3 pulgadas (7.5 cm), conforme a lo establecido en la Tabla 20.6.1.3.1 de la norma ACI 318-14. Considerando este requisito, se propone un espesor total de 40 cm para la zapata.

1. Módulo de elasticidad del muro

Para garantizar la homogeneidad entre el muro y la zapata, se asume un concreto con una resistencia de 210 kgf/cm² (3000 psi). Por lo tanto, el módulo de elasticidad es el mismo calculado previamente en la sección D-1.

2. Inercia

Asumiendo una altura unitaria, la inercia de la zapata se calcula considerando su geometría como la de un rectángulo.

$$I_{muro} = \frac{1}{12} b^3 h \rightarrow \frac{1}{12} \cdot (40cm)^3 \cdot 100cm = 5333.33cm^4$$

3. Peso de la zapata

Utilizando un peso volumétrico del concreto con agregado de peso normal de 24 kN/m³ (según McCormac, 2018), se calcula el peso de la zapata por unidad de ancho.

$$W_{muro} = A_{muro} \cdot \gamma_c \rightarrow 0.40m \cdot 1m \cdot 24 \frac{kN}{m^3} = 9.6 \frac{kN}{m}$$

F. Análisis de equilibrio límite

En cuanto a la metodología de equilibrio límite se empleó utilizando el software GeoSlope. Este programa se utiliza para evaluar los distintos escenarios de taludes con muros soil nailing, puesto que es una herramienta ampliamente reconocida en la ingeniería geotécnica y permite realizar análisis detallados mediante el método de equilibrio límite, evaluando la estabilidad de los taludes bajo diferentes condiciones y parámetros de diseño. Su capacidad para modelar interacciones suelo-refuerzo lo convierte en una opción adecuada para este tipo de estudios.

1. Método seleccionado

Se seleccionó el método Mohr-Coulomb para la caracterización de las propiedades del suelo en el software GeoSlope, debido a su capacidad para modelar de manera efectiva el comportamiento mecánico de los suelos bajo diversas condiciones de carga. En este análisis, se utilizaron como parámetros principales el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales representan las propiedades más relevantes para describir la resistencia al corte del suelo. Estos parámetros se encuentran detallados en la Cuadro 1, donde se presentan los valores específicos que sirvieron como entrada para el modelo.

2. Propiedades del suelo

A continuación, se presenta la secuencia de los estratos definidos según la metodología de Mohr-Coulomb en el software GeoSlope, junto con la asignación de los colores específicos que identifican cada estrato.





Name	Slope Stability Material Model	Color
Capa Orgánica	Mohr-Coulomb	
Limo Arenoso	Mohr-Coulomb	
Polvillo	Mohr-Coulomb	
Selecto	Mohr-Coulomb	
Talpetate	Mohr-Coulomb	

Figura 13. Estratigrafía asignada en software GeoSlope

Fuente: Elaboración propia, 2025.

a. Capacidad friccionante del suelo

La resistencia del cuerpo de la inclusión depende principalmente de dos factores: primero, la adherencia entre el acero y la lechada de cemento, y segundo, la posibilidad de deslizamiento entre la inclusión y el terreno circundante. A continuación, se presentan valores de referencia de la resistencia media al deslizamiento de inclusiones en distintos tipos de suelo, con el objetivo de definir una resistencia global a tracción para su uso en el software GeoSlope.

Método constructivo	Tipo de terreno	Fricción última (lb/ft ²)
Perforación rotativa	Arena Limosa	2,000 – 4,000
	Limo	1,200 – 1,600
	Coluvio fino	1,500 – 3,000
	Coluvio grueso	2,000
Perforación rotativa en húmedo	Arena / Grava	6,000 – 9,000
Perforación con entubado	Arena	6,000
Perforados con barrena Helicoidal (Augered)	Coluvio	2,000 – 4,000
	Relleno de limo arenado	400 – 600
	Limo y arena fina	1,700 – 2,200
	Limo arcilloso arenoso	2,500 – 5,000

Cuadro 3. Capacidad de tracción estimada en suelos sin cohesión (inclusiones llenadas con lechada)
Fuente: Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations, 1991.

Método constructivo	Tipo de terreno	Fricción última (lb/ft ²)
Perforados con barrena Helicoidal (Augered)	Loess	500 – 6000
	Arcilla suave	400 – 600
	Arcilla dura	800 – 1,2000
	Limo arcilloso	800 - 2,000
	Arcilla limosa calcárea	4,000 – 6,000
Perforados con entubado	Arcilla limosa	3,600
	Limo arcilloso	1,800 - 3,000
Perforación rotativa	Arcilla limosa	700 - 950

Cuadro 4. Capacidad de tracción estimada en suelo cohesivos

Fuente: Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations, 1991.

Proy	Estrato	γ (T/m ³)	C (T/m ²)	Φ (°)	q_s (T/m ²)
GT	Limo Arenoso	1.60	4.0	37	36

Cuadro 5. Fricción desarrollada (q_s) con base en pruebas.

Fuente: Herrera, Pinetta, & Menéndez, 2019.

Basándose en las referencias anteriores, se establece que la resistencia a la fricción aplicada es de 200 kPa (4,000 lb/ft²) para todas las secciones.

3. Propiedades de las barras de acero

En la configuración de las propiedades del *nail* en GeoSlope, se definió la resistencia a la extracción, la capacidad a tensión. Se aplicó la cortante en dirección paralela al plano de deslizamiento, y la fuerza a lo largo del clavo se distribuyó uniformemente. Además, se detalló el

diámetro de adherencia y el espaciado fuera del plano. Como resultado, se calculó una resistencia ajustada a la extracción de 72.957 kN/m/m y una capacidad a tracción ajustada de 89.836 kN/m/F of S.

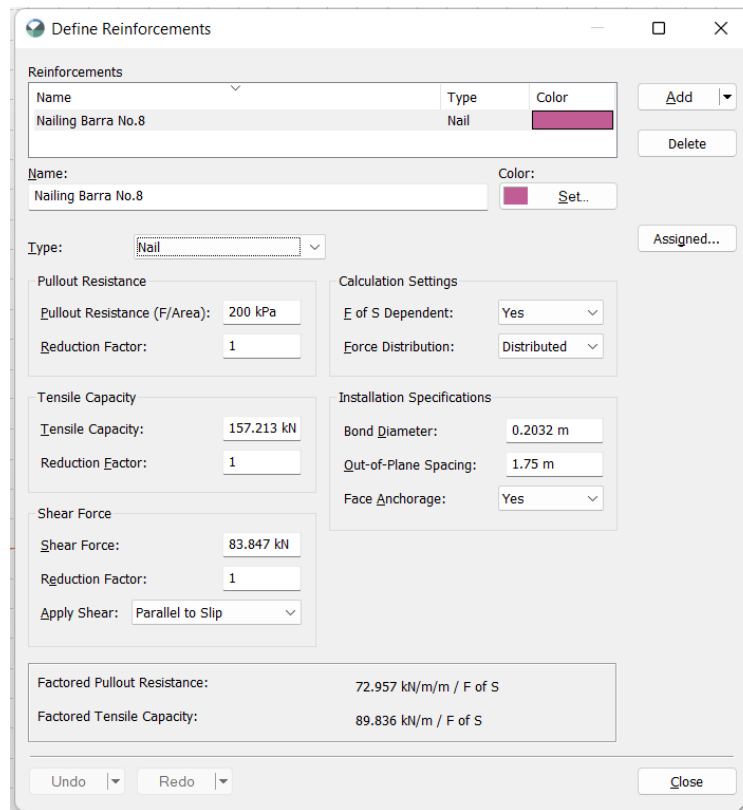


Figura 14. Propiedades ingresadas del *nail* en software GeoSlope para las secciones a analizar
Fuente: Elaboración propia, 2025.

4. Sobrecarga aplicada

Como se mencionó con anterioridad la sobrecarga aplicada en el modelo corresponde a 1 ton/m².

Surcharge Load	Surcharge (Unit Weight) (kN/m ³)	Direction
1	10	Vertical

Figura 15. Sobrecarga aplicada en software GeoSlope
Fuente: Elaboración propia, 2025.

5. Coeficientes sísmicos

Se emplearon los siguientes coeficientes sísmicos verticales y horizontales del suelo.

$$k_h = 0.24$$

$$k_v = 0.12$$

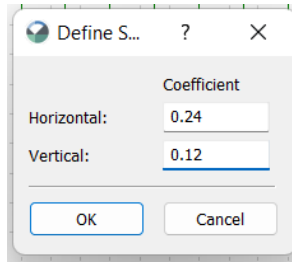


Figura 16. Coeficientes sísmicos aplicados
Fuente: Elaboración propia, 2025.

6. Factores de seguridad

a. Factor de seguridad estático en distintas alturas

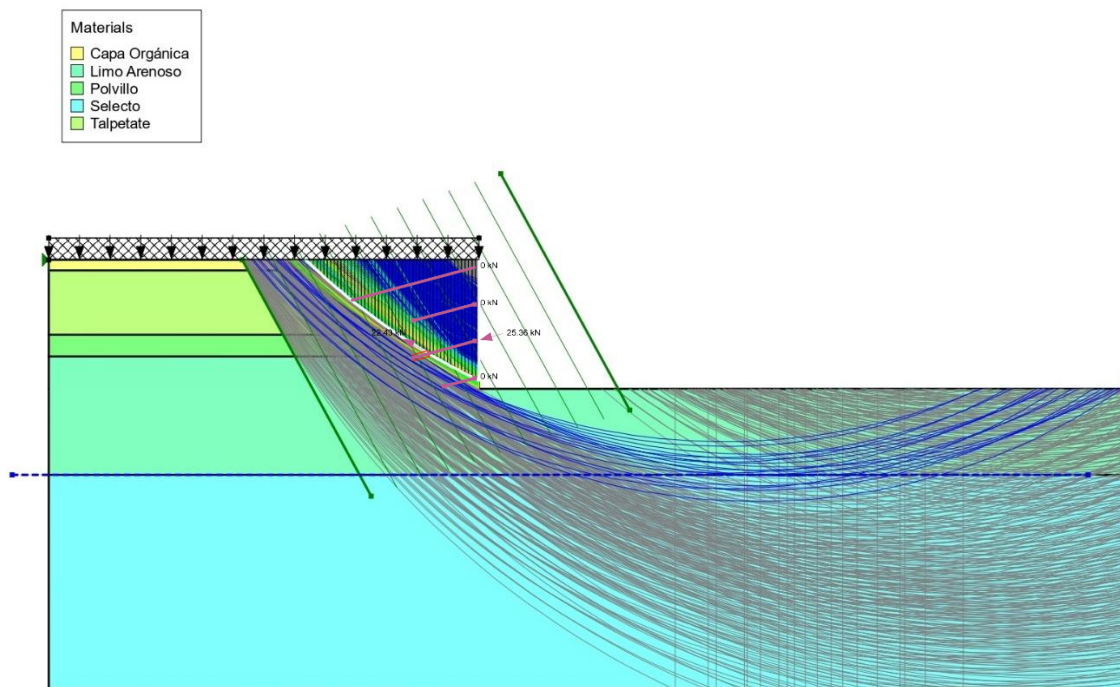
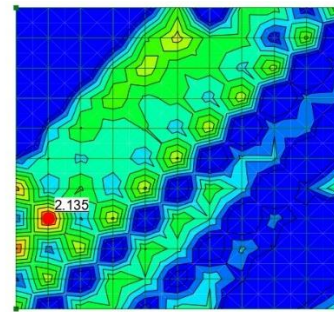


Figura 17. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 6m.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

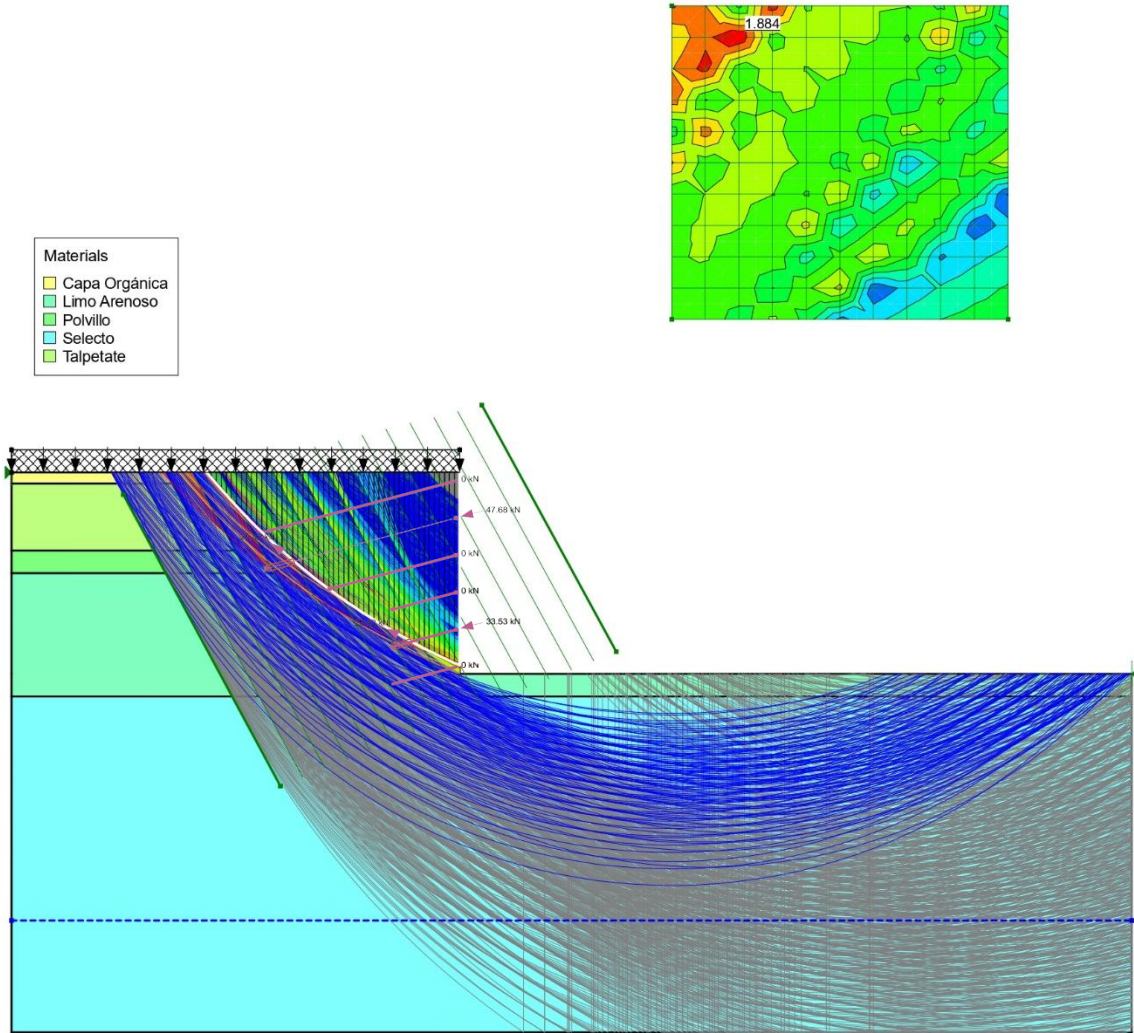


Figura 18. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 9m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

- Materials
- Capa Orgánica
 - Limo Arenoso
 - Polvillo
 - Selecto
 - Talpetate

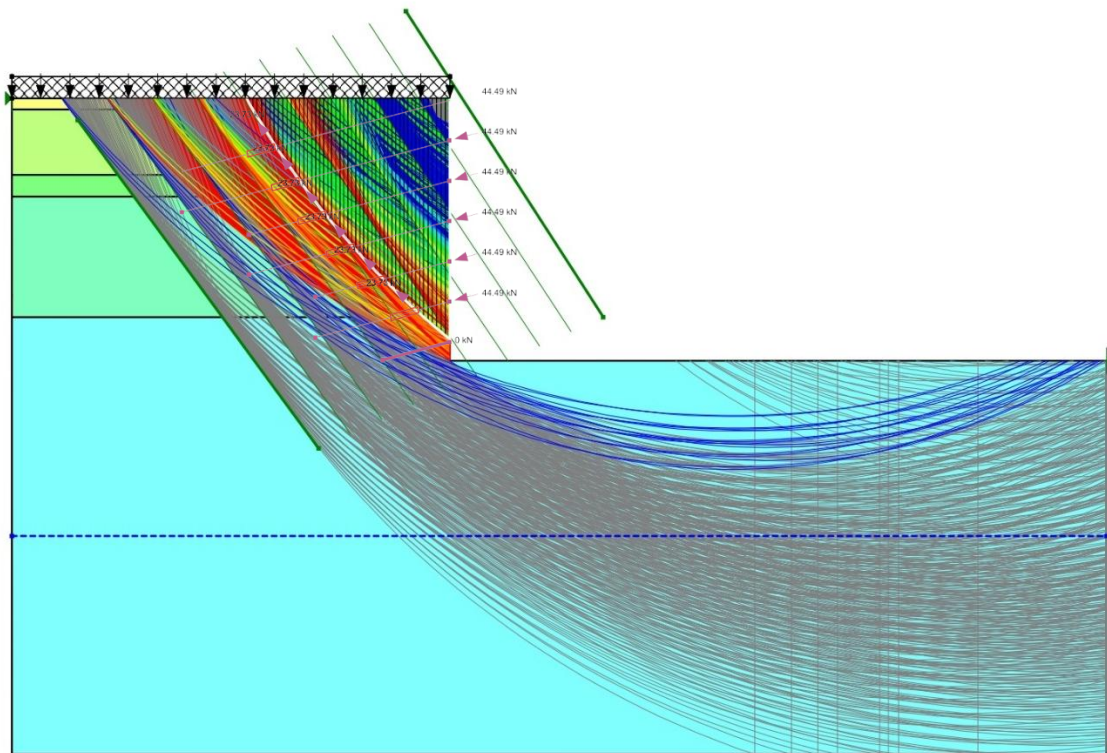
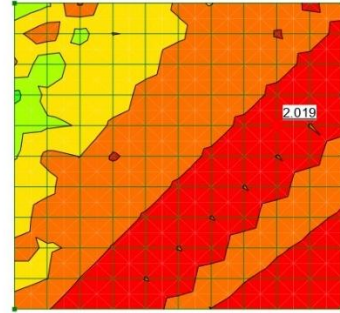


Figura 19. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 12m.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

b. Factor de seguridad sísmico en distintas alturas

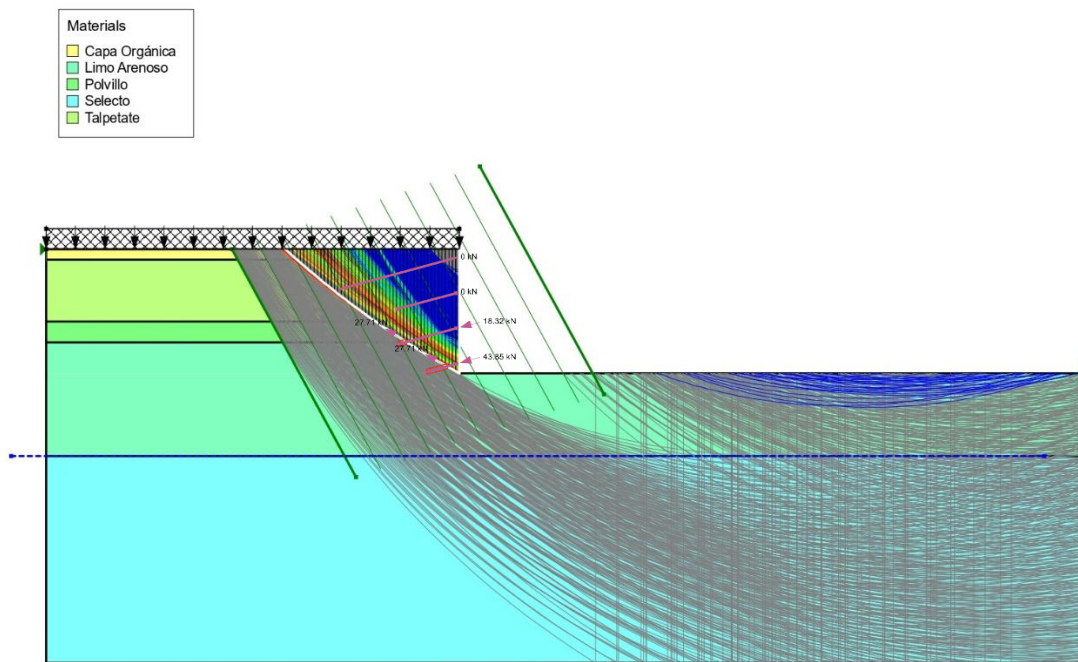
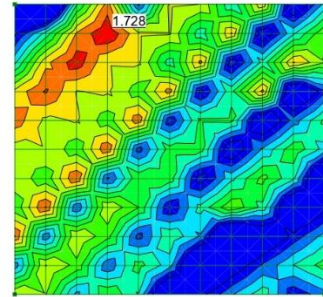


Figura 20. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 6m.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

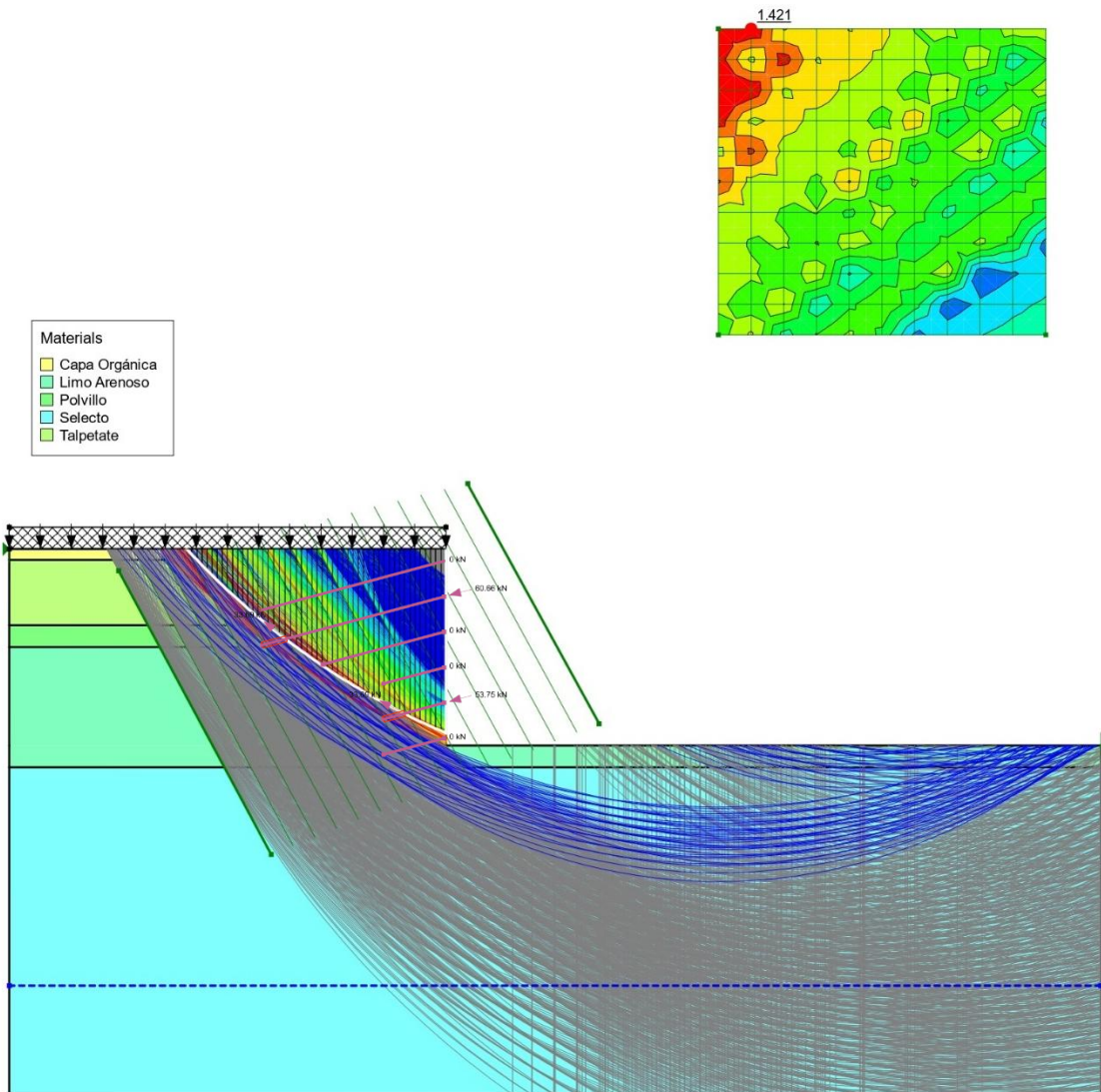


Figura 21. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 9m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

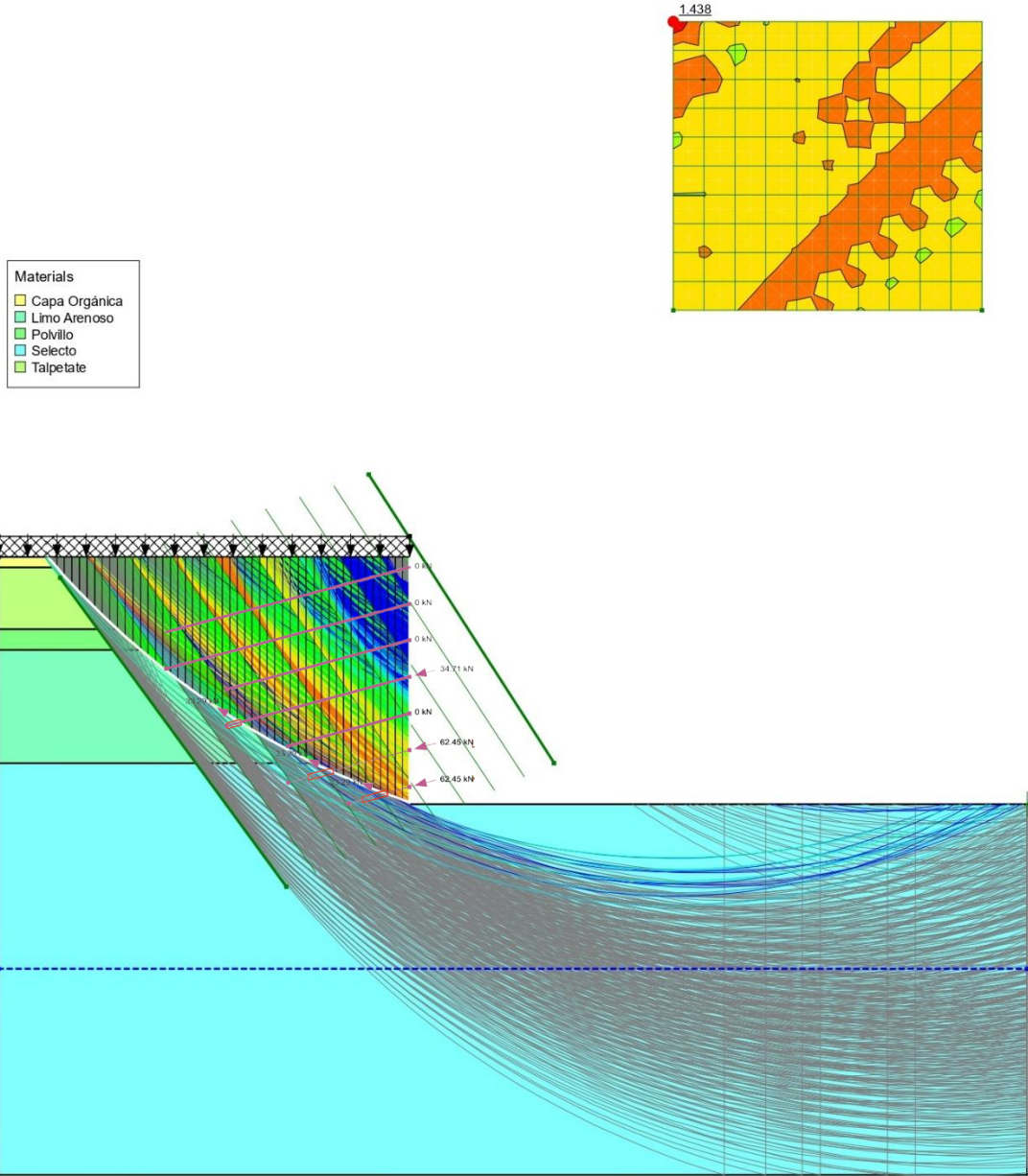


Figura 22. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 12m.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

G. Análisis de elementos finitos

Respecto a la metodología de elementos finitos se utilizó el software Plaxis. Se evaluó los diferentes escenarios de taludes con muros soil nailing, ya que Plaxis es una herramienta avanzada y ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para simular el comportamiento del suelo y las estructuras bajo condiciones complejas. Mediante la técnica de elementos finitos, Plaxis permitió modelar de manera detallada la interacción entre el suelo, el muro y los refuerzos, considerando efectos no lineales, deformaciones y esfuerzos en diferentes condiciones de carga. Esta metodología proporciona un análisis más preciso y realista de la estabilidad de los taludes estabilizados, permitiendo evaluar su desempeño bajo diversas condiciones y escenarios.

1. Método seleccionado

Se seleccionó el método Mohr-Coulomb para la caracterización de las propiedades del suelo en el software PLAXIS, empleando los parámetros fundamentales de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción para describir el comportamiento del suelo. Adicionalmente, a diferencia del análisis de equilibrio límite realizado en GeoSlope, en PLAXIS se incluyeron parámetros adicionales como el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson, los cuales son esenciales para modelar el comportamiento deformacional del suelo bajo cargas aplicadas, permitiendo un análisis más detallado y realista del sistema.

2. Propiedades del suelo

Se muestra a continuación la secuencia de los estratos caracterizados mediante la metodología de Mohr-Coulomb en el software PLAXIS, incluyendo los colores asignados para distinguir cada uno de ellos.

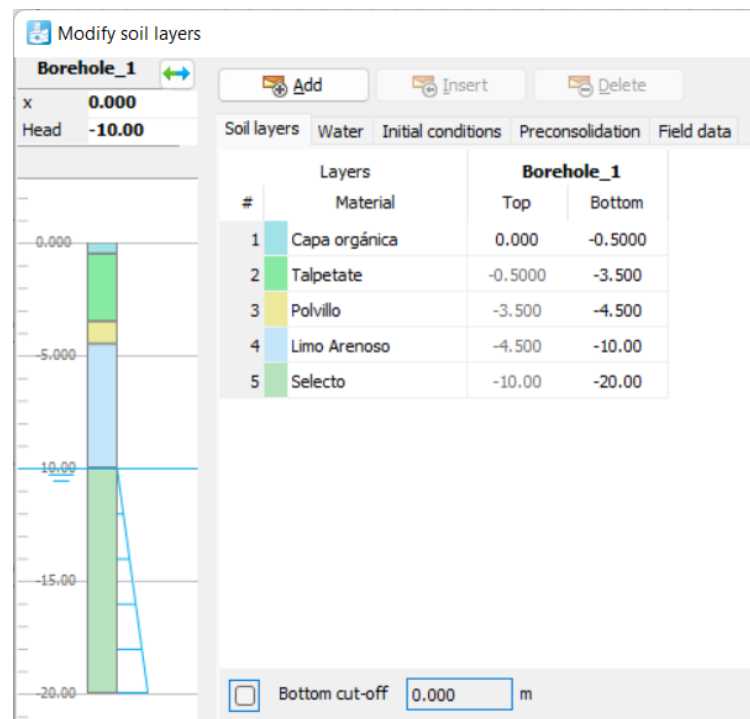


Figura 23. Estratigrafía asignada en software PLAXIS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3. Propiedades de las barras de acero

En el software PLAXIS, se ingresaron las propiedades correspondientes a la barra de acero. Se definió el espaciamiento, lo que representa la distancia entre barras en la dirección del plano. Además, la rigidez axial se estableció, indicando la capacidad de la barra para resistir deformaciones axiales bajo carga, basada en las propiedades del material y la sección transversal del acero utilizado.

Property	Unit	Value
Properties		
L _{spacing}	m	1.750
Stiffness		
EA	kN	104.4E3

Figura 24. Propiedades ingresadas del *nail* en PLAXIS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

4. Propiedades del muro

En el software PLAXIS, se definieron las propiedades correspondientes a un muro de concreto de 13 cm de espesor y resistencia de 3000 psi. Se identificó como un material elástico, con su respectivo peso unitario. Se ingresaron propiedades de rigidez isotrópica, incluyendo un módulo de elasticidad, rigidez axial, que reflejan la capacidad del muro para resistir cargas en dirección axial. Además, se especificó una rigidez a flexión, considerando su comportamiento ante momentos flectores. El módulo de Poisson se estableció como 0.20 (McCormac, 2018).

Property	Unit	Value
Material set		
Identification	Muro 13cm	
Material type	Elastic	
Colour	RGB 0, 0, 255	
Comments		
Unit weights		
w	kN/m/m	3.120

Property	Unit	Value
Properties		
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
Stiffness		
EA ₁	kN/m	2.592E6
EA ₂	kN/m	2.592E6
E ₁	kN/m ²	19.94E6
E ₂	kN/m ²	19.94E6
ET	kN m ² /m	3650
v (nu)		0.2000
d	m	0.1300

Figura 25. Propiedades ingresadas del muro en software PLAXIS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

5. Propiedades de la zapata

En el software PLAXIS, se asignaron las propiedades correspondientes a una zapata de 40 cm de espesor y concreto con resistencia de 3000 psi. El material se definió como elástico, incluyendo su peso unitario. Se incorporaron propiedades de rigidez isotrópica, como el módulo de elasticidad y la rigidez axial, para representar su capacidad de soportar cargas en dirección axial. Asimismo, se

especificó la rigidez a flexión, considerando el comportamiento de la zapata frente a momentos flectores. El módulo de Poisson se configuró con un valor de 0.20, según lo recomendado por McCormac (2018).

Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
Material set			Properties		
Identification		Zapata 20cm	Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
Material type		Elastic	Stiffness		
Colour		RGB 55, 121, 242	EA ₁	kN/m	7.975E6
Comments			EA ₂	kN/m	7.975E6
Unit weights			E ₁	kN/m ²	19.94E6
w	kN/m/m	9.600	E ₂	kN/m ²	19.94E6
			EI	kN m ² /m	106.3E3
			v (nu)		0.2000
			d	m	0.4000

Figura 26. Propiedades ingresadas de la zapata el software PLAXIS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

6. Sobrecarga aplicada

Tal como se indicó anteriormente, la sobrecarga aplicada en el modelo tiene un valor de 1 ton/m².

Property	Unit	Value
LineLoad_1		
Distribution		Uniform
Q _{x,start,ref}	kN/m/m	0.000
Q _{y,start,ref}	kN/m/m	-10.00
Q _{start,ref}	kN/m/m	10.00

Figura 27. Sobrecarga aplicada en software PLAXIS

Fuente: Elaboración propia, 2025.

7. Coeficientes sísmicos

Se activó la sección pseudoestática en el modelo permitiendo emplear los siguientes coeficientes sísmicos verticales y horizontales del suelo.

$$k_h = 0.24$$

$$k_v = 0.12$$

Property	Unit	Value
PseudoStatic		
Acceleration _x	g	-0.2400
Acceleration _y	g	-0.1200

Figura 28. Coeficientes sísmicos aplicados

Fuente: Elaboración propia, 2025.

8. Factores de seguridad

Este análisis se llevó a cabo en fases, siguiendo una metodología constructiva. Primero, se aplica la sobrecarga; luego, se realiza la excavación debajo de la perforación del *nailing*. Posteriormente, se efectúa la perforación para proceder con la conformación del *nailing*. A continuación, se construye el muro y se repite el mismo procedimiento hasta alcanzar la conformación de la zapata del muro.

a. Factor de seguridad estático en distintas alturas

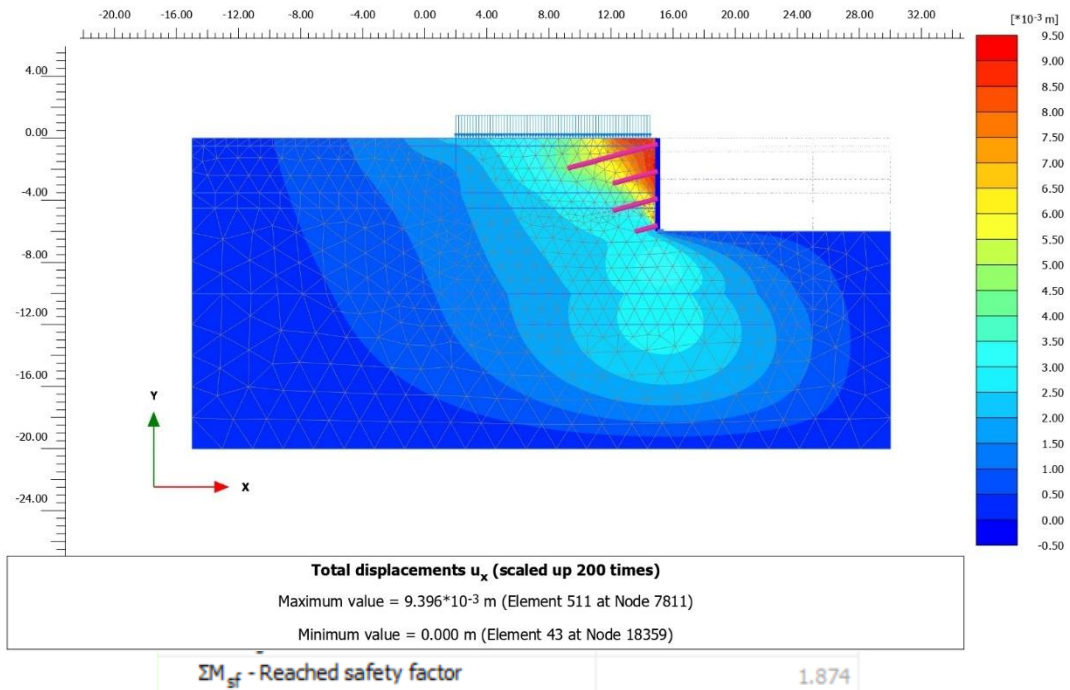


Figura 29. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 6m.
 Fuente: Elaboración propia, 2025.

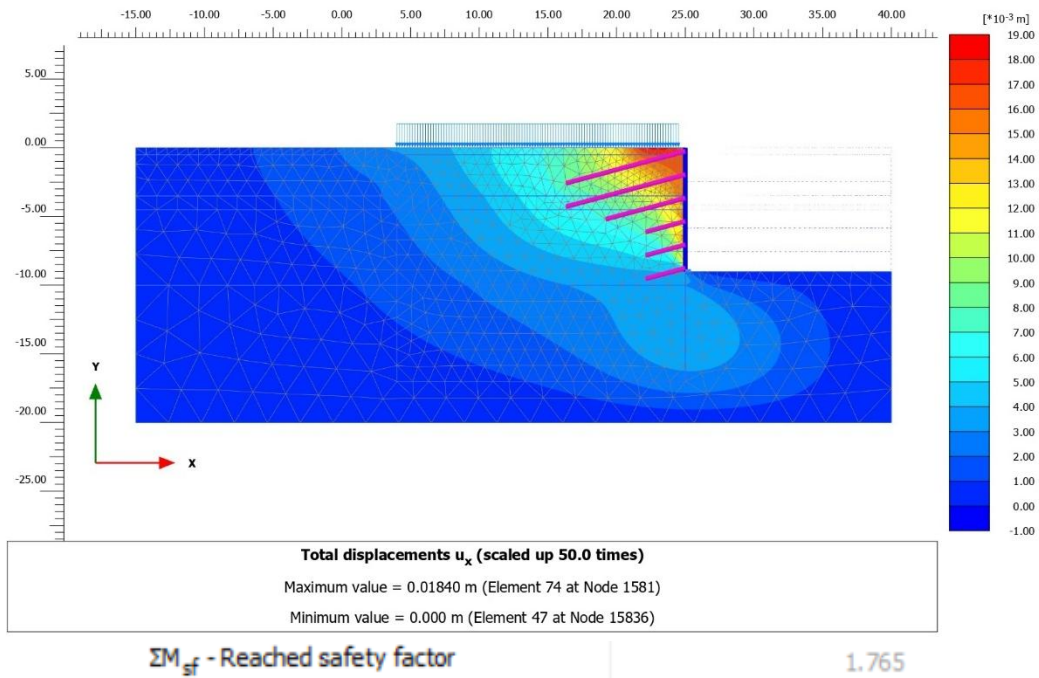


Figura 30. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 9m.
 Fuente: Elaboración propia, 2025.

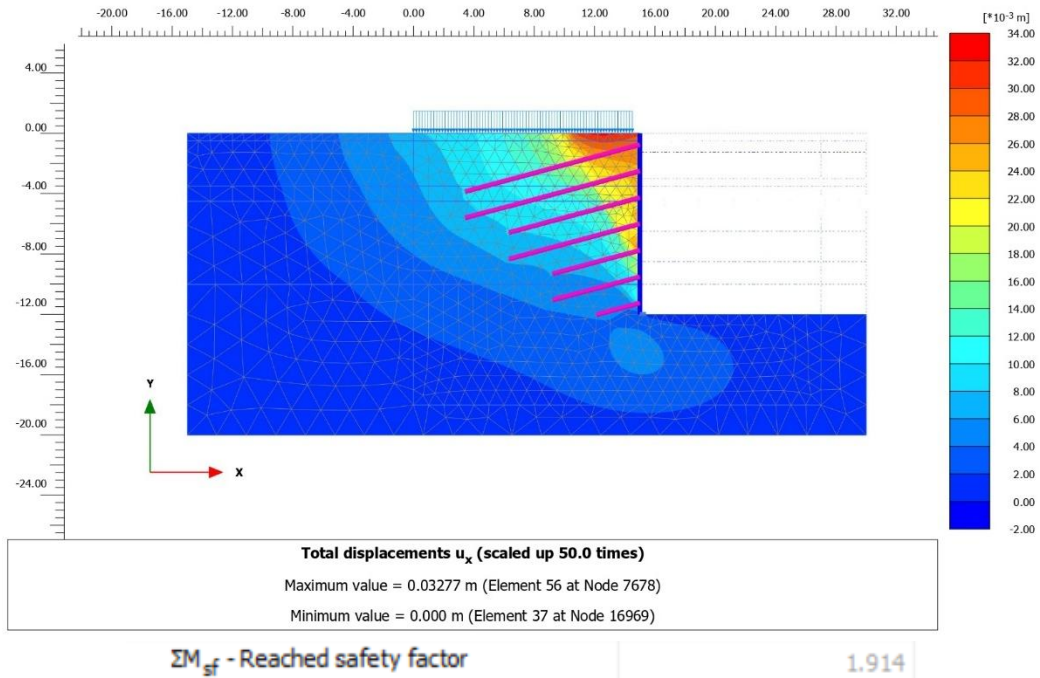


Figura 31. Factor de seguridad estático en sección de profundidad de 12m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

b. Factor de seguridad sísmico en distintas alturas

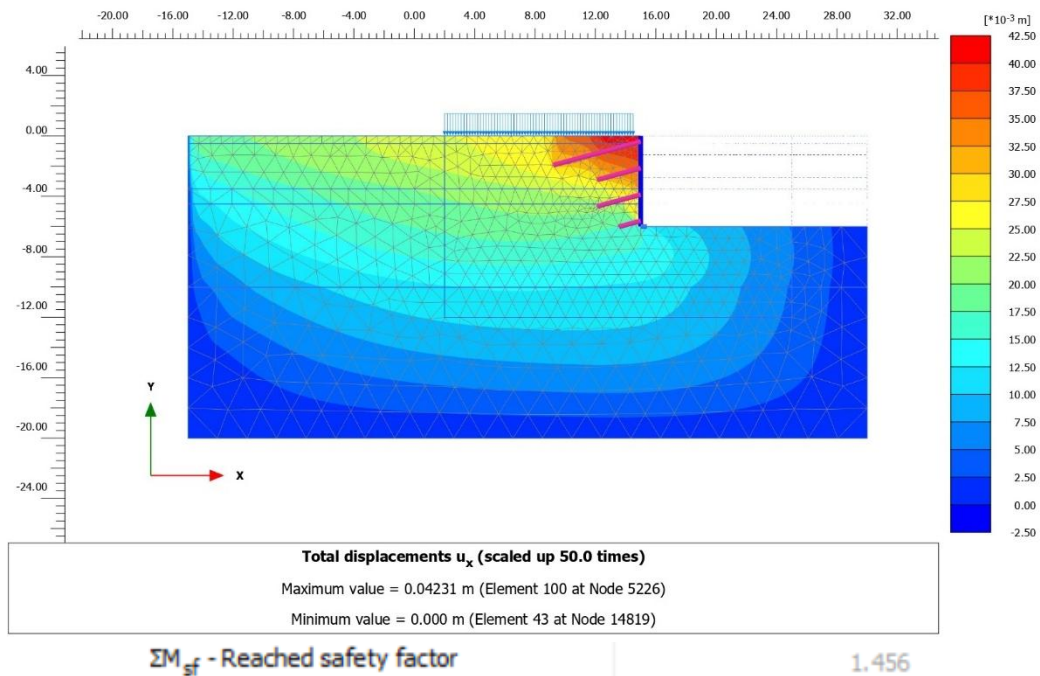


Figura 32. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 6m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

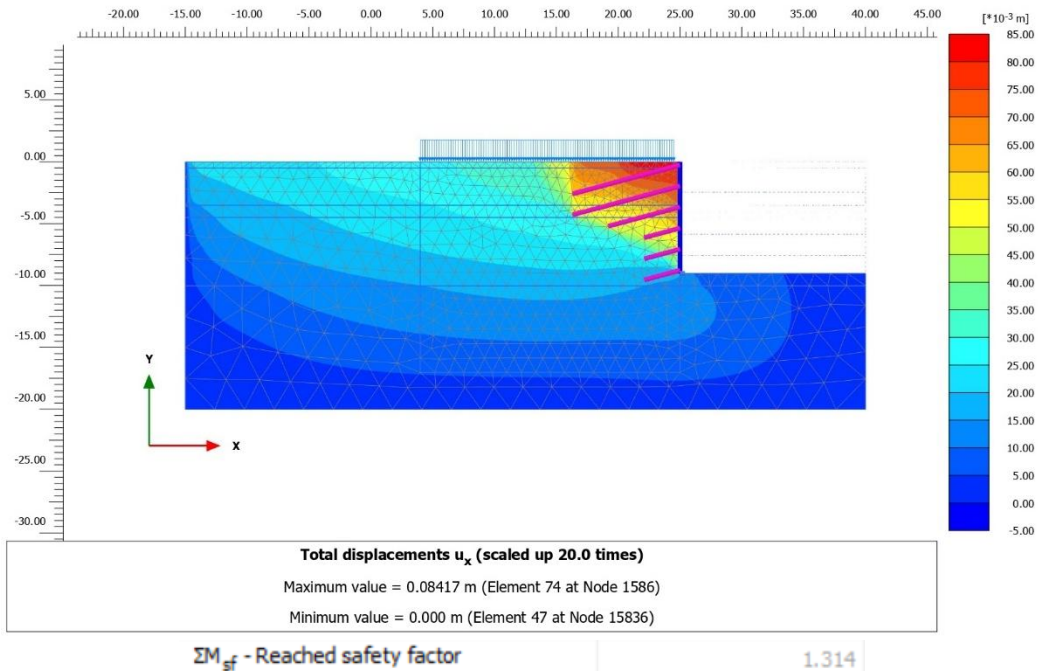


Figura 33. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 9m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

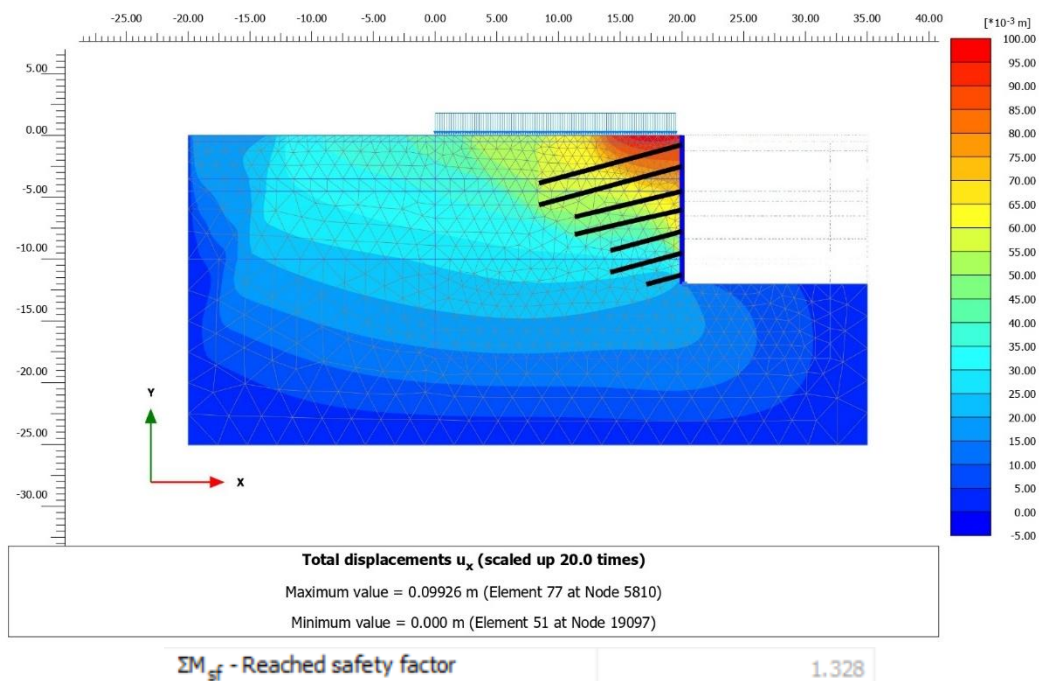


Figura 34. Factor de seguridad pseudo-estático en sección de profundidad de 12m.
Fuente. Elaboración propia, 2025.

VI. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, aplicados a tres secciones representativas de excavaciones con muros soil nailing en el Valle Central de Guatemala. Se comparan los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas para cada una de las profundidades evaluadas (6 m, 9 m y 12 m), así como las deformaciones y esfuerzos generados en los distintos elementos del sistema. Además, se discuten las diferencias metodológicas, las ventajas y limitaciones de cada enfoque, y se analizan los parámetros empleados en la técnica de reducción de resistencia al corte en el modelo numérico. Esta comparación integral permite valorar la precisión y aplicabilidad de cada método en el contexto geotécnico local, contribuyendo a una mejor toma de decisiones en el diseño de sistemas de contención para excavaciones profundas.

Profundidad	6m		9m		12m	
	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático
FS equilibrio límite	2.135	1.728	1.884	1.421	2.019	1.438
FS elementos finitos	1.874	1.456	1.765	1.314	1.914	1.328
Diferencia	0.261	0.272	0.119	0.107	0.105	0.11

Cuadro 6. Resumen de factor de seguridad estático y pseudo-estático con ambas metodologías en las distintas secciones

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Profundidad	6m		9m		12m	
	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático
Deformación (mm)	9.39	42.31	18.40	84.17	32.77	99.26

Cuadro 7. Deformaciones del muro *soil nailing* en las distintas profundidades

Fuente: Elaboración propia, 2025.

A. Discusión de metodologías

1. Comparativa de metodología

Los resultados descritos en el Cuadro No. 6 muestran que el método de equilibrio límite proporciona factores de seguridad consistentemente mayores en comparación con el análisis mediante elementos finitos.

El método de equilibrio límite asume una distribución simplificada de esfuerzos en la masa de suelo y un mecanismo de falla predefinido (generalmente circular o poligonal). Esto puede resultar en factores de seguridad más conservadores, pues no considera la redistribución de esfuerzos dentro del suelo ni la interacción real entre los materiales. Por otro lado, el método de elementos finitos permite modelar deformaciones, esfuerzos internos y variaciones en la rigidez del suelo, lo que proporciona una representación más realista del comportamiento del talud. Este modelo considera la

deformabilidad del suelo, lo que reduce el factor de seguridad en comparación con el equilibrio límite, donde se supone una falla instantánea sin efectos de deformación progresiva.

En el método de equilibrio límite, el refuerzo se introduce como una resistencia adicional al deslizamiento, considerando la capacidad de tracción del nail y la fricción entre el suelo y el anclaje. Sin embargo, no se modela la interacción real entre el refuerzo y el suelo en términos de deformaciones. En contraste, en el método de elementos finitos, el refuerzo se modela como un elemento estructural con rigidez específica, permitiendo evaluar esfuerzos internos en los *nails*, deformaciones en el muro y redistribución de esfuerzos. Esta capacidad de modelado más detallado puede llevar a factores de seguridad menores, ya que se consideran efectos de flexibilidad y reducción de resistencia debido a deformaciones acumuladas.

El software GeoSlope, utilizado para el método de equilibrio límite, considera la resistencia del suelo a través de los parámetros de cohesión y fricción interna, aplicando el criterio de Mohr-Coulomb. Sin embargo, al no modelar explícitamente deformaciones, puede sobreestimar la capacidad resistente del suelo. Por otro lado, Plaxis (elementos finitos) incorpora la deformabilidad del suelo mediante el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson, lo que puede reflejar un comportamiento más realista en el cual los esfuerzos pueden redistribuirse y concentrarse en ciertas zonas, disminuyendo el factor de seguridad en comparación con el equilibrio límite.

La sección de 6 metros presentó diferencias más significativas entre ambos métodos. Esto puede atribuirse a la menor presencia de limo arenoso en esta sección, lo que afectó la resistencia a la extracción (pullout resistance) en el modelo de equilibrio límite. Aunque se mantuvo una resistencia homogénea en los modelos para evitar sesgos, este ajuste pudo haber impactado la estimación del factor de seguridad en GeoSlope, resultando en un mayor valor respecto a Plaxis. En contraste, en las secciones de 9 y 12 metros, la diferencia entre los factores de seguridad se mantuvo en un rango de 0.10-0.12 tanto en condición estática como pseudoestática, lo que sugiere una mayor consistencia en la influencia del refuerzo y las propiedades del suelo en estas profundidades.

2. Ventajas y desventajas de metodologías

Criterio	Método de equilibrio límite (GeoSlope)	Método de elementos finitos (Plaxis)
Formulación matemática	Basado en el equilibrio estático de fuerzas y momentos considerando una superficie de falla predefinida.	Basado en la discretización del dominio mediante elementos finitos, resolviendo ecuaciones de esfuerzo-deformación con formulación incremental.
Evaluación del Factor de Seguridad (FS)	Determinado a partir de la relación entre fuerzas resistentes y actuantes en la superficie de falla asumida, generalmente sobreestimado.	Calculado mediante el método de reducción ϕ/c , resultando en valores más conservadores.

Criterio	Método de equilibrio límite (GeoSlope)	Método de elementos finitos (Plaxis)
Modelo del comportamiento del suelo	Considera propiedades geotécnicas simplificadas (cohesión, fricción interna y peso unitario), asumiendo que el suelo se comporta como un medio rígido-plástico.	Incorpora modelos constitutivos avanzados (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Cam-Clay, etc.), permitiendo la simulación de comportamiento no lineal y dependiente de la deformación.
Interacción suelo-refuerzo	Implementado como fuerzas nodales distribuidas o cargas puntuales sin interacción deformacional.	Modela la interacción suelo-refuerzo mediante elementos de interfaz, considerando esfuerzos de tracción, cortante y flexión en los anclajes.
Definición de la superficie de falla	Se asume una superficie de falla predefinida (circular, logarítmica o poligonal), optimizando el FS mínimo.	La superficie de falla emerge naturalmente a partir de la distribución de esfuerzos y desplazamientos en el modelo, sin necesidad de suposiciones previas.
Condiciones sísmicas	Se incluyen mediante coeficientes sísmicos pseudoestáticos aplicados como fuerzas externas equivalentes.	Simula efectos dinámicos considerando interacción suelo-estructura, deformaciones acumuladas y posibles mecanismos de falla progresiva.
Capacidad predictiva	Adecuado para estimaciones iniciales de estabilidad y validación con normativas de diseño.	Permite evaluar estados tensionales, deformaciones, redistribución de esfuerzos y mecanismos de colapso progresivo.
Tiempo de cómputo	Menor, debido a la formulación basada en equilibrio estático y resolución analítica simplificada.	Mayor, ya que resuelve un sistema de ecuaciones no lineales con múltiples iteraciones hasta convergencia.
Aplicabilidad en diseño	Útil en evaluaciones preliminares, dimensionamiento inicial y verificación normativa de estabilidad.	Recomendado para análisis detallados de estabilidad, optimización de refuerzos y evaluación del comportamiento en escenarios críticos.

Cuadro 8. Comparativa entre método de equilibrio límite y elementos finitos

Fuente: Elaboración propia, 2025.

3. Parámetros de reducción en Plaxis

Según el método de reducción de parámetros Φ/c , la resistencia al corte del suelo, representada por $\tan(\varphi)$ y la cohesión, así como la resistencia a la tracción del material, se reducen progresivamente hasta alcanzar una condición de inestabilidad que marca el colapso de la estructura.

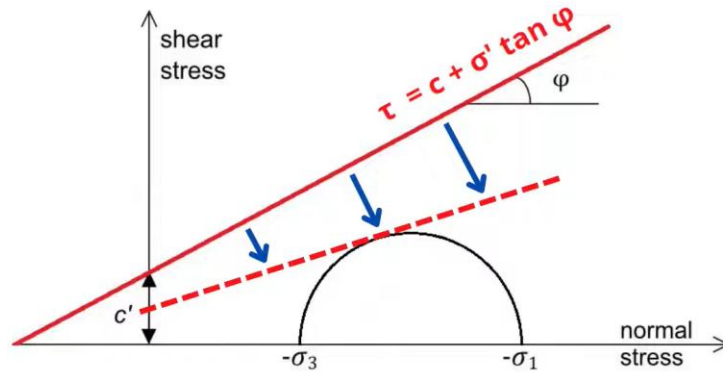


Figura 35. Método de reducción Φ/c
Fuente: Plaxis Tutorial, 2023.

Por lo que el factor de seguridad global se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sum Msf = \frac{\tan(\varphi)_{ingresado}}{\tan(\varphi)_{reducido}} = \frac{c_{ingresado}}{c_{reducido}} = \frac{S_{u,ingresado}}{S_{u,reducido}} = \frac{tracción_{ingresada}}{tracción_{reducida}}$$

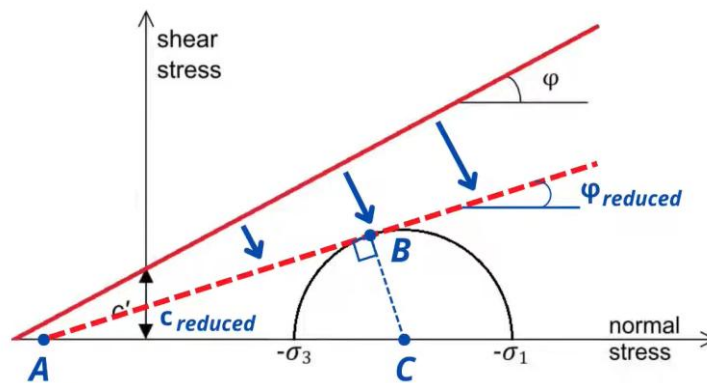


Figura 36. Parámetros de reducción
Fuente: Plaxis Tutorial, 2023.

Mediante las propiedades del triángulo rectángulo ABC, se determina la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \text{sen}(\varphi_{reducido}) + c_{reducido} \cdot \text{cos}(\varphi_{reducido})$$

Como primer paso se escogieron dos puntos de falla para verificar los esfuerzos, en el caso de la sección estática de 6m de profundidad fueron los puntos 20,406 y 20,834.

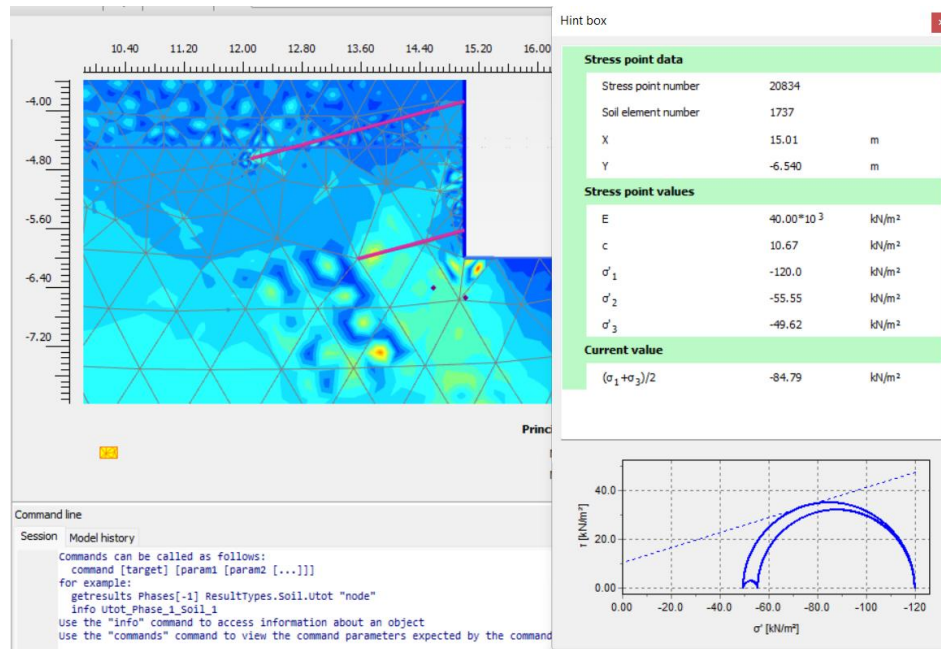


Figura 37. Esfuerzo en punto crítico 20,834 en la sección estática de 6m.
Fuente: Elaboración propia, 2025.

De esta manera se obtuvieron los esfuerzos en ambos puntos críticos, los cuales se detallan en el siguiente cuadro.

Punto	20,406	20,834
$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \left(\frac{kN}{m^2} \right)$	-98.29	-84.79
$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(\frac{kN}{m^2} \right)$	-39.14	-35.17

Cuadro 9. Esfuerzos en puntos críticos de falla en la sección estática de 6m de profundidad
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Resolviendo para $\varphi_{reducido}$ y $c_{reducido}$ mediante el siguiente sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes valores.

$$39.14 = 98.29 \cdot \text{sen}(\varphi_{reducido}) + c_{reducido} \cdot \text{cos}(\varphi_{reducido})$$

$$35.17 = 84.79 \cdot \text{sen}(\varphi_{reducido}) + c_{reducido} \cdot \text{cos}(\varphi_{reducido})$$

$$\varphi_{reducido} = 17.10^\circ$$

$$c_{reducido} = 10.71 \frac{kN}{m^2}$$

Por lo que $\varphi_{ingresado}$ y $c_{ingresado}$ corresponde a:

$$FS \cdot \varphi_{reducido} = \varphi_{ingresado} \rightarrow 1.874 \cdot 17.10^\circ = 32.05^\circ$$

$$FS \cdot c_{reducido} = c_{ingresado} \rightarrow 1.874 \cdot 10.71 \frac{kN}{m^2} = 20.07 \frac{kN}{m^2}$$

En el análisis de estabilidad del muro soil nailing mediante el método de reducción ϕ/c en Plaxis, los valores obtenidos para el ángulo de fricción ($\phi_{ingresado} = 32.05^\circ$) y la cohesión ($c_{ingresado} = 20.07 \frac{kN}{m^2}$) no corresponden a un único estrato, sino que representan una combinación ponderada de las propiedades mecánicas de las distintas capas del suelo. Dado que la distribución de esfuerzos involucra múltiples estratos con diferentes características, el software interpola estos valores en función de la contribución de cada capa al sistema de retención y a la estabilidad global. Como resultado, los parámetros reducidos se encuentran dentro del rango de la estratigrafía original ($20^\circ \leq \phi_{ingresado} \leq 38^\circ$ y $10 \leq c_{ingresado} \leq 25 \frac{kN}{m^2}$), lo que valida la representatividad del modelo numérico sin necesidad de asumir valores únicos para todo el perfil del suelo.

A continuación, se muestra el $\phi_{ingresado}$ y $c_{ingresado}$ del resto de secciones siguiendo el mismo procedimiento.

Profundidad	6m		9m		12m	
	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático	Estático	Pseudo-estático
$\phi_{ingresado}$	32.05°	31.57°	31.73°	31.48°	32.15°	31.17°
$c_{ingresado} (\frac{kN}{m^2})$	20.07	19.89	20.42	19.12	19.96	20.08

Cuadro 10. Ángulo de fricción y cohesión ingresada en cada una de las condiciones de las secciones analizadas

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Como se observa en el Cuadro 10, los valores de ϕ y c en las secciones de 6m, 9m y 12m se mantienen dentro del rango de la estratigrafía original ($20^\circ \leq \phi \leq 38^\circ$ y $10 \leq c \leq 25 \text{ kN/m}^2$), lo que indica que el modelo numérico es representativo de las condiciones del suelo sin necesidad de asumir valores únicos para todo el perfil. Se evidencia una ligera reducción de los parámetros en la condición pseudo-estática, lo que sugiere un incremento en la demanda de estabilidad bajo cargas dinámicas. Esto refuerza la importancia de considerar la variabilidad estratigráfica en los análisis de estabilidad y el dimensionamiento de los sistemas de retención.

VII. CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un modelo representativo del Valle Central de Guatemala, implementando un sistema de soil nailing homogéneo para garantizar la comparabilidad de resultados.
2. Se calculó el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas para profundidades de 6, 9 y 12 metros. Se observó que el método de equilibrio límite (GeoSlope) sobrestima los factores de seguridad en comparación con el método de elementos finitos (Plaxis), con diferencias promedio de 0.10-0.12, siendo más significativa en la sección de 6 metros.
3. El método de equilibrio límite presenta mayor rapidez y simplicidad, pero asume una superficie de falla predefinida y no modela deformaciones. En cambio, el método de elementos finitos permite un análisis más realista de la interacción suelo-refuerzo y de la redistribución de esfuerzos, aunque requiere mayor tiempo de cómputo y parametrización.
4. Para diseño preliminar y verificación normativa, el equilibrio límite es eficiente; sin embargo, para modelaciones más precisas de estabilidad y efectos dinámicos, los elementos finitos ofrecen mejores resultados. Se recomienda complementar ambos métodos según la complejidad del proyecto.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Incorporar un acelerograma obtenido mediante estudios geofísicos locales permitiría modelar con mayor precisión la respuesta sísmica del suelo, en lugar de depender únicamente de coeficientes pseudoestáticos. Esto habría mejorado la evaluación de la estabilidad en condiciones dinámicas.
2. Implementar un modelo tridimensional en Plaxis 3D habría permitido estudiar efectos fuera del plano, como la variación de esfuerzos en diferentes direcciones y la interacción realista del sistema suelo-refuerzo en excavaciones más complejas.
3. Comparar los resultados del análisis numérico con datos de monitoreo en taludes reales (como inclinómetros o extensómetros) habría permitido validar los modelos con mediciones empíricas y ajustar los parámetros de simulación.
4. Analizar distintos escenarios de nivel freático y su impacto en la estabilidad del talud habría permitido evaluar mejor los efectos de la presión de poros en la resistencia del suelo y en la interacción con los anclajes.
5. Incorporar un análisis de consolidación o degradación de resistencia del suelo con el tiempo habría permitido evaluar la estabilidad de las excavaciones bajo efectos como la fatiga del material o ciclos de carga-descarga.
6. Los factores de seguridad obtenidos en este trabajo superan los mínimos establecidos por AGIES, ya que el diseño de las secciones buscó mantener una configuración lo más homogénea posible para facilitar la comparación entre casos. Esta estrategia, aunque válida para fines académicos, podría haber generado un sobredimensionamiento en ciertos escenarios. Por ello, resulta pertinente considerar una futura optimización del diseño, ajustando la cantidad, longitud o espaciamiento de los anclajes según las condiciones particulares de cada sección, manteniendo la estabilidad requerida y mejorando la eficiencia del sistema.
7. Incorporar una evaluación económica entre las secciones propuestas en este estudio y aquellas que puedan optimizarse en futuros trabajos permitiría estimar ahorros en materiales y ejecución. Esta comparación contribuiría a diseños más eficientes, sin comprometer la seguridad estructural, y facilitaría la toma de decisiones en proyectos similares.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- ACI. (2014). *ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- AGIES. (2018). *NSE 2 Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio*.
- AGIES. (2018). *NSE 2.1 Estudios geotécnicos*
- AGIES. (2018). *NSE 5.3 Obras de retención*
- AGIES. (2018). *Demandas Estructurales y Condiciones de Sitio*.
- American Institute of Steel Construction. (2010). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10)*. American Institute of Steel Construction.
- AISC. (2016). *AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings*
- Banco de Guatemala. (2023). *Producto Interno Bruto trimestral*. https://banguat.gob.gt/sites/default/files/banguat/cuentasnac/PIB2013/PDF_graficas_y_cuadros_estadisticos.pdf
- Beneyto, P, et al. 2011. *Análisis de estabilizador de taludes mediante técnicas de optimización heurística*. Vol XXX, págs. 2001-2014.
- Bojorque-Iñiguez, J. (2011). Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes. *Maskana*, 2(2), 1–16. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.02.01>
- BONIS, S.1978. *Unheeded geological warnings from 1976, Gutatemala earthquake.- Proc. of Int. Symp. On the February 4th., 1976 Guatemalan earthquake and the reconstruccion process. Guatemala*, I: Ponencia 9.
- BONIS, S.1993. *Mapa Geológico de Guatemala, hoja Guatemala [2aed.]*.- Escala 1:250,000, IGN, Guatemala
- Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Design 5th ed.* (Vol. 20). [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(84\)90010-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(84)90010-3)
- Cerda, S. (2020). *Implicancias del diseño y la secuencia constructiva en el comportamiento de muros soil nailing como sistema de contención de excavaciones*.
- Cervera, L. (2022). *El Método de elementos finitos. Estabilidad de Taludes*. <https://eadic.com/blog/entrada/el-metodo-de-elementos-finitos-estabilidad-de-taludes/>
- CIMWORKS. (s.f.). *Abaqus*. <https://www.cimworks.es/abaqus/>
- Clouterre. (1991). *"Recommendations Clouterre" Soil Nailing Recommendations*. Paris: Presses de l'ENPC.
- Crespo, C. 2004. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Noriega Editores. págs. 13 - 16.
- Das, B, (1985). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson Learning.
- Department of Economic and Social Affairs. (2020). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/>
- D. V. Griffiths J. Huang G. A. Fenton. (2009) On the reliability of earth slopes in three dimensions. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 465:2110, 3145-3164. Online publication date: 29-Jul-2009.
- EARTH ENGINEERING AND SCIENCES, INCORPORATED BALTIMORE. (1991). *Soil nailing for stabilization of highway slopes and excavations*.
- EG Science. (2023). *¿Conoces estos 5 software de estabilidad de taludes?*. <https://egsciences.com/?lang=es>
- FHWA. (2015). *Soil Nail Wall Reference Manual*. 7ª edición. NHI
- Fine Softwares. (s.f.). *GEO5 Software MEF*. <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/mef/>

- González, J. (2018), *Cálculos con programas de equilibrio límite*. <https://jesusgonzalezgalindo.wordpress.com/2018/01/25/calculos-con-programas-de-equilibrio-limite/>
- Griffiths, D & Marquez, R. (2007). *Three-dimensional slope stability analysis by elastoplastic finite elements*, (8), 537-546. <https://doi.org/10.1680/geot.2008.D.010>
- Grupos Aceros de Guatemala. (s.f.). *Varilla Grado 60*. <https://www.somosgrupoag.com/productos/2?category=HierroAG>
- Hayashi, D. (2008) Theoretical basis of FE simulation software package. Bulletin of the Faculty of Science, University of the Ryukyus. Págs. 81-95.
- Herrera, A. F., Pinetta, P. R., & Menéndez, P. J. (2019). *Desarrollo completo de la capacidad friccionante del suelo para la construcción de anclajes activos de alta capacidad en Centroamérica*. Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica & Geotécnica – Ciudad de Guatemala.
- Jack C.McCORMAC.(2018). *Diseño de concreto reforzado*. 10ª edición. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR,S.A. de C.V.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. (2015). *"Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls - Reference Manual" FHWA-NHI-14-007*. Washington: Federal Highway Administration, FHWA.
- Lysandros Pantelidis D.V. Griffiths. (2013) Stability of earth slopes. Part II: three dimensional analysis in closed-form. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 37:13, 1987-2004. Online publication date: 1-Aug-2012.
- Marín Nieto, L. E.1991. *Mecánica de Suelos*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil
- Martínez, Julio, et al. 2017. *Estudio Geotécnico y Microzonificación Tipo IV*. Diseño, decoración y construcción. 64 págs.
- Midas. (s.f.). *Midas GTS NX*. <https://www.midasoft.com/es/latinoamerica/productos/ingenieriageotecnica/midasgtsnx>
- Montoya, S. (2013). *Estabilidad de taludes, deslizamientos de tierra y sus causas*. <https://gidahatari.com/ih-es/estabilidad-de-taludes-deslizamientos-de-tierra-causas>
- Pérez, C.L. 2009. *Estructura geológica del valle de la ciudad de Guatemala interpretada mediante un modelo de cuenca por distensión*.- Rev. Geól. Amér. Central, 41: 71
- Plafker, G. 1978: *Tectonic significance of surface faulting related to The 4 february 1976 Guatemala earthquake*.- Proc. of Int. Symp. On the February 4th., 1,976 Guatemalan earthquake and the reconstruction process. Guatemala, I: Ponencia 3
- Reductionsafety. (2025). *#Reductionsafety* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=smn5kvWSDKc>
- SE-AE. 2009. *Seguridad Estructural Acciones de la Edificación*.
- Sanhueza Plaza, C., & Rodríguez Cifuentes, L. (2013). *Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Revista de la Construcción, 12(1), 17-29.https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2013000100003&script=sci_arttext
- Sanz, R, et al. 2015. *Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo*. Revista Civilizante. págs. 50-54
- Seequent. (s.f.). *Plaxis*. <https://www.seequent.com/es/productos-y-soluciones/plaxis/>
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. 550 págs.
- Suárez, J. (2012). *Deslizamientos - Técnicas de remediación*. p.176

- T.-K. Nian R.-Q. Huang S.-S. Wan G.-Q. Chen. (2012) Three-dimensional strength-reduction finite element analysis of slopes: geometric effects. *Canadian Geotechnical Journal* 49:5, 574-588. Online publication date: 1-May-2012.
- US Army Corps of Engineers. (2003). *Slope Stability*. EM-1110-2-1902,205
- Villalobos, S. (2021). *Modelos de regresión y superficies de respuesta para evaluar la estabilidad externa de muros de soil nailing*. *Revista ingeniería de construcción*, 36(2), 251-267. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732021000200251&script=sci_arttext
- Weyl, R. 1980. *Geology of Central America*. Gebrüder Brontaege, Stuttgart. 371 págs.
- Yepes, V. (2019). *Soil Nailing o suelo claveteado*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/05/soil-nailing-o-suelo-claveteado/>