

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Evaluación de diferentes metodologías de cálculo del equilibrio
límite para los muros de retención segmentados**

Trabajo de graduación presentado por Ana Sofía Archila Sandoval para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2020

**Evaluación de diferentes metodologías de cálculo del equilibrio
límite para los muros de retención segmentados**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Evaluación de diferentes metodologías de cálculo del equilibrio
límite para los muros de retención segmentados**

Trabajo de graduación presentado por Ana Sofía Archila Sandoval para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

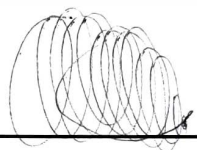
Guatemala

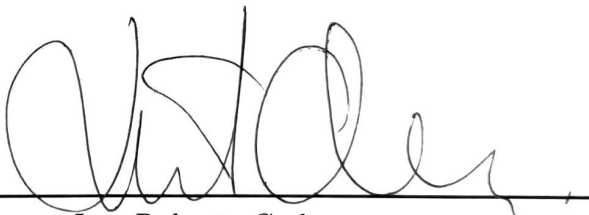
2020

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Alvaro Rubio

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Alvaro Rubio

(f) 
Ing. Roberto Godo

(f) 
Ing. Hugo Pallais

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de diciembre de 2020.

Este trabajo de graduación comprende el análisis de distintas metodologías utilizadas a lo largo de los años en el diseño de obras de construcción como lo son los muros de contención segmentados, esto personalmente fue un tema interesante de investigar así como un reto de aprender a analizar. Durante el transcurso de la carrera tuve la oportunidad de aprender acerca de la amplia gama de aplicaciones e implicaciones que comprende la ingeniería civil; tales como la ingeniería estructural, ingeniería geotécnica, hidrología, ingeniería sanitaria, entre otras. Actualmente existe bibliografía de afuera de Guatemala en cuanto a ingeniería geotécnica, siendo esta un área muy amplia y totalmente aplicable a nuestras condiciones geográficas; por estas razones y motivos de gusto personal decidí retarme a dejar huella con este trabajo de graduación, también pretendo alentar a los lectores a querer superarse cada día aceptando nuevos retos para crecer personal y profesionalmente.

Durante el tiempo que estudié en la Universidad del Valle, que fue la institución académica encargada de formar mi criterio profesional y personal durante varios años de mi vida, logré conocer a profesionales ejemplares dispuestos a impartir su conocimiento. Es por eso que quiero agradecer a todos mis catedráticos por ser factores positivos en mi formación tanto académica como personal. La excelencia es algo que se aprende y se pone en práctica día a día. No me queda más que agradecer a las personas que estuvieron apoyándome en todo momento durante mi carrera. Principalmente a mi familia, por ser ese apoyo incondicional y a Dios por permitirme vivir mi vida un día a la vez. Agradezco al ingeniero Álvaro Rubio por ser mi asesor de trabajo de graduación compartiendo su amplio conocimiento conmigo, al ingeniero Roberto Godo por tener altas expectativas de los jóvenes estudiantes de Guatemala brindando apoyo incondicional para hacernos crecer, a la empresa Baunovo International por brindarme datos y apoyo técnico importante para esta investigación y por último a mis amigos de la universidad con quienes he compartido momentos inolvidables.

Prefacio	v
Lista de figuras	x
Lista de cuadros	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
I. Introducción	1
II. Justificación	3
III. Objetivos	5
1. Objetivo general	5
2. Objetivos específicos	5
IV. Marco teórico	7
A. Taludes o laderas	7
1. Nomenclatura de un talud o ladera	7
2. Procesos de movimiento	9
3. Dimensiones	9
B. Talud reforzado	10
C. Esfuerzo y resistencia al cortante	11
D. Estabilidad de taludes	12
E. Modelos de análisis de estabilidad	13
F. Métodos de círculos de falla	13
G. Equilibrio límite	13
1. Concepto de Factor de Seguridad (F.S.)	14
2. Parámetros utilizados en los análisis de equilibrio límite	15
H. Métodos del equilibrio límite considerados	17
I. Análisis de estabilidad a través del software SVSLOPE	17

1.	Métodos de cálculo	18
J.	Muros de contención en general	23
K.	Diseño de estructuras de contención para estabilización	24
L.	Comparación de métodos de contención más utilizados	25
1.	Muro de contención por gravedad	27
2.	Muros de contención segmentados	28
3.	Estabilidad interna en muros de contención reforzados con geomallas	30
M.	Componentes principales de muros de contención segmentados	32
1.	Geomallas	32
2.	Bloques prefabricados de concreto	36
V.	Metodología	39
A.	Consideraciones para modelo realizado en SVSLOPE	39
1.	Equilibrio límite a través de métodos seleccionados	39
2.	Dimensionamiento de muro de contención	40
3.	Constantes asignadas	41
4.	Materiales asignados	41
5.	Superficie de falla	42
6.	Sobrecarga asignada	43
7.	Análisis sísmico	43
VI.	Análisis y discusión de resultados	47
A.	Comparación de metodologías utilizadas	47
B.	Resultados obtenidos	48
1.	Muro de retención de altura 6 metros	48
2.	Muro de retención de altura 3 metros	50
3.	Resumen de resultados para diferentes alturas	53
C.	Discusión de métodos comparados para equilibrio límite	53
VII.	Conclusiones	55
VIII.	Recomendaciones	57
IX.	Bibliografía	59
X.	Anexos	61
XI.	Glosario	63

Lista de figuras

1.	Clasificación de taludes	8
2.	Deslizamiento típico	9
3.	Dimensiones del volumen según IAEG (1990)	10
4.	Tipos de fallas	12
5.	Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método ordinario	19
6.	Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método de Bishop simplificado	20
7.	Diagrama para determinación del factor f_o para el método simplificado de Janbú	21
8.	Diagrama de fuerzas actuantes sobre dovelas consideradas para el método de Spencer	22
9.	Diagrama de función asumida para método de Morgenstern-Price	23
10.	Tipos de muros de contención.	24
11.	Muro de contención por gravedad	27
12.	Componentes de muros de contención segmentados según White, 2010	29
13.	Refuerzo de geomalla de pared envolvente	30
14.	Pared con revestimiento de gaviones	31
15.	Pared con panel frontal de concreto	31
16.	Diseño de muro de contención reforzado con geomalla	32
17.	Geomallas disponibles para el mercado guatemalteco	33
18.	Geomalla Baugrid uniaxial	34
19.	Geomalla Baugrid uniaxial	34
20.	Geomalla Baugrid biaxial	35
21.	Geomalla extruida	36
22.	Ejemplo de Novoblock con cara plana	37
23.	Métodos seleccionados para realizar el análisis de equilibrio límite	40
24.	Distribución de materiales en el modelo	40
25.	Distribución de materiales en el modelo	41
26.	Parámetros asignados al modelo	41
27.	Caracterización de suelos asignados para cada región	42
28.	Distribución de geomallas en la altura total del muro	42
29.	Propiedades de geomalla asignada	42
30.	Superficie de deslizamiento asignada	43

31.	Parámetro de sobrecarga distribuida asignada	43
32.	Constantes sísmicas asignadas en SVSLOPE	46
33.	Factor de seguridad obtenido para método ordinario	48
34.	Factor de seguridad obtenido para método de Bishop simplificado	48
35.	Factor de seguridad obtenido para método de Janbú simplificado	49
36.	Factor de seguridad obtenido para método de Spencer	49
37.	Factor de seguridad obtenido para método de Morgenstern-Price	50
38.	Factor de seguridad obtenido para método ordinario	50
39.	Factor de seguridad obtenido para método de Bishop simplificado	51
40.	Factor de seguridad obtenido para método de Janbú simplificado	51
41.	Factor de seguridad obtenido para método de Spencer	52
42.	Factor de seguridad obtenido para método de Morgenstern-Price	52
43.	Ficha técnica de geomalla brindada por BAUNOVO, 2019	62

Lista de cuadros

1.	Ventajas y desventajas de muros de contención por gravedad	28
2.	Ventajas y desventajas de muros de contención reforzados con geomallas . . .	29
3.	Parámetros iniciales para espectro sísmico	45
4.	Ajuste por clase de sitio	45
5.	Ajuste por intensidades sísmicas especiales	45
6.	Períodos de vibración de transición	46
7.	Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño y análisis por sismo	46
8.	Comparación de factores en diferentes análisis	47
9.	Comparación de factores en diferentes análisis	53

Desde hace mucho tiempo atrás se ha utilizado el método del equilibrio límite para el análisis de muros de contención en cuanto a estabilización de taludes. Existen diversos métodos para llevar a cabo dicho análisis, en varias ocasiones distintos autores han tratado de modificar y de cierta forma simplificar los modelos de las ecuaciones. Cabe mencionar que un solo punto de vista en estabilidad de taludes no siempre es lo más óptimo a considerar ya que las características de los suelos que encontramos alrededor del globo, no son ideales y óptimas.

Como objetivo principal de la investigación se determinará el método más conservador para realizar el análisis de estabilización de taludes a través de muros de retención segmentados con software en cuanto al equilibrio límite. A través de la realización de un modelo digital, se correrán distintos métodos de análisis del equilibrio límite. Los métodos a evaluar son: Morgenstern-Price, Spencer, Bishop simplificado, Janbú y el ordinario de Dovelas. Es importante mencionar que aunque se quiera realizar un modelo y estudio de las características del suelo a tratar, con el tiempo este va a cambiar. Debido a la situación anteriormente descrita es significativo que establecer el método más conservador, para analizar un muro de contención segmentado el cual tome en cuenta factores determinantes para el estudio, así como conveniente para futuras obras civiles de muros de contención.

Estableciendo lo anterior, los resultados serán significativos para futuros estudios de equilibrio límite en muros de retención segmentados, es decir, utilizando geomallas. Con el afán de realizar la evaluación desde varios puntos de vista se tomaron en cuenta los métodos anteriores para así comparar los factores de seguridad propios y los elementos que se toman y no se toman en cuenta.

The limit equilibrium method has long been used for retaining wall analysis for slope stabilization. There are several methods to carry out this analysis, in several occasions different authors have tried to modify and in some way simplify the models of the equations. It is worth mentioning that a single point of view in slope stability is not always the most optimal to consider since the characteristics of the soils that we find around the globe, are not ideal nor optimal.

The main objective of the research will be to determine the most conservative method to perform the analysis of slope stabilization through segmented retaining walls with a software in terms of limit equilibrium. Through the realization of a digital model, different methods of analysis of the limit equilibrium will be performed. The methods to be evaluated are: Morgenstern-Price, Spencer, Bishop simplified, Janbu and the ordinary method of slices or Fellenius method. It is important to mention that even if you want to make a model and study the characteristics of the soil, over time this will change. Due to the situation described above, it is significant that the most conservative method should be established to analyze a segmented retaining wall, which takes into account determining factors for the study, as well as being convenient for future civil works on retaining walls.

Establishing the above, the results will be significant for future studies of limit equilibrium in segmented retaining walls, that implies, the usage of geogrids. In order to carry out the evaluation from various points of views, the previous methods were taken into account in order to be able to compare each of the safety factors and the elements that are included or not included.

Guatemala posee dos cadenas montañosas de este a oeste que dividen su territorio en tres regiones principales, con características únicas y un relieve muy propenso a cambios drásticos de niveles. En general, es importante conocer acerca de los muros de contención ya que en obra civil juegan un papel importante para preservar la estructura construida.

El objetivo principal es realizar una comparación de los diferentes factores de seguridad obtenidos de los métodos de equilibrio límite a través de un software para un modelo de muro de retención segmentado. La estabilidad de un talud se determina a través de factores geométricos, geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. En conjunto, los anteriores mencionados determinan la condición de rotura del terreno en cierto lugar, permitiendo movimiento de la masa retenida por el talud natural, provocando derrumbes entre otros desastres.

El presente trabajo estará dividido en dos diferentes partes principales presentando el proceso lógico del análisis de los muros de retención segmentados. Como primer punto se presentará el marco conceptual complementándose con otra parte de análisis metódico de las diferentes ecuaciones para el cálculo del equilibrio límite para muros de contención segmentados. El muro que se utilizará para el análisis comparativo consta de bloques prefabricados de concreto, suelo mecánicamente estabilizado, sistema de drenaje interno y geomalla. Una comparación entre los distintos factores de seguridad brinda una idea acerca de qué tan conservadora es la metodología de cálculo del equilibrio límite para el caso específico de muros de retención segmentados.

Justificación

El objetivo del trabajo de graduación es realizar un análisis profundo detrás de todos los elementos que influyen en el cálculo y determinación del factor de seguridad de los métodos de Morgenstern-Price, Spencer, Bishop simplificado, Janbú y el Ordinario de Dovelas para el cálculo de equilibrio límite en muros de retención segmentados. Desde hace décadas se han propuesto métodos para el análisis de equilibrio límite lo cual requiere información sobre la resistencia del suelo. Es decir, es necesario realizar este tipo de análisis para conocer los movimientos de los taludes o laderas, antes de comenzar la fase de construcción o decidir qué tipo de retención se debe utilizar.

Es común en la rama de ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), es más fácil de visualizar e interpretar, obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismo, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los elementos que afectan la estabilidad de un talud se pueden llegar a cuantificar para incluirlos en el modelo matemático. Existen varios factores que no son considerados en los distintos tipos de análisis, la determinación de un factor de seguridad permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones (Suárez, 1998).

Desde los inicios de las técnicas de estabilización, los muros de tierra mecánicamente estabilizados (MSE) se han convertido en mayoría entre los muros de contención construidos debido a que son relativamente económicos y presentan un rendimiento satisfactorio. En un estudio, realizado en 2011 por investigadores en Austin Texas, llamado: "Validación y justificación de los parámetros de diseño para MSE", se pueden observar casos en distintos lugares de Estados Unidos donde el suelo no se comporta idealmente para la construcción de muros de contención. Por ejemplo, en el Distrito de Beaumont en Texas, donde se notan algunas grietas e incluso volteo de las paredes de los muros de retención a pesar de haber realizado estudios de suelos previos (Aubeny *et al.*, 2013). Es conveniente realizar una comparación de los diferentes métodos y además de las consideraciones debido a que el número

de muros de retención segmentados construidos, así como en análisis, va en aumento con el paso de los años. Dicho estudio toma valor bajo la perspectiva de realizar la comparación de varios métodos de cálculo para determinar el más conservador, es decir el que incluye más variables importantes que van a verse reflejadas en resultados muy apegados a la realidad. En Guatemala los muros de contención deben ser estudiados más a profundidad debido a que para cumplir con requisitos de seguridad se deben emplear en construcción de carreras, condominios, pasos peatonales, entre otras obras civiles (Leoncio Avalos, 2015).

1. Objetivo general

Determinar el método óptimo para realizar el análisis de estabilización de taludes de muros de contención segmentados a través del software.

2. Objetivos específicos

- Evaluar equilibrio límite mediante los métodos de Morgenstern-Price, Spencer, Bishop simplificado, Janbú y método Ordinario de Dovelas en muros de contención segmentados.
- Interpretar y analizar los factores de seguridad para cada método del equilibrio límite para muros de contención segmentados.
- Simular un muro de contención segmentado en software especial de análisis de muros de contención segmentados.
- Determinar cómo las diferentes metodologías toman en cuenta las fuerzas externas y fuerzas generadas por las geomallas de los muros segmentados.

A. Taludes o laderas

Un talud o una ladera corresponde a la masa de tierra que se caracteriza por no ser plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En términos técnicos existe una principal diferencia entre estos dos términos; se define como una ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Duncan *et al.*, 2005)

1. Nomenclatura de un talud o ladera

Las laderas pueden fallar de forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios de resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Es decir, conforme pasa el tiempo una ladera puede parecer estable, pero falla en cualquier momento debido a estas características cambiantes. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: terraplenes, cortes de laderas naturales y muros de contención. También cabe mencionar que hay diferentes tipos de combinaciones de diversos tipos de taludes y laderas (Suárez, 1998)

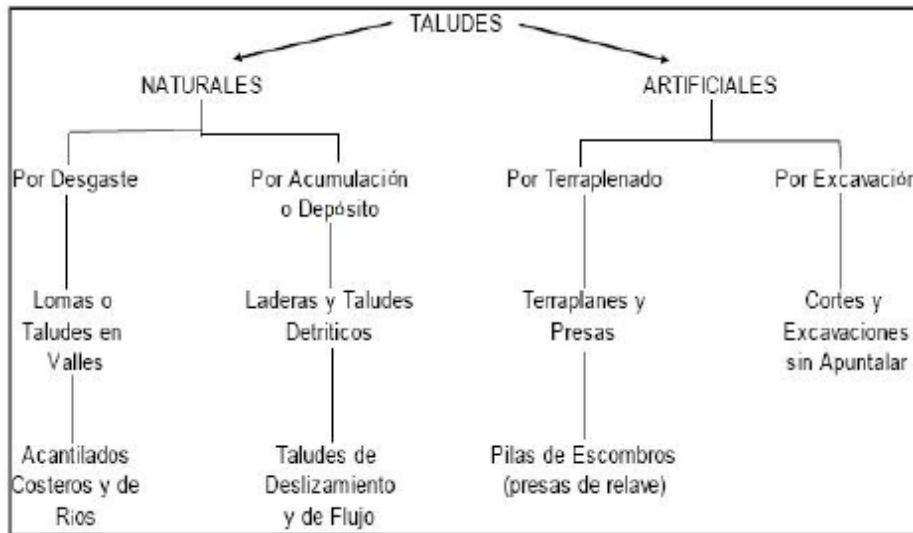
Taludes naturales

Son pendientes naturales de terrenos, no intervenidos por la acción del ser humano, su conformación se da por un proceso natural, en general también son llamados laderas.

Taludes artificiales

Son aquellos cortes o terraplenes generados por el hombre, modificando el estado del terreno natural, esto se da debido a necesidades de un proyecto en construcción o protección de algún tipo de obra constructiva (Morataya Pérez, 2011).

Figura 1: Clasificación de taludes



(Morataya Pérez, 2011)

Diferentes elementos constitutivos en las laderas y taludes como:

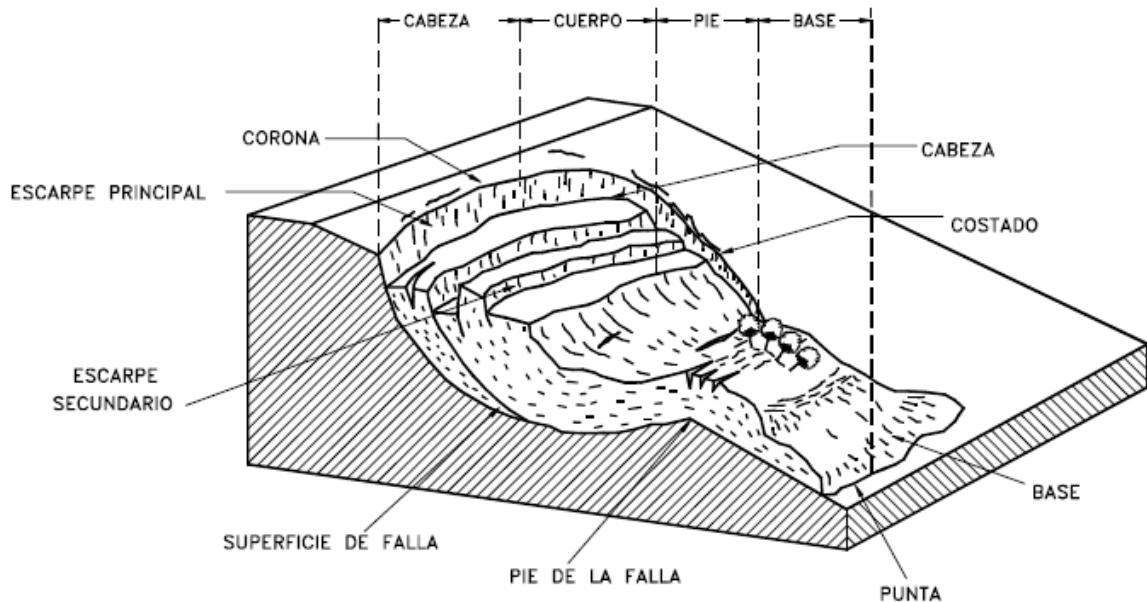
- **Altura:** Se define como la distancia vertical entre el pie y la cabeza, es complicada de cuantificar en laderas debido que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos que sean visualmente marcados.
- **Pie:** Este punto corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe:** Se refiere a la parte donde sucede un cambio repentino de pendiente en la parte superior.
- **Altura de nivel freático:** Corresponde a la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera, esta puede ser medida en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m coincide con la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

Ajeno a los elementos anteriormente descritos, existen factores topográficos que son importantes de mencionar y tomar en cuenta para realizar un análisis completo: longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento meramente geotécnico del talud (Duncan *et al.*, 2014).

2. Procesos de movimiento

Se dan procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas que implican generalmente movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales conformando un talud, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Dichos movimientos ocurren a lo largo de superficies de falla, por caída libre, masa en movimiento, erosión o flujos. En la siguiente imagen se muestra un deslizamiento o movimiento de masa típico con sus partes indicadas (Suárez, 1998).

Figura 2: Deslizamiento típico



(Suárez, 1998)

3. Dimensiones

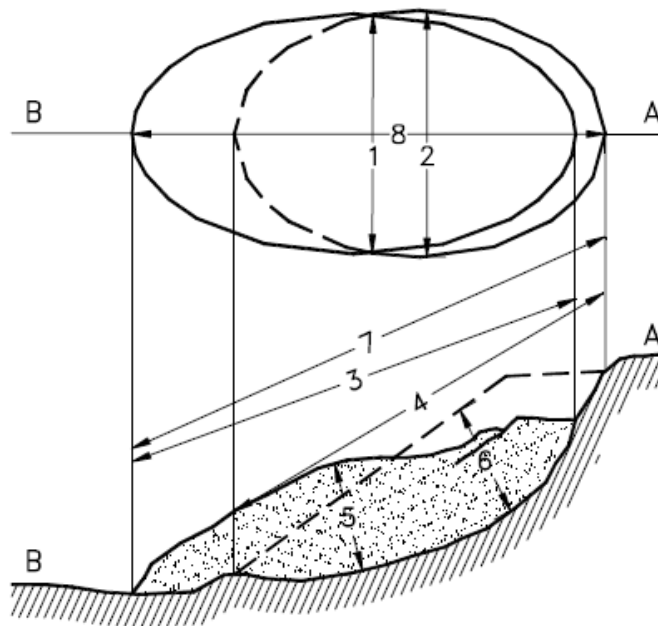
Según la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG), se utiliza cierta terminología para definir las dimensiones de un movimiento, como se visualiza en la siguiente figura:

1. Ancho de la masa desplazada (W_d):
Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .
2. Ancho de la superficie de falla (W_r):
Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
3. Longitud de la superficie de falla (L_r):
Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

4. Profundidad de la masa desplazada (D_d):
Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
5. Profundidad de la superficie de falla (D_r):
Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
6. Longitud total (L):
Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
7. Longitud de la línea central (L_{cl}):
Distancia desde la punta o ña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

El volumen de material caracterizado en la medición del deslizamiento por lo general suele aumentar con el movimiento de corte, debido a que el material se dilata; este fenómeno es identificado con el término “factor de expansión”, expresado como un porcentaje del volumen antes del movimiento. En algunas ocasiones como en el caso de suelos rocosos dicho factor puede llegar a ser hasta un 70 % (Cruden *et al.*, 1990).

Figura 3: Dimensiones del volumen según IAEG (1990)



B. Talud reforzado

Un talud reforzado es suelo remendado y fortalecido por elementos geosintéticos tales como geomallas y/o geotextiles de alta resistencia, con un ángulo de inclinación máximo de

90° respecto a la horizontal. El proceso constructivo se comprende por múltiples capas de geosintéticos y material de relleno. El geosintético se adiciona a la estructura para reforzar el suelo retenido y promueve un incremento en las propiedades mecánicas de este (Morataya Pérez, 2011).

Para muros con pendientes mayores a 80° en el rostro, este debe ser recubierto con varias opciones. Entre estas opciones se encuentra el concreto lanzado, bloques segmentados, mampostería convencional, planchas de concreto prefabricado u otro recubrimiento aprobado; el revestimiento de la cara cumple con la función de proteger al geosintético de forma permanente contra la radiación ultravioleta (Morataya Pérez, 2011).

Los taludes reforzados son asociados con resistencia a tracción y bajo alargamiento, permitiendo la construcción de alta resistencia, durables, flexibles, confiables, simples de construcción e inmediata integración ambiental (Morataya Pérez, 2011).

C. Esfuerzo y resistencia al cortante

Para obtener una representación matemática del fenómeno de una falla cortante en un deslizamiento se utilizan teorías de resistencia de materiales. Las rocas y los suelos cuando fallan a corte se comportan conforme las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada desarrollada por Charles-Augustin de Coulomb mostrada a continuación:

Para suelos saturados:

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

Para suelos parcialmente saturados:

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

Donde:

- τ = Esfuerzo de resistencia al corte
- c' = cohesión
- σ = Esfuerzo normal total
- μ = Presión del agua intersticial o de poros
- μ_a = Presión del aire intersticial
- φ' = Ángulo de fricción interna del material
- φ'' = Ángulo de fricción del material no saturado

En esta ecuación de Coulomb se toman el ángulo de fricción y cohesión, como propiedades características del suelo en cuestión. Cabe mencionar que la presencia de agua reduce el valor

de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros en esta ecuación, en la cual el factor μ está restando al valor de la presión normal. La presión resultante recibe el nombre de presión efectiva σ' (Suárez, 1998).

D. Estabilidad de taludes

En general, cuando el factor de seguridad al deslizamiento es igual a 1, se produce deslizamiento en el talud. Este dato es obtenido a través de la comparación de los esfuerzos que tienden a producir el deslizamiento (fuerzas que intentan hacer fallar al talud) contra los esfuerzos que resisten el deslizamiento (fuerzas resistentes), a partir de esta se define la superficie de falla. La diferencia entre niveles topográficos entre dos planos unidos a través de un talud, existe tendencia natural de las masas a equilibrar sus potenciales energéticos. La inestabilidad física, encuentra su estado teórico de 'equilibrio final' cuando las masas igualen sus energías eliminando la diferencia potencial inicial. Este equilibrio tiende a alcanzar como estado límite, al formar un plano horizontal. Las fuerzas causantes de la inestabilidad son el peso del suelo y las presiones generadas (Morataya Pérez, 2011).

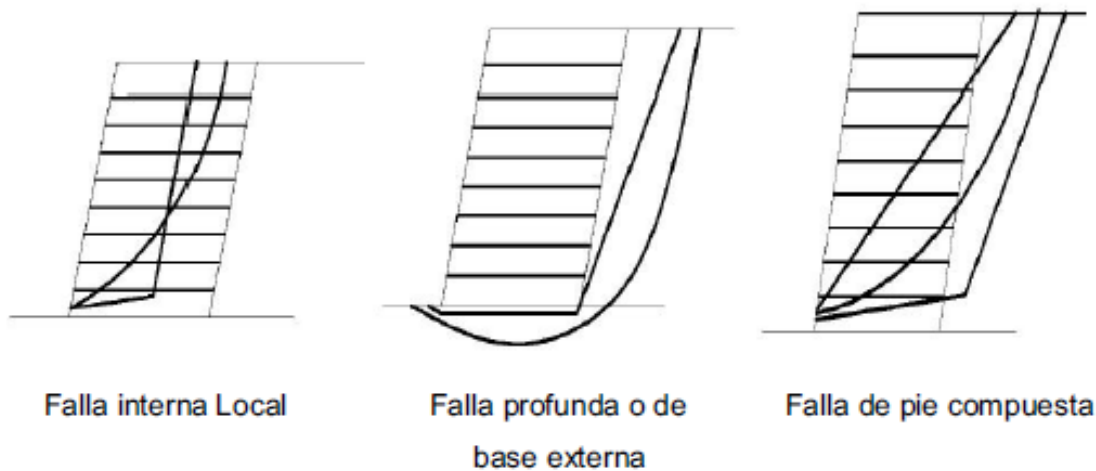
Tipos de estabilidad

Estabilidad interna: es aquella en la que las superficies de rotura discurren íntegramente por el sólido reforzado con geosintéticos.

Estabilidad externa: este tipo de estabilidad considera superficies de rotura que no cortan la zona del sólido reforzado.

Estabilidad compuesta: caso en el que las superficies de rotura pasan simultáneamente por la zona reforzada y no reforzada.

Figura 4: Tipos de fallas



(Morataya Pérez, 2011)

E. Modelos de análisis de estabilidad

Un dato importante el cual da a los ingenieros una idea general de un modelo es el factor de seguridad. Es práctica común en ingeniería civil (geotecnia) definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obteniendo de un análisis matemático de estabilidad. Los factores determinantes del modelo incluyen la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Se debe aclarar que no todos los factores que afectan la estabilidad del talud se pueden cuantificar matemáticamente hablando, no se pueden incluir en el modelo; por lo que hay algunas situaciones donde un enfoque matemático no es el más adecuado para producir resultados satisfactorios. Considerar el factor de seguridad, permite al ingeniero tener una herramienta útil para tomar una decisión acerca del proyecto o talud en análisis.

Existe la posibilidad de estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o a proximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. En los últimos años se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, pero se requiere todavía de un gran esfuerzo de investigación (Duncan *et al.*, 2005).

F. Métodos de círculos de falla

Se puede generalizar que en materiales relativamente homogéneos las fallas ocurren a lo largo de las superficies curvas. Además por facilidad de cálculo, las superficies curvas se asimilan como círculos y la mayoría de los análisis de estabilidad de taludes se llevan a cabo suponiendo que estas fallas son circulares. Actualmente existen software especializados para este tipo de análisis. Los factores de seguridad para todos los círculos se calculan por medio de varios métodos (Suarez, 2009a).

G. Equilibrio límite

El equilibrio límite es un tipo de análisis que solicita datos acerca de la resistencia del suelo, pero requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. Supone que en el caso de una falla, las fuerzas que actúan sobre el suelo y las resistentes del suelo son iguales a lo largo de la superficie de falla que son equivalentes a un FS de 1.0. "El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión." menciona Suárez, 1998.

En general, los métodos generales de equilibrio límite son relativamente simples proporcionando resultados significativos en cuanto a la evaluación de un talud. Son aplicables a todo tipo de terrenos y suelen considerar cargas de rotura (límites) superiores a las teóricas, pero relativamente cercanas a ellas. Según Pérez de Agreda, 2005, "Una hipótesis común a todos los métodos de cálculo es la consideración del talud como indefinido en la dirección horizontal paralela a la superficie del mismo. Aunque la forma de la superficie de rotura sea tridimensional, el hecho de considerar el problema plano conduce a resultados del lado de la seguridad al no tener en cuenta el efecto de los bordes laterales que limitan el deslizamiento."

Un análisis de límite de equilibrio devuelve como resultado un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, se obtienen valores de resistencia al cortante, como se mencionó anteriormente. Con las características definidas de: resistencia al cortante, presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede calcular el factor de seguridad. Dicho análisis consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla del sólido en cuestión. Existen diferentes autores a lo largo de los años que han comparado las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla; sin embargo, existen algunas variaciones entre cada uno. Entre las principales variaciones de cada método se pueden encontrar el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla (Suarez, 2009a).

1. Concepto de Factor de Seguridad (F.S.)

El factor de seguridad o coeficiente de seguridad es empleado por ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones para las cuales está siendo diseñado. En 1992, Fellenius presentó como 'factor de seguridad' la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud contra los esfuerzos de corte críticos que intentan hacer fallar este (Duncan *et al.*, 2005).

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

(Duncan *et al.*, 2005)

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

(Duncan *et al.*, 2005)

En la mayoría de sistemas de análisis asumen un criterio de "límite de equilibrio" donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Como modelo se toma un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Obteniendo esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo y se calcula una indicación del factor de seguridad (Duncan *et al.*, 2005).

Otro criterio es dividir la masa que se va a estudiar en una serie de tajadas o dovelas y realizar análisis de equilibrio sobre cada dovela por separado. La sumatoria de cada análisis brinda el factor de seguridad. Esta condición de análisis por dovelas aplica también para momentos actuantes y resistentes (Duncan *et al.*, 2005).

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias al cortante disponibles}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante actuantes}}$$

(Duncan *et al.*, 2005)

2. Parámetros utilizados en los análisis de equilibrio límite

Existen factores que afectan la estabilidad entre estos factores se pueden encontrar la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujo de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos, etc. menciona Suarez, 2009a. No todos estos factores pueden llegar a ser cuantificados para poder incluirlos en un modelo matemático de límite de equilibrio.

Pesos unitarios

Este parámetro es el más sencillo de medir para el análisis de estabilidad en taludes, es el menos influyente en el factor de seguridad. Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático y saturados por debajo del mismo. La densidad saturada se puede determinar asumiendo un valor de gravedad específica, el cual se puede suponer como 2.68 para la mayoría de suelos (Suarez, 2009a).

Resistencia al cortante

Para utilizar en los análisis de cálculo de la resistencia al cortante puede ser medida de dos formas:

- En la práctica, es decir en el laboratorio o en ensayos de campo, en tal forma que las cargas aplicadas, sean lo idóneo (suficientemente lentas) para producir drenaje.
- En el laboratorio con ensayos consolidados no drenados.

Las envolventes de falla son determinadas a través de dichos métodos son las mismas para todos los fines prácticos (Suárez, 1998).

Según Suarez, 2009a "Se debe tener en cuenta si se trata de condiciones drenadas o no drenadas o si el análisis es realizado en estado no-saturado. Los parámetros deben corresponder a los niveles de esfuerzos sobre las superficies de falla potenciales. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda emplear las resistencias residuales. Igualmente, debe tenerse en cuenta la disminución de resistencia, con el tiempo. Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas, es

igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada a partir de los ensayos no-consolidados no-drenados."

Para suelos parcialmente saturados, como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas debe obtenerse a partir de ensayos no-consolidados, no-drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en cuestión. Por lo general, para suelos como el anteriormente mencionado la envolvente de falla es curva, esto conlleva utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento tanto en los ensayos de laboratorio como en los de campo (Suarez, 2009a).

Condiciones drenadas o no drenadas

Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de cualquier parte del talud, en suelos que poseen baja permeabilidad, puede que no tengan tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga; este escenario es llamado condiciones no drenadas. Por lo general, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poro que tienen en exceso; condición llamada drenada. Suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg., se consideran drenadas y por el contrario si son menores de 10^{-7} cm/seg., consideradas no drenadas. En el intermedio se consideran como condiciones parcialmente drenadas (Duncan *et al.*, 2014).

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

$$T = \frac{C_v t}{D^2}$$

donde:

→ T = Factor adimensional.

→ C_v = Coeficiente de consolidación

→ t = Tiempo de drenaje.

→ D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T da un valor entre 0.01 y 3.0, ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas. Entonces, deben analizarse ambas condiciones, caso drenado y no drenado (Suárez, 1998).

Esfuerzos totales y efectivos

La estabilidad de taludes puede analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. Como primer punto, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las

presiones efectivas tanto en la condición drenada y en la condición no drenada. Pero en la práctica sin embargo es virtualmente imposible determinar con precisión cuales son los excesos de presión de poro que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). Debido a esta razón no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. Aun así, se trabaja todo el análisis utilizando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poro en las condiciones no drenadas (Suárez, 1998).

Estabilidad a corto y largo plazo

En estabilidad considerada a corto plazo se debe tener en cuenta que los suelos no tienen un drenaje rápido, este va a depender de las presiones de poros por las cargas aplicadas; para arcillas se recomienda hacer análisis de esfuerzos totales para el modelaje. Para el caso a largo plazo, se hace la suposición que los suelos (Duncan *et al.*, 2005).

H. Métodos del equilibrio límite considerados

Método ordinario o de Fellenius:

- Toma una superficie de falla circular así como equilibrio de momentos, este método es muy utilizado por su procedimiento simple.

Método de Bishop:

- Con superficie de falla circular, tomando en cuenta equilibrio de momentos actuantes y asumen fuerzas cortantes entre dovelas iguales a cero.

Método de Janbú simplificado:

- Siendo parecido al método de Bishop, tomando cualquier forma de superficie de falla y equilibrio de fuerzas. Janbú utiliza un factor de corrección para tener en cuenta posibles errores y sus factores de seguridad son bajos.

Método de Spencer:

- Es aplicado con cualquier forma de superficie de falla, tomando en cuenta equilibrio de momentos y fuerzas asumiendo que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada partición considerada.

Método de Morgenstern - Price:

- De forma similar al método de Spencer, toma en cuenta cualquier tipo de forma de superficie de falla y el equilibrio de momentos y fuerzas. La diferencia entre los métodos es que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía conforme a una función arbitraria. (Duncan *et al.*, 2014)

I. Análisis de estabilidad a través del software SVSLOPE

SOILVISION es un software de base de datos de propiedades de suelos, deformación o tensión, filtración no saturada, congelación o descongelación y estabilidad de pendientes.

Específicamente es para análisis de estabilidad de pendientes de rocas residuales, diseños para muros de contención, diseños de cimientos y entornos árticos y áridos. Dicho software comprende análisis avanzados que consideran clima y flujos no saturados.

Dentro del software existen diferentes complementos para diferentes análisis. En este caso se utilizó SVSLOPE. SVSLOPE representa el nuevo estándar en análisis de estabilidad de pendientes en 2D y 3D. El software permite realizar estudios de análisis de pendientes del equilibrio límite sobre las pendientes rocosas o del suelo mediante método de cortes o los nuevos métodos basados en tensiones.

SVSLOPE posee la capacidad de poder escoger diversos métodos de análisis de equilibrio límite. Permite métodos clásicos de cortes o dovelas como Bishop, Janbú, Spencer, Morgenstern-Price y el método Ordinario o de Fellenius, entre otros métodos basados en tensión (Bentley, 2020).

Para este caso de estudio se realizó un mismo modelo de muro de retención segmentado y se realizó a través de los distintos métodos de equilibrio límite por dovelas. Es importante mencionar que estas asunciones fueron realizadas bajo la idea de realizar la comparación de cinco métodos de equilibrio límite: Ordinario o de Fellenius, Bishop simplificado, Janbu Simplificado, Spencer y Morgenstern-Price. Para poder tener una sola variable en cada experimentación, se asumieron los mismos parámetros de suelos, mismas dimensiones y condiciones de carga; tanto sobrecarga como carga sísmica.

1. Métodos de cálculo

El método de dovelas para equilibrio límite considera que el factor de seguridad asociado a un talud, es constante para toda la superficie de falla, la resistencia al corte del suelo satisface el criterio de Mohr-Coulomb y al momento de la falla la resistencia a corte del suelo se desarrolla con una magnitud constante en toda la superficie de rotura.

Método ordinario o de Fellenius

Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, las fuerzas actuantes y resultantes obtenidas corresponden a las de cada dovela y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo (producidos por dichas fuerzas en cada dovela) se obtiene el factor de seguridad. La siguiente expresión corresponde al método de Fellenius.

$$F.S. = \frac{\sum [C' \Delta l + (W \cos \alpha - u \Delta l \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W s \sin \alpha}$$

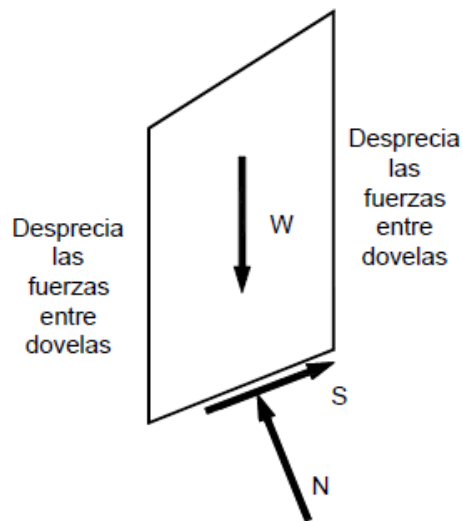
donde:

→ α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada dovela.

- W = Peso total de cada dovela.
- u = Presión de poros = $\gamma_w h_w$.
- Δl = Longitud del arco del círculo en la base de la tajada.
- C', ϕ' = Parámetros de resistencia del suelo.

El método ordinario solamente toma en cuenta el equilibrio de momentos y no satisface el equilibrio de fuerzas. Dicho análisis es sencillo de realizar a través de métodos manuales o en software especiales. Es menos preciso que otros procedimientos y la precisión disminuye a medida que la presión de poros se hace mayor. Generalmente, el método de Fellenius devuelve factores de seguridad menores, en comparación con otros métodos (Suarez, 2009b).

Figura 5: Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método ordinario



(Duncan *et al.*, 2005)

Método de Bishop

Allan W. Bishop en 1955, presentó otro método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas que se producen entre las dovelas; se asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, es decir, no toma en cuenta las fuerzas de cortante. Generalmente se utiliza una forma simplificada de la ecuación de Bishop, ya que la solución general es muy compleja.

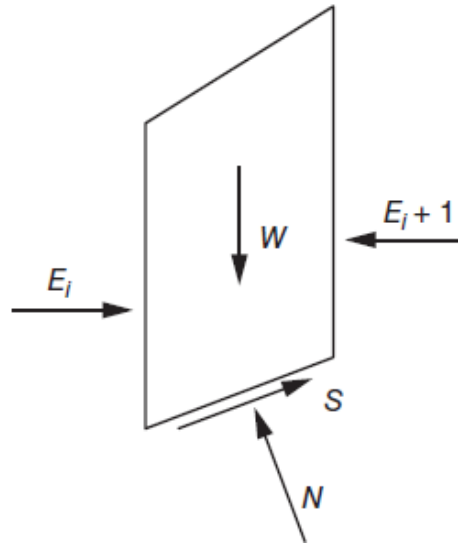
$$F.S. = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

donde:

- α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada dovela.
- W' = Peso total de cada dovela.
- u = Presión de poros = $\gamma_w h_w$.
- Δl = Longitud del arco del círculo en la base de la tajada.
- C', ϕ' = Parámetros de resistencia del suelo.

Como se puede observar en la ecuación anterior el FS aparece de ambos lados de la ecuación, es decir, que se requiere un proceso de interacción para calcular el factor de seguridad. Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad en taludes. Considerando únicamente el equilibrio de momentos, se considera que da resultados muy precisos en comparación al método ordinario. La principal restricción del método de Bishop simplificado es que solo considera las superficies circulares (Suarez, 2009b).

Figura 6: Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método de Bishop simplificado



(Duncan *et al.*, 2005)

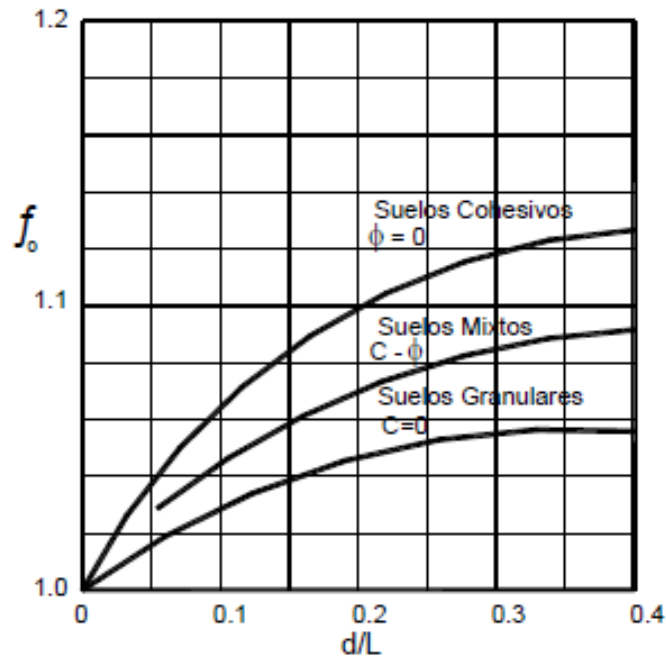
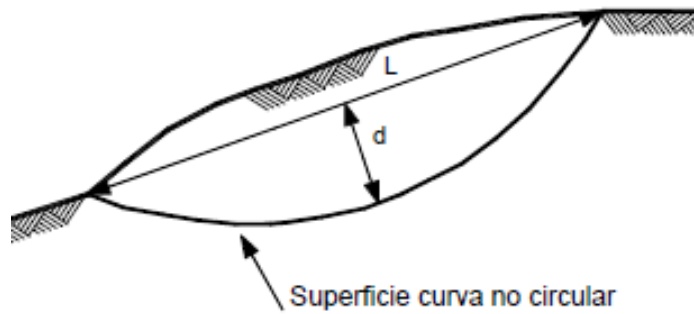
Método de Janbú

Para el método simplificado de Janbú se supone que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante. Considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares, por lo que establece un factor de seguridad f_o . Este factor depende de la curvatura de la superficie de falla. Se tiene el registro que estos factores de corrección son aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos.

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ [c' b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha m a} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)}$$

En algunos casos, la suposición f_o puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Para algunos taludes la consideración del factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis.

Figura 7: Diagrama para determinación del factor f_o para el método simplificado de Janbú



(Duncan *et al.*, 2005)

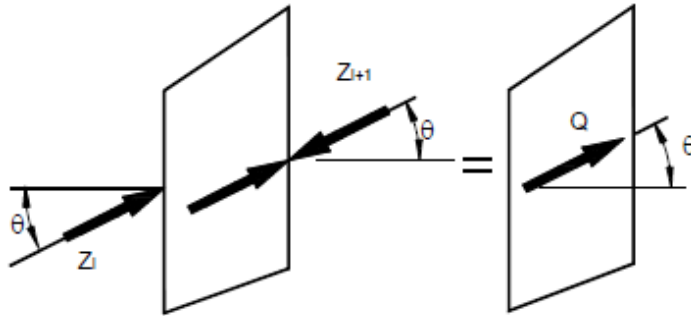
Método de Spencer

Satisfaciendo totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos, el método de Spencer se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas

con las otras, es decir, que tienen el mismo ángulo de inclinación. Dicha inclinación específica de las fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Inicialmente Spencer propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender a superficies no circulares. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerza y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de fuerzas entre dovelas θ .

Para resolver las ecuaciones de F y θ , se utiliza un sistema de prueba y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel de error aceptable. Luego de obtener los valores para F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer es muy preciso y se puede aplicar en casi cualquier tipo de geometría de talud y perfiles de suelo. Se considera el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad (Duncan *et al.*, 2005).

Figura 8: Diagrama de fuerzas actuantes sobre dovelas consideradas para el método de Spencer



(Duncan *et al.*, 2005)

Método de Morgenstern-Price

El procedimiento de Morgenstern-Price considera las fuerzas de corte entre dovelas como

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

donde:

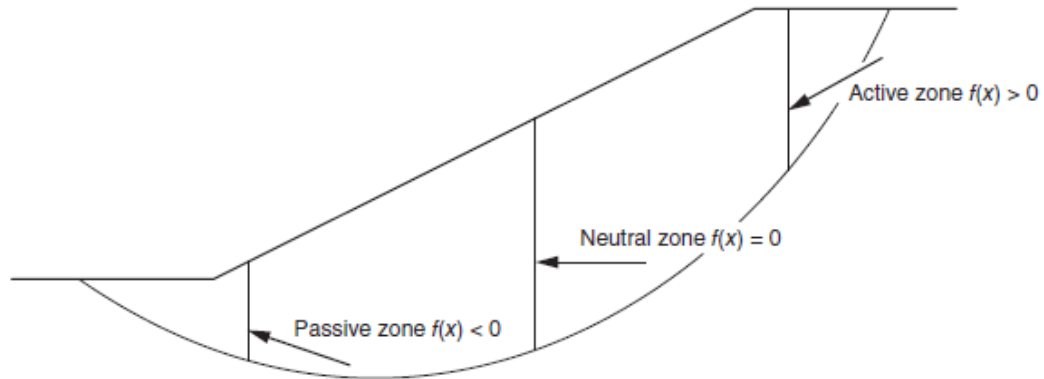
→ X y E = Fuerzas verticales y horizontales entre dovelas.

→ λ = Factor desconocido que es evaluado en conjunto con las otras incógnitas.

→ $f(x)$ = Función asumida con valores establecidos para cada límite de cada dovela.

(Duncan *et al.*, 2005)

Figura 9: Diagrama de función asumida para método de Morgenstern-Price



(Duncan *et al.*, 2005)

Este método asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o como otro tipo de función. La suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo del factor de seguridad al satisfacer el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y de Morgenstern-Price. Este método es muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo (Duncan *et al.*, 2005).

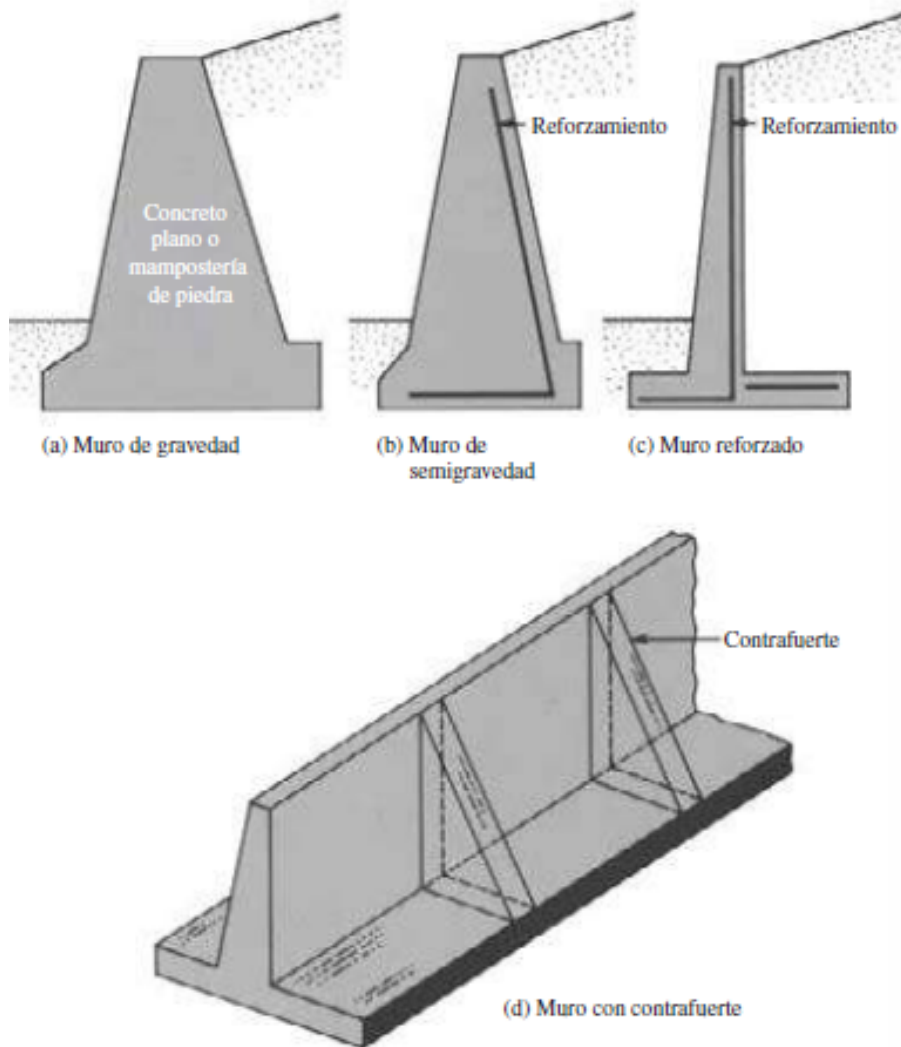
J. Muros de contención en general

Los muros de contención son elementos que dan soporte permanentemente a los taludes verticales o casi verticales del suelo. Lo anterior mencionado es en cuanto a terrenos naturales, pero en el área de la construcción a veces se deben realizar excavaciones en la tierra de las cuales se obtienen caras verticales o casi verticales. Dichas excavaciones hechas por maquinaria tienen el fin de un mejor aprovechamiento del espacio a construir, este también es un factor determinante cuando se debe elegir la técnica utilizada para contener el suelo. Un ejemplo bastante común son los sótanos en edificios de áreas desarrolladas o instalaciones de transporte subterráneas a poca profundidad, a la larga el objetivo es aprovechar el espacio del terreno (M. Das, 2015).

En general, los muros de contención comúnmente utilizados en proyectos de construcción pueden agruparse en cuatro clasificaciones según M. Das, 2015. Estos se encuentran detallados a continuación e ilustrados en la siguiente imagen.

- Muros de gravedad
- Muros de semigravedad
- Muros reforzados
- Muros con contrafuerte

Figura 10: Tipos de muros de contención.



(M. Das, 2015)

K. Diseño de estructuras de contención para estabilización

Según los distintos requerimientos de cada talud y proyecto en cuanto a remediación a través de estabilización es el método que se debe escoger como estructura de contención. A continuación, se enlistan algunos pasos guía a seguir en el diseño de muros de contención para estabilizar deslizamientos.

- **Paso 1 Determinar la viabilidad del uso de estructuras de contención**
Analizar restricciones de derecho de vía, materiales, equipos, estructuras existentes, aspectos ambientales, estética, sensibilidad, movimientos de tierra, costos, etc.
- **Paso 2 Información geotécnica del deslizamiento o talud**

Topografía, extensión lateral, perfil de suelo, niveles freáticos, parámetros para el análisis, superficie de falla, sismicidad, etc. Asegurarse de la topografía del deslizamiento y profundidad de la superficie de falla real o esperada, y las condiciones del nivel freático se conocen en forma clara y precisa.

- **Paso 3 Evaluar el factor de seguridad del talud existente**

Calcular el factor de seguridad utilizando un software de equilibrio límite. Realizar un cálculo de estabilidad de taludes convencional y ajustar las condiciones en tal forma que el modelo sea lo más cercano posible a la realidad. Se diseña para el factor de seguridad mínimo.

- **Paso 4 Selección de tipo de muro y su ubicación**

El tipo de muro depende del espacio, los materiales disponibles, la magnitud requerida, la posibilidad o no de realizar excavaciones, el tiempo disponible. La localización del muro depende del objetivo específico y las características del deslizamiento.

- **Paso 5 Predimensionamiento del muro y cálculo de factor de seguridad del talud a falla global con el muro**

A prueba y error con un software de estabilidad de taludes por equilibrio límite modificar las dimensiones y localización del muro para lograr el factor de seguridad deseado.

- **Paso 6 Evaluar factores de seguridad a deslizamiento, volcamiento y capacidad de soporte**

Calcular los factores de seguridad y modificar las dimensiones del muro hasta obtener los factores especificados. Si se modifica el muro se requiere comprobar nuevamente el factor de seguridad a falla global del talud.

- **Paso 7 Diseñar la estructura interna del muro y detalles especiales**

Calcular refuerzos (geomallas, anclajes, etc.), subdrenajes, drenajes, elementos de fachada, etc.

(Suarez, 2009a)

L. Comparación de métodos de contención más utilizados

El concreto dio paso a que se construyeran sistemas de muros de contención por gravedad, pero conforme los años, los constructores se fueron dando cuenta que existían limitaciones en cuanto a la altura, se desarrollaron sistemas con concreto reforzado y se lograron alcanzar mayores alturas con más esbeltez. En obras civiles el concreto debido su sobreexplotación y encarecimiento, los ingenieros civiles han desarrollado nuevos métodos constructivos y nuevos elementos estructurales. En Francia, Henri Vidal, en 1963, creó y planteó la técnica de 'tierra armada' lo que hoy se conoce como suelo reforzado y suelo armado (Espada Loli, 2017).

La técnica consistía en la construcción de un terraplén reforzado mediante tiras metálicas recubierto con placas prefabricadas de concreto. Más adelante en 1982 en el Reino Unido se comenzó a producir geomalla, así como en Estados Unidos, la cual fue siendo introducida al mundo de la construcción. Actualmente hay muchas entidades que poseen regulaciones de los

muros de contención y detallan su comportamiento según las condiciones de cada proyecto. Una de ellas es Standard Specifications for Highway Bridges que fueron creadas por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Espada Loli, 2017).

Existen diversos tipos de muros de contención, la selección del método adecuado va a depender de dos puntos más importantes: el punto de vista técnico y económico. En cuanto al aspecto técnico se deben tomar en cuenta características tales como las dimensiones y la estabilidad del sistema de contención. La cuantificación de materiales, calidad y costos de estos son los que rigen directamente el aspecto económico del muro. Se debe encontrar un balance óptimo para que se pueda cumplir la función de contener el suelo bajo los factores de seguridad adecuados y tener criterio a la hora de realizar el diseño para poder adecuar calidad y cantidad de materiales sin elevar costo (Espada Loli, 2017).

Muros de gravedad:

Los muros de gravedad se construyen con concreto plano o mampostería de piedra. La forma en la que funcionan es dependiendo de su propio peso y cualquier apoyo del suelo que se encuentre sobre la mampostería para estabilizarse. Cuando se requiere contener grandes alturas este tipo de muros resultan no siendo económicos.

Muros de semigravedad:

En este tipo de muros es conveniente la utilización de una pequeña cantidad de acero y así minimizar el tamaño de las secciones de pared, como se muestra en la imagen anterior.

Muros reforzados:

Como su nombre lo indica, están hechos de concreto reforzado que consiste en una punta delgada y una losa base. Este sistema de contención resulta ser económica hasta una altura de alrededor de 8 metros.

Muros con contrafuerte:

Similares a las paredes reforzadas, la parte denominada contrafuerte de este tipo de muro corresponde a losas delgadas de concreto verticales ubicadas a intervalos regulares a lo largo del muro. Los contrafuertes tienen como función unir la pared y la losa base, reduciendo el esfuerzo cortante y los momentos a flexión de la estructura.

Para diseñar muros de contención correctamente, el ingeniero a cargo debe conocer parámetros del suelo tales como el peso unitario, ángulo de fricción y cohesión del suelo retenido detrás de la pared y del suelo ubicado debajo de la losa base. Las características del suelo a retener determina la distribución de la presión lateral a considerar en el diseño (M. Das, 2015).

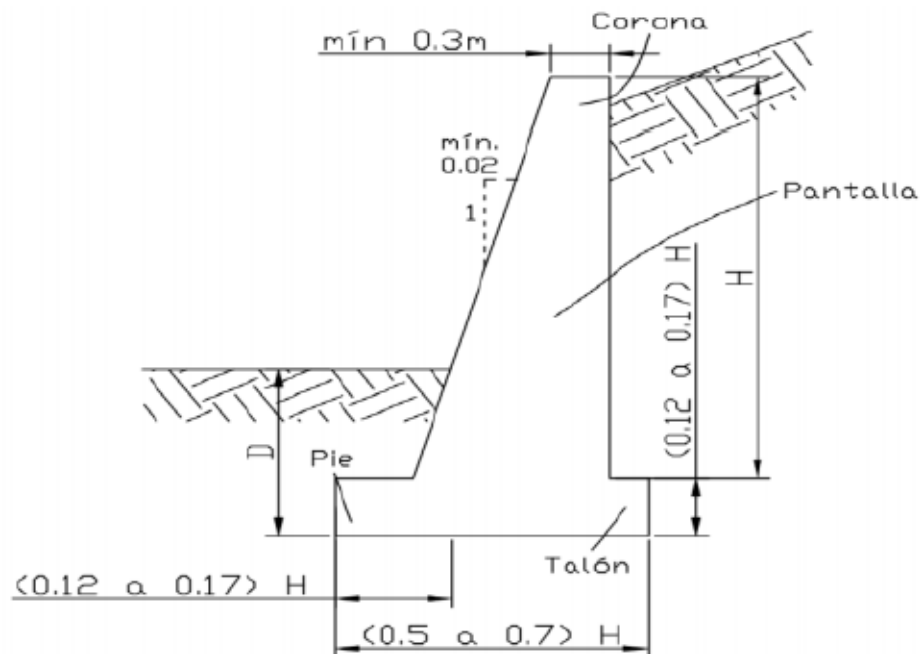
En este punto de la investigación cabe mencionar que para muros de contención el diseño consiste de dos fases. Como primera fase, con la presión lateral de la tierra conocida, con la estructura en conjunto se verifica la estabilidad, donde se chequea el posible, vuelco, deslizamiento y fallas en la capacidad de carga. Como segunda fase se verifica cada componente para una resistencia adecuada y se determina el refuerzo de acero requerido en cada elemento de la estructura (M. Das, 2015).

1. Muro de contención por gravedad

La característica principal estos muros es que dependen de su propio peso y del suelo para ser estables. Existen muchas formas de construir muros de contención por gravedad, una forma común de construcción es la presentada a continuación, la cual se constituye de varias partes de un y especificaciones. Se deben diferenciar dos tipos generales de muros por gravedad: muros rígidos y muros flexibles. Entre los muros rígidos se pueden encontrar los muros de concreto reforzado, concreto simple y concreto ciclópeo; entre los flexibles se pueden encontrar gaviones, muros criba, pedraplenes y muros de tierra con llantas usadas, entre otros (Suarez, 2009b).

Para diseño de estructuras por gravedad siempre debe cimentarse sobre suelos estables, es conveniente en la mayoría de casos colocar tacones o llaves de cortante por debajo del muro, en todos los casos debe existir un sistema de drenaje y subdrenaje completo, la altura máxima prudente es de 8 metros y en algunos tipos de muro hasta 4 metros, en general, los muros de gravedad solo son efectivos para estabilizar pequeños deslizamientos, se deben analizar por estabilidad de taludes y comprobar la estabilidad interna del muro (Suarez, 2009b).

Figura 11: Muro de contención por gravedad



(Espada Loli, 2017)

A continuación en el Cuadro 1 se especifican algunas ventajas y desventajas de este sistema.

Cuadro 1: Ventajas y desventajas de muros de contención por gravedad

Ventajas	Desventajas
Trabajan efectivamente para alturas pequeñas siendo más económicos.	Altura efectiva limitada especialmente si el suelo presenta características de ser arcilloso.
Diseño sencillo al realizar análisis de estabilidad.	No son efectivos para estabilizar deslizamientos grandes debido a que el mecanismo depende de su propio peso.
Inclusión de sistemas de drenaje para eliminar presión de agua es fácil y efectivo ya que conduce y transporta el agua hacia la tubería.	No deben ser diseñados a flexión, de ser así únicamente admiten esfuerzos pequeños de flexión.

(Suárez, 1998)

2. Muros de contención segmentados

Varios autores han desarrollado diferentes sistemas patentados para los muros de contención segmentados, los cuales son utilizados como alternativas a los muros de contención convencionales. Aunque los métodos de diseño hayan sido utilizados en el pasado, la mayoría fueron diseñados utilizando normas NCMA (National Concrete Masonry Association's) así como los programas computarizados MSEW (2000) comisionados por la FHWA (Federal Highway Administration) (Duncan *et al.*, 2014).

Los muros de contención o retención segmentados constan de varios componentes. A continuación, se mencionan las propiedades mecánicas e importancia de los componentes. La capa expuesta del muro está hecha con unidades modulares prefabricadas, tiene refuerzo geosintético transversal, material de relleno que permite el drenaje, capas de suelo reforzado con geotextil, cimientos de la pared con elementos prefabricados, así como el suelo retenido por la unidad de retención (White, 2010).

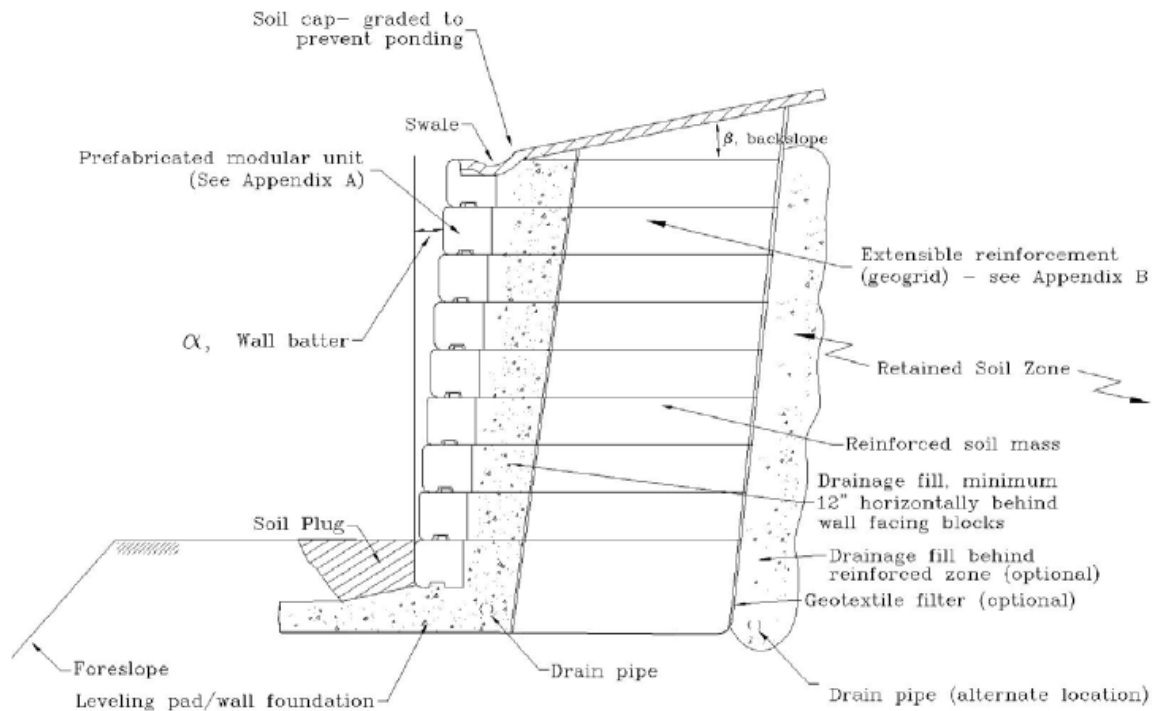


Figura 12: Componentes de muros de contención segmentados según White, 2010

A continuación en el Cuadro 2 se especifican algunas ventajas y desventajas de este sistema.

Cuadro 2: Ventajas y desventajas de muros de contención reforzados con geomallas

Ventajas	Desventajas
Son muros más económicos, después de la metodología para estabilizar a través de gaviones.	Según AASHTO se utilizan materiales granulares como relleno.
La flexibilidad de la estructura, comparándola con una estructura rígida.	Existe posibilidad de requerir longitudes muy extensas de refuerzo, según el material y caso, esto eleva costos.
En terraplenes no requieren de gran volumen de relleno y se comportan mejor ante sismos.	No deben ser diseñados a flexión, de ser así únicamente admiten esfuerzos pequeños de flexión.
Permite estabilizar cortes.	Su estudio de comportamiento real a largo plazo, no se ha comprobado, sin embargo, comercialmente se asegura que se pueden utilizar a largo plazo, debido a que se fabrican con factores de seguridad elevados.

(Suárez, 1998)

Henri Vidal utilizó tiras metálicas para reforzar el suelo pero con el tiempo estas tendían a ser corroídas con gran facilidad, hoy en día estas tiras metálicas han sido sustituidas principalmente por dos tipos de refuerzo: geotextil, que es un elemento compuesto por poli-

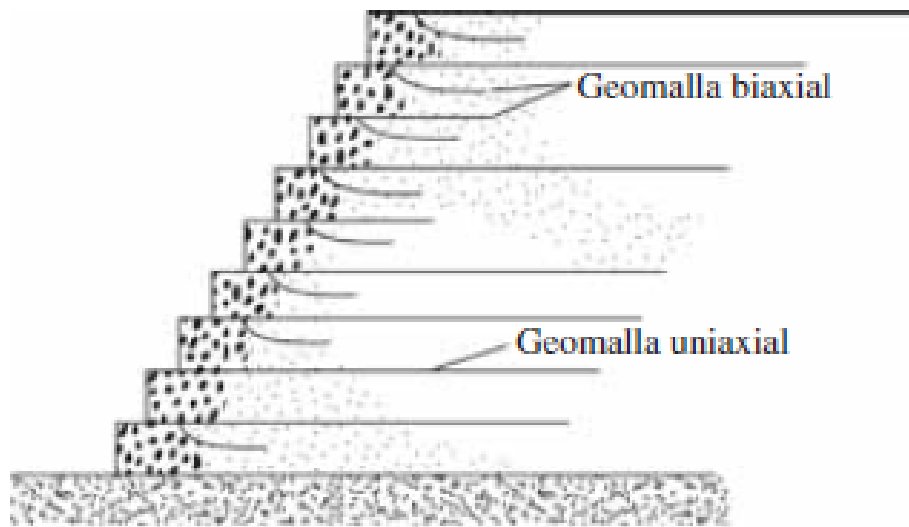
propileno y poliéster, pueden ser tejidos o no tejidos, dependiendo su uso y requerimientos. En este tipo de muros el refuerzo se logra debido a la resistencia al esfuerzo que existe entre el geotextil y las capas de suelo en contacto con el mismo. Las geomallas son un material que posee diferentes resistencias en uno todos sentidos. Poseen altas resistencias a la tensión en sentido longitudinal. Existen geomallas uniaxiales y biaxiales; las uniaxiales son las más utilizadas con diferentes resistencias (Leoncio Avalos, 2015).

Comparando las geomallas con los geotextiles, estas son más rígidas lo que conlleva a menor deformación, no acumulan agua entre sus capas. En las siguientes figuras se detallan ambos tipos de geocompuestos.

3. Estabilidad interna en muros de contención reforzados con geomallas

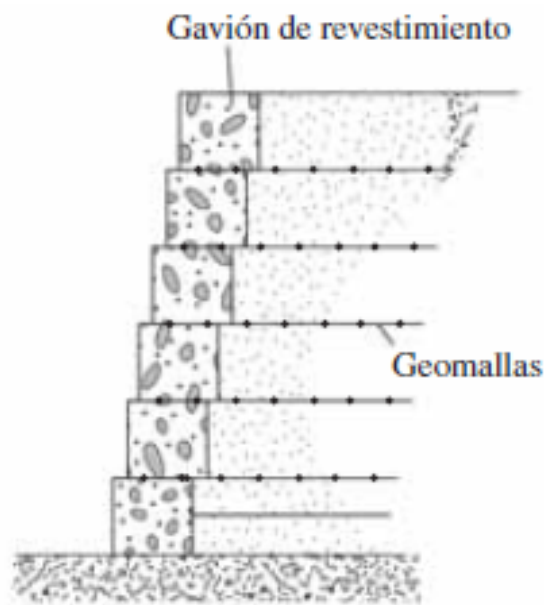
Las geomallas se pueden utilizar como refuerzo en material de relleno granular en la construcción de muros de retención. A continuación se presentan algunos diagramas esquemáticos típicos de muros de contención con refuerzo de geomallas (M. Das, 2015).

Figura 13: Refuerzo de geomalla de pared envolvente



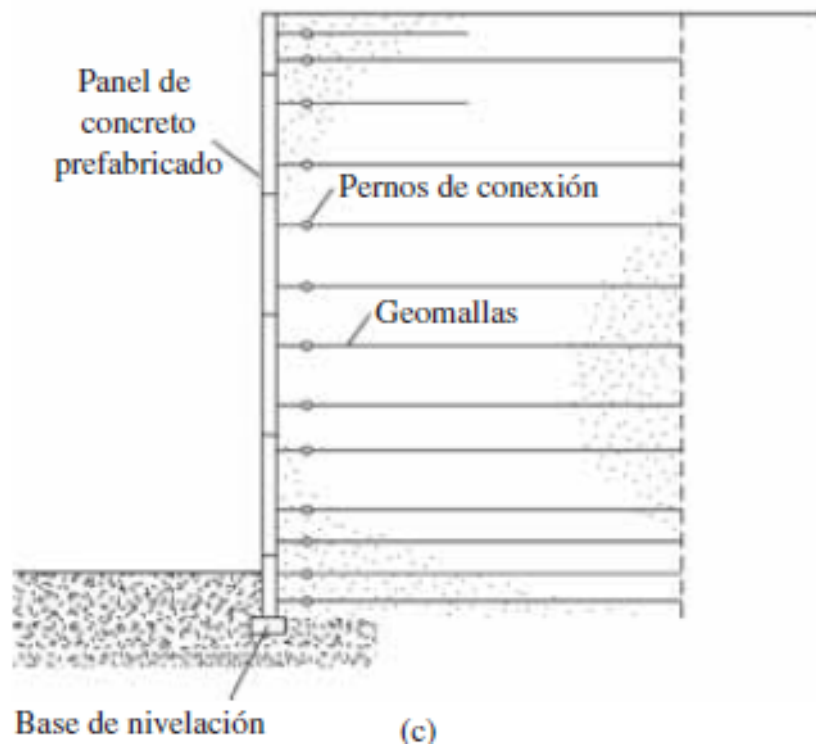
(M. Das, 2015)

Figura 14: Pared con revestimiento de gaviones



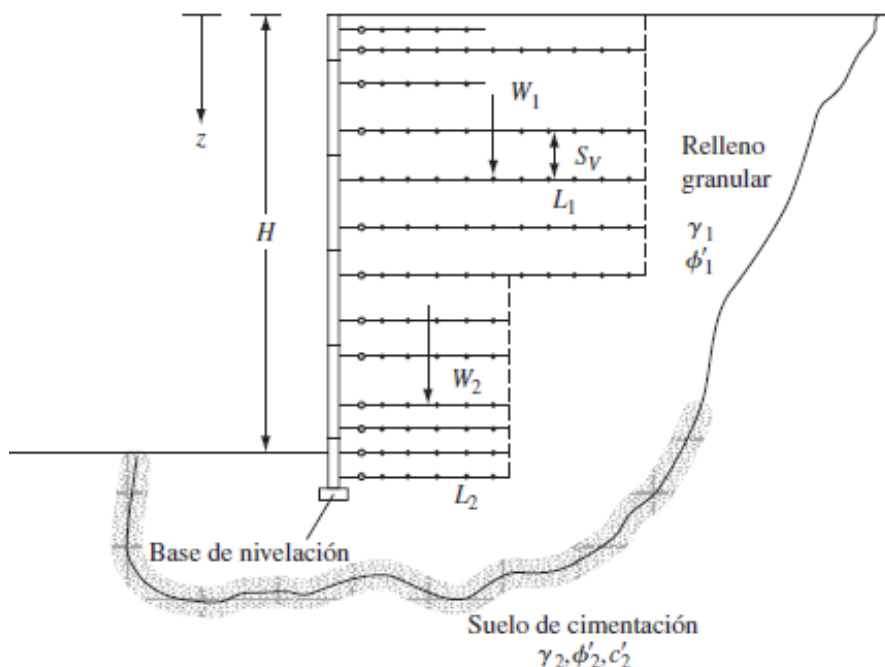
(M. Das, 2015)

Figura 15: Pared con panel frontal de concreto



(M. Das, 2015)

Figura 16: Diseño de muro de contención reforzado con geomalla



(M. Das, 2015)

M. Componentes principales de muros de contención segmentados

Los principales componentes son:

- Geomallas
- Bloques prefabricados
- Tubería
- Material de relleno

1. Geomallas

Una geomalla es un geosintético hecho de un material polimérico, formando un tejido con aberturas apropiadas para sus diferentes aplicaciones. Principalmente se utilizan en varios tipos de proyectos de construcción, pero también pueden ser utilizadas como separaciones. Sus rejillas abiertas permiten que el suelo golpee a través de las aberturas y los dos materiales (suelo y geomalla) se entrelazan para trabajar en conjunto. Tienen la característica de ser altamente resistentes a las fuerzas de tensión y una mayor capacidad para distribuir cargas en un área amplia (BAUNOVO, 2019).

Hay algunos tipos de geomallas que cumplen una función específica, comprenden diferentes fortalezas. Entre los diferentes tipos de geomallas, existen uniaxiales, biaxiales y triaxiales (GEOACE, 2019).

Figura 17: Geomallas disponibles para el mercado guatemalteco



(BAUNOVO, 2019)

Geomalla uniaxial

La geomalla uniaxial soporta específicamente la tensión en una sola dirección. Se forman estirando las costillas en una dirección de longitud y su resistencia a la tracción se estira en la dirección de la máquina. Es decir, son adecuadas para aplicaciones en paredes como en pendientes, por ejemplo en muros de contención, sistemas de revestimiento de vertederos, terraplenes sobre suelos blandos y con pendientes empinadas (GEOACE, 2019).

Figura 18: Geomalla Baugrid uniaxial



(Elaboración propia, 2020)

Figura 19: Geomalla Baugrid uniaxial



(Elaboración propia, 2020)

Geomalla biaxial

En cuanto a la geomalla biaxial, posee la característica de tener un equilibrio igual de resistencia a la tensión tanto en la dirección de la máquina como en dirección transversal. Aumentando su capacidad para distribución de cargas en un área más amplia que las uniaxiales, esto aumenta su espectro de aplicación. Estas son usadas comúnmente en aplicaciones tales como cimientos para camas de caminos, plataformas de camiones ferroviarios, caminos permanentes sin pavimentar, pistas de aeropuertos, caminos de acarreo de construcción, plataformas de trabajo en subgrados débiles y estacionamientos (GEOACE, 2019).

Figura 20: Geomalla Baugrid biaxial



(Elaboración propia, 2020)

Geomalla triaxiales

Para proporcionar un nivel mejorado de rigidez en el plano, las geomallas triaxiales están hechas de una lámina de polipropileno perforada orientada en múltiples direcciones equilateras para formar aberturas triangulares. Creando un producto más eficiente que ofrece una transferencia óptima de tensión en servicio desde el agregado a la geomalla (GEOACE,

2019).

Figura 21: Geomalla extruida



(Elaboración propia, 2020)

2. Bloques prefabricados de concreto

Son bloques de concreto o mortero con peso unitario entre 15 y 50 kg. El tamaño típico en la fachada es de 10 x 60 centímetros. La mayoría de estos bloques son patentados por las empresas instaladoras y se les conoce por su nombre comercial (Suarez, 2009b).

En la cara expuesta de los muros de retención segmentados estudiados en el presente trabajo, se toma en cuenta el bloque prefabricado. Son bloques fabricados con concreto de alta resistencia, diseñado exclusivamente para la construcción de muros de contención. Cabe mencionar que la geometría de dicho bloque hace que la conexión entre uno y otro sea la adecuada para que la cara total del muro trabaje en conjunto con las geomallas que refuerzan la estructura. La resistencia de los bloques debe ser alta para poder soportar fuerzas residuales dentro del muro. Por ejemplo, el Novoblock, distribuido por la empresa internacional Baunovo en Guatemala cuenta con resistencias mayores a los 210 kg/cm^2 . Según los requerimientos estéticos de cada proyecto pueden ser fabricados con diferentes geometrías en la cara así como colores del bloque. En este caso los bloques son únicamente

la fachada del muro, por efectos prácticos y su poca influencia en la estabilidad del muro en general, estos no son tomados en cuenta para la modelación en el software.

Figura 22: Ejemplo de Novoblock con cara plana



(BAUNOVO, 2019)

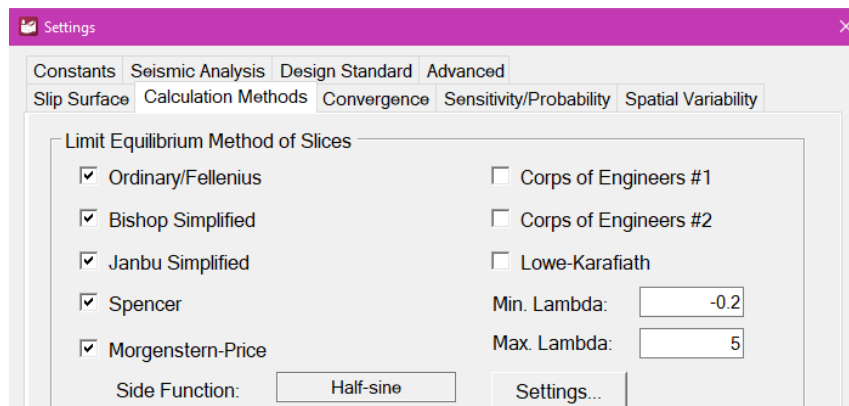
A. Consideraciones para modelo realizado en SVSLOPE

Para la simulación de un muro de contención, en este caso segmentado, en el programa SVSLOPE y realizar distintos métodos de análisis de equilibrio límite se deben asignar distintos parámetros de suelo, dimensionamiento de regiones, resistencias a tensión de geomallas, superficie de falla, cargas asignadas (sobrecarga y sísmica), etc. A continuación, se agregan capturas de pantalla de los parámetros de entrada al programa.

1. Equilibrio límite a través de métodos seleccionados

Los métodos considerados para realizar la comparación fueron: Método ordinario o de Fellenius, Bishop simplificado, Janbú simplificado, Spencer y Morgenstern-Price. En la siguiente figura se muestran los métodos asignados al programa SVSLOPE versión 10.

Figura 23: Métodos seleccionados para realizar el análisis de equilibrio límite

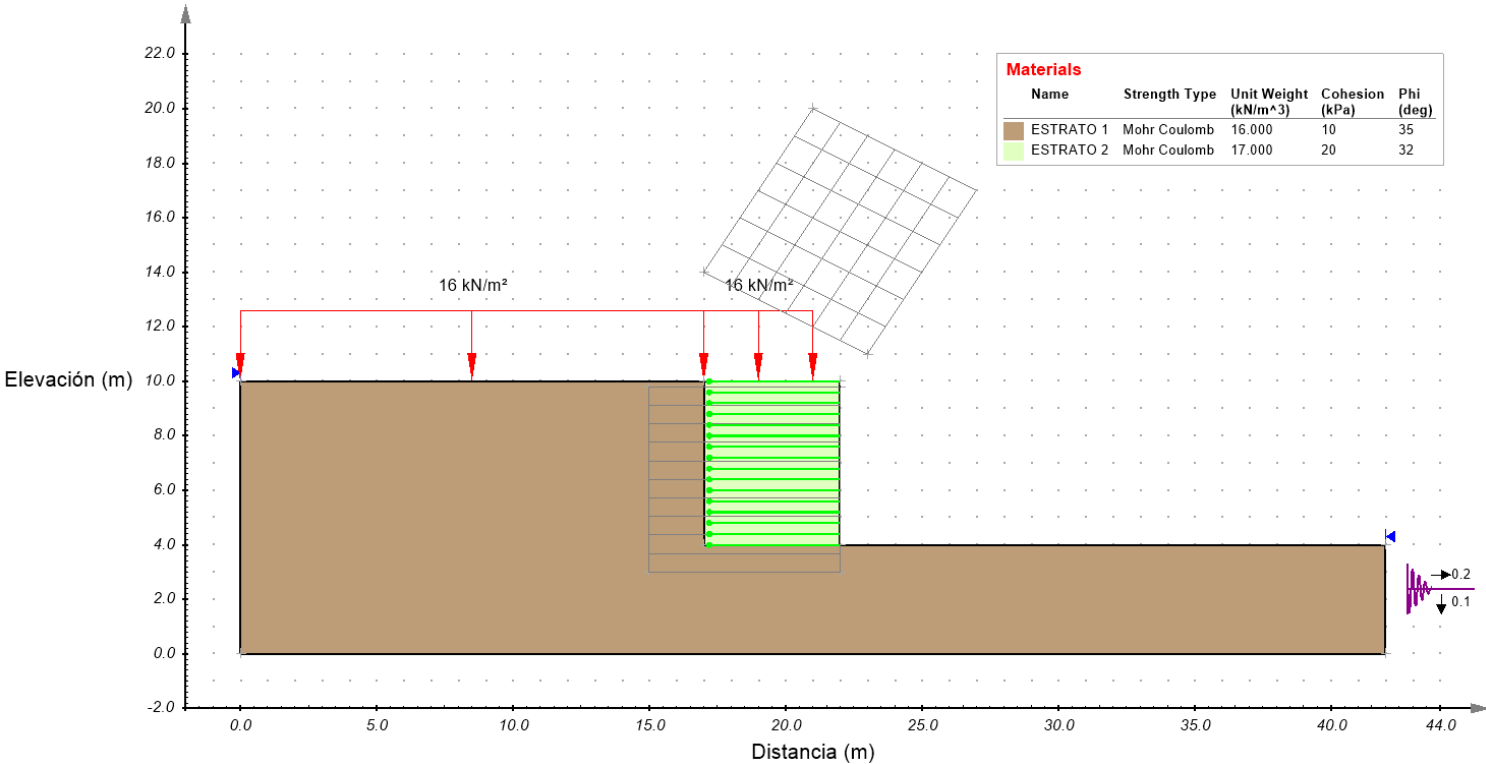


(Elaboración propia, 2020)

2. Dimensionamiento de muro de contención

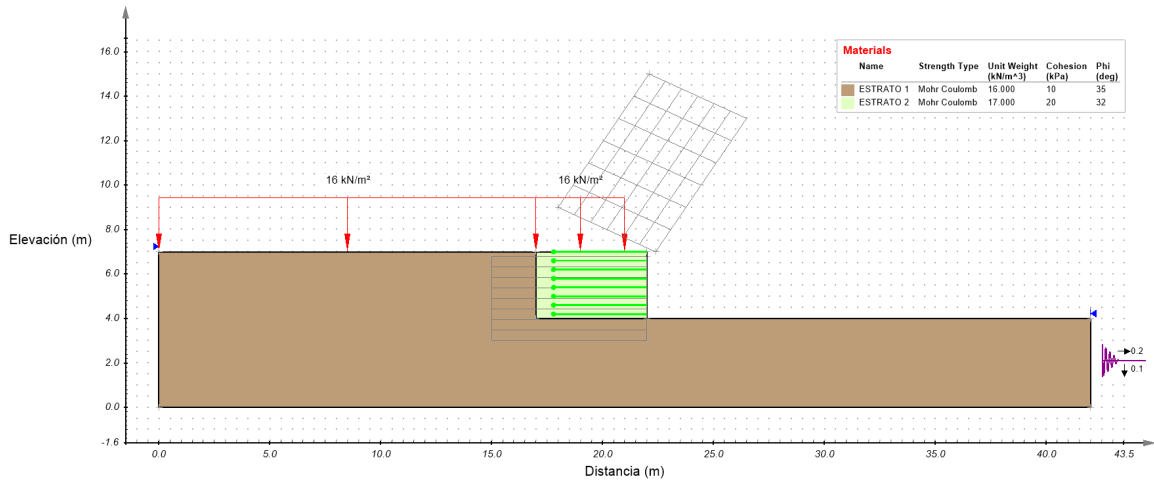
La altura final expuesta de los muros de contención segmentados asignadas fueron de 6 metros y 3 metros, respectivamente. Para dibujar el segmento considerado para el estudio en el software, este permite ingresar una tabla con coordenadas cartesianas (x, y) en metros y así definir el polígono correspondiente a cada región. En la primera región se asignó el material 'ESTRATO 1' y en la segunda región el 'ESTRATO 2'. Más adelante se presentan las características definidas para los distintos suelos.

Figura 24: Distribución de materiales en el modelo



(Elaboración propia, 2020)

Figura 25: Distribución de materiales en el modelo



(Elaboración propia, 2020)

3. Constantes asignadas

En la siguiente imagen se enlistan las constantes definidas para el modelo. Cabe mencionar que estas constantes ya están predefinidas en el software, únicamente se chequeó que los valores sean adecuados para las condiciones que tienen el modelo.

Figura 26: Parámetros asignados al modelo

Parámetro	Valor	Unidades
Peso unitario del agua	9.807	kN/m ³
Densidad del agua	1000	kg/m ³
Aceleración de gravedad	9.807	m/s ²

(Elaboración propia, 2020)

4. Materiales asignados

Los materiales descritos se encuentran dentro de los rangos razonables correspondientes a arenas sueltas y un material selecto para el relleno detrás de la cama vertical de pedrín colocada luego de los bloques de concreto conformando la cara expuesta del muro.

Suelos

Para el 'ESTRATO 1' correspondiente al suelo drenado y según el método de Mohr Coulomb se asignaron los parámetros de cohesión de 10 kPa, ángulo de fricción ϕ de 35° y el peso unitario del suelo corresponde a 16 kN/m³.

El 'ESTRATO 2' fue asignado con los parámetros de cohesión de 20 kPa, ángulo de fricción ϕ de 32° y un peso unitario del suelo de 17 kN/m³; dichas características considerando

las condiciones drenadas del suelo.

Figura 27: Caracterización de suelos asignados para cada región

Material	Color asignado	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Peso unitario (kN/m ³)
ESTRATO 1		10	35	16
ESTRATO 2		20	32	17

(Elaboración propia, 2020)

Geomallas

Las geomallas poseen características importantes de considerar en cuanto las fuerzas laterales. Las especificaciones asignadas a las geomallas corresponden a la ficha técnica brindada por BAUNOVO, 2019. En la sección de anexos se encuentra la ficha técnica de donde se obtuvo los datos correspondientes a Baugrid 100/30 kN. Dicha geomalla posee 100 kN de resistencia a la tensión (MD).

Para la longitud de las geomallas se utilizó el 80 % de la altura total expuesta de la cara del muro (6 metros). En casos con condiciones de suelo débil y amplias superficies de falla podría llegar a considerarse un 110 % de la altura para la longitud de la geomalla. El espaciamiento entre cada geomalla puesta, fue calculado en múltiplos de la altura total de las unidades de bloque prefabricado utilizado para realizar el modelo; se fue iterando hasta llegar a ubicar cada capa de geomalla separadas 0.4 m entre cada una verticalmente.

Figura 28: Distribución de geomallas en la altura total del muro

Parámetro	H= 3 m	H= 6 m
Orientación de refuerzo	Horizontal	Horizontal
Longitud de refuerzo	2.4 m	4.8 m
Separación entre cada geomalla (verticalmente)	0.4 m	0.4 m

(Elaboración propia, 2020)

Figura 29: Propiedades de geomalla asignada

Propiedad	Cantidad	Unidad
Adhesión	1	kPa
Ángulo de fricción	37	deg
Resistencia a la tensión	100	kN/m

(Elaboración propia, 2020)

5. Superficie de falla

Para esta parte del estudio se debe asignar la dirección en la que se debe considerar el deslizamiento, luego la forma de la superficie de falla a considerar dependiendo el método

seleccionado del análisis. Para el método de búsqueda de falla se utilizó definición de grilla y tangente, este permite una búsqueda más sencilla de la superficie de falla crítica ya que se identifica con colores como se presenta en los resultados obtenidos.

Figura 30: Superficie de deslizamiento asignada

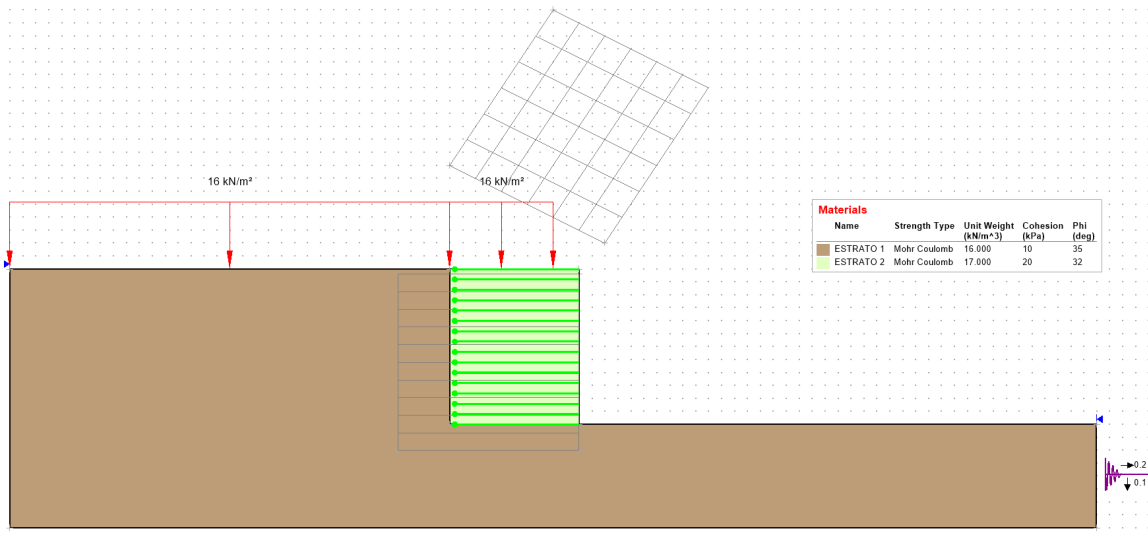
Parámetro	Asignación
Dirección de deslizamiento	Izquierda a derecha
Forma de superficie de deslizamiento	Circular
Método de búsqueda	Grilla y tangente

(Elaboración propia, 2020)

6. Sobrecarga asignada

Como se puede observar en el esquema, la sobrecarga de diseño asignada corresponde a 16 kN/m^2 , es decir una carga distribuida a lo largo del terraplén sostenido por el muro de contención.

Figura 31: Parámetro de sobrecarga distribuida asignada



(Elaboración propia, 2020)

7. Análisis sísmico

En Guatemala, el análisis de los efectos de sismo en obras de retención es muy importante debido a que se encuentra en una zona con una alta amenaza sísmica. El análisis pseudo estático es comúnmente utilizado para los análisis de estabilidad de taludes y de obras de retención. Con este método las fuerzas de inercia producidas por un sismo (siendo variables en función del tiempo) y las que actúan dentro de una masa o bloque rígido de suelo que es potencialmente inestable, se sustituyen por una fuerza pseudo estática equivalente que actúa en el centro de gravedad del bloque considerado (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2018).

Cabe resaltar que el nivel de protección sísmica (NPS) y el sismo de diseño a utilizar en el diseño de las obras de contención o análisis de estabilidad en taludes, no deberá ser menor que el estipulado en la norma dependiendo del tipo de proyecto. Las componentes horizontal y vertical de esta fuerza pseudo-estática equivalente se calculan, según la norma:

$$F_{in\ h} = k_h W$$

$$F_{in\ v} = k_v W$$

donde:

→ W = Peso del bloque de suelo.

→ k_h = Coeficiente sísmico horizontal (adimensional).

→ k_v = Coeficiente sísmico vertical (adimensional).

Los coeficientes k_h y k_v se relacionan con las componentes horizontal y vertical de la aceleración pico del suelo en el sitio del proyecto, respectivamente. Los signos pueden ser positivos o negativos, debiéndose evaluar lo que sea menos favorable para la obra de contención.

El coeficiente k_h es una fracción del coeficiente de la aceleración del suelo, que está dada por la ecuación siguiente, es a su vez función del valor de la aceleración pico del suelo en el sitio en cuestión, se identifica como aceleración máxima del suelo (AMSd) en el capítulo 4 de la NSE 2-2017.

$$A_m = (1.45 - AMSd) AMSd$$

En general, es aceptable seleccionar el coeficiente sísmico horizontal k_h para el diseño sísmico de obras de retención y para taludes puede ser:

$$k_h = 0.5 A_m$$

$$k_h = 0.67 A_m$$

donde:

- La primera ecuación se aplica para suelos firmes y la segunda para suelos medio densos a medio compactos
- Para suelos suaves o potencialmente licuables se deberán hacer estudios más específicos

El coeficiente sísmico vertical k_v se calcula como:

$$k_v = 0.5 k_h$$

(Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2018)

Para las constantes sísmicas calculadas se asumió que la obra se encontraba en Jalapa, departamento de Guatemala. A continuación se presentan los datos utilizados para el cálculo de coeficiente sísmico horizontal y vertical según Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, 2018.

Cuadro 3: Parámetros iniciales para espectro sísmico

Departamento	JALAPA	Guatemala
Io	4.1	
Scr	1.36	g
S1r	0.87	g
Clasificación de obra	Ordinaria	Categoría II
Nivel de protección sísmica	D	
Probabilidad de excedencia	10%	en 50 años

(Elaboración propia, 2020)

Cuadro 4: Ajuste por clase de sitio

Clase de sitio	D
Fa	1
Fv	1.7
Scs	1.36 g
S1s	1.479 g

(Elaboración propia, 2020)

Cuadro 5: Ajuste por intensidades sísmicas especiales

Tipo de fuente	C
Na	1
Nv	1
Scs	1.36 g
S1s	1.479 g

(Elaboración propia, 2020)

Cuadro 6: Períodos de vibración de transición

Ts	1.088 s
To	0.218 s

(Elaboración propia, 2020)

Cuadro 7: Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño y análisis por sismo

Kd	0.66
Scd	0.8976 g
S1d	0.97614 g

Svd	0.17952
AMSd	0.35904
Am	0.39
kh	0.20
<b b="" kv<="">	0.10

(Elaboración propia, 2020)

Figura 32: Constantes sísmicas asignadas en SVSLOPE

Constantes pseudo-estáticas	
Coefficiente horizontal	0.2
Coefficiente vertical	0.1

(Elaboración propia, 2020)

Análisis y discusión de resultados

A. Comparación de metodologías utilizadas

Para completar un análisis de resultados integro es importante definir y/o resumir las diferencias existentes entre los métodos utilizados. En cuanto a consideraciones y parámetros que no se toman en cuenta para los cálculos de factor de seguridad es más sencillo y fácil de comprender un cuadro como el que se presenta a continuación.

Cuadro 8: Comparación de factores en diferentes análisis

Método	Superficies de falla consideradas	Equilibrio de	Características del método
Ordinario o de Fellenius	Circulares	Momentos	No toma en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado	Circulares	Momentos	Asume que las fuerzas cortantes entre las dovelas son iguales a cero.
Janbú simplificado	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza cortante entre cada dovela considerada.
Spencer	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas son las mismas para cada tajada, estas son desconocidas.
Morgenstern y Price	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas se asumen como variables de acuerdo con una función arbitraria.

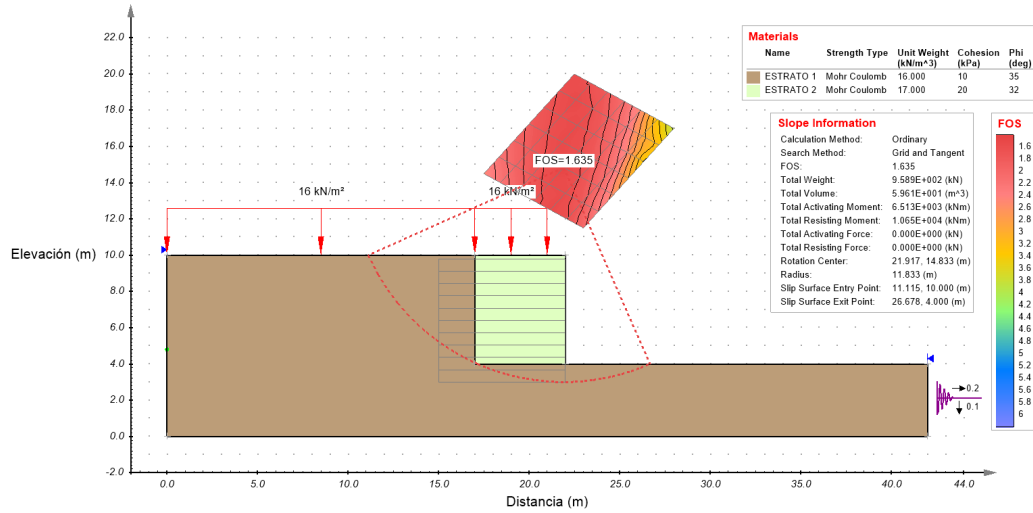
(Duncan *et al.*, 2005)

B. Resultados obtenidos

1. Muro de retención de altura 6 metros

Método ordinario o de Fellenius

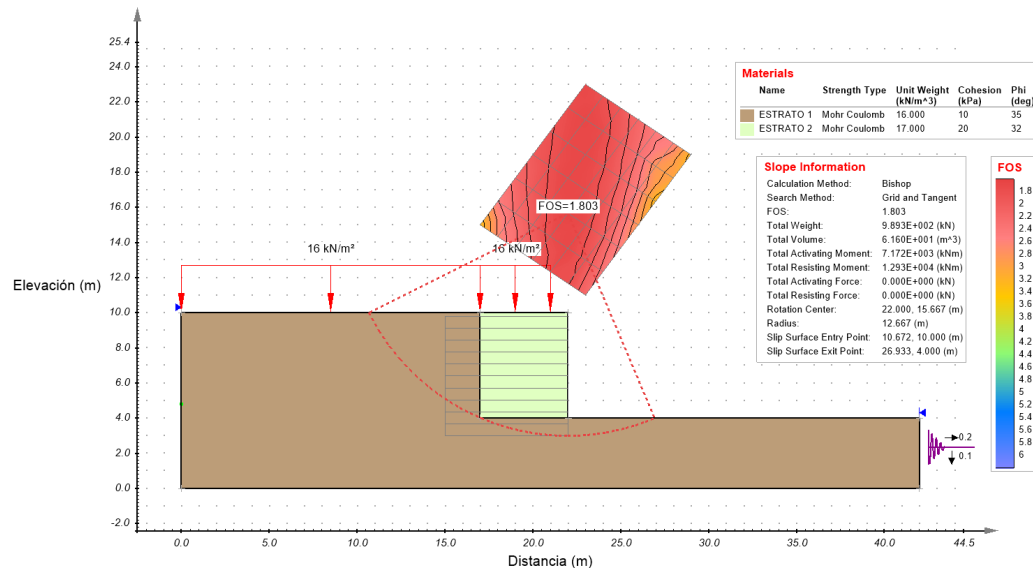
Figura 33: Factor de seguridad obtenido para método ordinario



(Elaboración propia, 2020)

Método de Bishop simplificado

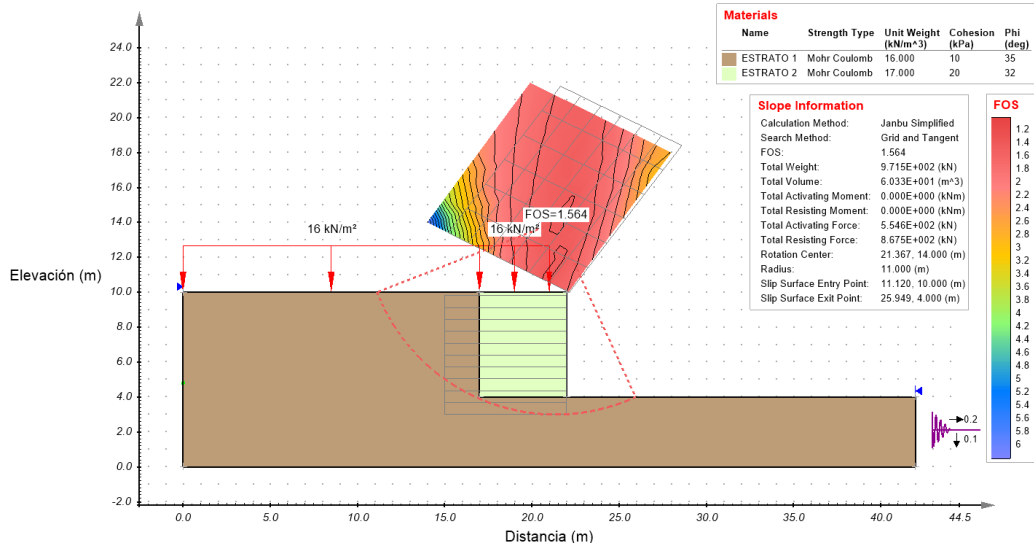
Figura 34: Factor de seguridad obtenido para método de Bishop simplificado



(Elaboración propia, 2020)

Método de Janbú simplificado

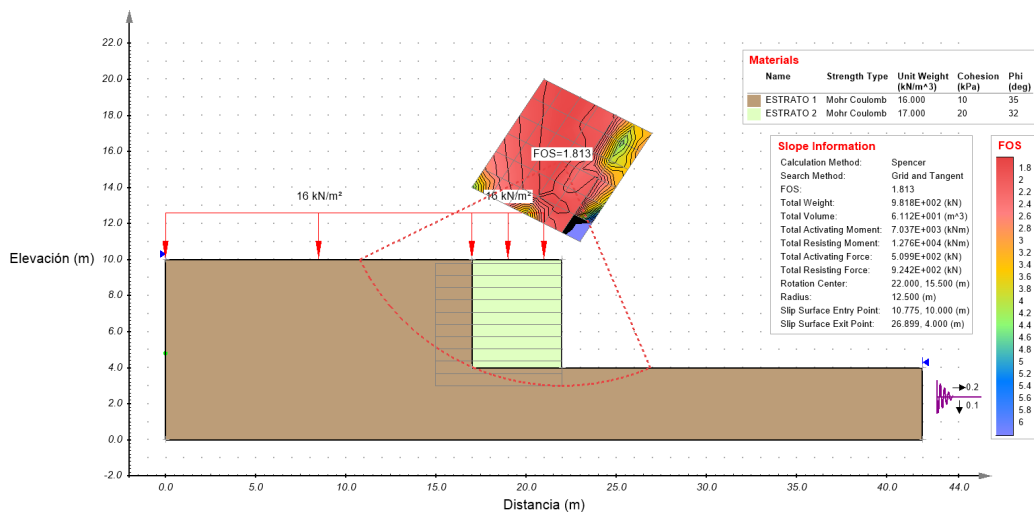
Figura 35: Factor de seguridad obtenido para método de Janbú simplificado



(Elaboración propia, 2020)

Método de Spencer

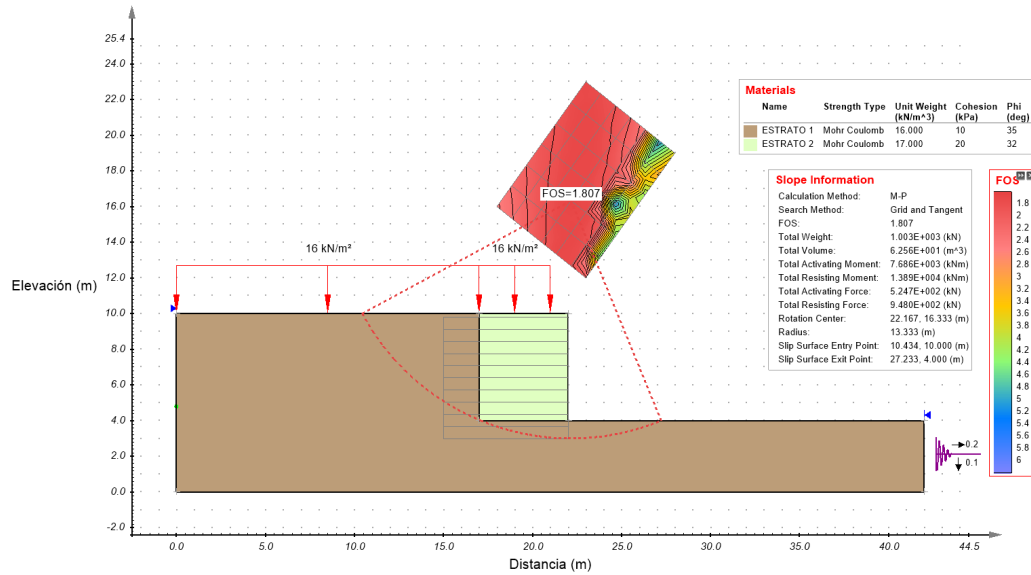
Figura 36: Factor de seguridad obtenido para método de Spencer



(Elaboración propia, 2020)

Método de Morgenstern-Price

Figura 37: Factor de seguridad obtenido para método de Morgenstern-Price

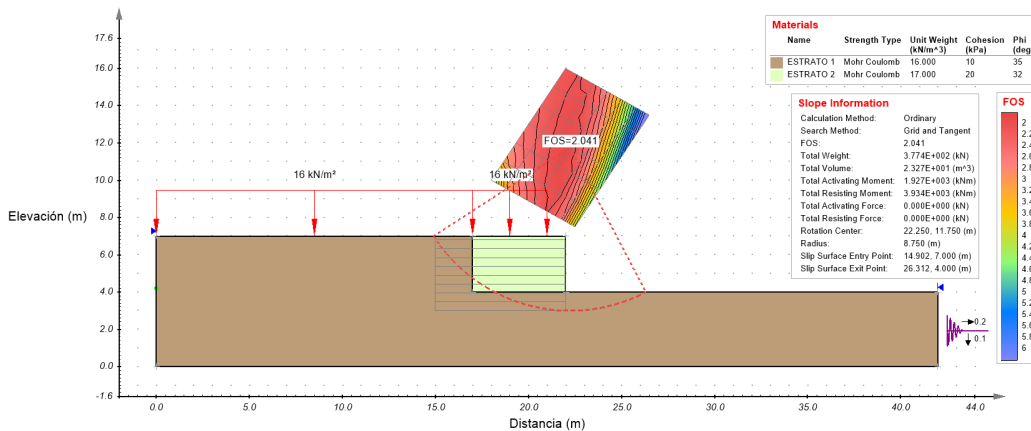


(Elaboración propia, 2020)

2. Muro de retención de altura 3 metros

Método ordinario o de Fellenius

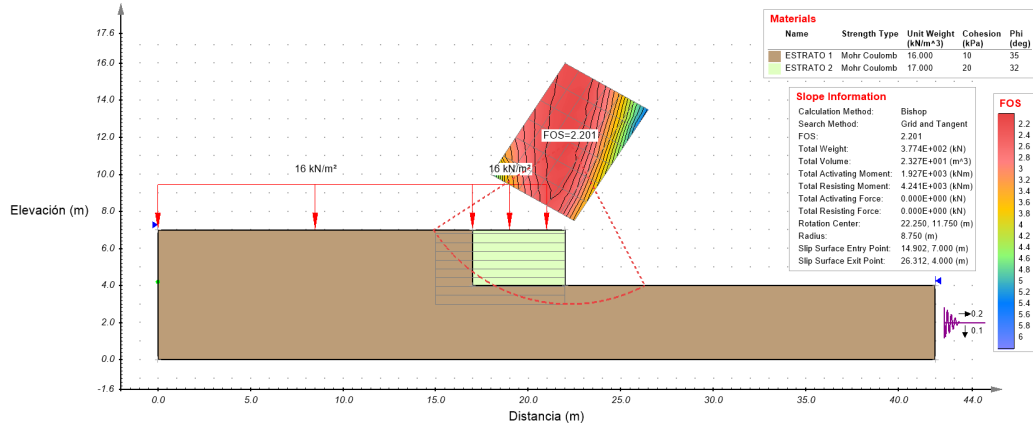
Figura 38: Factor de seguridad obtenido para método ordinario



(Elaboración propia, 2020)

Método de Bishop simplificado

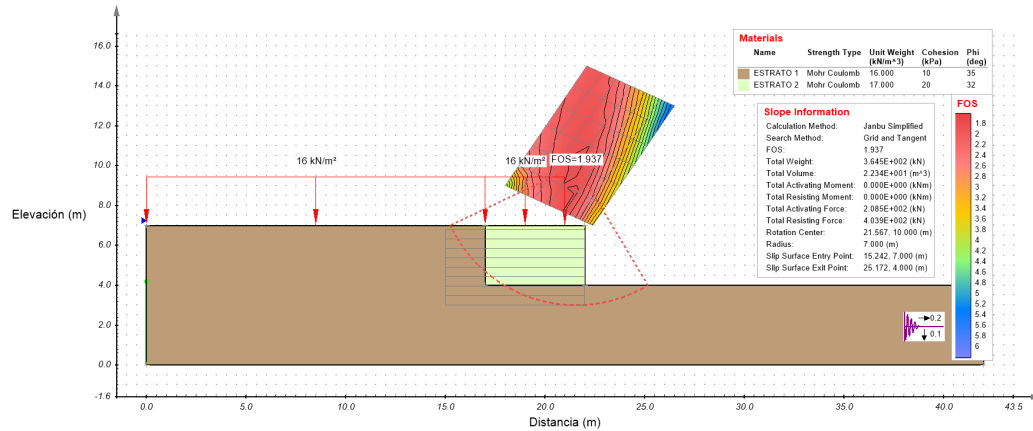
Figura 39: Factor de seguridad obtenido para método de Bishop simplificado



(Elaboración propia, 2020)

Método de Janbú simplificado

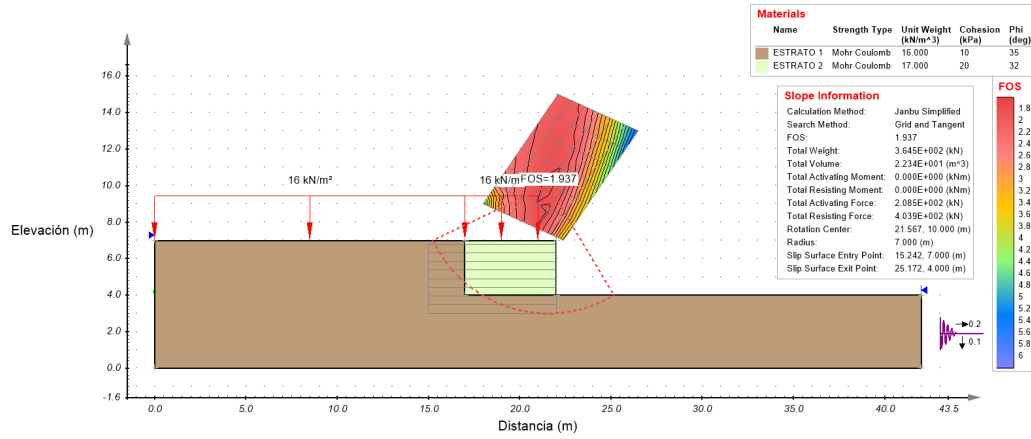
Figura 40: Factor de seguridad obtenido para método de Janbú simplificado



(Elaboración propia, 2020)

Método de Spencer

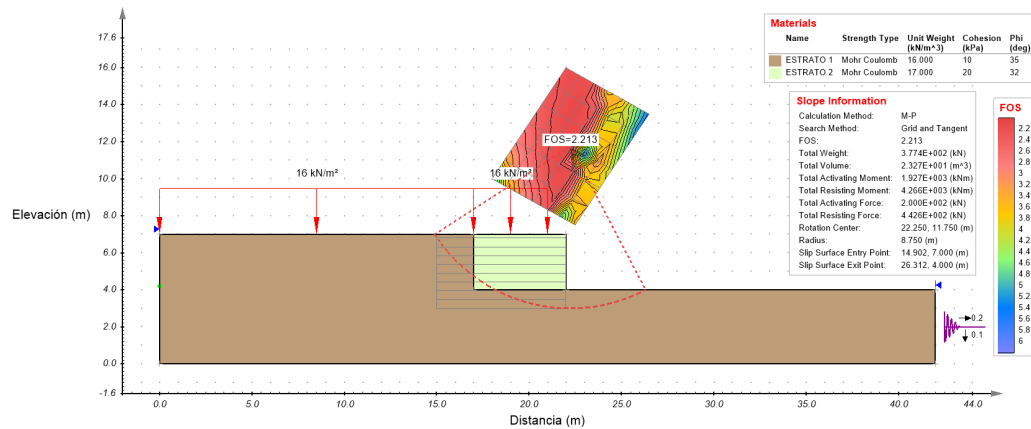
Figura 41: Factor de seguridad obtenido para método de Spencer



(Elaboración propia, 2020)

Método de Morgenstern-Price

Figura 42: Factor de seguridad obtenido para método de Morgenstern-Price



(Elaboración propia, 2020)

3. Resumen de resultados para diferentes alturas

Cuadro 9: Comparación de factores en diferentes análisis

Método	Factor de seguridad obtenido según altura de muro de contención segmentado	
	H= 3 m	H= 6 m
Ordinario o Fellenius	2.041	1.635
Bishop simplificado	2.201	1.803
Janbú simplificado	1.937	1.564
Spencer	2.214	1.813
Morgenstern-Price	2.213	1.807

(Elaboración propia, 2020)

C. Discusión de métodos comparados para equilibrio límite

Los análisis de estabilidad son estudios con gran importancia en cuanto a taludes, dependen de variables evaluadas de acuerdo con el método que se especifique utilizar. Existen varios métodos los cuales evalúan estabilidad, específicamente para equilibrio límite. Las consideraciones según cada autor de los métodos varían e incluso pueden llegar a tomar en cuenta los mismos parámetros, pero con variantes como dirección de fuerzas, equilibrio de momentos y fuerzas, entre otros. Para este estudio se realizó la comparación de cinco métodos. Un factor cambiante en la mayoría de los métodos es la consideración de las fuerzas laterales como fuerzas exteriores (en este caso el refuerzo brindado por las geomallas). Los parámetros variables para los modelos utilizados fueron diferentes alturas de caras expuestas para los muros, así como la longitud de la geomalla, la cual depende del factor de altura anteriormente mencionado.

En cuanto al método ordinario o de Fellenius, las fuerzas entre dovelas no son consideradas y únicamente cuenta con equilibrio de momentos. Brinda un método sencillo, por lo que es resaltado como menos significativo. Debido a no tomar en cuenta el equilibrio estático, las fuerzas actuantes consideradas corresponden a las del peso correspondiente al pedazo de suelo de cada dovela, las fuerzas laterales tomadas en cuenta son las aportadas por las geomallas. Se considera que dicho método es el menos adecuado para el análisis realizado por no ser riguroso y además únicamente considera superficies de falla circulares.

Bishop dejando por un lado las fuerzas por corte, únicamente toma las fuerzas normales actuantes en cada dovela, las fuerzas entre dovelas son consideradas horizontales, por lo que este FS puede llegar a ser significativo, tomando las fuerzas laterales aportadas por las geomallas. Cabe mencionar que dicho método también considera únicamente superficies de falla circulares, por lo que, si se presenta una falla en cualquier otra forma, los resultados pueden presentar variantes y ser menos representativos para situaciones reales. Deja por un lado el equilibrio de fuerzas, tomando solamente el equilibrio de momentos.

Sin cumplir todas las ecuaciones del equilibrio estático, sino solo el equilibrio de fuerzas

específicamente horizontales, el método de Janbú simplificado, incluye en su análisis cualquier forma de superficie de falla posible a obtener. A través de factores de corrección supone llegar a tener resultados cercanos a los datos reales, entonces resulta ser un método complicado de aplicar. Con este método de obtuvo el factor de seguridad más bajo, no considera el cortante entre dovelas, lo que lo hace ser un método menos representativo.

Los métodos de Morgenstern-Price y Spencer consideran el equilibrio de momentos y fuerzas dentro de sus ecuaciones para la obtención del factor de seguridad. Estos métodos mencionados anteriormente, funcionan casi de la misma manera, considerando una superficie de falla en cualquier forma, no solo circular. Para el método de Morgenstern-Price se analizan dos factores de seguridad, correspondientes a equilibrio de momentos y el otro a equilibrio de fuerzas. Para esta metodología las fuerzas laterales siguen una función lineal predeterminada considerando fuerzas horizontales y verticales.

Spencer considera fuerzas normales, cortantes y equilibrio de momentos, siendo una metodología muy completa. Considera la dirección de las fuerzas laterales como igual para cada dovela o que varía de forma constante entre cada una. Tomar en cuenta los aportes laterales de las geomallas resultó en que los factores de seguridad para Morgenstern-Price y Spencer fueran más altos. Spencer se considera un método adecuado para evaluación de taludes reforzados debido a que la inclinación de las fuerzas laterales es calculada en todas las condiciones de equilibrio, también puede ser utilizada para superficies de falla de cualquier forma, no solo circular.

Los métodos más adecuados para un análisis del equilibrio límite integral de un muro de contención segmentado son Morgenstern-Price y Spencer ya que estos métodos satisfacen todas las condiciones de equilibrio, tomando en cuenta la dirección de las fuerzas laterales actuantes, resultando ser más específicos. Pueden llegar a brindar factores de seguridad significativos para superficies de falla de cualquier forma, no solo circulares. Bishop es recomendado para análisis de estabilidad a través del equilibrio límite de fallas circulares.

Por otra parte, se concluye que el método menos adecuado para el análisis realizado fue el de Fellenius por no ser riguroso en sus consideraciones. Directamente considera superficies de falla circulares. El método de Janbú simplificado tomando en cuenta cualquier forma de superficie de falla, es un método complicado de aplicar debido a su inclusión de factores de corrección, siendo menos representativo.

- Los métodos óptimos para el análisis de estabilización de taludes a través del equilibrio límite son Morgenstern-Price y Spencer ya que consideran equilibrio de fuerzas y momentos para cualquier tipo de superficie de falla, toman en cuenta fuerzas laterales aportadas por el refuerzo aplicado. Esto es aplicable para muros de retención segmentados en ambas alturas estudiadas.
- Los factores de seguridad del equilibrio límite con ambas alturas de muro 6 metros y 3 metros fueron mayores para métodos de Spencer y Morgenstern Price, es decir que se mantiene la misma relación para ambas alturas evaluadas en este estudio.
- Al obtener un factor de seguridad alto con métodos que incluyen la mayor cantidad de variables en su cálculo da un resultado más adecuado según los requerimientos del talud o muro de contención en cuestión. Por el lado contrario se demostró que con el método de Janbú simplificado puede no obtenerse un factor de seguridad significativo ya que no considera todas las condiciones del equilibrio estático.
- SVSLOPE es un software adecuado para el modelado y análisis de muros de contención segmentados debido a que permite al usuario asignar todos los parámetros desde propiedades de suelo, geometrías hasta las propiedades del refuerzo a utilizar. Para realizar cálculos del equilibrio límite en muros de retención es indispensable contar con un software completo para así poder obtener resultados significativos.
- Los métodos de Janbú simplificado, Morgenstern-Price y Spencer integran la inclusión de fuerzas y momentos en equilibrio para cualquier tipo de falla así como las fuerzas laterales aportadas por el refuerzo de geomallas. Bishop toma en cuenta las fuerzas laterales por geomallas pero deja por un lado las fuerzas cortantes entre dovelas y Fellenius no considera el equilibrio de fuerzas, brindando factores de seguridad menores comparado con los demás métodos.

- A las universidades se recomienda impartir cursos enfocados al área de suelos con diferentes metodologías de análisis por ejemplo, a través de elementos finitos para comparar los resultados obtenidos de un software especializado.
- Para entes reguladores, se recomienda ser más específicos para indicar parámetros de obras de contención pues es bastante general apoyándose en especificaciones AASHTO. También debería incluirse una sección que recomiende la utilización de cierto método de análisis del equilibrio límite según las condiciones y sollicitaciones del proyecto.
- Para el diseñador de muros de contención segmentados, es recomendable incrementar la longitud de la geomalla considerada según la altura del muro de contención (80 % de la altura, para el modelo de este estudio) determinando así la relación entre longitud efectiva y el factor de seguridad a través de diferentes métodos del equilibrio límite.
- Para futuros investigadores universitarios se recomienda incurrir en variaciones como distintos tipos de muros de contención, estratos de suelos cambiantes, diferentes parámetros de suelos según la ubicación de proyectos, diferentes materiales de refuerzo en taludes y muros de contención para comparar resultados obtenidos de factores de seguridad con equilibrio límite.
- En cuanto a estudiantes que quieran profundizar acerca de los muros de contención, se recomienda investigar la pertinencia de los factores sísmicos en factores locales y globales de para el diseño de muros de contención segmentados.

- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, A. (2018). *NSE 5.3 Obras de retención*. Guatemala, Guatemala, AGIES, Dirección de Comités Técnicos.
- Aubeny, C. P., Biscontin, G., Huang, J., Dantal, V. S., Sadat, R. & Bin, S. (2013). DESIGN PARAMETERS AND METHODOLOGY FOR MECHANICALLY STABILIZED EARTH (MSE) WALLS 5. 7(2), 356. <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-6716-1.pdf>
- BAUNOVO. (2019). *Brochure Baunovo Web*. <http://www.baunovo.com/wp-content/uploads/2019/09/brochure-baunovo-web.pdf> (accessed: 01.09.2020)
- Bentley. (2020). *SVSLOPE Análisis de estabilidad de pendientes LEM en 2D o 3D*. <https://www.bentley.com/es/products/product-line/geotechnical-engineering-software/svslope> (accessed: 01.09.2020)
- Cruden, D., Novograd, S., Pilot, G., Krauter, E., Bhandari, R., Cotecchia, V., Nakamura, H., Okagbue, C., Zhuoyuan, Z., Hutchinson, J. *et al.* (1990). Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41(1), 13-16.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Espada Loli, R. (2017). *Estudio comparativo de costos entre muros de contención por el método convencional y por el método de suelo reforzado con geomallas*. Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo".
- GEOACE. (2019). ¿Qué es una geomalla y cuáles son sus usos? (1). <https://www.geoaceperu.com/blog/que-es-una-geomalla-usos/>
- Leoncio Avalos, M. E. (2015). *Estudio comparativo de costos entre muros de contención por gravedad, en voladizo y suelo reforzado*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- M. Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.
- Morataya Pérez, L. J. (2011). *Sistema de tierra armada con geomalla (Procedimiento de diseño y evaluación de estructuras existentes)*. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Pérez de Agreda, E. (2005). *Estabilidad de Taludes*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Suarez, J. (2009a). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico, Tomo I*. Publicaciones UIS.
- Suarez, J. (2009b). *Deslizamientos, técnicas de remediación, tomo II*. Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Publicaciones UIS.
- White, P., Dean M. (2010). *Engineering design manual for Stoneterra wall system*. Stone-Terra tm.

Figura 43: Ficha técnica de geomalla brindada por BAUNOVO, 2019

FICHA TÉCNICA

BAUGRID

GEOMALLA TEJIDA DE POLIÉSTER

PROPIEDADES FÍSICAS	MÉTODO DE PRUEBA	BAUGRID 80/30 kN/m	BAUGRID 100/30 kN/m	BAUGRID 150/30 kN/m
Masa por unidad de área	ASTM D-5261	> 230 g/m ²	> 280 g/m ²	> 420 g/m ²
Tamaño de apertura	Medido	25 x 25 mm	25 x 25 mm	25 x 25 mm
Porcentaje de área abierta	CWO 22125	65%	65%	60%
Máxima resistencia a la tensión (MD)	ASTM D-6637	80 kN/m	100 kN/m	150 kN/m
Elongación a la máxima tensión (MD)	ASTM D-6637	≤ 12%	≤ 12%	≤ 12%
Resistencia a largo plazo (MD)	GRI GG4 (b)	43 kN/m	54 kN/m	81 kN/m
Dimensiones del rollo		2 m x 100 m	2 m x 100 m	2 m x 100 m
Peso del rollo		55 kg	60 kg	90 kg



BAUGRID

BAUGRID es una geomalla uniaxial, compuesta por hilos de poliéster tejidos y luego recubiertos de PVC o SBR para protegerlos de los daños de instalación y de exposición a los rayos ultravioleta.

La geomalla **BAUGRID** posee una alta resistencia y baja deformación a la fuerza de tensión a largo plazo. Es fácil de instalar.

Usos: **BAUGRID** es utilizado como elemento de tensión, promueve las funciones de refuerzo a la tensión en muros de contención de tierra mecánicamente estabilizada, principalmente en estabilización de suelos y refuerzo de pendientes. Utilizado para sistemas de Murotech y Murotech Green.

+ (502) 2385-2578
✉ info@baunovo.com
🌐 www.baunovo.com



Accidentes topográficos: es una unidad geomorfológica (una rama de la geografía que estudia la superficie terrestre). Los accidentes geográficos se clasifican por características tales como elevación, pendiente, orientación, estratificación, exposición de roca y tipo de suelo. 8

Cohesión: es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas, del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas. 11

Convexidad: de una curva o una superficie, es la zona que se asemeja al exterior de una circunferencia o una superficie esférica, es decir, que tiene su parte sobresaliente dirigida al observador. 8

Cortante: es una fuerza externa que es aplicada en forma vertical a la sección que se este tratando, puede ser una viga, columna, o cualquier elemento estructural, el esfuerzo aplicado intenta cortar el elemento en la zona donde se esta aplicando. 11

Curvatura: es la desviación continua de la línea curva respecto de una línea recta. 8

Erosión: desgaste y modelación de la corteza terrestre causados por la acción del viento, la lluvia, los procesos fluviales, marítimos y glaciales, y por la acción de los seres vivos. 9

Factor de seguridad: es el cociente resultante entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se verá sometido. 12–15, 18, 23, 47

Geosintéticos: un grupo de materiales fabricados a partir de la transformación industrial de ciertas sustancias químicas llamadas polímeros, que desde su forma elemental, de polvos o gránulos son transformados en fibras, láminas, perfiles, películas, tejidos o mallas. 10–12, 32

Mampostería: es un sistema de construcción tradicional. Consiste en superponer rocas, ladrillos o bloques de concreto prefabricados, para la edificación de muros o paramentos.. 11

Nivel freático: se llama así a la profundidad del terreno en la que existe presencia de agua o más técnicamente expresado, el lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. 8, 15, 16

Obra constructiva: cualquier obra, pública o privada, en la que se efectúen trabajos de construcción o ingeniería civil, siempre que las mismas estén referidas a trabajos intrínsecamente asociados a actividades de construcción (edificación e ingeniería civil) y se ejecuten con tecnologías propias de este tipo de industrias. 8

Pendiente: es un declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente. 8

Superficie de falla: se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan esfuerzos cortantes que sobrepasan la resistencia al corte del material. 12

Terraplen: es la tierra que se emplea para construir un camino o una estructura defensiva, o que se utiliza con el objetivo de rellenar algún espacio. 7