

Selección de metodología de equilibrio límite adecuada para diseñar muros reforzados con geomalla

Montserrat Sarmiento García

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle de Guatemala

Resumen

El presente trabajo identificó cuál es la metodología más eficiente de equilibrio límite para diseñar muros reforzados con geomallas. El objetivo era conocer y evaluar cada una de las metodologías propuestas de equilibrio límite planteadas por diferentes autores, para determinar las ventajas y desventajas de cada una, así como los factores que afectan su estabilidad. De esta forma, se determinó cuál es la óptima para el diseño de este tipo de muro de contención.

Este tema fue influenciado por el tipo de muro de contención reforzado con Geomalla. A lo largo de los años, se han presentado muchas catástrofes de deslizamiento de taludes que pudieron haber sido evitadas con un muro de contención. El muro con geomalla es una metodología eficiente que cumple con la función de retener el suelo y además cuenta con un comportamiento mecánico de componentes que otros muros no tienen. Es por eso que definir la metodología de equilibrio límite adecuada para este sistema era muy importante.

En la fase de experimentación, se utilizó el programa de GeoStudio para simular escenarios de taludes, con la geomalla, a fin de encontrar su factor de seguridad estático con las diferentes metodologías. En cada una de ellas se presentó un nuevo factor de seguridad que se explicó con los componentes y parámetros mencionados. Una vez obtenidos los diferentes resultados para cada caso, se definió cuál de ellos es el más efectivo para el diseño de este tipo de muro de contención.

Palabras clave: Equilibrio límite, factor de seguridad, estabilidad, plano de falla, muro de contención, metodologías, geomalla.

Abstract

This paper identified the most efficient limit equilibrium methodology for the design of geogrid-reinforced walls. The objective was to know and evaluate each of the proposed limit equilibrium methodologies proposed by different authors, in order to determine the advantages and disadvantages of each one, as well as the factors that affect their stability. In this way, it was determined which one is the optimum for the design of this type of retaining wall.

This topic was influenced by the type of Geogrid reinforced retaining wall. Over the years, there have been many landslide disasters that could have been avoided with a retaining wall. The geogrid wall is an efficient methodology that fulfills the function of retaining the soil and also has a mechanical behavior of components that other walls do not have. That is why defining the appropriate limit equilibrium methodology for this system was very important.

In the experimental phase, the GeoStudio program was used to simulate slope scenarios with the geogrid in order to find its static safety factor with the different methodologies. In each of them, a new factor of safety was presented and explained with the mentioned components and parameters. Once the different results were obtained for each case, it was defined which of them is the most effective for the design of this type of retaining wall.

Key Words: Limit equilibrium, factor of safety, stability, failure plane, retaining wall, methodologies, geogrid.

Introducción

Guatemala es conocido mundialmente por su diversidad geológica con respecto a su relieve y su suelo. La mayor cantidad de estos suelos se pueden dividir en sedimentarios y volcánicos. Este material volcánico es producto de la fisura existente de las placas tectónicas, Cocos, Caribe y Norteamérica. Los suelos guatemaltecos han tenido años de deformación, presiones, esfuerzos, y propiedades que han mantenido o perdido a lo largo del tiempo. Es por esto que es necesario conocer el comportamiento de estos cuando se trata de construcción.

Una obra de ingeniería civil comienza con el suelo. Es importante conocer algunos parámetros del suelo para realizar diferentes tipos de obras como carreteras, estructurales, etc. Y entender la situación o vulnerabilidad del suelo y relieve del terreno, para conocer con que se está trabajando y buscar las soluciones adecuadas a la hora de diseñar. Es importante descifrar con qué se trabaja. Si hay un talud de suelo es esencial obtener parámetros como la cohesión, ángulo de fricción y factores de seguridad para saber cuál es su estabilidad.

Los muros de contención han sido estructuras utilizadas a lo largo de los años para retener el suelo cuando se necesita. A lo largo de los años se han creado diferentes sistemas de muros de contención que proponen esa estabilidad que se necesita en una obra. Entre estos, se encuentran los muros

reforzados con geomalla. Una metodología en la cual consta de una conexión entre el la geomalla y el bloque de concreto para crear un suelo mecánicamente estabilizado y crear esa capacidad de carga uniformemente en un suelo.

Este sistema se observa aplicado en diferentes mercados como el comercial, industrial, de transporte y hasta en jardinería. Su forma y textura hace que este sea agradable a la vista sin olvidarse de su función estructural. En Guatemala, esta metodología se utiliza frecuentemente para retener el suelo. Para diseñarlo es esencial conocer tanto los parámetros del suelo

Existen diferentes autores que han propuesto sus propias metodologías de equilibrio límite para encontrar el factor de seguridad. Cada una de estas metodologías tiene el mismo propósito de encontrar el factor de seguridad que define si un talud es estable o no. Esto es muy importante especialmente a la hora de diseñar muros de contención reforzados con geomalla, ya que Guatemala está ubicado en una zona altamente sísmica, y este es el parámetro más importante para predecir esa falla.

De acuerdo con Michael Duncan, Stephen Wright y Thomas Brandon en su libro de Resistencias del suelo y Estabilidad de Taludes “El factor de seguridad es definido respecto a la fuerza cortante y es aplicado tanto a la cohesión como al ángulo de fricción. Se deben de obtener una variedad de factores de

seguridad para determinar el caso más crítico en talud y el valor correspondiente al mismo”.

El presente trabajo consistió en encontrar esa metodología adecuada para diseñar muros reforzados con geomalla. Este trabajo es aplicable para todas aquellas obras en las cuales es importante el apoyo de este sistema de muro de contención donde se necesite un relleno y estabilidad. Esto para tener la certeza de que la metodología escogida es específicamente la más eficiente y con mejores resultados para su diseño y llegar así a alcanzar una ejecución de un muro estable.

Metodología

En esta sección, se aplicaron los conceptos aprendidos a los procedimientos para la recolección, clasificación y validación de datos provenientes de casos comunes para un muro armado. Para ello, se tomó como foco el modelado de este tipo de muro, simplificando casos comunes de la realidad. En cada uno de los escenarios, cambiaron los factores para cada metodología y permanecieron los parámetros de la geomalla y el suelo compactado en el muro y natural.

El software GeoStudio fue la herramienta para correr cada una de las simulaciones, permitiendo crear escenarios gracias a su gran gama de variables y obtener una base de datos con resultados.

A. Modelado de muro de contención segmentado y reforzado con geomalla

Para alcanzar los objetivos de este trabajo, se tomaron los casos comunes de un muro armado con refuerzo de geomalla para su modelado antes de someterse al análisis de estabilidad. Se diseñaron tres diferentes muros con alturas de cuatro, cinco y seis metros. Además, cada muro con diferentes casos de separación entre las geomallas a 0.40, 0.60 y 0.80 metros. Y finalmente, casos con y sin

sobrecarga. Dando así un total así de 72 simulaciones para la base de datos. La cantidad de geomallas varió según la altura y la separación entre estos a utilizarse. La tabla#1 muestra los valores correspondientes a cada caso.

Con estos datos se empezó a modelar el muro y aplicar el refuerzo de la geomalla en cada simulación. Con la herramienta de dibujar polígono, se creó la geometría del muro con su debida altura, dividiendo las regiones para el suelo granular, arena para las simulaciones, y el suelo natural para el segundo polígono, asumido como limo. Los parámetros de estos suelos serán descritos en el siguiente apartado. Es importante mencionar que se dejó un tamaño amplio debajo del suelo granular para permitir que programa que buscara entre una gama amplia de planos de falla y asegurar, de esta manera, la selección del más crítico.

Una vez desarrollada la geometría del muro. Se prosiguió con la función de crear un nuevo análisis de estabilidad de taludes, seleccionando la opción de equilibrio límite para ello. En esta nueva pestaña, se dibujaron los refuerzos de la malla. Para ello se definieron las propiedades de la geomalla y se insertaron los datos para la ubicación de cada una en su respectivo caso. Los parámetros seleccionados para el geosintético serán descritos en el siguiente apartado. El largo de las mallas es equivalente a la altura del muro.

B. Modelado de componentes de muro segmentado

Cuando el modelo estaba listo, se le asignaron los parámetros tanto para el suelo como para la malla. En esta ocasión se tomaron parámetros generales o comunes para el suelo. Se seleccionó un suelo granular para el muro y un limo para el natural. Para la geomalla se tomó una geomalla uniaxial

genérica del mercado para utilizar valores promedio de capacidad de tracción y resistencia de arrancamiento. Estos serán descritos en la tabla#2 y tabla#3.

La asignación de los parámetros a los conjuntos de refuerzo solo se realizó una vez ya que en las próximas simulaciones solo se seleccionaba la combinación creada y se asignaba al conjunto para cada una. Siendo así la única variable de las geomallas la separación entre ellas, la cantidad y la altura del muro como tal. De igual forma que las geomallas, los parámetros del suelo solo se definieron una vez en todo el proceso de simulaciones. En cada caso se asignó el suelo, con sus propiedades ya listas, a cada región, el suelo dentro del muro y el natural.

C. Factor Externo: Sobrecarga

Entre los casos comunes para este tipo de muro, se agregó el factor de sobrecarga. La razón principal era asegurar la estabilidad cuando se tiene previsto construir alguna estructura sobre el muro o determinarla cuando el muro ya esté construido. Este factor fue uno de los parámetros retadores que reduce los factores de seguridad por peso agregado. Para las simulaciones se utilizó un valor de 20kPa para la sobrecarga, utilizado en la mitad de las simulaciones para observar el comportamiento de cada metodología con y sin ella.

D. Modelado de Superficie de deslizamiento

Antes de empezar a correr las simulaciones y conocer el factor de seguridad de cada caso, era importante definir la superficie de deslizamiento que se deseaba para que el programa tomará el plano de falla más crítico dentro del rango que se le da. Para ello, se utilizó la grilla y el radio. Este valor varió en cada caso por lo que se creó en cada simulación, buscando que, al correrlo los casos

críticos de color rojo, quedaran al centro de la grilla, y que el plano de falla pasará por las geomallas.

E. Análisis de estabilidad

Una vez modelado los casos con los refuerzos debidos, factores externos, parámetros del suelo y geomalla, y superficie de deslizamiento, el programa brindaba el análisis de estabilidad para cada metodología aplicada. El propósito era probar en cada una de las metodologías los diferentes casos de factores externos y propiedades del suelo para obtener una data de resultados en cada una. Una vez tabulados, se analizó cada uno de los resultados, los factores que influyeron para cada caso y compararlos entre sí. Al final de esta comparación, se logró definir y explicar cuál de ellas era la más adecuada para utilizar al momento de diseñar muros reforzados con geomalla. Para definir cada metodología se ingresó a la pestaña “definir proyecto” y se seleccionó en tipo de análisis la metodología a evaluar en esa simulación. Una vez definida se pudo correr la simulación. Después de que el programa evaluó todos los planos de falla para ese escenario, este tomo el más crítico y proporcionó un factor de seguridad.

Resultados y Discusión

A partir de la base de datos obtenida de las simulaciones, se identificó y analizó tendencias sobre las metodologías para los diferentes escenarios y combinaciones de las variables altura del muro, espaciamiento entre geomallas y sobrecarga. Como primer punto, se observó que la metodología que brinda el factor de seguridad más alto en el 88.89% de los 18 casos diferentes, fue la de Morgenstern y Price. El orden de valores mayores a menores, con base en la cantidad de incógnitas y ecuaciones utilizadas, suposiciones, y principios de cada una es: Morgenstern y Price, Spencer, Janbu y Bishop. En las

primeras tres metodologías, se consideran tres incógnitas y tres ecuaciones de equilibrio límite necesarios para conseguir el factor de seguridad, mientras que en Bishop únicamente dos.

Como segundo punto, es importante mencionar que la razón de variación de datos entre metodologías fue a los diferentes enfoques y suposiciones que tiene cada una. En cuanto a los factores de seguridad más altos, con base en los principios de equilibrio límite y la resistencia de corte que posee el suelo, se observa que Morgenstern y Price supera a Spencer por un rango de 0.1% a 2%. Así, la cercanía en este rango se debe a que comparten este principio. Por otro lado, difieren en que en el caso del método de Spencer, las fuerzas cortantes entre las secciones divididas de la superficie de deslizamiento tienen la misma inclinación, mientras que en Morgenstern y Price, este aspecto está relacionado a la fuerza normal (N).

Otro factor de la variación entre las metodologías Spencer y Morgenstern y Price, fue la superficie de falla asumida para cada una. En la metodología de Morgenstern y Price se asume una superficie de circular, mientras que en Spencer se asume una no circular. Esto indicó que Spencer proporciona una representación más realista de las condiciones reales del terreno, y de este caso del muro. De esta forma, los resultados de Spencer se catalogaron más conservadores que la metodología Morgenstern y Price, que tiene factores de seguridad más altos.

Como tercer punto, se consideró el comportamiento de la tendencia de la metodología de Janbu. Este método alcanzó a tener el factor de seguridad más alto entre las 4 metodologías en un caso específico: un muro de altura de cuatro metros, con espaciamiento

de 0.40 metros y con una sobrecarga de 20kPa. Sin embargo, en la mayoría de los casos, Spencer y Morgenstern y Price brindaron valores más altos.

Esto no significa que los resultados del método sean erróneos para este tipo de muro de contención, sino que este rango se debe a las suposiciones tomadas en cuenta. Las tres metodologías establecen tres ecuaciones e incógnitas para encontrar el factor de seguridad. Sin embargo, Janbu utiliza círculos de deslizamiento, la variabilidad del suelo y un factor de corrección. Estas suposiciones la convirtieron así, en un método más conservador que los otros dos, por lo que resultó en valores más bajos.

Como cuarto punto, se tomo en cuenta el comportamiento de los factores de seguridad con respecto a la altura del muro. Entre más pequeño sea el muro, más altos serán los valores tanto con y sin sobrecarga. Esto debido a que la presión del suelo incrementa significativamente con la altura, por lo que a alturas más altas, más presión y menor factor de seguridad. Los valores más altos para el factor de seguridad se pueden observar en las gráficas #11 & 12.

Este comportamiento también se evidenció en el espaciamiento entre mallas. Mientras el muro tenga un menor espaciamiento entre mallas, más altos serán los valores tanto con y sin sobrecarga. Este comportamiento se observó en todas las metodologías desde la figura#7 hasta la figura#12, en las que se demuestra que hay una tendencia de reducción del factor de seguridad mientras incrementa el espaciamiento. Mientras más geomallas tenga el muro, brindará un mayor refuerzo y estabilidad. Esto no quiere decir que el muro deba saturarse de ellas, sino que debe de ser un parámetro a tomar en cuenta en el momento de diseño para

encontrar el factor de seguridad adecuado, sin sobredimensionarlo.

En resumen, la selección para la metodología más apropiada para el diseño de muros reforzados con geomallas dependió del escenario del proyecto. La base de datos y gráficas proporcionaron líneas de tendencias a partir de las que se pudo analizar el comportamiento de las metodologías para este tipo específico de muro de contención. Los parámetros de altura del muro, espaciamiento entre geomallas y sobrecarga deben tomarse en cuenta porque pueden ocasionar una reducción en el factor de seguridad.

Cada metodología tomo en cuenta diferentes suposiciones y principios. Morgenstern y Price dieron factores de seguridad altos, por lo que es un método adecuado cuando se busca una solución rápida y aproximada. Spencer es adecuado cuando se necesita un análisis de estabilidad más detallado y preciso al tomar en cuenta las condiciones del terreno. Janbu es útil cuando se necesita tomar en cuenta la variabilidad del suelo, haciéndolo en un análisis más avanzado. Finalmente, Bishop es útil para una gama amplia de condiciones del suelo y geometrías de superficie de falla al tomar en cuenta dos ecuaciones de equilibrio límite. La elección del método depende, entonces, de la complejidad del caso, condiciones del sitio, precisión requerida y recursos disponibles.

Conclusiones

1. Las metodologías de Morgenstern y Price, Janbu y Spencer proporcionaron resultados más altos para verificar la estabilidad de un muro reforzado con geomalla, pues consideran una incógnita extra en comparación de Bishop.
2. Independiente de la metodología a utilizar, para realizar un análisis

correcto del factor de seguridad, es necesario considerar la altura del muro, separación entre geomallas, factores externos y parámetros del suelo.

3. La metodología de Morgenstern y Price ha demostrado proporcionar el factor de seguridad más alto en la mayoría de los casos estudiados con un porcentaje de 88.89%.
4. La diferencia en los factores de seguridad entre las metodologías de Morgenstern y Price y Spencer era mínima, entre 0.1% y 2%, lo que indicó que ambas comparten principios similares pero se diferencian en la inclinación de las fuerzas cortantes entre las secciones de la superficie de deslizamiento.
5. La metodología de Janbu resultó en un método más conservador al proporcionar valores más bajos en comparación con los métodos de Morgenstern y Sprice y Spencer, al considerar la variabilidad del suelo y un factor de corrección.
6. Las metodologías equilibrio límite Morgenstern y Price, Spencer, Janbu y Bishop, son adecuadas y proporcionan valores aceptables para la estabilidad de muros reforzados con geomalla.

Agradecimientos

Estoy agradecida con Dios por darme la oportunidad de formarme como profesional en la Universidad del Valle de Guatemala y terminar esta etapa de mi vida. Le agradezco a mi familia y amigos por el apoyo y motivación que me han dado a lo largo de los años. A la Universidad del Valle de Guatemala, especialmente al departamento de ingeniería civil, por todo su apoyo y conocimientos que han marcado mi vida estudiantil y me han preparado para convertirme en profesional.

Tablas y figuras

Altura de muro (m)	Espaciamiento de geomalla (m)	Cantidad de geomallas
4.00	0.40	14
	0.60	12
	0.80	9
5.00	0.40	9
	0.60	8
	0.80	6
6.00	0.40	7
	0.60	6
	0.80	4

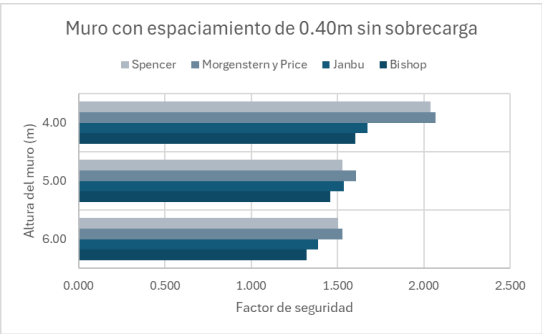
Tabla# 1 Espaciamiento entre geomallas a respectivas alturas

Tipo de Geomalla	Capacidad de Tracción (kN/m)	Resistencia al arrancamiento (kPa)
Uniaxial	175	1

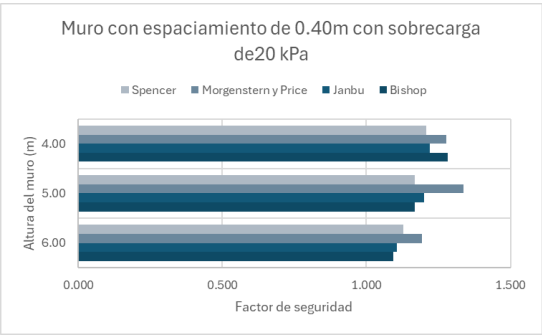
Tabla# 2 Parámetros de Geomalla

Material	Cohesión (kPa)	Peso unitario (kN/m³)	Ángulo de fricción (°)
Arena	10	15	32
Limo	10	15	26

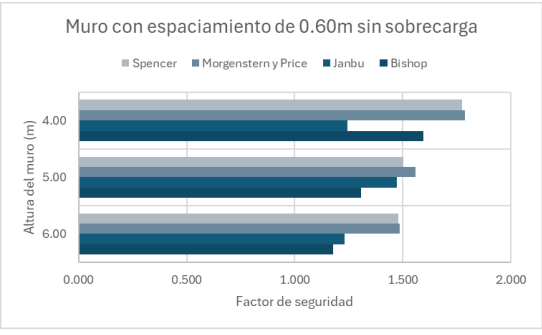
Tabla# 3 Parámetros del suelo



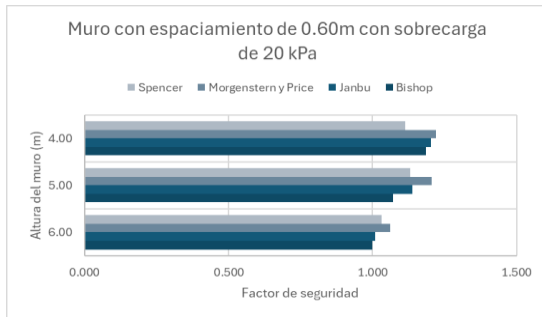
Figura# 1 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamento de 0.40 metros sin sobrecarga



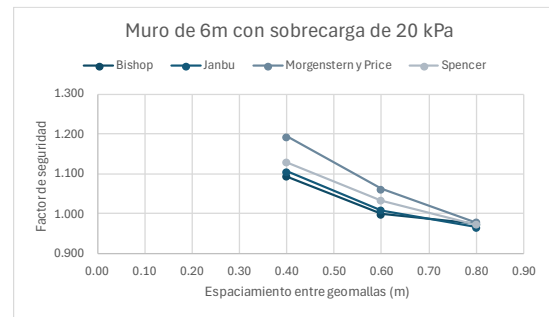
Figura# 2 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamento de 0.40 metros con sobrecarga de 20 kPa



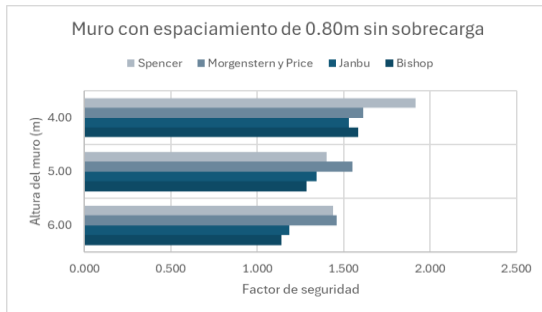
Figura# 3 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamento de 0.60 metros sin sobrecarga



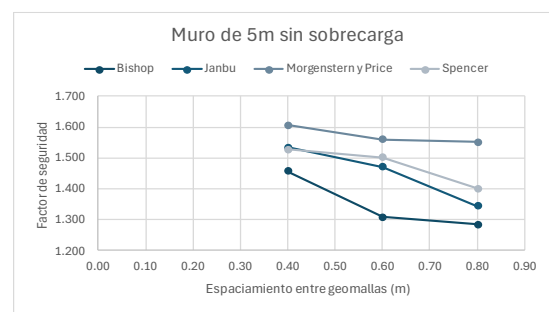
Figura# 4 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamiento de 0.60 metros con sobrecarga de 20 kPa



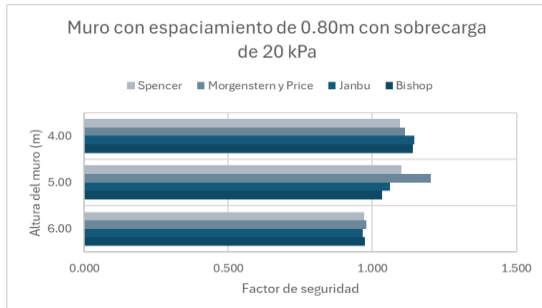
Figura# 8 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con seis metros de altura y sobrecarga de 20 kPa



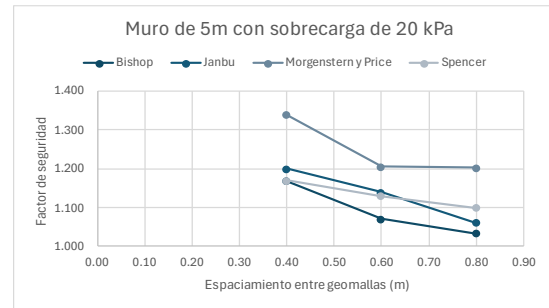
Figura# 5 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamiento de 0.80 metros sin sobrecarga



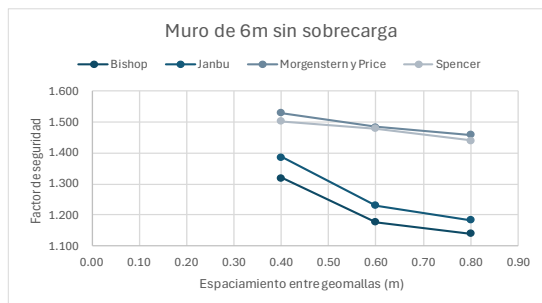
Figura# 9 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con cinco metros de altura y sin sobrecarga



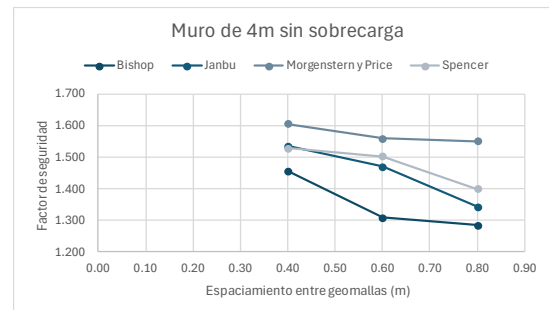
Figura# 6 Análisis de sensibilidad respecto a la altura para cada metodología en un muro con espaciamiento de 0.80 metros con sobrecarga de 20 kPa



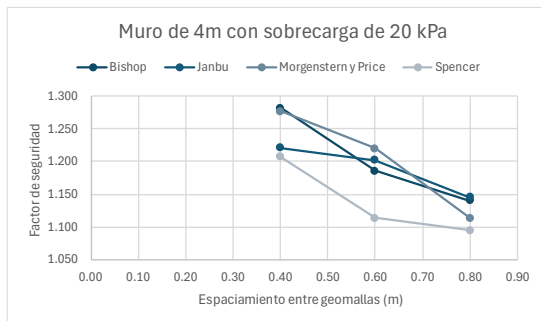
Figura# 10 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con cinco metros de altura y sobrecarga de 20 kPa



Figura# 7 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con seis metros de altura y sin sobrecarga



Figura# 11 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con cuatro metros de altura y sin sobrecarga



Figura# 12 Análisis de sensibilidad respecto a la separación entre geomallas para cada metodología en un muro con cuatro metros de altura y sobrecarga de 20 kPa



Figura# 13 Metodologías con factores de seguridad más alto en casos establecidos

Listado de referencias

Bardales Espinoza, W. A., Castañón, C., & Herrera Herrera, J. L. (2019). Clima de Guatemala, tendencias observadas e índices de cambio climático. En E. J. Castellanos, A. Paiz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, & A. Santizo (Eds.), Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. Guatemala: Editorial Universitaria UVG.

Braja M, D. (2011). Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición. Cengage Learning.

Cerna de la Cruz, A. E. (2020, December 14). ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL Análisis de la estabilidad de taludes reforzados con geosintéticos entre el tramo Curgos [Tesis].

de Ágreda, E. A. P. (2005). Estabilidad de Taludes. Upc.edu. Recuperado el 2 de mayo

de 2024, de <https://deca.upc.edu/es/el-departamento/secciones/itcg/docencia/asignaturas/geolquat/ejercicios/P2/analisis-estabilidad>

Díaz, A.(2021). Usos y aplicaciones de la geomalla. LDM. Extraído de: <https://blog.ldm.la/es/usuarios-y-aplicaciones-de-la-geomalla>

Duncan, J. M. (2014). Soil Strength and Slope Stability Second Edition. Wiley.

INACAP. (2020). Propiedades Índices de los Suelos. http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Construccion/G02_Propiedades_Indices.pdf

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 FACULTAD DE INGENIERÍA.

Tensar International Corporation (2012) Tensar Mesa. Sistemas de muros de retención. <http://aguayo.com.do/wp-content/uploads/catalogo-sistemas-muro-contencion-mesa.pdf>

Villagrán de León, J. C. (2008). Riesgo Sísmico en Guatemala. Instituto para el Medio Ambiente y Seguridad Humana Universidad de Naciones Unidas, Bonn, Alemania.