

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil



ANÁLISIS PARAMÉTRICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE UN MURO DE CONTENCIÓN DE GAVIONES TIPO LISO MEDIANTE EL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil

Juver Ivan Ayala Gomez

20192422

Dante Manuel Mendoza Ricanqui

20182906

Asesor

Marko Antonio López Bendezú

Lima – Perú

Septiembre 2024

**PARAMETRIC ANALYSIS FOR THE
OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF A
SMOOTH TYPE GABION RETAINING WALL
USING THE LIMIT EQUILIBRIUM METHOD**

ÍNDICE

Resumen.....	x
Abstract.....	xi
Capítulo 1: Generalidades.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos	5
1.5. Estado del arte	5
1.5.1. Diseño de Muros de Contención	5
1.5.2. Estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite	7
1.5.3. Propuesta de estabilidad de taludes	7
Capítulo 2: Revisión de la literatura	10
2.1. Muros de gaviones	10
2.2. Grava de gavión	11
2.3. Fundamentos teóricos para el cálculo de la estabilidad	12
2.3.1. Resistencia al corte y esfuerzo normal	13
2.3.2. Determinación del empuje.....	16
2.3.3. Factor de seguridad	20
2.4. Estabilidad de los muros de gaviones	21
2.4.1. Falla por deslizamiento	22
2.4.2. Falla por volcamiento.....	23
2.4.3. Falla por capacidad portante	24
Capítulo 3: Análisis paramétrico usando el método de equilibrio límite	26
3.1. Introducción	26
3.2. Parámetros geométricos	28
3.2.1. Ángulo de inclinación del muro (α).....	28
3.2.2. Inclinación del terreno (ε)	29
3.2.3. Carga sobre el terreno (q).....	29
3.3. Método de equilibrio límite con GEO5.....	29
3.3.1. Verificación del equilibrio del muro	31

3.3.2. Verificación de la capacidad portante	32
3.3.3. Verificación general del muro	33
3.3.4. Verificación del análisis global	34
Capítulo 4: Análisis paramétrico usando el método analítico	36
4.1. Introducción	36
4.2. Estabilidad contra deslizamiento.....	36
4.3. Estabilidad contra volcamiento	37
4.4. Estabilidad por capacidad portante	38
4.5. Diseño y verificación de la estabilidad del muro de gavión	39
Capítulo 5: Resultados del análisis.....	41
5.1. Variación del factor de seguridad por volcamiento	41
5.2. Variación del factor de seguridad por deslizamiento.....	47
5.3. Variación del factor de seguridad por capacidad portante	52
Capítulo 6: Conclusiones.....	59
Referencias	61
Anexo A: Datos de ingreso del cálculo	65
Anexo B: Dimensiones del gavión.....	66
Anexo C: Cálculo del centro de gravedad	67
Anexo D: Diseño de muro de gavión	68

Índice de figuras

Figura 2.1 Muro de gavión de cara lisa	11
Figura 2.2 Grava para relleno de gavión	12
Figura 2.3 Estado de esfuerzos en un plano.....	15
Figura 2.4 Círculo de Mohr	16
Figura 2.5 Empuje sobre un paramento vertical.....	17
Figura 2.6 Gráfico de Empuje Vertical	17
Figura 2.7 Fuerzas actuantes para el estado activo	18
Figura 2.8 Plano de empuje en muros de gavión de cara lisa	19
Figura 2.9 Tipos de falla en muros de gaviones.....	21
Figura 2.10 Fuerzas actuantes en muro de gavión	23
Figura 2.11 Punto de aplicación de la fuerza normal N	25
Figura 3.1 Predimensionamiento de muros de gaviones	27
Figura 3.2 Vista de superficie	30
Figura 3.3 Proyección tridimensional.....	30
Figura 3.4 Fuerzas actuantes en el caso de estudio.....	31
Figura 3.5 Capacidad portante en el caso de estudio.....	32
Figura 3.6 Juntas debajo del bloque 3	33
Figura 3.7 Juntas debajo del bloque 2	33
Figura 3.8 Juntas debajo del bloque 1	34
Figura 3.9 Superficie de deslizamiento circular	35
Figura 4.1 Especificación del metrado de cargas.....	37
Figura 4.2 Especificación del cálculo del centro de gravedad	38
Figura 5.1 Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL.....	41
Figura 5.2 Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL.....	42
Figura 5.3 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL.....	42
Figura 5.4 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL.....	43
Figura 5.5 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL.....	44
Figura 5.6 Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico	44
Figura 5.7 Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico	45
Figura 5.8 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico	45
Figura 5.9 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico	45
Figura 5.10 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico 46	46
Figura 5.11 Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF	48
Figura 5.12 Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF	48

Figura 5.13 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF	48
Figura 5.14 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF	49
Figura 5.15 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF	49
Figura 5.16 Efecto de la carga $q = 0\text{ kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico.....	50
Figura 5.17 Efecto de la carga $q = 29.43\text{ kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico	50
Figura 5.18 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico.	50
Figura 5.19 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico.	51
Figura 5.20 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico	51
Figura 5.21 Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF	53
Figura 5.22 Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF	54
Figura 5.23 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF	54
Figura 5.24 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF	54
Figura 5.25 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF	55
Figura 5.26 Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico .	55
Figura 5.27 Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico	56
Figura 5.28 Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico	56
Figura 5.29 Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico	56
Figura 5.30 Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico.....	57

Índice de tablas

Tabla 1.1 <i>Estado del Arte</i>	8
Tabla 2.1 <i>Valores típicos del ángulo de fricción interna</i>	15
Tabla 3.1 <i>Parámetros del material</i>	28
Tabla 3.2 <i>Valores para la verificación del muro</i>	31
Tabla 3.3 <i>Valores y puntos de aplicación de las fuerzas actuantes</i>	32
Tabla 3.4 <i>Carga de diseño de la capacidad portante</i>	32
Tabla 3.5 <i>Valores y puntos de aplicación de las fuerzas actuantes en los bloques</i>	34
Tabla 3.6 <i>Verificaciones de las juntas</i>	34
Tabla 3.7 <i>Verificación de la estabilidad del talud (Bishop)</i>	35
Tabla 3.8 <i>Resumen de los valores comparables en el GEO5</i>	35
Tabla 4.1 <i>Metrado de cargas</i>	37
Tabla 4.2 <i>Cálculo de los centros de gravedad</i>	38
Tabla 4.3 <i>Valores para la estabilidad del gavión</i>	39
Tabla 4.4 <i>Valores de la estabilidad del muro y esfuerzos del suelo</i>	40
Tabla 5.1 <i>FS_{volcamiento} mediante el método de equilibrio límite y método analítico</i>	47
Tabla 5.2 <i>FS_{deslizamiento} mediante el método de equilibrio límite y método analítico</i>	52
Tabla 5.3 <i>FS_{capacidad portante} mediante el método de equilibrio límite y método analítico</i>	58

Abreviaturas

- A_s = Área transversal del gavión
- a = Ancho de la corona
- B = Base del gavión
- β = Ángulo entre el empuje del muro y el plano horizontal
- C = Cohesión
- C_g = Cohesión de agarre del gavión
- d = Altura del punto de aplicación
- e = Excentricidad
- ε = Pendiente del terreno
- α = Ángulo de inclinación de la estructura
- E_a = Empuje activo
- E_h = Componente horizontal
- E_v = Componente vertical
- F_s = Factor de seguridad
- H = Altura
- H_{act} = Fuerza desestabilizante
- H_g = Altura de la carga
- H_{res} = Fuerza estabilizante
- K_a = Coeficiente de empuje activo
- MEL = Método de equilibrio límite
- M_r = Momento resistente
- M_v = Momento de volcamiento
- N = Fuerza normal
- n = Porcentaje de vacíos en el gavión
- P = Peso propio
- P_a = Presión activa
- P_u = Peso de la red metálica
- τ = Esfuerzo cortante
- W = Peso del gavión

- σ = Esfuerzo normal
- φ = Angulo de fricción interna
- γ_g = Peso específico del gavión
- γ_p = Peso específico de la piedra del gavión
- γ_s = Peso específico del suelo
- δ = Ángulo de fricción entre el suelo y la estructura
- X_i : Ubicación de cada bloque dentro del diseño o disposición de la estructura.
- M_i : Momento asociado con cada bloque de gavión.

Resumen

El presente trabajo de investigación analiza la influencia de los parámetros geométricos de un muro de gavión liso. Se toma el caso de estudio aplicativo del libro Manual de gaviones de Camargo Hernández (2001), en el cual las propiedades de entrada, tanto para el suelo, el relleno y el gavión, ya se encuentran definidas, así como los parámetros del muro como la altura de 4 metros, ancho de base de 3 metros, ancho de corona de 1 metro, la inclinación del muro de 6° , inclinación del terreno de 0° y la sobrecarga del terreno de 29.43 kN/m^2 . En base a ellos se realiza el estudio geométrico paramétrico de la carga del terreno, ángulo de inclinación del muro, y el ángulo de inclinación del terreno, todos ellos como parámetros elegidos para analizarlos a través de dos métodos de estudio.

Con la finalidad de validar el caso de estudio, se realiza una comparación objetiva de las variables definidas entre el método analítico, para el cual se obtienen las fórmulas necesarias para su aplicación previa revisión de la literatura, y el método de equilibrio límite GEO5, el cual utiliza los métodos de estado límite, factor de seguridad y análisis de estabilidad interna, para así obtener el cálculo de estabilidad contra deslizamiento, volcamiento, coeficiente de volteo, fuerzas normales, excentricidad, fuerzas resistentes y activas, coeficiente de deslizamiento, esfuerzo máximo y capacidad portante.

Finalmente, se analiza la variación de los parámetros ya validados, para lo cual se varía un parámetro específico y los otros permanecen con los valores del caso de estudio. Así, el ángulo de inclinación del muro va desde los 0° hasta los 12° , la inclinación del terreno desde los 0° hasta los 24° y la sobrecarga del terreno desde los 0 kN/m^2 hasta los 117.68 kN/m^2 ; todos ellos realizados por los dos métodos mencionados, para así poder definir los parámetros que aporten mayor seguridad y resistencia en el diseño de este tipo de muros.

Palabras claves: diseño, equilibrio límite, factor de seguridad, gaviones.

Abstract

The application case study is taken from the book Gabion Manual by Camargo Hernández (2001), in which the input properties, both for the soil, the fill and the gabion, are already defined, as well as the parameters of the wall such as the height of 4 meters, the base width of 3 meters, the crown width of 1 meter, the wall inclination of 6° , the terrain inclination of 0° and the terrain overload of 29.43 kN/m^2 . Based on them, the parametric geometric study of the ground load, angle of inclination of the wall, and the angle of inclination of the ground is carried out, all of them as parameters chosen to analyze them through two study methods.

In order to validate the case study, an objective comparison of the defined variables is carried out between the analytical method, for which the necessary formulas for its application are obtained after reviewing the literature, and the GEO5 limit equilibrium method, the which uses the methods of limit state, safety factor and internal stability analysis, in order to obtain the calculation of stability against sliding, overturning, overturning coefficient, normal forces, eccentricity, resistant and active forces, sliding coefficient, maximum stress and bearing capacity.

Finally, the variation of the already validated parameters is analyzed, for which a specific parameter is varied, and the others remain with the values of the case study. Thus, the angle of inclination of the wall ranges from 0° to 12° , the inclination of the terrain from 0° to 24° and the overload of the terrain from 0 kN/m^2 to 117.68 kN/m^2 ; all of them carried out by the two mentioned methods, in order to define the parameters that provide greater security and resistance in the design of this type of walls.

Keywords: design, gabions, limit equilibrium, safety factor.

Capítulo 1: Generalidades

1.1. Introducción

Los muros de contención de gaviones son estructuras reconocidas por su flexibilidad y eficacia en la prevención de deslizamientos. Estos muros, clasificados como muros de gravedad, consisten en una red de malla hexagonal de dimensiones variables, siendo las más comunes las de 2x1x1 metros y las de 1.5x1x1 metros, las cuales son tejidas con la técnica de doble torsión (Piñar, 2008). Su versatilidad de implementación, resistencia y consideraciones medioambientales los han convertido en una opción adecuada para enfrentar problemas geotécnicos, hidráulicos y de control de la erosión. Un factor clave en el diseño de estos muros es su capacidad para soportar las cargas y sobrecargas inherentes al terreno y su entorno, manteniendo una integridad estructural que evite deformaciones excesivas o rupturas. Para un diseño óptimo se vuelve imperativo el análisis de equilibrio integral de estos muros, que considera propiedades de los materiales, configuraciones estructurales y métodos constructivos (De Almeida, 2008).

Los gaviones como sistemas de protección se utilizan en una variedad de situaciones, tales como muros de contención, defensas ribereñas, revestimientos de canales, contrafuertes de puentes, presas, muros de alcantarillas, rompeolas, diques y protección de playas. Los muros de contención revestidos con gaviones son estructuras esencialmente semirrígidas, que generalmente soportan grandes movimientos laterales y verticales, además de tener ventajas tales como su permeabilidad y flexibilidad, durabilidad y menores costos, son ideales para fines de paisajismo (Lifonzo y Lifonzo, 2018).

Esta investigación se enfoca en el análisis paramétrico con el propósito de optimizar el diseño de los muros de contención de gaviones de tipo liso. Mediante la utilización de métodos analíticos y de equilibrio límite, se busca identificar cuáles son los factores críticos que tienen influencia en la eficiencia y estabilidad de estos muros. Se abordan la evaluación de los parámetros geométricos, la influencia del suelo y las condiciones de carga, así como la verificación de la estabilidad frente a diferentes modos de falla. Los resultados obtenidos sirven como base para el desarrollo de recomendaciones prácticas

que contribuyan al diseño eficiente y seguro de estos elementos esenciales en la ingeniería geotécnica.

1.2. Planteamiento del problema

En la actualidad, existe una creciente demanda de estructuras de contención de taludes, que han demostrado su eficacia para mitigar una serie de problemas geotécnicos, hidráulicos y de erosión. Sin embargo, estos muros de contención convencionales, especialmente los que emplean materiales como el concreto y el acero, suelen generar gastos considerables. Por tal motivo, los muros de gaviones representan una alternativa más económica con un proceso constructivo menos complejo, además de que utilizan materiales fácilmente disponibles y presentan una buena relación con el medio ambiente (Cano, 2007).

Cabe mencionar que los gaviones son estructuras modulares de distintas configuraciones, formadas por mallas metálicas que se rellenan con piedras del tamaño adecuado y se unen mediante costuras. Estas estructuras se construyen con el objetivo de resolver problemas relacionados con la geotecnia, la hidráulica y el control de la erosión. El montaje y relleno de los gaviones puede ejecutarse manualmente o mediante equipos mecánicos comunes (De Almeida, 2008).

A pesar de los beneficios de los muros de gaviones, es importante comprender su comportamiento y la interacción entre sus parámetros con el propósito de tener un diseño óptimo que soporte eficazmente las cargas actuantes en la estructura, tales como los momentos de volteo y fuerzas activas, entre otros. La falta de conocimiento en este aspecto puede llevar a diseños deficientes, decisiones de construcción erróneas y aumentar el riesgo de fallas. Además, estas fallas podrían tener consecuencias graves, como el colapso de taludes, la erosión del suelo y daños potenciales a infraestructuras cercanas o áreas habitadas. Por lo tanto, se hace necesario llevar a cabo un análisis paramétrico que examine de qué manera la geometría y las condiciones del terreno afectan el comportamiento y la resistencia de los muros de gaviones. Este análisis permite una comprensión más precisa de cómo cada parámetro influye en la estabilidad y el rendimiento de los muros de gaviones, así como en las interacciones entre ellos.

En la literatura se puede encontrar diversos casos de falta de análisis de muros de gaviones ante diferentes situaciones, se cita dos casos uno en Colombia y otro en Indonesia. En Bogotá, el corregimiento de Puerto Bogotá, en el municipio de Guaduas,

Cundinamarca, se encuentra a 243 msnm y está separado de la ciudad de Honda, Tolima, por el río Magdalena. Aunque Puerto Bogotá está 18 metros más elevado que Honda, ambos comparten una elevación similar respecto al río. La zona enfrenta problemas mínimos de erosión gracias a la capa vegetal que estabiliza el terreno, sin embargo, la tala de árboles por parte de los habitantes expone el terreno y aumenta el riesgo de erosión. La avalancha de Armero también contribuyó a esta vulnerabilidad al eliminar parte de la vegetación estabilizadora, afectando un tramo de calle de aproximadamente 106 metros de largo (Soto, 2017). En Indonesia, en una investigación sobre la falla de un muro de contención de gaviones en una carretera nacional en Padang, se menciona que experimentó una falla por deslizamiento excesivo justo después de la construcción. La conclusión fue que el deslizamiento excesivo mostró que el muro de contención tenía un factor de seguridad por debajo del calculado en el análisis de estabilidad inicial (Satriawan y Gusti, 2020).

Por otra parte, en nuestro país se ha venido implementando este tipo de construcciones. En Ancash se desarrolló la construcción de un muro de gaviones para la protección y estabilización de un talud en una institución educativa. Se utilizó este método por su versatilidad, flexibilidad, permeabilidad y economía, y se llegó a la conclusión de que los muros de gaviones permiten una rápida ejecución y trabajo en zonas de difícil acceso y con factores climáticos adversos (Novoa, 2018).

Por lo tanto, en esta investigación se busca analizar los métodos analíticos y de equilibrio límite con el fin de optimizar el diseño de los muros de gaviones en términos de eficiencia y rendimiento. Al comprender cómo los diferentes parámetros interactúan y afectan el comportamiento de la estructura, es posible identificar las mejores prácticas de diseño y establecer límites y rangos óptimos para cada parámetro. Esto contribuye a mejorar la seguridad y la durabilidad de los muros de gaviones, asegurando que se cumpla con el factor de seguridad adecuado para cada caso específico.

1.3. Justificación

La importancia del uso de los gaviones radica en su capacidad para solucionar problemas geotécnicos, hidráulicos y de control de erosión (De Almeida, 2008). Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un análisis exhaustivo del desempeño de estos muros que no requieren de mano de obra calificada. En ese sentido, la presente investigación se orienta hacia la validación del análisis geométrico de un muro de gavión liso de 4 metros

de altura utilizando 2 métodos distintos. De esta manera se establece una base sólida que permita tomar decisiones que respalden un diseño geométrico adecuado de estas estructuras.

Por un lado, el método analítico nos permite realizar los cálculos numéricos a través de las fórmulas con las cuales se calcula la estabilidad del gavión en base al ángulo que se forma por el plano de empuje y la horizontal, y el empuje activo. Seguidamente se comprueba la estabilidad del muro a través de la verificación de la seguridad contra deslizamiento con la cual se obtiene el momento de volteo y el momento resistente junto con su factor de seguridad correspondiente, excentricidad, fuerzas horizontales tanto resistentes como activas, coeficiente de deslizamiento y máximo esfuerzo.

Por otro lado, el análisis por el método de equilibrio límite se realiza con el software GEO5 que efectúa el análisis de estabilidad interno incluyendo el momento de volcamiento, desplazamiento, capacidad portante del suelo de cimentación y el factor de seguridad. Primero, se utilizan los datos de parámetros del suelo obtenidos a través de ensayos, los cuales se introducen en el software para realizar un análisis detallado. Luego, se establece la geometría del muro según el peso específico de los gaviones y se procede con el análisis completo de la estructura, que incluye la verificación de la estabilidad mediante el método de Bishop. El método de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes es una técnica de ingeniería que evalúa la estabilidad de una superficie de falla asumiendo condiciones de equilibrio de momentos y fuerzas verticales en franjas individuales de la superficie. Se utiliza principalmente en casos donde la superficie de falla es circular o puede aproximarse a esta forma. Este método divide el área de la superficie de falla en bloques verticales llamados dovelas, donde se calculan las fuerzas actuantes, incluyendo el peso del suelo, las fuerzas de cohesión y fricción, así como las presiones laterales y cortantes entre las dovelas. Aunque no se cumplen completamente las condiciones de equilibrio horizontal para las franjas individuales, el método proporciona una estimación aceptable del factor de seguridad del talud, siendo útil en el diseño y la evaluación de estructuras geotécnicas (Sismica Insitute, 2024).

Finalmente, se realiza una comparación de resultados de los parámetros que se obtienen por el método analítico y el de equilibrio límite para el caso de estudio donde en el método analítico hace uso de diversas ecuaciones matemáticas para determinar el comportamiento del suelo y permite obtener con mayor precisión el análisis. Sin

embargo, es un proceso complejo y muy detallado. En el caso del método de equilibrio límite se obtienen valores más aproximados, pero es un método más simple de realizarse.

Cabe mencionar que el tema de muro de gaviones se relaciona con el ODS 9 de industria, innovación e infraestructura, debido a que la construcción de estos muros nos permite tener un mejor manejo para evitar desastres naturales como en taludes, tanto en zonas urbanas como rurales.

1.4. Objetivos

El objetivo general es realizar un análisis paramétrico utilizando el método de equilibrio límite y el método analítico para optimizar el diseño de un muro de contención de gaviones de tipo liso. Se pretende evaluar la respuesta del muro ante diversos escenarios variando sus parámetros, comparando metodologías y modificando variables para mejorar su eficiencia y estabilidad.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Determinar los factores de seguridad por volcamiento, por deslizamiento y por capacidad portante tanto para el método de equilibrio límite como para el método analítico comparando su variación.
- Evaluar y comparar la respuesta estructural de una configuración específica frente a cargas críticas, utilizando tanto el método de equilibrio límite como el método analítico.
- Optimizar el diseño del muro de gaviones por medio estudio paramétrico geométrico, variando el ángulo de inclinación del muro, la inclinación del terreno y la sobrecarga del terreno.

1.5. Estado del arte

1.5.1. Diseño de Muros de Contención

Para la realización del diseño de cualquier muro de contención se tiene que comenzar por obtener los parámetros geotécnicos del tipo de suelo tomando como data principal al peso específico, cohesión, ángulo de fricción y luego se determina la capacidad admisible de carga. Posterior a ello, se plantea un diseño inicial del muro de contención donde se establece valores de altura y anchura. En el caso que el muro no logró satisfacer la necesidad de estabilidad además de dar valores de factores de seguridad bajos se realizan ajustes en el diseño hasta que se confirme la viabilidad del diseño. Tomando como

ejemplo el trabajo de Vila (2022) titulado *Diseño de muro de contención reforzado con geomalla, Asentamiento Humano Chavinillo, Ventanilla - Callao 2022* planteo un muro de contención reforzado con geomallas que sostuviera las viviendas junto a la ladera del asentamiento humano donde los resultados mostraron que el diseño del muro de contención se beneficia y es eficaz con el refuerzo de geomalla en longitudes de capa de 7,00 metros para una altura de muro de 9,59 metros, 8,00 metros para una altura de muro de 10,75 metros, 8,50 metros para una altura de muro de 11,48 metros y 9,00 metros para una altura de muro de 12,29 metros. El trabajo de Piñar (2008) titulado *Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³* consistió en realizar un estudio en el que se obtenga información relevante con respecto al diseño de estos. Entre los puntos analizados se encuentra la determinación del empuje activo y pasivo de los suelos, las teorías aplicadas para el diseño de estas estructuras. Además, se mencionan los pasos que se deben seguir previo al análisis como suponer una geometría inicial basada en el peso específico del gavión y tener una altura determinada.

Asimismo, una investigación realizada por Korin (2022) titulada *Dimensionamiento de paredes de Gabiões: Caso práctico* tuvo como objetivo estudiar el muro de gaviones como estructura de contención en zonas de posibles deslizamientos, teniendo en cuenta diversos factores como la estabilidad, flexibilidad, impacto ambiental y facilidad de mantenimiento, siguiendo los parámetros de diseño dados, como momento de volcamiento, momento de resistencia, resistencia al deslizamiento y presión de apoyo. El muro se calculó manualmente y también con ayuda del programa "GAWAC WIN 2003". Como resultado, se estableció que ocurre un efecto positivo debido a las variaciones en los parámetros relacionados al aumento de la inclinación y el desplazamiento relativo de los bateadores del muro, los cuales aumentan la resistencia del muro de contención diseñado. Además, el impacto negativo ocurre debido a la adición de parámetros relacionados con el aumento de la porosidad de los gaviones, adición de geotextil en la base, reducción de la fricción, una capa adicional a lo largo de la altura del muro y reducción de la base del gavión, que reducen su estabilidad. Finalmente Possato (2021) realizó la descripción geotécnica de un suelo residual en *Biguaçu* en Santa Catarina, Brasil, se utilizó para dimensionar un muro de contención de tipo gavión.

1.5.2. Estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite

El análisis de estabilización de taludes implica conocer ciertas condiciones dependiendo del análisis que se desea realizar tipo estático o pseudoestático (donde se toma en consideración las aceleraciones sísmicas del terreno). Para esto se puede realizar por medio del método de equilibrio límite que permite conocer el factor de seguridad del talud y confirmar si presenta estabilidad o inestabilidad. Se toma en cuenta los valores mínimos de estabilización de plantear que un talud estable en caso estático de 1.50 y en caso pseudoestático un valor de 1.25 según la norma técnica E.050 enfocada en suelos y cimentaciones. Con lo mencionado anteriormente será posible verificar los factores de seguridad del talud ante fallas de volcamiento, deslizamiento, etc. En el caso de estudio presentado por Ayyub et al. (2021) en su artículo *Analysis of gabion retaining Wall using analytical and numerical modelling with Plaxis 2D*, se evaluó la estabilidad estructural de un muro de gaviones que comenzó a abultarse poco tiempo después de su construcción. Se utilizaron métodos analíticos y numéricos para realizar un análisis comparativo. Ambos métodos revelaron que la estructura era marginalmente segura, pero se encontraba cerca de un estado límite. Como solución, se propuso invertir la posición de las caras del muro y mejorar la base con una capa de concreto para evitar asentamientos y reducir la excentricidad. Rivera y Vicuña (2023) usaron el programa Slide 6.0 para comprobar la estabilización del talud de la costa verde por el método de Monte Carlo y los factores de seguridad por método de equilibrio límite. Peerdawood y Mawlood (2010) igualmente realizó un estudio analítico de la estabilidad exterior de una forma típica de muro de contención conocida como muros de gaviones. Finalmente Salvatierra (2021) como en los casos anteriores se analizó la estabilidad del talud por medio del método de equilibrio límite usando los casos de Bishop, Janbu y Spencer para determinar los factores de seguridad.

1.5.3. Propuesta de estabilidad de taludes

Una propuesta de estabilización de taludes implica una serie de pasos y consideraciones importantes para garantizar la seguridad y estabilidad de la pendiente del terreno. Para plantear una propuesta de estabilización de taludes se debe primero conocer las propiedades geomecánicas del talud con el fin de conocer si es estable por cualquier método como el equilibrio límite con el fin de determinar los factores de seguridad en caso estático y pseudoestático del talud. Si se da el caso de que los factores de seguridad son

menores al límite establecido se procede a plantear una propuesta de estabilización de taludes sea hacer uso de un muro de contención, geomallas, implementación de vegetación o una modificación geométrica del talud. Zumba (2023) obtuvo los datos de los taludes empleando la refracción sísmica a comparación de Cevallos (2022) que realizó un estudio geomecánico. Ambos investigadores propusieron estabilizar los taludes mediante modificaciones geométricas, y luego evaluaron la efectividad de estas modificaciones utilizando programas especializados. Mismo caso ocurrido en la investigación de Garzón et al. (2021) donde realizaron el mismo procedimiento para posteriormente plantear una reconfiguración del terreno haciendo uso de terrazas que logren estabilizar el talud y a su vez se plantea un sistema de drenaje para lluvias en el talud. Asimismo, Cerquera (2023) propuso el uso de zanjas de coronación además de colocar mantos temporales en la zona y posterior a ello implementar pernos de anclaje en el talud después de verificar su inestabilidad. Finalmente Reyes (2019) implemento el uso de la revegetalización del talud y realizar un posterior análisis por medio del programa SLIDE para verificar su estabilidad en una simulación.

Los principales trabajos identificados que son bases de la investigación se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Estado del Arte

ID	TÍTULO	AUTOR	TIPO DE ESTUDIO
1	Diseño de muro de contención reforzado con geomalla, Asentamiento Humano Chavinillo, Ventanilla - Callao 2022.	Vila (2022)	Aplicado
2	Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m ³	Piñar (2008)	Descriptivo
3	Dimensionamento de paredes de Gabião: Caso práctico	Korin (2022)	Descriptivo
4	Dimensionamento de contenção do tipo gabião em região de solo residual na cidade de Biguaçu / SC	Possato (2021)	Descriptivo
5	Analysis of Gabion Retaining Wall Using Analytical and Numerical modelling with Plaxis 2D.	Ayyub et al. (2021)	Explicativo
6	Análisis Probabilístico Aplicado a la Estabilidad de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del Mar	Rivera y Vicuña (2023)	Aplicado
7	Analytical Study for Stability of Gabion Walls	Peerdawood y Mawlood (2010)	Explicativo
8	Análisis de Estabilidad de Taludes mediante el Método de Equilibrio Limite para prevenir deslizamientos durante la expansión de un depósito de minerales en minas a cielo abierto, La Libertad 2021	Salvatierra (2021)	Aplicado

9	Análisis de Estabilidad del Talud en la Vía al CRS Turi Aplicando Ensayos Geofísicos	Zumba (2023)	Aplicado
10	Análisis de Estabilidad de Talud de Roca ubicado en la parroquia La Pila perteneciente al Cantón Montecristi	Cevallos (2022)	Descriptivo
11	Análisis de estabilidad de taludes Barrio El Arroyo	Garzón et al. (2021)	Aplicado
12	Análisis de Estabilidad del Talud Ubicado en el Pr 13- 4506 del Proyecto Autovía Neiva–Girardot	Cerquera (2023)	Aplicado
13	Análisis de estabilidad de taludes aplicando diferentes técnicas de revegetalización	Reyes (2019)	Aplicado

Capítulo 2: Revisión de la literatura

2.1. Muros de gaviones

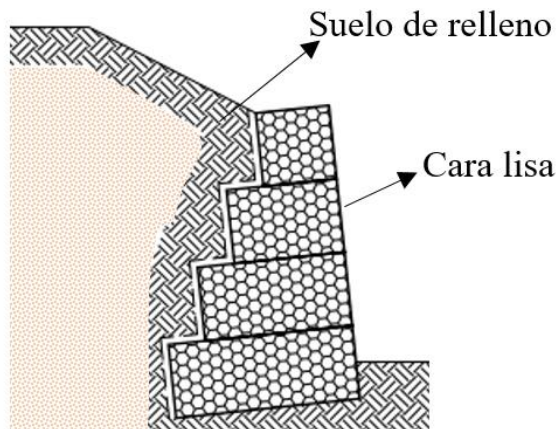
Los muros de contención de gaviones son uno de los sistemas tradicionales de estructuras de contención. Estos muros se utilizaron por primera vez en Italia a finales del siglo XIX. Actualmente su uso se extiende a varios campos y tienen una demanda creciente, ya que presentan una buena adaptabilidad a grandes movimientos laterales y verticales debido a su carácter semirrígido (Bianchini et al., 2017). Al diseñar muros de gaviones, hay que tener en cuenta que son estructuras drenantes, por lo que no se pueden generar empujes debidos al agua. Esta condición debe verificarse en el lugar donde se realizará el proyecto para asegurarse de que no existen elementos que permitan la acumulación de agua detrás de los muros (Morales, 2023).

Estas estructuras presentan ventajas en la construcción de estructuras de contención desde los puntos de vista económico y técnico. Por ejemplo, ofrecen una resistencia contra el empuje activo del suelo y la presión hidráulica, sin agrietarse ni presentar deformaciones. Además, estos muros muestran una tolerancia más aceptable frente a los asentamientos diferenciales en comparación con los muros convencionales.

En la Figura 2.1 se presenta un muro de gavión de cara lisa con inclinación contra el terreno, compuesto por 4 bloques. Esta configuración específica del muro contribuye a la reducción de las fuerzas de empuje lateral generadas por el suelo detrás de la estructura. Al tener superficies inclinadas en el interior, se interrumpe la presión hidrostática y se minimizan los riesgos de deslizamiento o volcamiento. Estas estructuras se constituyen adicionalmente por elementos metálicos en las canastas, las cuales son redes de malla hexagonal de doble torsión que deben ser llenadas con material pétreo (Bianchini et al., 2017). Estas canastas trabajan como unidades de transferencia de cargas, distribuyendo uniformemente la presión del suelo a través de la estructura evitando así la deformación del gavión. Para la estabilización de los muros de gaviones por su propio peso se puede trabajar con una base igual a $0.60H$, donde H es la altura del muro (Camargo & Franco, 2001). El diseño de esta estructura de gaviones como muro de gravedad debe cumplir con la estabilidad externa e interna en deslizamiento, volcamiento y capacidad portante.

Figura 2.1

Muro de gavión de cara lisa



Nota. De Almeida (2008)

2.2. Grava de gavión

El llenado para los gaviones se realiza con la ayuda de un equipo adecuado o manualmente. Antes de iniciar este proceso es necesario comprobar el buen estado del gavión y los elementos que lo conforman. Entre los materiales más usados para el llenado de estas estructuras se encuentran las gravas, debido a sus propiedades mecánicas y la facilidad de obtención del material.

El tamaño de las gravas utilizadas para rellenar las canastas de gavión tiene un impacto en la estabilidad del muro y su capacidad de carga. Mayo y Pacheco (2021) mencionan que las gravas deben ser suficientemente grandes y homogéneas para evitar la pérdida de material a través de las mallas de los gaviones; se recomiendan, en la medida de lo posible, piedras de tamaño nominal 1.5 veces superior al tamaño mínimo de la abertura de la malla. Asimismo, el diámetro mínimo permitido debe ser mayor al tamaño de la abertura de la malla y debe conformar como máximo entre el 5 al 7% del material colocado dentro del gavión; además, el porcentaje de porosidad debe estar en el orden comprendido entre el 30-40 % (Korin, 2022).

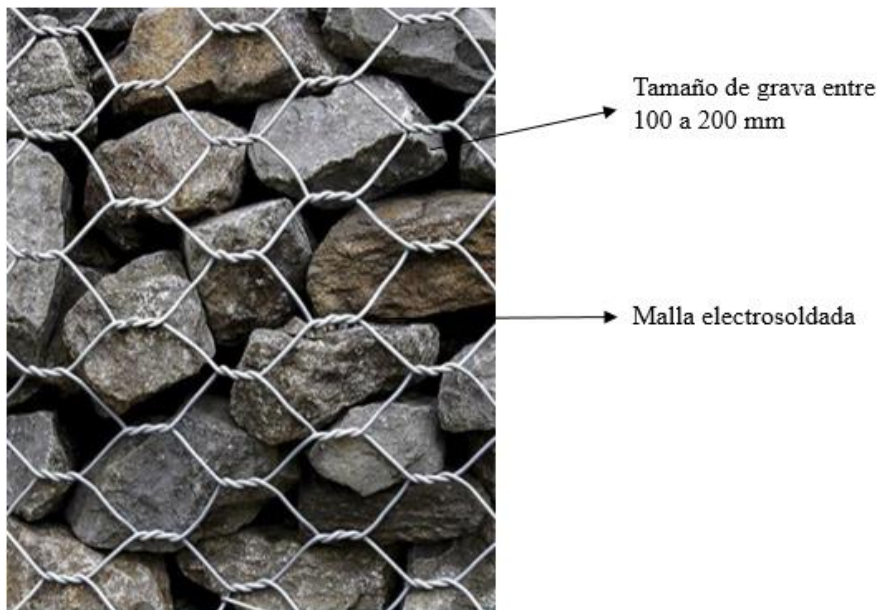
Como se observa en la Figura 2.2 este material debe ser de forma angular y de un tamaño uniforme para que haya un correcto acoplamiento dentro de las canastas, además de ser denso para asegurar una correcta capacidad de carga y resistencia a la erosión.

No obstante, se puede utilizar otros materiales para el llenado de los muros de gaviones, tales como sacos rellenos de arena o mortero, bloques de concreto, escombros, escorias de alto horno, entre otros. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la

utilización de estos materiales puede traer como consecuencia una disminución en las propiedades del muro. Por lo tanto, se recomienda optar por materiales de alto peso específico, ya que el comportamiento a gravedad de la estructura es función directa de su propio peso.

Figura 2.2

Grava para relleno de gavión



Nota. De Korin (2022)

2.3. Fundamentos teóricos para el cálculo de la estabilidad

Debido a que son estructuras de gravedad, los muros de gaviones se pueden dimensionar a partir de algunos conceptos que involucran a la mecánica de suelos, por lo que se analizan las características y propiedades del suelo de fundación, tales como la resistencia al corte de suelos, tanto cohesivos y no cohesivos, los cuales implican los parámetros de la cohesión, ángulo de fricción interna, fallas por esfuerzos; se analizan la estabilidad mediante la determinación del empuje del suelo y los factores de seguridad. Cabe señalar que para los factores de seguridad se analizan los tipos por volcamiento, deslizamiento y de capacidad portante, siendo el mínimo admisible para los dos primeros un valor de 1.5, y para la última un valor mínimo admisible de 1.0 y 1.5; todo ello para evitar posibles riesgos de falla. (Ministerio de vivienda, 2012) indica en la norma C.E.020 indica que, para cargas estáticas, el factor de seguridad mínimo de la pendiente debe ser de 1,5; para cargas sísmicas, debe ser de 1,25. En caso de que no se satisfagan estos requisitos de seguridad, se tendrá que elegir una técnica estabilizadora, o una combinación de técnicas, y probará la solución sugerida hasta que satisfaga ambos

requisitos. A lo mencionado, DS N° 011-2019-TR (2019) establece disposiciones específicas relacionadas con la seguridad y salud en el trabajo en la industria de la construcción, incluyendo valores admisibles para los factores de seguridad por volcamiento, deslizamiento y capacidad portante en el Perú. La legislación esboza procedimientos para garantizar la seguridad en las obras de construcción, aunque no establece específicamente valores para los aspectos de seguridad. Según los artículos 9.2 y 10, por ejemplo, es necesario establecer un "Procedimiento de autorización de visitas" que incluya una cartilla de seguridad (artículo 11). En resumen, la ley hace hincapié en el mantenimiento de la seguridad y la salud de los trabajadores a lo largo de la construcción, aunque no proporcione una cifra numérica para los aspectos de seguridad

2.3.1. Resistencia al corte y esfuerzo normal

La resistencia al corte de los suelos se refiere a su capacidad para soportar cargas sin deformarse excesivamente o romperse. Es esencialmente la resistencia interna que el suelo ofrece por unidad de área para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él (Das, 2015). En otras palabras, representa el valor máximo que el suelo puede alcanzar sin que se produzca su rotura.

Esta resistencia está influenciada por dos parámetros principales: la cohesión y el ángulo de fricción interna. La cohesión se refiere a la fuerza que mantiene unidos a los granos de suelo bajo la acción de fuerzas externas tales como la gravedad y el peso propio de la estructura, y es más relevante en suelos finos y arcillosos, en los cuales los granos tienen un tamaño de partícula más pequeño en comparación con los suelos granulares. Por otro lado, el ángulo de fricción interna es más importante en suelos granulares tales como arenas y gravas, y representa la resistencia que se genera cuando dos superficies de suelo se deslizan una sobre la otra.

Con respecto a los suelos cohesivos, su resistencia al corte depende de diversos factores, entre ellos la cantidad de agua presente en el suelo, su composición, su estructura y la cohesión de este. El comportamiento al corte de los suelos arcillosos es mucho más complejo con relación a los suelos granulares, debido al tamaño de las partículas que componen las arcillas.

Por lo tanto, en suelos cohesivos, la fuerza de cohesión es la principal responsable de la resistencia al corte. En estas condiciones, la superficie específica, que se define como la relación entre la superficie total de todas las partículas y el volumen total del

suelo, es mucho mayor en el caso de las arcillas (Das, 2015), lo que hace que las fuerzas de superficie de naturaleza fisicoquímica sean preponderantes en el comportamiento de este tipo de suelo. Estas fuerzas tienen una fuerte dependencia de la distancia entre las partículas. Asimismo, la resistencia al corte aumenta con la consolidación, que ocurre cuando las partículas son aproximadas unas a otras por efecto de una carga. Cuando se retira esta carga, las fuerzas de superficie impiden el retorno de las partículas a la situación anterior, y es cuando se produce la cohesión.

Con respecto a la presencia de agua, la baja permeabilidad es otra característica importante que influye en el comportamiento de los suelos arcillosos. Cualquier exceso de la presión de poros provocado por las cargas se disipa casi inmediatamente en las arenas, mientras que en las arcillas esta disipación es mucho más lenta.

Por otro lado, la resistencia al corte en suelos no cohesivos depende principalmente de la fricción interna entre las partículas de suelo. En este tipo de suelos la resistencia al corte está relacionada con la capacidad que tienen para resistir las fuerzas tangenciales que actúan sobre él. De esta forma, la envolvente de resistencia se expresa mediante la fórmula de Coulomb, ecuación (2.1).

$$\tau = \sigma \cdot \tan\varphi \quad (2.1)$$

Donde τ representa la resistencia al corte, σ es el esfuerzo normal y φ es el ángulo de fricción interna del material, que es un parámetro fundamental para el cálculo de la presión lateral y la capacidad de carga de suelos granulares sin cohesión. Este valor representa la resistencia al deslizamiento del suelo y es utilizado en la fórmula de Coulomb. Los factores determinantes para el valor del ángulo de fricción interna son:

- **Compacidad:** La compacidad, o porcentaje de vacíos, tiene una participación importante en el ángulo de fricción. Un suelo con mayor porcentaje de vacíos requerirá una mayor fuerza para romper su estructura, lo que resultará en un ángulo de fricción más elevado.
- **Granulometría:** La distribución adecuada de las partículas de diversos tamaños en el suelo contribuye a una menor resistencia. Las partículas más pequeñas llenan los espacios entre las partículas más grandes, lo que promueve una distribución más estable y un mayor ángulo de fricción.

- Forma de las partículas: También tiene influencia en el ángulo de fricción. Las partículas redondeadas ofrecen menos resistencia al deslizamiento en comparación con aquellas de forma más irregular. En consecuencia, las partículas irregulares presentan un ángulo de fricción más elevado.

En la Tabla 2.1 se muestran valores típicos del ángulo de fricción interna (ϕ) para algunos materiales como la grava y la arcilla.

Tabla 2.1
Valores típicos del ángulo de fricción interna

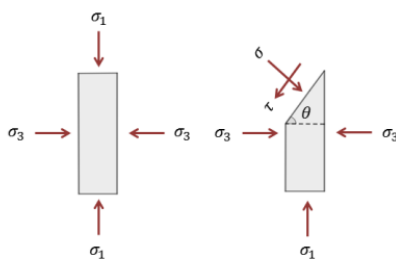
Suelo	Ángulo de fricción
Grava	36° - 40°
Arcilla	25° - 40°
Pedrisco	32° - 36°
Arena de cantera	30° - 34°
Arena limosa	25° - 35°
Limo	25° - 35°

Nota. De Almeida (2008)

Sin embargo, para representar gráficamente tanto los esfuerzos principales (σ_1 , σ_3) como el esfuerzo cortante del suelo (τ), tal como se muestra en la Figura 2.4, se utiliza el círculo de Mohr.

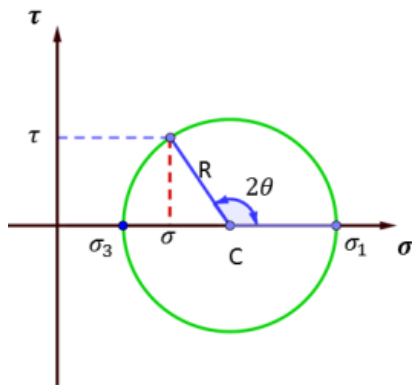
La construcción del círculo de Mohr, tal como se observa en la Figura 2.3, se realiza trazando los esfuerzos normales en el eje horizontal y los esfuerzos cortantes en el eje vertical. Luego, se traza un punto en la intersección de ambos ejes, el cual representa los esfuerzos en un punto específico del suelo sometido a ensayo. A continuación, se dibuja un círculo que pasa por el punto trazado, y su diámetro representa la magnitud del esfuerzo principal. Por último, la distancia entre el centro del círculo y el punto representa el esfuerzo cortante.

Figura 2.3
Estado de esfuerzos en un plano



Nota. Das (2015)

Figura 2.4
Círculo de Mohr



Nota. Das (2015)

Por último, para predecir el punto de falla de un material sometido a esfuerzos uniaxiales o biaxiales se emplea el criterio de falla de Mohr-Coulomb, basado en el ángulo de fricción interna y de la cohesión del material. Esta relación se expresa mediante la ecuación (2.2), donde c representa a la cohesión.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi \quad (2.2)$$

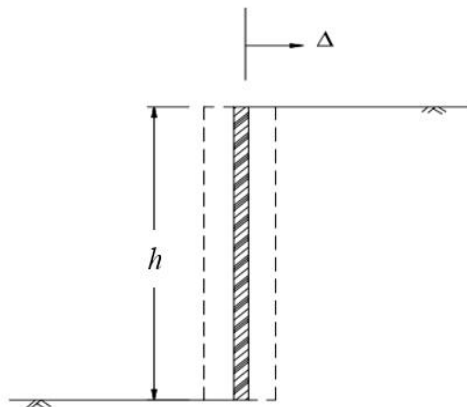
Si el esfuerzo cortante aplicado supera la resistencia al corte del suelo, se experimentan deformaciones plásticas e irreversibles, por lo tanto, determinar adecuadamente estos parámetros es esencial para el cálculo del empuje y para comprender cómo el suelo responderá a las cargas y esfuerzos aplicados.

2.3.2. Determinación del empuje

El empuje de tierra se refiere a las fuerzas generadas por el suelo que actúan sobre una estructura de cimentación o contención. Estas fuerzas son resultado del peso propio del suelo o de cargas adicionales aplicadas sobre él.

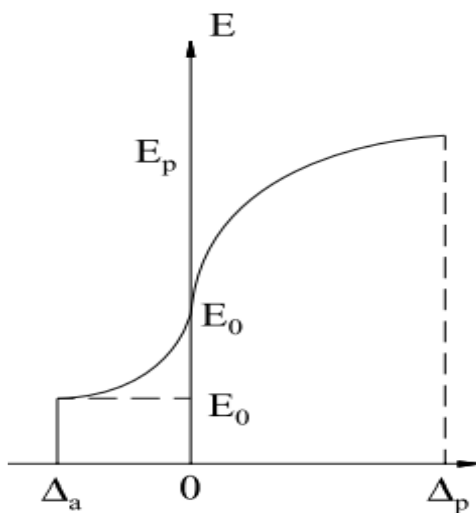
El valor de este empuje está relacionado con la deformación experimentada por la estructura. En otras palabras, la magnitud del empuje depende de cómo la estructura se deforma en respuesta a las presiones ejercidas por el suelo. Se visualiza esta interacción en la Figura 2.5, donde h se conoce como la altura total del gavión, Δ se conoce como el desplazamiento ocasionado por el empuje, el cual se representa como E , donde se efectúa un experimento que utiliza un paramento vertical móvil que soporta un desnivel de suelo, en el cual se verifica que la presión ejercida por el suelo sobre el paramento varía con el desplazamiento de este último (De Almeida, 2008).

Figura 2.5
Empuje sobre un paramento vertical



Nota. De Almeida (2008)

Figura 2.6
Gráfico de Empuje Vertical



Nota. De Almeida (2008)

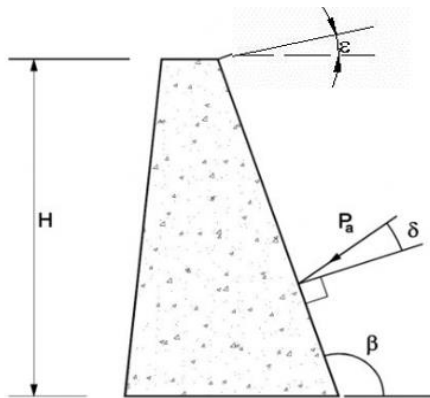
En la Figura 2.6 se observa que cuando el paramento se aleja del suelo contenido, se produce una disminución del empuje hasta alcanzar un valor mínimo, correspondiente a la movilización total de la resistencia interna del suelo, lo que se conoce como estado activo, y se logra con un ligero desplazamiento del paramento.

En general, los muros de contención a gravedad, y los flexibles como es el caso de los construidos con gaviones, en particular, permiten la deformación del suelo contenido en forma suficiente para que su resistencia sea totalmente movilizada. Por lo tanto, se deben dimensionar sobre la acción del empuje activo (Camargo & Franco, 2001).

Para determinar el empuje en muros de gaviones, Coulomb propuso un modelo que plantea el equilibrio de una masa de terreno en forma de cuña al deformarse o moverse el muro. La cuña, formada por dos planos, se comporta como un bloque rígido. La rotura se produce a lo largo del plano formado por la interfaz suelo-muro y a lo largo del plano de deslizamiento en el terreno (Yepes, 2019). En la Figura 2.7, se observa las fuerzas que actúan sobre la cuña de suelo que se forma en el estado activo.

Figura 2.7

Fuerzas actuantes para el estado activo



Nota. Yepes (2019)

Las fuerzas mencionadas incluyen al peso propio del suelo (P) y al empuje activo (E_a), también denominado presión activa (P_a), que se inclina a un ángulo δ con respecto al paramento de la estructura de contención. Este ángulo de inclinación representa el ángulo de fricción entre el suelo y la estructura; y finalmente la pendiente del terreno (ϵ), que en algunos casos puede ser nula y se considera como cero grados.

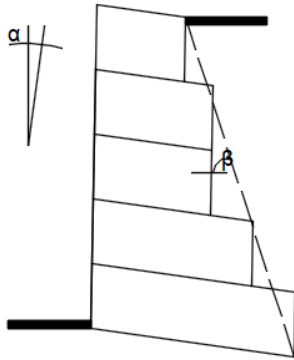
El valor de la altura de aplicación está definido por la ecuación (2.3), donde h representa la altura del gavión, B la base del gavión y a el ancho de la corona.

$$H = (h + (B + a)\tan\alpha)\cos\alpha \quad (2.3)$$

Como se ve en la Figura 2.8, se considera como β al ángulo formado por la superficie de empuje del muro y el plano que une a la base con el ancho de corona y se le denomina α al ángulo de inclinación de la estructura.

Figura 2.8

Plano de empuje en muros de gavión de cara lisa



Por lo tanto, β y el coeficiente de empuje activo (K_a) se determinan mediante las ecuaciones (2.4) y (2.5).

$$\beta = \left(\tan^{-1} \left(\frac{h}{B-a} \right) \right) + \alpha \quad (2.4)$$

$$K_a = \frac{\text{sen}^2(\beta + \varphi)}{\text{sen}^2\beta \cdot \text{sen}(\beta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi + \delta) \cdot \text{sen}(\varphi - \varepsilon)}{\text{sen}(\beta - \delta) \cdot \text{sen}(\beta + \varepsilon)}} \right]^2} \quad (2.5)$$

En el caso que haya una sobrecarga aplicada sobre el muro de retención, esta se trabaja como si fuera un relleno adicional con las mismas características y se representa en función de su altura, siendo expresada como h_s . Esta consideración se expresa mediante la ecuación (2.6), donde q representa a la sobrecarga encima del relleno que soporta el muro de gavión y γ_s es el peso específico del suelo.

$$h_s = \frac{q}{\gamma_s} \quad (2.6)$$

Además, es importante calcular el punto de aplicación d usando la ecuación (2.7), puesto que sirve para el cálculo de las verificaciones posteriores.

$$d = \frac{H}{3} * \left(\frac{H + 3h_s}{H + 2h_s} \right) - \text{sen}\alpha \quad (2.7)$$

Finalmente, el empuje activo en el muro (E_a) del suelo se calcula con la ecuación (2.8). Cabe resaltar que la cohesión no es necesaria en el cálculo del empuje, ya que tiende a modificarse con el tiempo y su influencia en el valor final no es significativa.

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma_s \cdot H^2 \cdot \left(1 + \frac{2h_s}{H}\right) - 2K_a^{1/2} \cdot c \cdot H \quad (2.8)$$

2.3.3. Factor de seguridad

El factor de seguridad en los muros de gaviones es un valor que representa la resistencia de las fuerzas que actúan sobre un muro en comparación con las fuerzas que pueden comprometer su estabilidad (Camargo & Franco, 2001). Cuando el coeficiente de seguridad es mayor a 1 significa que es capaz de soportar las cargas que actúan sobre él sin comprometer su estabilidad, por otro lado, cuando el coeficiente es menor a 1 indica que no es capaz de soportar dichas cargas. Sin embargo, para muros de gaviones se recomienda que el coeficiente de seguridad sea 1.5 como mínimo. Los factores de seguridad a analizar son los siguientes:

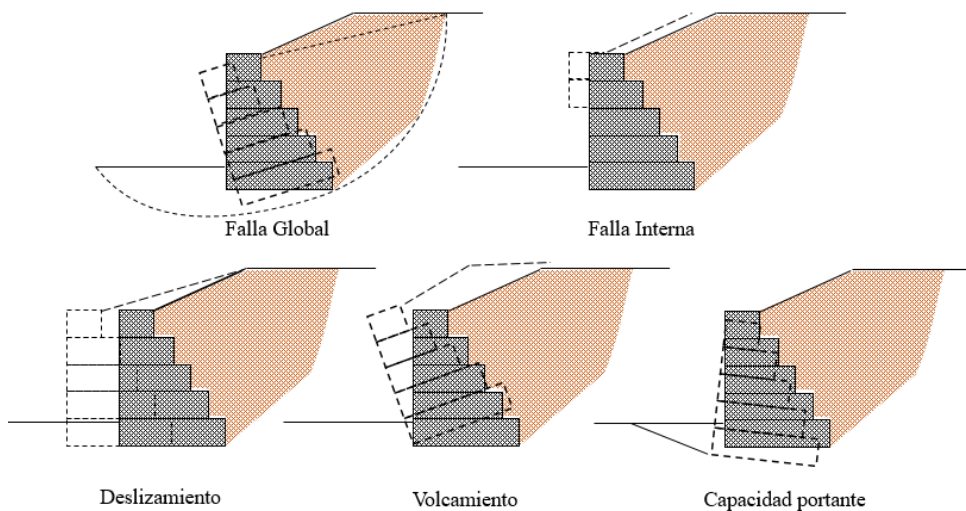
- Factor de seguridad contra deslizamiento: Hace referencia a la relación que existe entre las fuerzas que estabilizan y las fuerzas que influyen en el deslizamiento de la estructura. En este cálculo están implicados tanto las componentes del empuje activo como el peso propio de la estructura. Además, también influye en este factor el tener un ancho de base adecuado para que haya un mejor contacto con el suelo y un ángulo de inclinación de la estructura que permita que el propio suelo de fundación ayude a contrarrestar el deslizamiento del gavión.
- Factor de seguridad contra volcamiento: Consiste en la relación entre los momentos resistentes y los momentos de volcamiento presentes en la estructura. Adicionalmente a estos, también influye en el aumento de este factor tanto la fricción entre el suelo de fundación y geometría del muro, ya que un mayor ancho de base representa una mayor longitud, que multiplicado por el peso de la estructura significa un mayor momento resistente de esta.
- Factor de seguridad contra capacidad portante: Es la relación entre los esfuerzos que resiste el suelo de fundación y los que son generados por la propia estructura. Además del cociente de este factor también influyen los factores como la sobrecarga adicional que soportará la estructura y la geometría del muro, debido que esta es la encargada de transmitir los esfuerzos de la estructura al suelo.

2.4. Estabilidad de los muros de gaviones

El diseño de una estructura de gaviones es un asunto de optimización con restricciones, ya que debe ser lo más económico posible sin dejar de satisfacer todas las condiciones de estabilidad (Chatpattananan, 2021). La estabilidad hace referencia a la capacidad para resistir las fuerzas que actúan sobre él sin sufrir deformaciones excesivas y soportando las presiones activas del suelo. En la Figura 2.9 se muestran los tipos de fallas ocurridos en muros de gaviones que no solo están relacionadas con su resistencia o geométricas del muro, sino también con la estabilidad del suelo de fundación en el que se encuentra.

Figura 2.9

Tipos de falla en muros de gaviones



Nota. Adaptado De Almeida (2008)

La falla global del macizo se refiere a un estado límite en el cual todo el macizo de suelo que rodea al muro de gaviones colapsa, lo que resulta en la pérdida de la estabilidad de la estructura. Este tipo de falla puede ocurrir debido a varios factores, tales como la falta de capacidad portante del suelo de fundación, la sobrecarga aplicada al muro, la presencia de agua excesiva o la presencia de una pendiente inestable en el terreno adyacente. Esta verificación puede omitirse, ya que la estabilidad global depende principalmente de la ubicación real del sitio (Chatpattananan, 2021). La falla interna se refiere a la rotura en las secciones intermedias de los gaviones que componen la estructura, la cual puede ocurrir debido al deslizamiento o al exceso de presión normal.

El presente estudio analiza cuatro principales fallas, que son por deslizamiento, volcamiento, capacidad portante y global, las cuales se detallan a continuación.

2.4.1. Falla por deslizamiento

El deslizamiento en muros de gaviones se produce cuando la estructura se desplaza sobre el terreno que la sustenta. Esta falla ocurre cuando el gavión es inestable debido a una geometría deficiente, materiales de relleno con bajo peso específico sumado a una incorrecta distribución de estos dentro de la canasta, bajo ángulo de fricción del suelo o cuando la carga aplicada sobre el suelo supera su capacidad portante. En esta situación, la fuerza de fricción existente entre el suelo y la base del muro puede ser insuficiente para contrarrestar el empuje del material contenido en el muro, lo que provoca el desplazamiento de la estructura.

Para evitar esta falla se debe calcular la componente vertical (E_v) y la componente horizontal (E_h) del empuje activo, las cuales se calculan mediante las ecuaciones (2.9) y (2.10).

$$E_v = E_a * \text{sen}(90^\circ + \delta - \beta) \quad (2.9)$$

$$E_h = E_a * \text{cos}(90^\circ + \delta - \beta) \quad (2.10)$$

Sumado al peso de la estructura de gavión (W), que se calcula en base a las ecuaciones (2.11) y (2.12) donde interactúan el peso específico del gavión (y_g), peso específico de la piedra de relleno (y_p), el porcentaje de vacíos en el gavión (n) y el área transversal del gavión (A_s).

$$y_g = y_p(1 - n) \quad (2.11)$$

$$W = A_s \cdot y_g \quad (2.12)$$

Una vez calculadas las fuerzas actuantes en el muro de gavión, se debe calcular la fuerza estabilizante (H_{res}) y la desestabilizante (H_{act}) usando las ecuaciones (2.13) y (2.14), respectivamente.

$$H_{res} = ((W + E_v)\text{cos}\alpha + E_h\text{sen}\alpha)\text{tan}\varphi + (W + E_v)\text{sen}\alpha + cB \quad (2.13)$$

$$H_{act} = E_h \text{cos}\alpha \quad (2.14)$$

La condición que se debe cumplir para que la estructura no falle por deslizamiento es que el cociente entre H_{res} y H_{act} conocido como coeficiente de deslizamiento debe ser mayor o igual a 1.5 y se calcula mediante la ecuación (2.15). Además, es importante

también calcular la cohesión de agarre del gavión (C_g), el cual está relacionado con el peso de la red metálica (P_u) para gaviones de tipo estándar, que vale entre 8.6 y 12 kgf/m³; y el ángulo de fricción interna del gavión (φ) mediante las ecuaciones (2.16) y (2.17).

$$FS_{deslizamiento} = \frac{H_{res}}{H_{act}} \geq 1.5 \quad (2.15)$$

$$C_g = 10(0.03P_u - 0.05) \quad (2.16)$$

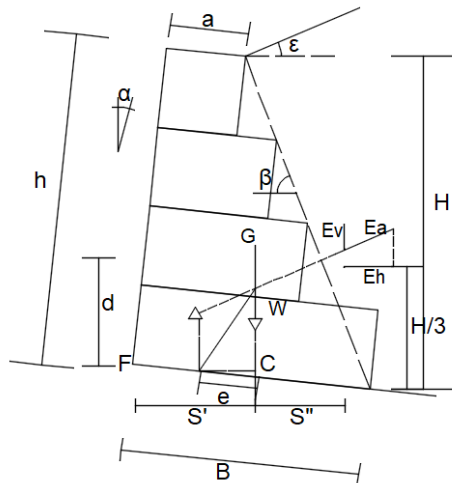
$$\varphi = 25y_g - 10 \quad (2.17)$$

2.4.2. Falla por volcamiento

La falla por volcamiento en los muros de gaviones se refiere a la incapacidad del muro para resistir el volcamiento debido a las fuerzas horizontales que actúan sobre él, tales como la presión del suelo detrás del muro, las cargas sísmicas y la presión del agua. Tal como se observa en la Figura 2.10, este empuje generalmente se origina con respecto a la esquina inferior izquierda de la base de la estructura, y ocurre cuando este momento originado supera a la suma del valor del momento del peso propio de la estructura y el momento de la componente vertical del empuje activo.

Figura 2.10

Fuerzas actuantes en muro de gavión



Nota. Adaptado de Hernández (2001)

Por lo tanto, se obtiene el momento de volcamiento (M_v) utilizando la ecuación (2.18) donde d es la altura con respecto al punto de aplicación conocido como F .

$$M_v = E_h \cdot d \quad (2.18)$$

Al tener un momento de volcamiento, también hay un momento resistente (M_r) que se calcula con la ecuación (2.19), donde W es el peso propio de la estructura de contención, S' es la distancia horizontal del punto de volcamiento conocido como F hasta la componente vertical del empuje activo, y S'' representa al punto de aplicación del peso.

$$M_r = WS' + E_v S'' \quad (2.19)$$

Por lo tanto, el primer paso consiste en calcular S' dada por la ecuación (2.20).

$$S' = B \cos \alpha - \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3 * h_s}{H + 2 * h_s} \right) \frac{1}{\tan \beta} \quad (2.20)$$

El punto S'' se obtiene en la siguiente ecuación (2.21) donde X_g y Y_g son los centros de gravedad en sus respectivas direcciones.

$$S'' = X_g \cos \alpha + Y_g \sen \alpha \quad (2.21)$$

Una vez que se tiene ambos momentos, se procede a calcular el coeficiente de volcamiento con la ecuación (2.22).

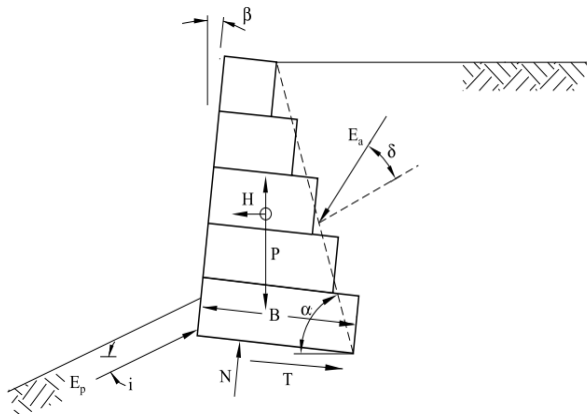
$$FS_{volcamiento} = \frac{M_r}{M_v} \geq 1.5 \quad (2.22)$$

2.4.3. Falla por capacidad portante

Este tipo de falla ocurre cuando los esfuerzos aplicados sobre el suelo resultan mayores que el esfuerzo admisible que proporciona el terreno y cuando el escalón más bajo del gavión es muy estrecho. Está ampliamente relacionado con la fuerza normal, la cual está compuesta por el peso propio del terreno y el empuje activo del suelo; ambos términos varían de acuerdo al ángulo de inclinación de la estructura, por lo tanto, cuando el ángulo de inclinación de la estructura sea cada vez mayor la fuerza normal incrementará su valor, aumentando el riesgo de falla del suelo de fundación debido al incremento de la excentricidad en la base lo cual se refleja en mayores esfuerzos transmitidos al suelo. Además, también influye en esta falla el tipo de suelo de fundación y el grado de erosión que este pueda presentar.

Figura 2.11

Punto de aplicación de la fuerza normal N



Nota. De Almeida (2008)

Tal como se observa en la Figura 2.11, cuando la resultante cae dentro del núcleo central de la base, los esfuerzos σ_1 y σ_2 , obtenidos mediante la aplicación de la fórmula de la escuadría que indica que el esfuerzo debido a la flexión es directamente proporcional a la distancia del punto considerado al eje neutro y están dados por la ecuación (2.23), en la cual el mayor de ambos representa al esfuerzo máximo que produce la estructura contra el suelo.

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (2.23)$$

Una condición previa al cálculo de la resultante es que la excentricidad (e) debe ser menor a la sexta parte de la base, y se calcula mediante la ecuación (2.24).

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_r - M_v}{N} \right) \quad (2.24)$$

Posteriormente, la resultante normal se calcula en base a la ecuación (2.25).

$$N = (W + E_v) \cos \alpha + E_h \sen \alpha \quad (2.25)$$

Finalmente se debe satisfacer la condición que se muestra en la ecuación (2.26) donde R hace referencia a la capacidad portante del suelo de cimentación.

$$FS_{\text{capacidad portante}} = \frac{R}{\sigma_{\max}} \geq 1 \quad (2.26)$$

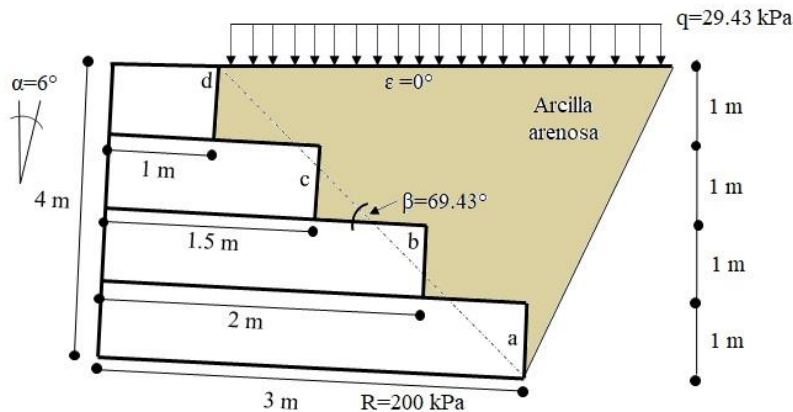
Capítulo 3: Análisis paramétrico usando el método de equilibrio límite

3.1. Introducción

En este capítulo se definen los criterios para el predimensionamiento, los cuales consisten en partir de una altura adecuada del muro de gavión para luego establecer el ancho de la base; se recomienda considerar a la base entre el 50 al 70% de la altura de muro de contención para evitar problemas de estabilidad. Con respecto a la malla, este debe de ser capaz de soportar las fuerzas que actúan sobre el muro y presentar una resistencia a la erosión provocada por la presencia de agua en el talud, la cual puede comprometer la estabilidad de la estructura, provocando deslizamiento de tierra y/o desprendimientos de rocas. El tamaño de las gravas utilizadas para rellenar las canastas del gavión tiene un impacto en la capacidad de carga y la estabilidad del muro; se recomienda trabajar con un tamaño entre 100 a 200 mm en los gaviones, ya que, si se cuenta con material de mayor tamaño, su manejo y colocación se vuelven más difíciles, lo que afecta negativamente la calidad, la estabilidad y la capacidad de drenaje del muro (Camargo & Franco, 2001).

Camargo (2011) propone en su libro Manual de Gaviones un caso de estudio aplicativo, el cual se toma en cuenta como el caso de estudio de la presente investigación en donde se muestran los parámetros iniciales del suelo, relleno y del gavión. El muro de la Figura 3.1 tiene una altura (H) de 4 m y una base del muro (B) de 3 m para la estructura de contención, y un ancho de corona (a) de 1 m. Asimismo, para la inclinación del muro con la vertical un ángulo (α) de 6° y con una inclinación inicial del terreno (ε) completamente horizontal. Esta decisión se basa en las fuerzas que actúan sobre la estructura, como los esfuerzos del suelo, la carga de la estructura y la sobrecarga del terreno (q) de 29.43 kPa, y para fines técnicos el valor de la capacidad portante del terreno de cimentación (R) de 200 kPa, como se observa en la imagen.

Figura 3.1
Predimensionamiento de muros de gaviones



A continuación, se presenta la Tabla 3.1 correspondiente a los valores de entrada de los materiales, tanto del suelo, relleno, gavión y malla; en donde se toma en cuenta una uniformidad para el suelo y el relleno debido a que ambos son una arcilla arenosa, es decir, las propiedades de peso unitario (γ), ángulo de fricción interna (φ), cohesión (c'), ángulo de fricción estructura-suelo (δ) y peso unitario del suelo saturado (γ_{sat}) son iguales para ambos depósitos. Cabe señalar que, para el caso de las propiedades del gavión, se inicia con una altura del gavión (h) de 4 m, un ancho de base (B) de 3 m, ancho de corona (a) de 1 m, inclinación de la estructura (α) de 6° , peso específico de la piedra de relleno (γ_p) de 23.84 kN/m^3 y un porcentaje de vacíos (n) del 30%, los cuales se insertan en la ecuación (2.11) para así obtener el peso específico de los gaviones (γ) de 16.69 kN/m^3 , y del mismo modo con las ecuaciones (2.16) y (2.17) se obtiene la cohesión (c') de 20.41 kPa y el ángulo de fricción interna (φ) de 32.53° . Para el peso unitario del suelo saturado se toma en cuenta el porcentaje de vacíos que existen en los gaviones, siendo un total de los 30% sumados al peso unitario. En cuanto a la malla electrosoldada se trabaja con la resistencia a la tracción de la malla (Rt) y con la fuerza de conexión (Rs) de 40.00 kN/m^3 para ambos casos, y con un espaciamiento de tabiques verticales (v) de 1 m. Una vez que se define el predimensionamiento del muro de gavión se realizan los análisis de momentos, tanto estabilizador como de volcamiento; las fuerzas normales, resistentes y activas; excentricidad y, finalmente, los factores de seguridad por volcamiento, deslizamiento y por capacidad portante para analizar la seguridad de la estructura.

Tabla 3.1*Parámetros del material*

	Suelo	Relleno	Gavión	Malla
γ (kN/m ³)	17.66	17.66	16.69	---
γ_{sat} (kN/m ³)	20.66	20.66	---	---
c' (kPa)	0	0	20.41	---
δ (°)	30.00	30.00	---	---
φ (°)	30.00	30.00	32.53	---
Rt (kN/m ³)	---	---	---	40.00
Rs (kN/m ³)	---	---	---	40.00

Nota. Parámetros extraídos de Camargo, J. (2001). *Manual de Gaviones*. RUSI.

3.2. Parámetros geométricos

Se estudia la influencia del ángulo de inclinación del muro (α), la inclinación del terreno (ε) y la carga sobre el terreno (q). Cabe señalar que, para el estudio del efecto de cada parámetro en particular, solamente fue variado este parámetro, manteniendo a todos los demás componentes constantes. Con respecto al ancho de la base, este proporciona estabilidad al muro de gaviones, ya que distribuye las cargas y presiones ejercidas sobre la estructura uniformemente a lo largo de su base. Por el contrario, un ancho de base deficiente origina una concentración de esfuerzos en el suelo de fundación, lo cual puede superar la capacidad portante del terreno. Así, un mayor ancho de base ocasiona que haya un mayor contacto entre el muro y el suelo, lo que aumenta la resistencia contra los momentos de volcamiento, y su influencia con respecto al factor de seguridad está ampliamente relacionado con el ángulo de inclinación de la propia estructura.

3.2.1. Ángulo de inclinación del muro (α)

Los efectos de contar con un correcto ángulo de inclinación son los siguientes:

- Estabilidad: Proporciona a la estructura una mejor resistencia contra las cargas producidas por el terreno debido a que este ángulo crea una mayor resistencia al volcamiento, ya que la inclinación permite que una mayor cantidad de suelo esté en contacto con la estructura.
- Eficiencia: Permite una mayor capacidad de retención del suelo y permite una mayor altura del muro sin comprometer la estabilidad; sin embargo, un ángulo de inclinación más bajo también aumenta la presión sobre la base del muro.

3.2.2. Inclinación del terreno (ϵ)

Se conoce como la pendiente natural del lugar donde se construye el muro de gavión. Está relacionado con la estabilidad del muro, ya que una pendiente pronunciada puede generar mayores fuerzas laterales y aumentar el riesgo de deslizamiento. Este parámetro influye en la geometría de la estructura tal como el ancho de base y el ángulo de inclinación del gavión para mantener el equilibrio de fuerzas y una adecuada distribución de cargas. Además, está ampliamente relacionado con la erosión y el tipo de material de relleno del terreno.

3.2.3. Carga sobre el terreno (q)

Se refiere a las sobrecargas permanentes adicionales al peso propio del terreno que el muro debe soportar; antes de la colocación de estas se debe evaluar el comportamiento del gavión bajo esta influencia.

La sobrecarga aplicada en el terreno como se muestra en la Figura 3.1, aumenta la magnitud de las fuerzas laterales y la carga vertical, lo cual afecta a la capacidad de carga del muro, generando asentamientos y deformaciones en el suelo de fundación.

3.3. Método de equilibrio límite con GEO5

El software geotécnico GEO5 se utiliza para el análisis y el diseño de distintas estructuras en ingeniería civil, entre ellas los gaviones. En el programa existen distintos módulos que sirven para el diseño y análisis de los gaviones, entre ellos se encuentra el MSE Wall y Gavión. En esta investigación se utiliza el módulo Gavión para el diseño y análisis a partir de herramientas que permitan calcular la estabilidad, capacidad de carga, la interacción con el suelo, entre otros. Primero, para el modelamiento en el software GEO5 se toman en cuenta algunas configuraciones iniciales de análisis de muro como la metodología de verificación que se da a través de factores de seguridad, y que tanto el cálculo de las presiones activa y pasiva de la tierra se realizan en base a la teoría de Coulomb. En esta primera sección se insertan las propiedades que presenta el gavión y la malla electrosoldada especificadas en el caso de estudio.

Una vez que se define el material que se va a utilizar, se procede a realizar la geometría que está conformada como se muestra en la Figura 3.1. Además, tanto para el relleno como para el suelo de fundación, se utilizan las propiedades del caso de estudio pertenecientes a la arcilla, como se detalla en la Tabla 3.1. Asimismo, para el relleno se

considera un ángulo de talud (α) de 45° y se utilizan los valores del muro-terreno presentados en el apartado de Introducción y Parámetros geométricos del presente capítulo, insertando así en el programa GEO5 la data necesaria correspondiente al caso de estudio. A continuación, la Figura 3.2 y Figura 3.3 muestra la geometría base del estudio en Geo5, realizada tanto en 2D como en 3D junto con la sobrecarga mencionada.

Figura 3.2

Vista de superficie

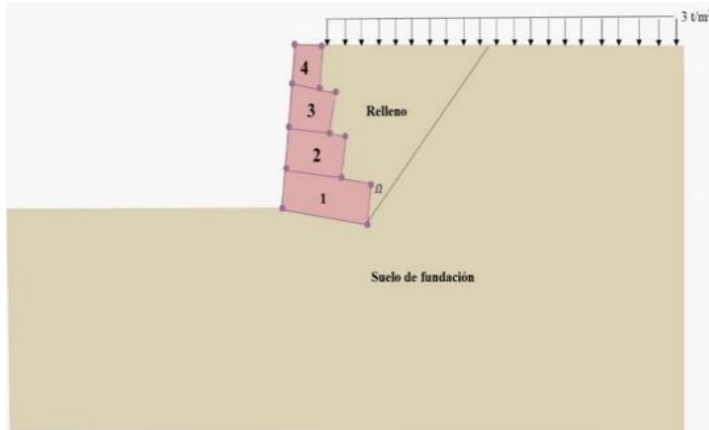
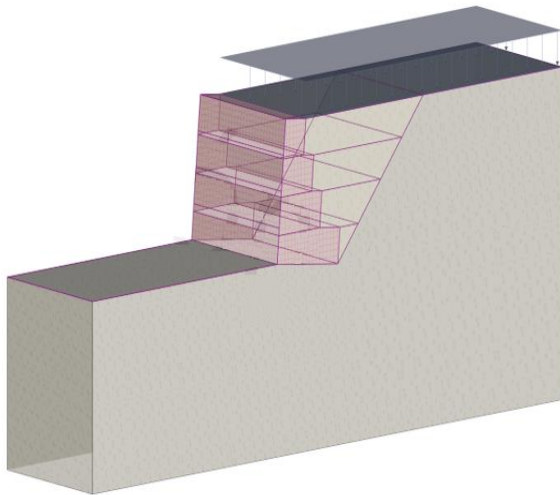


Figura 3.3

Proyección tridimensional



3.3.1. Verificación del equilibrio del muro

La verificación se realiza en base al volcamiento y deslizamiento, donde se obtienen factores de seguridad de 3.79 y 2.81 respectivamente siendo ambos casos satisfactorios, ya que son mayores al valor mínimo establecido por la normativa E.050, el cual es de 1.50. A continuación se muestra la Tabla 3.2 en donde se resumen las verificaciones.

Tabla 3.2

Valores para la verificación del muro

Momento estabilizador (kNm/m)	471.78
Momento de volcamiento (kNm/m)	124.37
FS _{volcamiento}	3.79
Fuerza horizontal resistente (kNm/m)	153.98
Fuerza horizontal activa (kNm/m)	54.74
FS _{deslizamiento}	2.81

En la Figura 3.4 se observan las fuerzas actuantes en el gavión, siendo estas el peso-muro, peso-cuña de tierra, presión activa y la carga (Q); cabe señalar que estas 2 últimas presentan un vector fuerza inclinado, por lo cual en la Tabla 3.3 se observan los valores y puntos de aplicación de las fuerzas según los ejes X y Z ya predeterminados por el programa GEO5.

Figura 3.4

Fuerzas actuantes en el caso de estudio

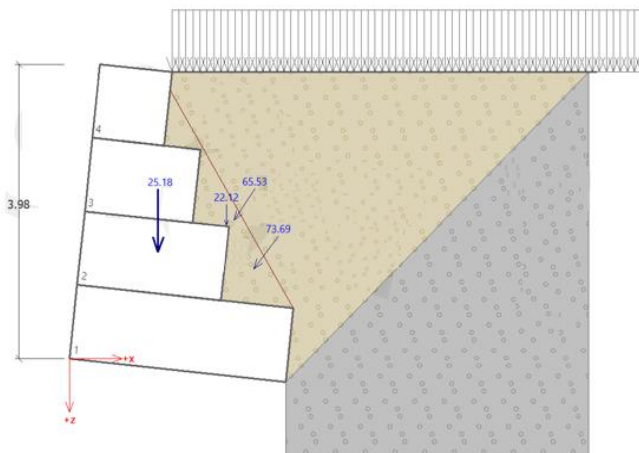
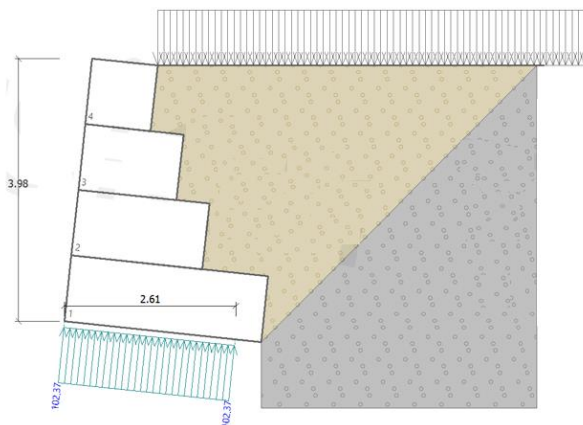


Tabla 3.3*Valores y puntos de aplicación de las fuerzas actuantes*

Nro.	Fuerza	Fx	Fz	Puntos de aplicación	
		[kN/m]	[kN/m]	x [m]	z [m]
1	Peso-muro	0.00	125.18	1.22	-1.44
2	Peso-cuña de tierra	0.00	22.12	2.17	-1.80
3	Presión activa	-44.95	58.39	2.54	-1.21
4	Carga (Q)	-37.36	53.83	2.27	-1.87

3.3.2. Verificación de la capacidad portante

La capacidad portante del fondo de la zapata fue de 51.2% de la capacidad portante del terreno de cimentación que por fines técnicos es de 200 kPa obteniendo así un esfuerzo máximo en el fondo de la zapata (σ) de 102.37 kPa, como se observa en la Figura 3.4. También se muestra el resumen de los valores obtenidos en la Tabla 3.4 en cuanto al $FS_{\text{capacidad portante}}$ que es 1.61 el cual cumple con el factor mínimo establecido que es de 1.00. En esta sección el programa también proporciona el valor de la fuerza normal y que, junto con los valores de verificación de volcamiento y deslizamiento, se calcula la excentricidad de la resultante $e=0.20$ m.

Figura 3.5*Capacidad portante en el caso de estudio***Tabla 3.4***Carga de diseño de la capacidad portante*

Momento (kNm/m)	52.65
Resistencia al corte (kNm/m)	53.98
Esfuerzo de la zapata (kPa)	102.37
Fuerza normal (kNm/m)	266.70
Excentricidad (m)	0.20

Máximo esfuerzo (kPa)	123.99
FS _{capacidad portante}	1.61

3.3.3. Verificación general del muro

Para esta sección se analizan las juntas debajo de cada bloque con sus respectivos valores y los puntos de aplicación de las fuerzas actuantes, como se muestra en la Tabla 3.5, para así obtener los porcentajes para volcamiento, deslizamiento, presión horizontal y diaclasa entre bloques mostrados en la Tabla 3.6. Asimismo, en la Figura 3.6 se observan las fuerzas ejercidas en para cada junta por separado.

Como se puede observar en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 las 3 juntas que conforman el caso de estudio son aceptables para los parámetros de volcamiento, deslizamiento, presión lateral y diaclasa entre bloques, ya que ninguno superó el 100%.

Figura 3.6
Juntas debajo del bloque 3

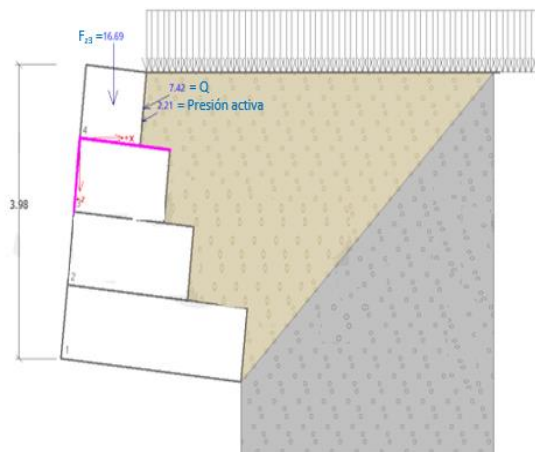


Figura 3.7
Juntas debajo del bloque 2

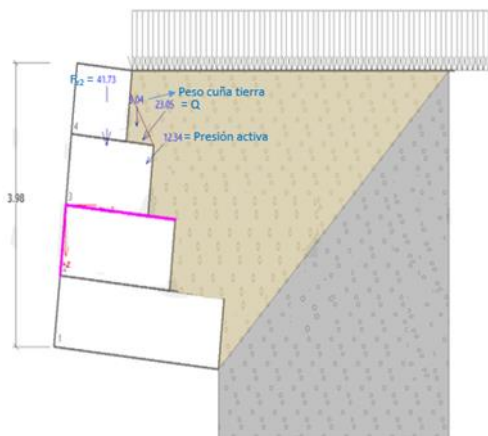


Figura 3.8
Juntas debajo del bloque 1



Tabla 3.5
Valores y puntos de aplicación de las fuerzas actuantes en los bloques

Fuerzas	Verificaciones para el bloque 1				Verificaciones para el bloque 2				Verificaciones para el bloque 3			
	Fx	Fz	Puntos de aplicación		Fx	Fz	Puntos de aplicación		Fx	Fz	Puntos de aplicación	
	[kN/m]	[kN/m]	x [m]	z [m]	[kN/m]	[kN/m]	x [m]	z [m]	[kN/m]	[kN/m]	x [m]	z [m]
Peso-muro	---	75.11	0.93	-1.19	---	41.73	0.74	-0.83	0	16.69	0.55	-0.44
Peso-cuña de tierra	---	3.04	1.79	-1.05	---	3.04	1.29	-1.1	---	---	---	---
Peso-cuña de tierra	---	3.04	1.39	-2.1	---	---	---	---	---	---	---	---
Presión activa	-22.68	23.51	1.84	-0.9	-9.42	7.98	1.46	-0.58	-2.02	0.9	1.03	-0.23
Q	-25.46	29.93	1.71	-1.39	16.12	16.48	1.4	-0.91	-6.78	3.02	1.05	-0.39

Tabla 3.6
Verificaciones de las juntas

	Junta debajo del bloque 3	Junta debajo del bloque 2	Junta debajo del bloque 1
Volcamiento	35.30%	43.50%	48.20%
Deslizamiento	30.00%	36.90%	41.10%
Presión horizontal	13.30%	25.90%	43.10%
Diaclasa entre bloques	13.30%	25.90%	43.10%

3.3.4. Verificación del análisis global

En esta sección se muestra el análisis global realizado con el método de Bishop debido a que teóricamente es el método con mayor precisión y flexibilidad de caso a comparación de otros métodos, utilizando la optimización como tipo de análisis. En la Figura 3.6 se observa la superficie de deslizamiento circular que abarcó el análisis y en

la Tabla 3.7 se detalla la verificación de la estabilidad del talud en general realizado por el método mencionado, en donde se obtiene un factor de seguridad aceptable.

Figura 3.9
Superficie de deslizamiento circular

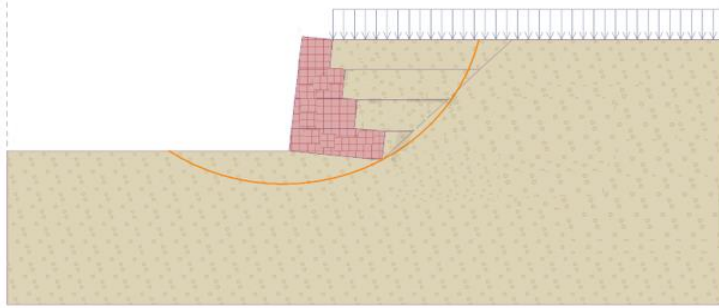


Tabla 3.7
Verificación de la estabilidad del talud (Bishop)

Suma de fuerzas activas	$F_a=237.45$ kN/m
Suma de fuerzas pasivas	$F_p=331.63$ kN/m
Momento de deslizamiento	$M_a=1560.03$ kN/m
Momento estabilizador	$M_p=2178.81$ kN/m
Factor de seguridad global	$FS = 1.40 > 1.30$

Cabe señalar que las fuerzas tanto pasivas y activas pertenecen a la verificación total del talud junto a los demás elementos, como el momento de deslizamiento y el estabilizador que proporciona el GEO5. Asimismo, se muestra la Tabla 3.8 donde el $FS_{volcamiento}$ es de 3.79 con relación a los valores del momento estabilizador como de volcamiento, el $FS_{deslizamiento}$ es de 2.81 el cual se obtuvo mediante la división de los valores de la fuerza horizontal resistente y activa, y finalmente el $FS_{capacidad\ portante}$ con un valor de 1.61. Se muestra un resumen de los valores comparables con el estudio analítico del caso de estudio.

Tabla 3.8
Resumen de los valores comparables en el GEO5

Momento estabilizador (kNm/m)	471.78
Momento de volcamiento (kNm/m)	124.37
$FS_{volcamiento}$	3.79
Fuerza horizontal resistente (kNm/m)	153.98
Fuerza horizontal activa (kNm/m)	54.74
$FS_{deslizamiento}$	2.81
Fuerza normal (kNm/m)	266.70
Excentricidad (m)	0.20
Máximo esfuerzo (Kpa)	123.99
$FS_{capacidad\ portante}$	1.61

Capítulo 4: Análisis paramétrico usando el método analítico

4.1. Introducción

Los cálculos para la verificación de la estabilidad del muro de contención de gaviones se encuentran en los anexos A, B, C y D bajo los mismos parámetros usados con el método de equilibrio límite. De acuerdo con la ecuación (2.4) se calcula el ángulo formado por el plano de empuje con la horizontal (β) que implica a la altura, base, ancho de corona y la inclinación del muro respecto a la vertical, dando como resultado $\beta=69.435^\circ$. Dicho valor es parte de la ecuación del coeficiente de empuje activo (K_a) mencionado en la ecuación (2.5) que implica al ángulo del talud con el muro sobre la horizontal (ε) de 0° , ángulo de fricción interna del terreno (φ_t) de 30° , ángulo de fricción interna del gavión (δ) de 30° y el ángulo formado por el plano del empuje con la horizontal (β) de 69.435° , obteniendo el valor del coeficiente de empuje activo (K_a) de 0.509. Cabe señalar que, según De Almeida (2008), se considera δ igual a φ_t de 30° en el caso de estudio de los muros de gaviones.

El siguiente paso consiste en calcular la altura donde actúa el empuje activo usando la ecuación (2.3), resultando $H=4.396$ m. Debido a la existencia de una sobrecarga sobre el terreno se emplea la ecuación (2.6) en función de la sobrecarga y el peso específico del terreno, resultando una altura equivalente de $h_s=1.667$ m. En base a los resultados obtenidos, se procede a calcular el empuje activo en el muro (E_a) usando la ecuación (2.8), resultando un valor de $E_a=15.561$ ton/m. Seguido de ello se calcula la altura del punto de aplicación (d), mostrado en la Figura 2.8, usando la ecuación (2.7), resultando 1.468 m.

4.2. Estabilidad contra deslizamiento

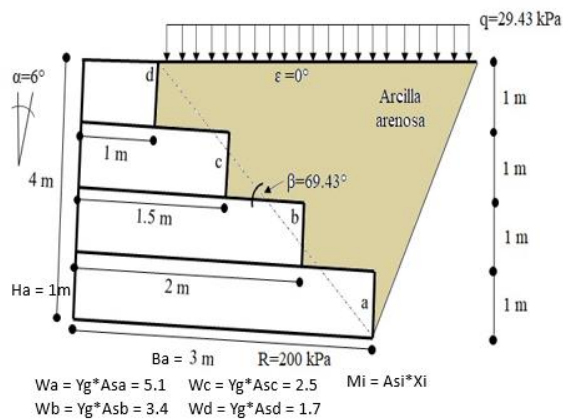
Este caso hace referencia a la capacidad de resistencia de la estructura ante fuerzas externas que podrían provocar su desplazamiento con respecto al terreno que lo contiene. Para verificar la seguridad contra el deslizamiento se debe hallar las componentes verticales (E_v) y horizontales (E_h) del empuje activo (E_a) de 15.561 ton/m, el ángulo formado por el plano y la horizontal (β) y el ángulo de fricción (δ); los cuales usando las ecuaciones (2.9) y (2.10) resultan en 12.0186 y 9.885 t/m, respectivamente, para luego

calcular el coeficiente de deslizamiento (CD) que es el cociente de las fuerzas resistentes (H_{res}) y las fuerzas activas (H_{act}), el cual debe ser mayor o igual que 1.5. Para este cálculo se debe hallar el peso propio de la estructura, teniendo en cuenta la posición de cada bloque de gavión (X_i) con su respectivo momento (M_i), como se muestra en la Tabla 4.1, obteniéndose un valor de W de 12.76 t. Usando las ecuaciones (2.13) y (2.14), las fuerzas resistentes y activas resultan en 17.41 y 9.83 t/m, respectivamente, con una equivalencia de 170.82 y 96.44 kN/m. Por lo tanto, usando la ecuación (2.15) el CD resulta 1.771.

Tabla 4.1
Metrado de cargas

W	W (t)	X_i	M_i
Wa	5.1	1.5	7.65
Wb	3.4	1	3.4
Wc	2.55	0.75	1.91
Wd	1.7	0.5	0.85
Total	12.76		13.82

Figura 4.1
Especificación del metrado de cargas



4.3. Estabilidad contra volcamiento

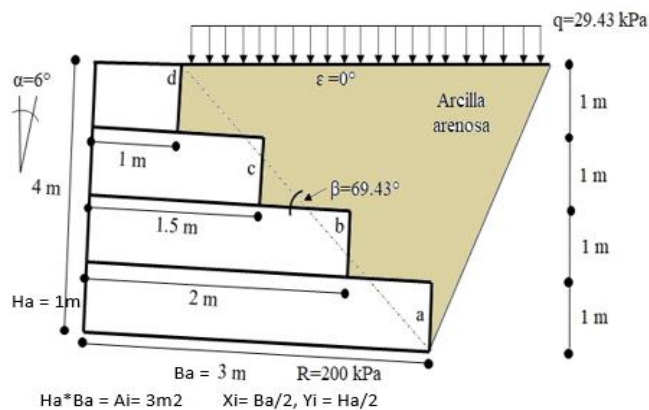
En este apartado se requiere verificar la seguridad contra el volcamiento, asegurándose de que los momentos de volteo sean inferiores al momento resistente. El primer paso consiste en calcular el momento de volcamiento (M_v) teniendo la componente horizontal del empuje activo como componente desestabilizante y la altura del punto de aplicación; usando la ecuación (2.18) resulta un M_v de 14.508 t-m/m el cual es equivalente a 142.33 kNm/m.

Luego con la ecuación (2.20), la distancia horizontal entre el punto de volcamiento ubicado en el punto de giro F como se muestra en la Figura 2.8 y el punto de aplicación resulta en S' de 2.315 m. Con respecto al punto de aplicación del peso S'' , se realiza el cálculo de los centros de gravedad en ambas direcciones, tal como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2
Cálculo de los centros de gravedad

Elemento	A_i (m^2)	X_i (m)	Y_i (m)	$A_i X_i$ (m^3)	$A_i Y_i$ (m^3)
A	3.00	1.50	0.50	4.50	1.50
B	2.00	1.00	1.50	2.00	3.00
C	1.50	0.75	2.50	1.13	3.75
D	1.00	0.50	3.50	0.50	3.50
Total	7.50			8.13	11.75

Figura 4.2
Especificación del cálculo del centro de gravedad



Por lo tanto, X_g es el cociente de $\sum A_i X_i$ y $\sum A_i$, resultando $X_g=1.083$ m; y Y_g el cociente de la sumatoria $\sum A_i Y_i$ y $\sum A_i$, donde se obtiene $Y_g=1.567$ m. Posteriormente, se emplea la ecuación (2.21) obteniéndose $S'' = 1.241$ m. Una vez obtenidos estos dos valores se emplea la ecuación (2.19), resultando un momento resistente de 44.45 t-m/m, equivalente a 436.09 kNm/m. Finalmente se emplea la ecuación (2.22) dando como valor de coeficiente de volteo 3.064.

4.4. Estabilidad por capacidad portante

El esfuerzo en los suelos de los muros de gaviones se refiere a la fuerza interna generada dentro del suelo debido a la presión ejercida por el propio muro. Esta carga

vertical aplicada por el muro produce un esfuerzo hacia abajo que se transmite a través del suelo, generando esfuerzos en el interior de este.

Como primer paso, se procede a calcular la resultante utilizando los datos obtenidos en el apartado anterior, tales como el peso del muro (W), las componentes verticales (E_v) y horizontales (E_h) del empuje, y el ángulo (α); mediante la aplicación de la ecuación (2.25) se obtiene un valor de N igual a 25.674 t/m equivalente a 251.86 kN/m.

Con respecto a la excentricidad (e), se utiliza la ecuación (2.24) que relaciona a la base del gavión junto con los momentos de volteo y resistente, dando como resultado el valor de 0.336 m, cumpliendo con la condición de ser menor que la sexta parte de la base del gavión. Finalmente, se calculan los esfuerzos resultantes con la ecuación (2.23), resultando los esfuerzos de 1.4268 kg/cm² y 0.2848 kg/cm², siendo ambos menores que la capacidad portante del terreno, y siendo el primero el máximo esfuerzo, equivalente a 139.97 kPa.

4.5. Diseño y verificación de la estabilidad del muro de gavión

A partir del caso de estudio y los valores de entrada expuestos, se obtienen los siguientes datos para el ángulo formado por el plano de empuje y la horizontal (β), coeficiente de empuje activo (K_a), altura del empuje (H), altura de la carga (h_s), empuje activo (E_a) y la altura del punto de aplicación (d), como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3

Valores para la estabilidad del gavión

β	69.44°
K_a	0.51
E_a	15.56 t/m
H	4.40 m
h_s	1.67 m
d	1.47 m

La verificación de equilibrio de la estructura está compuesta por la verificación del factor de seguridad contra deslizamiento, volcamiento y de capacidad portante. Se presenta la Tabla 4.4, en la cual se muestran los resultados obtenidos para las dos primeras verificaciones ya mencionadas donde se calculan los valores para la fuerza horizontal resistente, fuerza horizontal activa y su respectivo coeficiente de deslizamiento. Asimismo, se presentan los cálculos del momento resistente o estabilizador, momento de

volcamiento y el factor de seguridad. Finalmente, se muestran los cálculos correspondientes a la verificación de los esfuerzos en el suelo donde se calculan las fuerzas normales, y a partir de ello, junto con la base y los momentos se obtiene la excentricidad de la resultante, para finalmente obtener el máximo esfuerzo del suelo.

Tabla 4.4

Valores de la estabilidad del muro y esfuerzos del suelo

Momento estabilizador (kNm/m)	436.09
Momento de volcamiento (kNm/m)	142.33
FS _{volcamiento}	3.06
Fuerza horizontal resistente (kNm/m)	170.82
Fuerza horizontal activa (kNm/m)	96.44
FS _{deslizamiento}	1.77
Fuerza normal (kNm/m)	251.90
Excentricidad (m)	0.33
Máximo esfuerzo (Kpa)	139.97
FS _{capacidad portante}	1.43

Capítulo 5: Resultados del análisis

Se utiliza el programa Excel para calcular, graficar y detallar los resultados. La base (B) de 3 m y la altura (H) de 4 m son fijos y se parametriza el ángulo de inclinación del muro (α), el ángulo de inclinación del terreno (ε) y la sobrecarga (q) en un rango de 5 valores distintos para cada uno obteniendo un total de 750 puntos a analizar.

5.1. Variación del factor de seguridad por volcamiento

Se parametriza el ángulo de inclinación del muro (α) que varía desde los 0° hasta los 12° a lo largo del eje X y que al mismo tiempo se compara con el ángulo de inclinación del terreno (ε) que presenta cinco valores que van desde los 0° hasta los 24° . Primero analizando los efectos de carga para el método de equilibrio limite se observan que los factores de seguridad presentaron un incremento exponencial en cada caso independientemente del valor de la carga. En este caso se logra presenciar un crecimiento porcentual máximo del 54% aproximadamente. El gráfico en la Figura 5.1 muestra que el Factor de Seguridad contra el volcamiento ($FS_{volcamiento}$) aumenta consistentemente con el incremento del ángulo (α), indicando una mayor estabilidad a mayores ángulos. Sin embargo, a medida que el ángulo de inclinación inicial (ε) aumenta, el $FS_{volcamiento}$ disminuye, sugiriendo que una mayor inclinación inicial reduce la estabilidad. En resumen, la estabilidad contra el volcamiento mejora con un mayor (α) pero se ve afectada negativamente por un mayor (ε) destacando la importancia de estos parámetros en el diseño estructural para mantener la estabilidad en condiciones variables.

Figura 5.1

Efecto de la carga $q = 0\text{ kPa}$ para $FS_{volcamiento}$ mediante el MEL

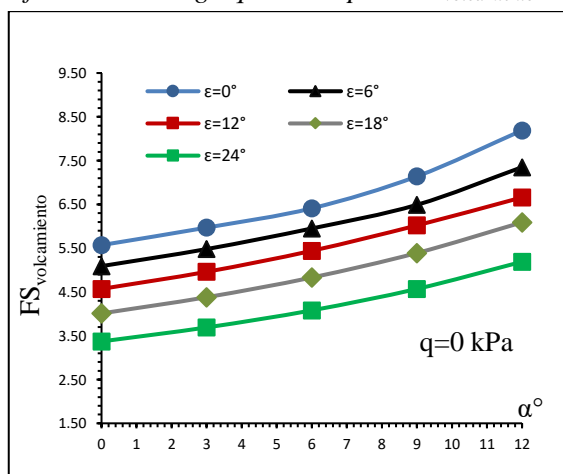
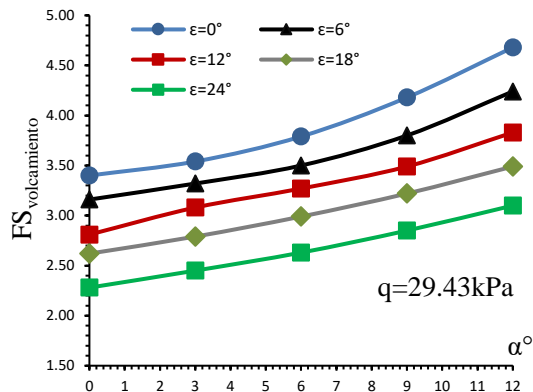


Figura 5.2

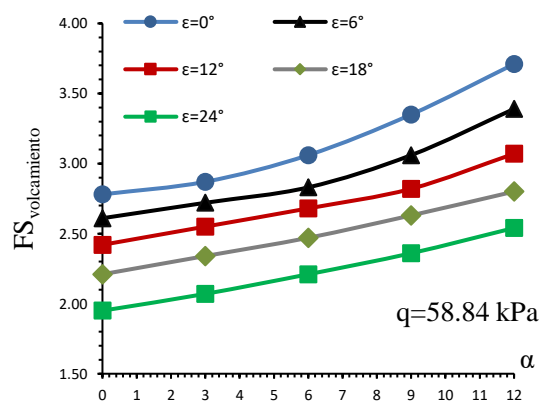
Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL



El gráfico en la Figura 5.2 muestra el efecto de una carga $q = 29.43\text{ kPa}$ en el Factor de Seguridad contra el volcamiento ($FS_{\text{volcamiento}}$) utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL). Se observa que el $FS_{\text{volcamiento}}$ aumenta con el incremento del ángulo (α), similar al comportamiento observado en el gráfico anterior. Sin embargo, la magnitud del $FS_{\text{volcamiento}}$ es menor en comparación con la situación sin carga ($q = 0\text{ kPa}$). A medida que el ángulo de inclinación inicial (ϵ) aumenta, el $FS_{\text{volcamiento}}$ disminuye, lo que indica una reducción de la estabilidad. En resumen, una carga de 29.43 kPa reduce el $FS_{\text{volcamiento}}$ en comparación con la ausencia de carga, pero la estabilidad sigue mejorando con un mayor (α) y disminuye con un mayor (ϵ).

Figura 5.3

Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL

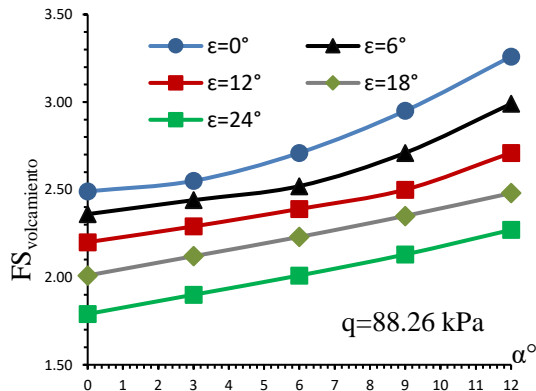


El gráfico en la Figura 5.3 muestra el efecto de una carga $q = 58.84\text{ kPa}$ en el $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL. Aquí también se observa un aumento del $FS_{\text{volcamiento}}$ con el incremento de (α), aunque los valores son notablemente más bajos que en los casos anteriores,

reflejando un impacto significativo de la carga aplicada. Al igual que en las otras figuras, el $FS_{volcamiento}$ disminuye con un aumento en (ϵ) . En resumen, una carga de 58.84 kPa disminuye considerablemente el $FS_{volcamiento}$ en comparación con cargas menores o ausencia de carga, pero la tendencia general de estabilidad sigue mejorando con un mayor (α) y disminuye con un mayor (ϵ) .

Figura 5.4

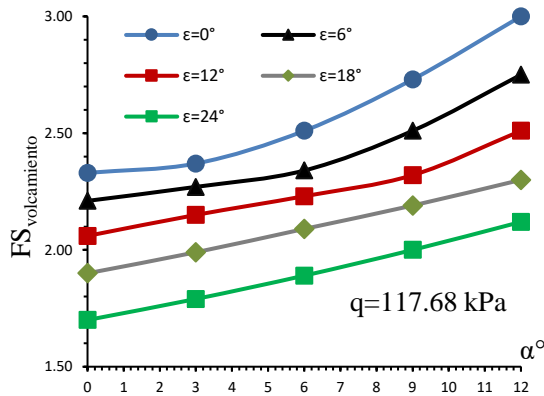
Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{volcamiento}$ mediante el MEL



El gráfico en la Figura 5.4 muestra el efecto de una carga $q = 88.26\text{ kPa}$ en el Factor de Seguridad contra el deslizamiento ($FS_{volcamiento}$) utilizando el Método de Equilibrio Límite (MEL). Como en los gráficos anteriores, se observa un incremento del $FS_{volcamiento}$ con el aumento del ángulo (α), indicando que la estabilidad mejora con mayores ángulos. Sin embargo, los valores absolutos del $FS_{volcamiento}$ son más bajos que en los gráficos con cargas menores, lo que indica que una carga de 88.26 kPa reduce la estabilidad en comparación con cargas más pequeñas. Además, el $FS_{volcamiento}$ disminuye con el aumento del ángulo de inclinación inicial (ϵ), similar a los comportamientos anteriores. En resumen, una carga de 88.26 kPa disminuye la estabilidad contra el deslizamiento en comparación con cargas menores, pero la estabilidad sigue mejorando con un mayor (α) y disminuye con un mayor (ϵ).

Figura 5.5

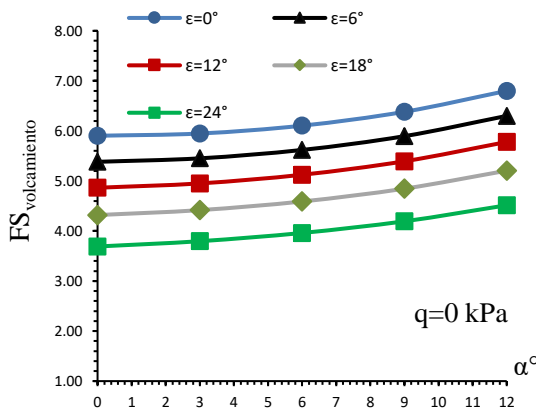
Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL



El gráfico en la Figura 5.5 muestra el efecto de una carga $q = 117.68\text{ kPa}$ en el $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el MEL. Este gráfico también muestra un incremento del $FS_{\text{volcamiento}}$ con el aumento de (α) , aunque los valores son notablemente más bajos que en los casos con cargas menores, reflejando un impacto aún mayor de la carga aplicada. Como en los otros gráficos, el $FS_{\text{volcamiento}}$ disminuye con un aumento en (ϵ) . En resumen, una carga de 117.68 kPa disminuye considerablemente el $FS_{\text{volcamiento}}$ en comparación con cargas menores o ausencia de carga, pero la tendencia general de estabilidad sigue mejorando con un mayor (α) y disminuye con un mayor (ϵ) .

Figura 5.6

Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico



Posterior al análisis mediante el método de equilibrio límite, se realizó el mismo análisis por medio del método analítico denotando que, a diferencia del MEL, su crecimiento no es significativamente alto debido a que presenta un crecimiento porcentual de máximo de 22%. Estos gráficos de crecimiento que varían según la carga q aplicada son observables en la Figuras 5.6 a la Figura 5.10.

Figura 5.7

Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico

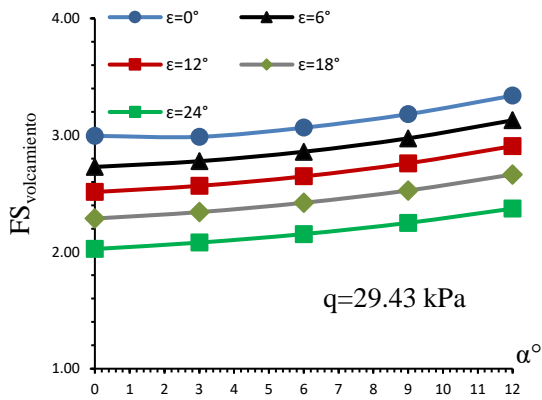


Figura 5.8

Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico

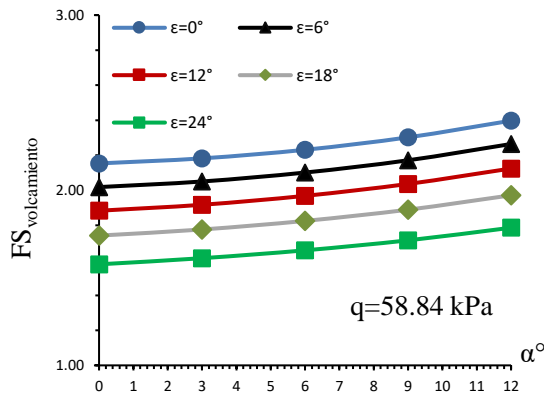


Figura 5.9

Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico

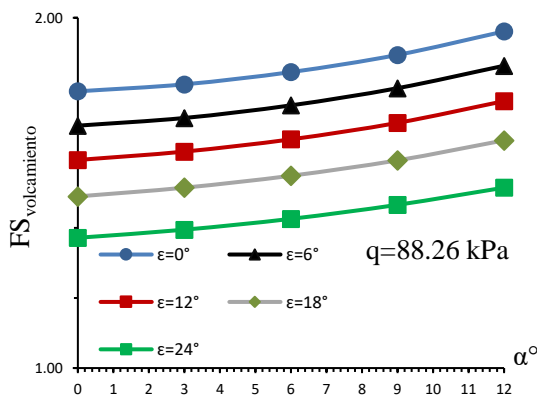
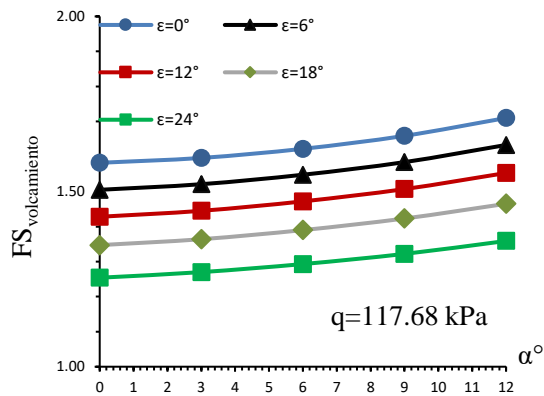


Figura 5.10

Efecto de la carga $q = 117.68 \text{ kPa}$ para $FS_{\text{volcamiento}}$ mediante el método analítico



De igual manera se puede observar a mayor detalle esta variación entre ambos métodos en la Tabla 5.1 donde se nota claramente que los factores de seguridad presentados por el programa GEO5 que hace uso del método de equilibrio limite son mayores a los valores a los obtenido por el método analítico, denotando así que el método de equilibrio limite es más seguro y ofrece mejores valores que el método analítico. A su vez, se observa que a partir del caso donde la carga q tiene un valor de 88.26 kPa donde se comienza a observar valores de factores de seguridad inestables.

Tabla 5.1*FS_{volcamiento} mediante el método de equilibrio límite y método analítico.*

		FS _{volcamiento}									
		0°		3°		6°		9°		12°	
		GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico
ε	α										
	0°	5.57	5.90	5.97	5.95	6.41	6.11	7.14	6.38	8.19	6.80
q=0 kPa	6°	5.09	5.38	5.48	5.45	5.95	5.62	6.49	5.90	7.35	6.30
	12°	4.57	4.86	4.96	4.95	5.44	5.12	6.02	5.39	6.66	5.78
	18°	4.01	4.32	4.38	4.42	4.83	4.59	5.39	4.85	6.09	5.21
	24°	3.37	3.69	3.69	3.80	4.08	3.96	4.57	4.19	5.19	4.51
	0°	3.40	2.99	3.54	2.99	3.79	3.06	4.18	3.18	4.68	3.34
q=29.43 kPa	6°	3.16	2.73	3.32	2.78	3.5	2.86	3.80	2.97	4.24	3.13
	12°	2.81	2.51	3.08	2.57	3.27	2.65	3.49	2.76	3.83	2.91
	18°	2.62	2.29	2.79	2.34	2.99	2.42	3.22	2.53	3.49	2.66
	24°	2.28	2.03	2.45	2.08	2.63	2.15	2.85	2.25	3.1	2.37
	0°	2.78	2.15	2.87	2.18	3.06	2.23	3.35	2.30	3.71	2.40
q=58.84 kPa	6°	2.61	2.02	2.72	2.05	2.83	2.10	3.06	2.17	3.39	2.26
	12°	2.42	1.88	2.55	1.92	2.68	1.97	2.82	2.04	3.07	2.12
	18°	2.21	1.74	2.34	1.78	2.47	1.83	2.63	1.89	2.8	1.97
	24°	1.95	1.58	2.07	1.61	2.21	1.66	2.36	1.71	2.54	1.79
	0°	2.49	1.79	2.55	1.81	2.71	1.85	2.95	1.89	3.26	1.96
q=88.26 kPa	6°	2.36	1.69	2.44	1.71	2.52	1.75	2.71	1.80	2.99	1.86
	12°	2.20	1.59	2.29	1.62	2.39	1.65	2.50	1.70	2.71	1.76
	18°	2.01	1.49	2.12	1.52	2.23	1.55	2.35	1.59	2.48	1.65
	24°	1.79	1.37	1.9	1.40	2.01	1.43	2.13	1.47	2.27	1.52
	0°	2.33	1.58	2.37	1.60	2.51	1.62	2.73	1.66	3	1.71
q=117.68 kPa	6°	2.21	1.51	2.27	1.52	2.34	1.55	2.51	1.58	2.75	1.63
	12°	2.06	1.43	2.15	1.45	2.23	1.47	2.32	1.51	2.51	1.55
	18°	1.90	1.35	1.99	1.36	2.09	1.39	2.19	1.42	2.3	1.47
	24°	1.70	1.25	1.79	1.27	1.89	1.29	2.00	1.32	2.12	1.36

5.2. Variación del factor de seguridad por deslizamiento

Se hace la parametrización del ángulo de inclinación del muro (α), el cual varía desde los 0° a los 12° cruzando el eje X, el cual es comparado con el eje Y que es representado por el ángulo de inclinación del terreno (ϵ), el cual varía desde un terreno totalmente plano (0°) hasta un talud con un ángulo de 24°. A continuación, se muestra la variación del factor de seguridad por deslizamiento en función de los parámetros mencionados anteriormente bajo la influencia de cinco cargas (q), variando desde los 0 kPa hasta los 117.68 kPa en la Figura 5.11 a la Figura 5.15 empezando con el caso de la aplicación del método de equilibrio límite donde se denota su crecimiento acelerado de los valores de factores de seguridad. Un caso particular se da en el caso de carga q igual a 0 y una inclinación de 0° igualmente donde se obtiene un valor de facto de seguridad de 35.85.

Figura 5.11

Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF

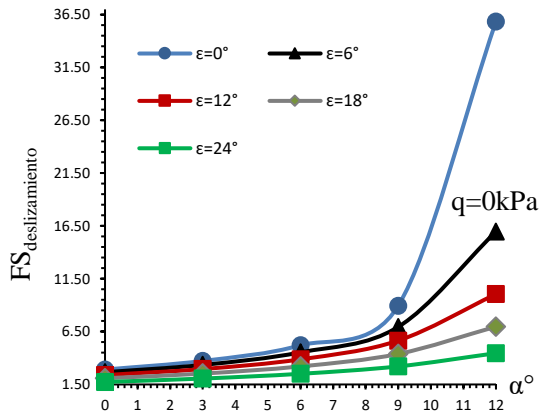


Figura 5.12

Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF

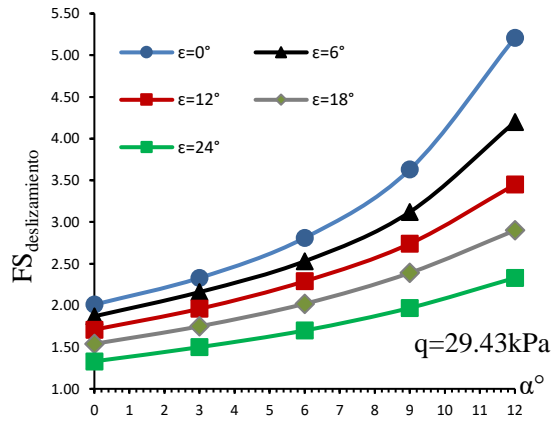


Figura 5.13

Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF

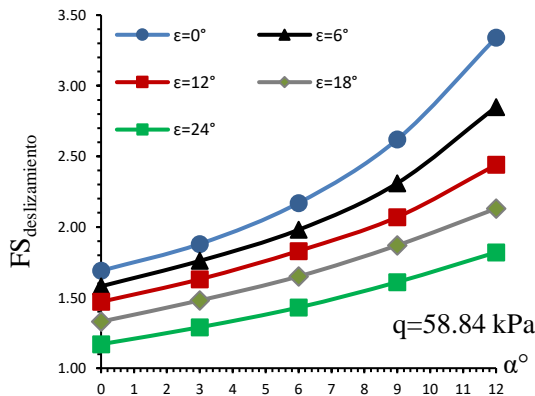


Figura 5.14

Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF

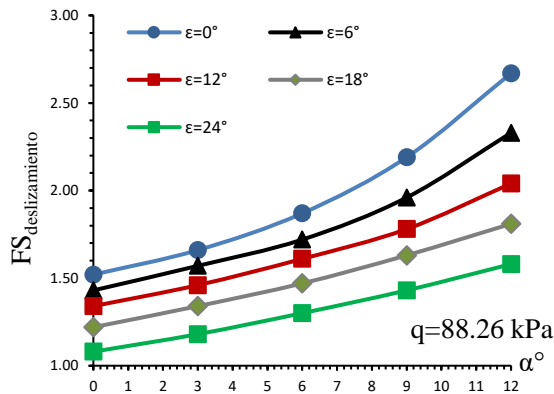
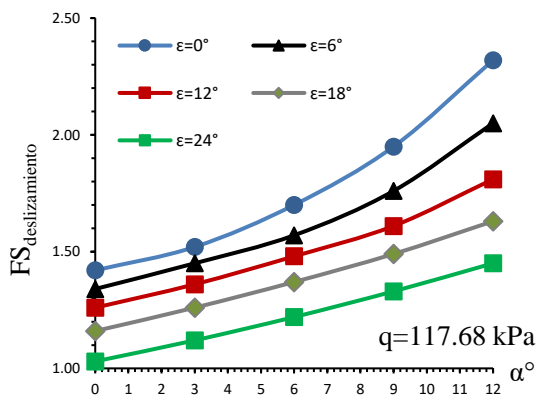


Figura 5.15

Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el MEF



Posterior al análisis mediante el método de equilibrio limite, se realizó el mismo análisis por medio del método analítico denotando que, a diferencia del MEL, su crecimiento es a menor escala o menos perceptible en los gráficos denotando que el cambio de ángulos de inclinación del muro no cambia significativamente los factores de seguridad el cual tuvo un aumento porcentual máximo de 9.72%. Estos gráficos de crecimiento que varían según la carga q aplicada son observables en las figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20.

Figura 5.16

Efecto de la carga $q = 0 \text{ kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico

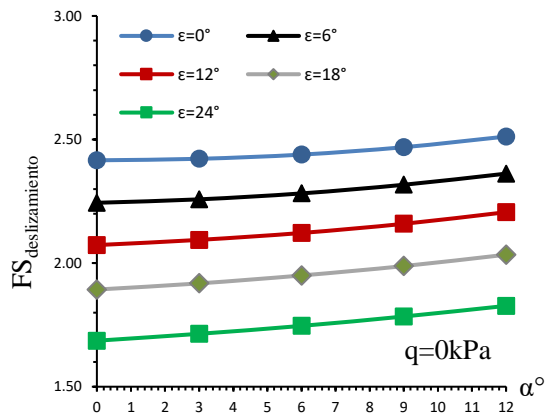


Figura 5.17

Efecto de la carga $q = 29.43 \text{ kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico

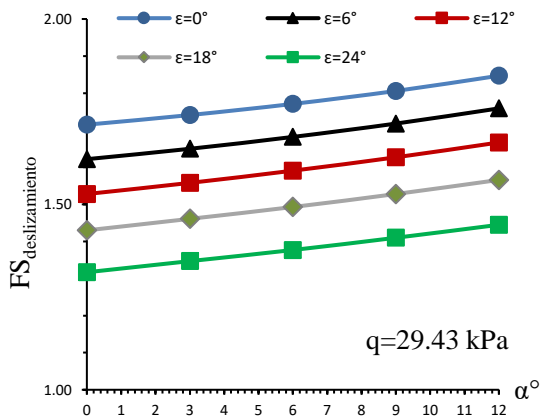


Figura 5.18

Efecto de la carga $q = 58.84 \text{ kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico

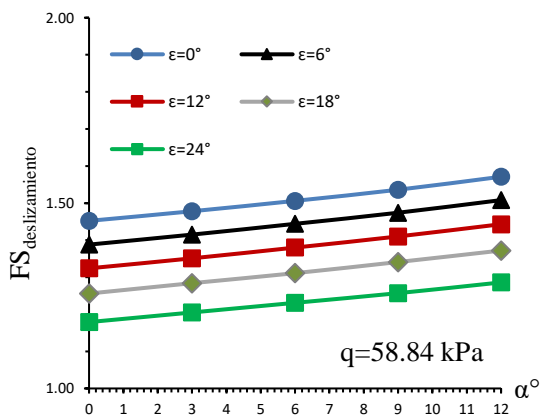


Figura 5.19

Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico

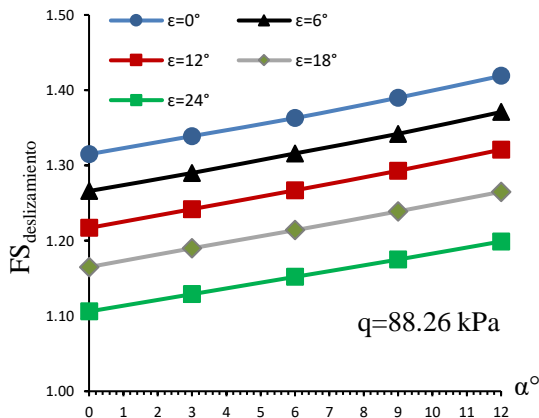
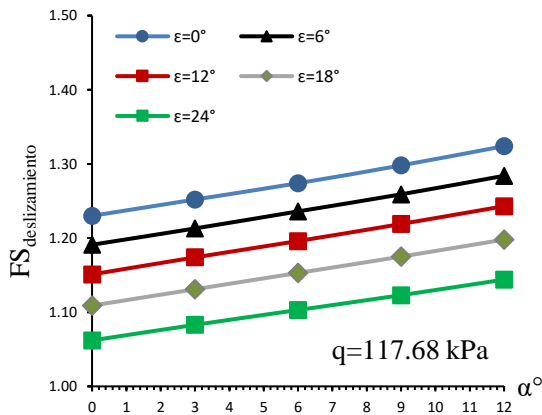


Figura 5.20

Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{deslizamiento}}$ mediante el método analítico



También se puede apreciar en el cuadro resumen que el comportamiento del $FS_{\text{deslizamiento}}$ es igual al del $FS_{\text{volcamiento}}$, ya que es directamente proporcional a los parámetros en análisis, lo cual indica que a medida que el ángulo de inclinación de la estructura y del terreno aumentan, proporcionan mayor resistencia a la estructura, lo cual representa un factor de seguridad más alto. Sin embargo, para el análisis de $FS_{\text{deslizamiento}}$ la estructura falla con una carga de $q=29.43\text{ kPa}$, $\alpha=0^\circ$ y $\epsilon=18^\circ$, lo cual indica que no basta que solo uno de estos parámetros varíe, sino que se tienen que variar ambos para que el factor de seguridad se mantenga seguro hasta valores constructivos factibles. No obstante, conforme aumenta la carga se presentan mayores fallas por deslizamiento, incluso cuando los valores de inclinación tanto de la estructura como del terreno son altos. Tomando en cuenta que se establece un punto de variación de factor de seguridad donde ya no se puede considerar estable, se recomienda trabajar con materiales de relleno con alto peso específico, los cuales estén correctamente compactados, ya que proporcionan

mayor peso propio a la estructura de gavión, ofreciendo mayor fuerza resistente en el cálculo del $FS_{deslizamiento}$.

Tabla 5.2

$FS_{deslizamiento}$ mediante el método de equilibrio límite y método analítico

		$FS_{deslizamiento}$									
		0°		3°		6°		9°		12°	
		GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico
α	ϵ										
q=0 kPa	0°	2.91	2.42	3.73	2.42	5.21	2.44	8.95	2.47	35.85	2.51
	6°	2.66	2.24	3.35	2.26	4.54	2.28	6.95	2.32	15.97	2.36
	12°	2.39	2.07	2.96	2.09	3.88	2.12	5.65	2.16	10.05	2.21
	18°	2.09	1.89	2.53	1.92	3.21	1.95	4.39	1.99	6.97	2.03
	24°	1.74	1.69	2.06	1.71	2.51	1.75	3.21	1.78	4.46	1.83
q=29.43 kPa	0°	2.01	1.72	2.33	1.74	2.81	1.77	3.63	1.81	5.21	1.85
	6°	1.87	1.62	2.16	1.65	2.53	1.68	3.12	1.72	4.2	1.76
	12°	1.71	1.53	1.96	1.56	2.29	1.59	2.74	1.63	3.45	1.67
	18°	1.54	1.43	1.75	1.46	2.02	1.49	2.39	1.53	2.9	1.57
	24°	1.33	1.32	1.5	1.35	1.7	1.38	1.97	1.41	2.33	1.45
q=58.84 kPa	0°	1.69	1.45	1.88	1.48	2.17	1.51	2.62	1.54	3.34	1.57
	6°	1.58	1.39	1.76	1.42	1.98	1.44	2.31	1.47	2.85	1.51
	12°	1.47	1.32	1.63	1.35	1.83	1.38	2.07	1.41	2.44	1.44
	18°	1.33	1.26	1.48	1.28	1.65	1.31	1.87	1.34	2.13	1.37
	24°	1.17	1.18	1.29	1.21	1.43	1.23	1.61	1.26	1.82	1.29
q=88.26 kPa	0°	1.52	1.32	1.66	1.34	1.87	1.36	2.19	1.39	2.67	1.42
	6°	1.43	1.27	1.57	1.29	1.72	1.32	1.96	1.34	2.33	1.37
	12°	1.34	1.22	1.46	1.24	1.61	1.27	1.78	1.29	2.04	1.32
	18°	1.22	1.17	1.34	1.19	1.47	1.21	1.63	1.24	1.81	1.27
	24°	1.08	1.11	1.18	1.13	1.3	1.15	1.43	1.18	1.58	1.20
q=117.68 kPa	0°	1.42	1.23	1.52	1.25	1.7	1.27	1.95	1.30	2.32	1.32
	6°	1.34	1.19	1.45	1.21	1.57	1.24	1.76	1.26	2.05	1.28
	12°	1.26	1.15	1.36	1.17	1.48	1.20	1.61	1.22	1.81	1.24
	18°	1.16	1.11	1.26	1.13	1.37	1.15	1.49	1.18	1.63	1.20
	24°	1.03	1.06	1.12	1.08	1.22	1.10	1.33	1.12	1.45	1.14

5.3. Variación del factor de seguridad por capacidad portante

Como en los dos casos anteriores se hace la parametrización del ángulo de inclinación del muro (α), el cual varía desde los 0° a los 12° cruzando el eje X, el cual es comparado con el eje Y que es representado por el ángulo de inclinación del terreno (ϵ), el cual varía desde un terreno totalmente plano (0°) hasta un talud con un ángulo de 24°. Con esto en cuenta, se muestra la variación del factor de seguridad por capacidad portante en función de los parámetros mencionados anteriormente bajo la influencia de cinco cargas (q), variando desde los 0 kPa hasta los 117.68 kPa en la figura 5.21, 5.22,

5.23, 5.24 y 5.25 empezando con el caso de la aplicación del método de equilibrio limite donde se percibe que, al igual que los casos anteriores, su crecimiento en el valor de factor de seguridad es exponencial el cual se obtuvo un aumento porcentual máximo del 63% denotando los aumentos según se aumente el ángulo del talud donde el mayor valor obtenido fue de 3.01.

Figura 5.21

Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF

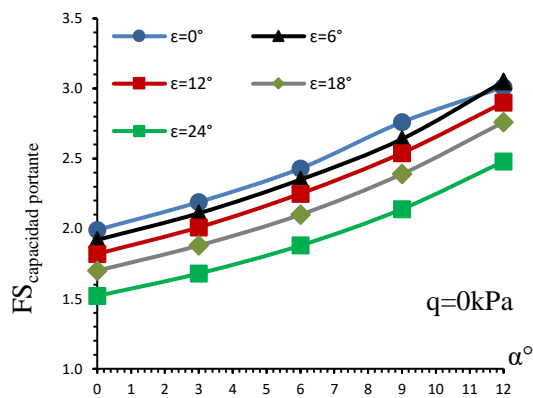


Figura 5.22

Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF

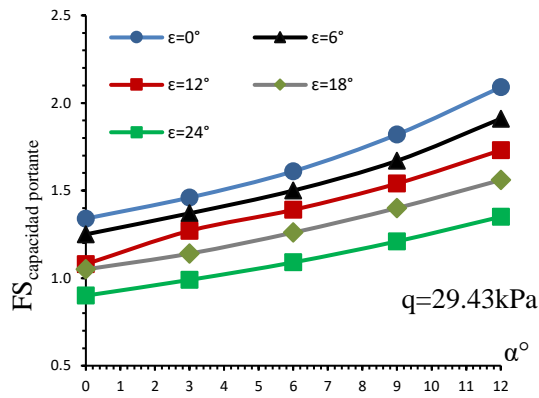


Figura 5.23

Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF

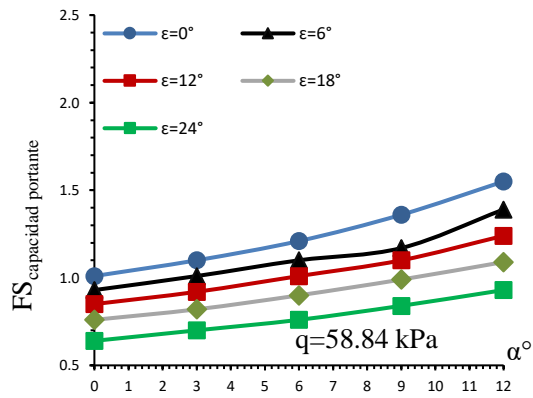


Figura 5.24

Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF

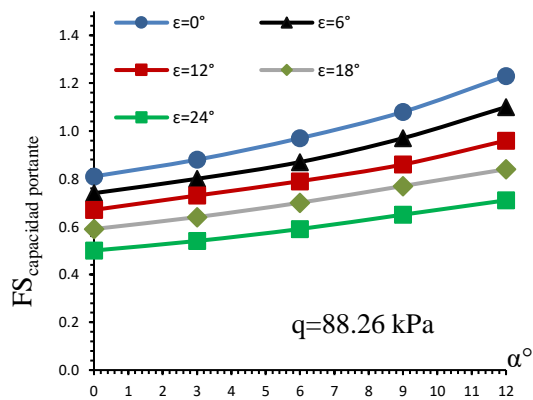
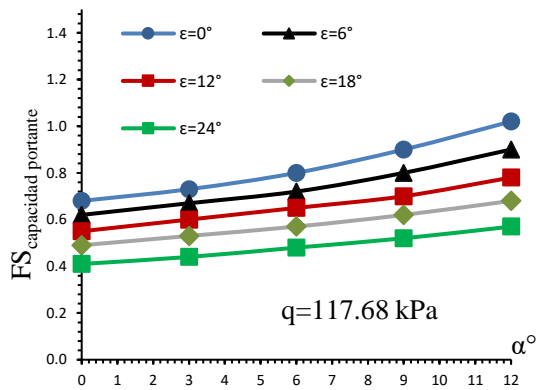


Figura 5.25

Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el MEF



Culminado el análisis mediante el método de equilibrio limite, se realizó el mismo proceso por medio del método analítico. Estos gráficos de crecimiento varían según la carga q aplicada, como se aprecia en las figuras 5.26, 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30 con un aumento porcentual máximo del 80%.

Figura 5.26

Efecto de la carga $q = 0\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico

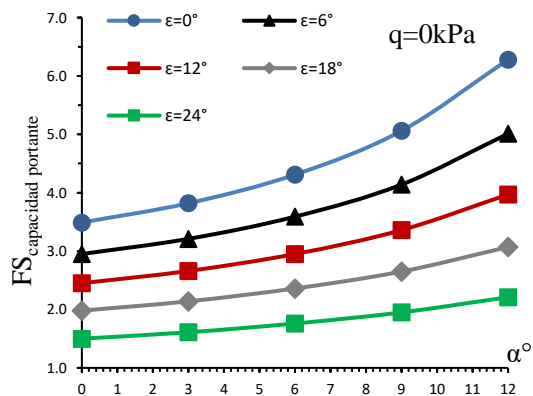


Figura 5.27

Efecto de la carga $q = 29.43\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico

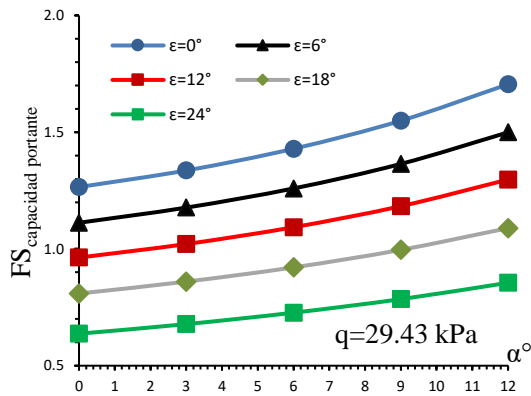


Figura 5.28

Efecto de la carga $q = 58.84\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico

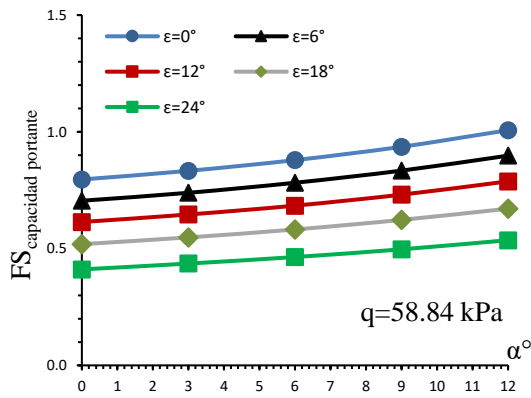


Figura 5.29

Efecto de la carga $q = 88.26\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico

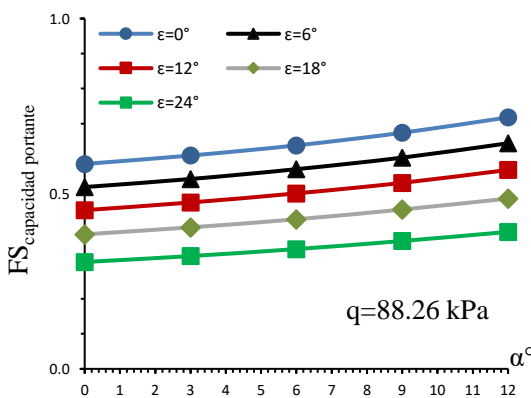
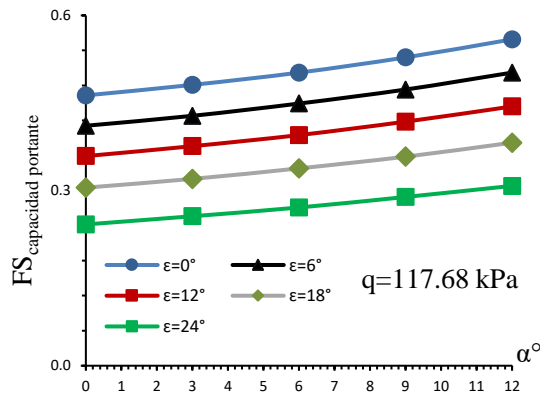


Figura 5.30

Efecto de la carga $q = 117.68\text{kPa}$ para $FS_{\text{capacidad portante}}$ mediante el método analítico



También se puede apreciar en el cuadro resumen que en este apartado el $FS_{\text{capacidad portante}}$ es seguro para todos los casos en donde no existe carga sobre el terreno. Cuando el terreno presenta una mayor pendiente, los esfuerzos transmitidos de la base de la estructura al terreno son mayores por lo tanto los factores de seguridad van disminuyendo, y dar una mayor inclinación del paramento amortigua este efecto verificándolo a través de los factores de seguridad que disminuyen de 1.99 a 1.52 en el caso de MEL y de 3.49 a 1.50 en el caso del método analítico. Cabe mencionar que tener un ancho de base mayor también suma al incremento del factor de seguridad.

Tabla 5.3*FS_{capacidad portante} mediante el método de equilibrio límite y método analítico*

		FS _{capacidad portante}									
		0°		3°		6°		9°		12°	
ε	α	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico	GEO5	Analítico
	q=0 kPa	0°	1.99	3.49	2.19	3.82	2.43	4.31	2.76	5.06	3.01
6°		1.92	2.95	2.11	3.21	2.35	3.59	2.64	4.14	3.05	5.01
12°		1.82	2.45	2.01	2.66	2.25	2.95	2.54	3.36	2.9	3.97
18°		1.70	1.98	1.88	2.14	2.1	2.36	2.39	2.65	2.76	3.07
24°		1.52	1.50	1.68	1.61	1.88	1.76	2.14	1.95	2.48	2.21
q=29.43 kPa	0°	1.34	1.27	1.46	1.34	1.61	1.43	1.82	1.55	2.09	1.71
	6°	1.25	1.11	1.37	1.18	1.5	1.26	1.67	1.36	1.91	1.50
	12°	1.08	0.96	1.27	1.02	1.39	1.09	1.54	1.18	1.73	1.30
	18°	1.05	0.81	1.14	0.86	1.26	0.92	1.40	1.00	1.56	1.09
	24°	0.90	0.64	0.99	0.68	1.09	0.73	1.21	0.79	1.35	0.86
q=58.84 kPa	0°	1.01	0.80	1.1	0.83	1.21	0.88	1.36	0.94	1.55	1.01
	6°	0.93	0.71	1.01	0.74	1.1	0.78	1.17	0.83	1.39	0.90
	12°	0.85	0.61	0.92	0.65	1.01	0.68	1.10	0.73	1.24	0.79
	18°	0.76	0.52	0.82	0.55	0.9	0.58	0.99	0.62	1.09	0.67
	24°	0.64	0.41	0.7	0.44	0.76	0.46	0.84	0.50	0.93	0.54
q=88.26 kPa	0°	0.81	0.59	0.88	0.61	0.97	0.64	1.08	0.67	1.23	0.72
	6°	0.74	0.52	0.8	0.54	0.87	0.57	0.97	0.60	1.1	0.64
	12°	0.67	0.45	0.73	0.48	0.79	0.50	0.86	0.53	0.96	0.57
	18°	0.59	0.38	0.64	0.40	0.7	0.43	0.77	0.46	0.84	0.49
	24°	0.50	0.31	0.54	0.32	0.59	0.34	0.65	0.37	0.71	0.39
q=117.68 kPa	0°	0.68	0.46	0.73	0.48	0.8	0.50	0.90	0.53	1.02	0.56
	6°	0.62	0.41	0.67	0.43	0.72	0.45	0.80	0.47	0.9	0.50
	12°	0.55	0.36	0.6	0.38	0.65	0.40	0.70	0.42	0.78	0.44
	18°	0.49	0.31	0.53	0.32	0.57	0.34	0.62	0.36	0.68	0.38
	24°	0.41	0.24	0.44	0.26	0.48	0.27	0.52	0.29	0.57	0.31

Capítulo 6: Conclusiones

- Se concluye que la realización del análisis paramétrico entre los métodos de equilibrio límite y analítico permiten simular distintos escenarios con el fin de optimizar el diseño del muro de gaviones tomando en cuenta en qué condiciones y bajo que parámetros geométricos el muro podría no generar la estabilidad requerida.
- Analizando el caso de los factores de seguridad por volcamiento se concluye que los valores son mayores a 2 casi en su totalidad denotando que el método da resultados satisfactorios tanto para cualquier caso de carga presentado, ángulo de inclinación del terreno y de la misma estructura al hacer uso del método de equilibrio límite. A su vez, el aumento de los factores de seguridad mientras se incrementa el ángulo de inclinación del muro es muy significativa dando a entender que el método permite obtener valores más altos según la condición requerida. En cambio, en el caso del método analítico los factores de seguridad son claramente menores a comparación de los obtenidos por el método de equilibrio límite y también es apreciable que su crecimiento es menor. Esto se puede demostrar al calcular que el porcentaje de crecimiento porcentual promedio en el MEL es de 33% y en el caso del método analítico es de 13%.
- En el análisis por deslizamiento, observa cuando se aplica una carga de 29.43 kPa, la estructura muestra señales de inestabilidad según el método de equilibrio límite. No obstante, esta inestabilidad puede ser mitigada al aumentar el ángulo de inclinación de la estructura. Los factores de seguridad mejoran considerablemente con cada incremento en el ángulo de inclinación, registrando un crecimiento promedio progresivo del 20%. Por otro lado, el método analítico también indica inestabilidad bajo la misma carga, pero el aumento en el factor de seguridad debido al incremento del ángulo de inclinación es mínimo, con un promedio de crecimiento del 2%. Este enfoque resalta la efectividad de ajustar el ángulo de inclinación para mejorar la estabilidad estructural, y subraya las diferencias significativas en los resultados entre los métodos de equilibrio límite y analítico en términos de respuesta frente a cargas críticas.

- Finalmente, para el caso de la capacidad portante, los factores de seguridad logran ser aceptables hasta una carga de 29.43 kPa en el caso del método de equilibrio límite debido a que, posterior a ello, sus valores no logran ser estables aun aumentando la inclinación de la estructura presentando una inestabilidad alarmante con cargas de 88.26 kPa y de 117.68 kPa. Incluso el aumento del ángulo de inclinación del muro no logra solventar completamente la estabilidad del talud, El método analítico no ofrece una mejor respuesta en estos escenarios debido a que el aumento del valor de los factores de seguridad es muy bajo a comparación del MEL y la inestabilidad de estos valores es más susceptible ante los cambios de carga y ángulos de inclinación del terreno. Se observó que además de los parámetros geométricos presentados en este estudio, la capacidad portante del terreno y el material de relleno del gavión también tienen una influencia directa en el mejoramiento de los factores de seguridad, por ende, en la seguridad de la estructura.
- Después de un análisis exhaustivo utilizando ambos métodos en todos los casos presentados, se ha determinado que las condiciones óptimas para el diseño del muro son una inclinación de talud entre 0° y 6° , así como una inclinación de muro de gaviones entre 6° y 9° . Estos rangos ofrecen valores más favorables y están respaldados por la teoría, que sugiere un ángulo máximo recomendado de inclinación de 10° . Es importante destacar que el método de equilibrio límite, especialmente utilizando el método de Bishop, ha demostrado consistentemente ofrecer los factores de seguridad más altos en comparación con el análisis por el método analítico. Estas conclusiones subrayan la importancia de considerar cuidadosamente estos parámetros para optimizar tanto la estabilidad como la eficiencia del diseño del muro.

Referencias

- A. Bianchini, Ingeniero, S. A. (2017). *Gaviones - Sistemas de corrección fluvial - Muros de Contención - Urbanismo*. A. Bianchini.
- Ayyub, A., Alshameri, B., Jamil, S. M., & Nawaz, N. (2021). Analysis of Gabion Retaining Wall Using Analytical and Numerical modelling with Plaxis 2D. *University of Wah Journal of Science and Technology (UWJST)*, 5, 12-19. <https://uwjst.org.pk/index.php/uwjst/article/view/65>
- Camargo, J., & Franco V. (2001). Manual de gaviones. Instituto de Ingeniería UNAM. <http://datosabiertos.unam.mx/IINGEN:RUSI:624>
- Cano Valencia, A. (2007). Resistencia de la malla de gavión al aplastamiento por impacto [Proyecto de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/4219>
- Cevallos Solórzano, M. A. (2023). Análisis de estabilidad de talud de roca ubicado en la Parroquia la Pila perteneciente al Cantón Montecristi (Bachelor's thesis, Jipijapa-Unesum). <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/5809>
- Cerquera, D. (2023). Análisis de estabilidad del talud ubicado en el Pr 13-4506 del proyecto autovía Neiva-Girardot. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/9ca6ff31-b767-4ab2-aace-b1a698242c8b>
- Chatpattananan, V., Thanadol Kongsomboon, T., & Ratanavaraha, V. (2021). Designing gabion structures under multi-criteria objectives with goal programming. *GEOMATE Journal*, 20(82), 121–131. <https://doi.org/10.21660/2021.82.GX347>
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cuarta edición. Cengage Learning.
- De Almeida, P. (2008). *Obras de contención*. MACCAFERRI.
- DS N° 011-2019-TR. (2019). Decreto supremo que aprueba el reglamento de seguridad y salud en el trabajo para el sector de Construcción. In *Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo*. <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-seguridad-y-sal-decreto-supremo-n-011->

2019-tr-1787274-4/

Korin, T. (2022). Design of Gabion Walls: Practical Case [Tesis de Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança]. Biblioteca Digital del Instituto Politécnico de Bragança. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/26452>

Lifonzo, C., & Lifonzo, S. (2018). *Modelamiento numérico de muros de contención de gaviones mediante el método de elementos finitos*. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica en Buenos Aires, Argentina. https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_673.pdf

Mayo, D. O., & Pacheco, G. O. (2021). Instalación de la defensa ribereña con gaviones y la evaluación del impacto ambiental del proyecto en el distrito de Paucas–Huari–Áncash. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4762>

Ministerio de vivienda. (2012). Norma CE.020 “Suelos y Taludes.” In El Peruano. <https://ww.cdn.www.gob.pe>

Morales, J. R. (2023). Diseño de muro de gavión y tramo carretero comprendido desde Villa Hermosa I, zona 7, hacia El Frutal, zona 7 y desde El Frutal, zona 7 hacia zona 13, San Miguel Petapa, Guatemala (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala). <http://www.repositorio.usac.edu.gt/18545/1/Jos%C3%A9%20Rodrigo%20Morales%20Enriquez.pdf>

Novoa, F. (2018). *Construcción de muro gaviones, para la protección y estabilización de talud en la IE. Virgen de Guadalupe Lucma - Ancash - Perú, en el año 2016* [Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil]. Repositorio digital de la Universidad Privada Telesup. <https://repositorio.utelesup.edu.pe/handle/UTELESUP/327>

Peerdawood, C. T., & Mawlood, Y. I. (2010). Analytical Study for Stability of Gabion Walls. *Journal of Pure and Applied Sciences / Salahaddin University -Hawler*, 22(5).

Piñar, R. (2008). *Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³*. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio institucional del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6034/construcci%C3%B3n-muro-gaviones.pdf>

Possato, A. (2021). *Dimensionamento de contenção do tipo gabião em região de solo residual na cidade de Biguaçu / SC* [Trabajo de conclusión de curso, Instituto

Federal Santa Catarina]. Repositório Institucional do Instituto Federal Santa Catarina. <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2348>

Rivera, G. A., & Vicuña, L. D. (2023). Análisis Probabilístico Aplicado A La Estabilidad De Los Taludes De La Costa Verde En El Distrito De Magdalena Del Mar. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/26894/RIVERA_CHANCA_GABRIEL_ANALISIS_PROBABILISTICO_APLICADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Reyes Suárez, Y. R. (2019). Análisis de estabilidad de taludes aplicando diferentes técnicas de revegetalización. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3454/Analisis_de_estabilidad_de_taludes.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Salvatierra Torres, R. D. (2021). Análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite para prevenir deslizamientos durante la expansión de un depósito de minerales en minas a cielo abierto, La Libertad 2021. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/29241/Salvatierra%20Torres%20Rogger%20Danny.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Satriawan, A., & Gusti, H. (2020). *Sliding failure analysis of a gabion retaining wall at km 31+800 of Lubuk Selasih - Padang city border highway, Indonesia*. 4th International Conference on Earthquake Engineering & Disaster Mitigation

Sismica Insitute. (2024). Análisis de Estabilidad de Taludes.

Soto. (2017). *Presupuesto para muro en gavión a gravedad – para protección de la rivera del rio magdalena en el corregimiento de puerto bogotá municipio de guaduas cundinamarca*. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/03891c61-b2e1-4515-9d36-7da37b622660/content>

Suárez, B. A., Quintero Escobar, L., & Garzón Marentes, J. T. (2021). Análisis de Estabilidad de Taludes Barrio el Arroyo. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1964/Garz%3%b3n%20Marentes%2c%20Jhenyfer%20Tatiana.-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vila, H. F. (2022). Diseño de muro de contención reforzado con geomalla, Asentamiento Humano Chavinillo, Ventanilla - Callao 2022. In Universidad Andina del Cusco.

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Yepes Piqueras Víctor. (2019). Empuje de tierras, ¿mejor Coulomb o Rankine? Universitat Politècnica de València.
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/11/27/empuje-de-tierras-mejor-coulomb-o-rankine/>

Zumba, J. V. (2023). Análisis de Estabilidad del Talud en la Vía al CRS Turi aplicando Ensayos Geofísicos. In Universidad del Azuay.
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13407>

Anexo A: Datos de ingreso del cálculo

DISEÑO DE MUROS DE GAVIONES

Fill Soil Properties
Foundation Soil Material Properties
Gabion

1. DATOS INGRESO

$\phi_t =$	30.00	°			Ángulo de fricción interna del terreno, en grados (del estudio de suelos)
$\phi_m =$	30.00	°			Ángulo de fricción interna del material, en grados
$\alpha =$	6.00	°			Inclinación del muro con la vertical en grados
$\epsilon =$	0.00				Ángulo del talud sobre el muro con la horizontal en grados
$C =$	0.00	t/m ²	=	0.00	kPa Cohesión del material, en t/m ² o kPa
$\gamma_s =$	1.80	t/m ³	=	17.66	kN/m ³ Peso específico del suelo en t/m ³ o Kn/m ³
$\gamma_p =$	2.43	t/m ³	=	23.84	kN/m ³ Peso específico de la piedra de relleno o Kn/m ³
$\sigma_s =$	2.00	kg/cm ²		196.20	Capacidad portante del suelo (del estudio de suelos)
$q =$	3.00	t/m ²		29.43	kN/m ² Sobrecarga del terreno
$a =$	1.00	m			Ancho de la corona
$B =$	3.00	m			Base del muro sin considerar los escalones extremos en m

Datos

Formula

Formula importante

Dependencia

Anexo B: Dimensiones del gavión

2. DIMENSIONES DEL GAVION

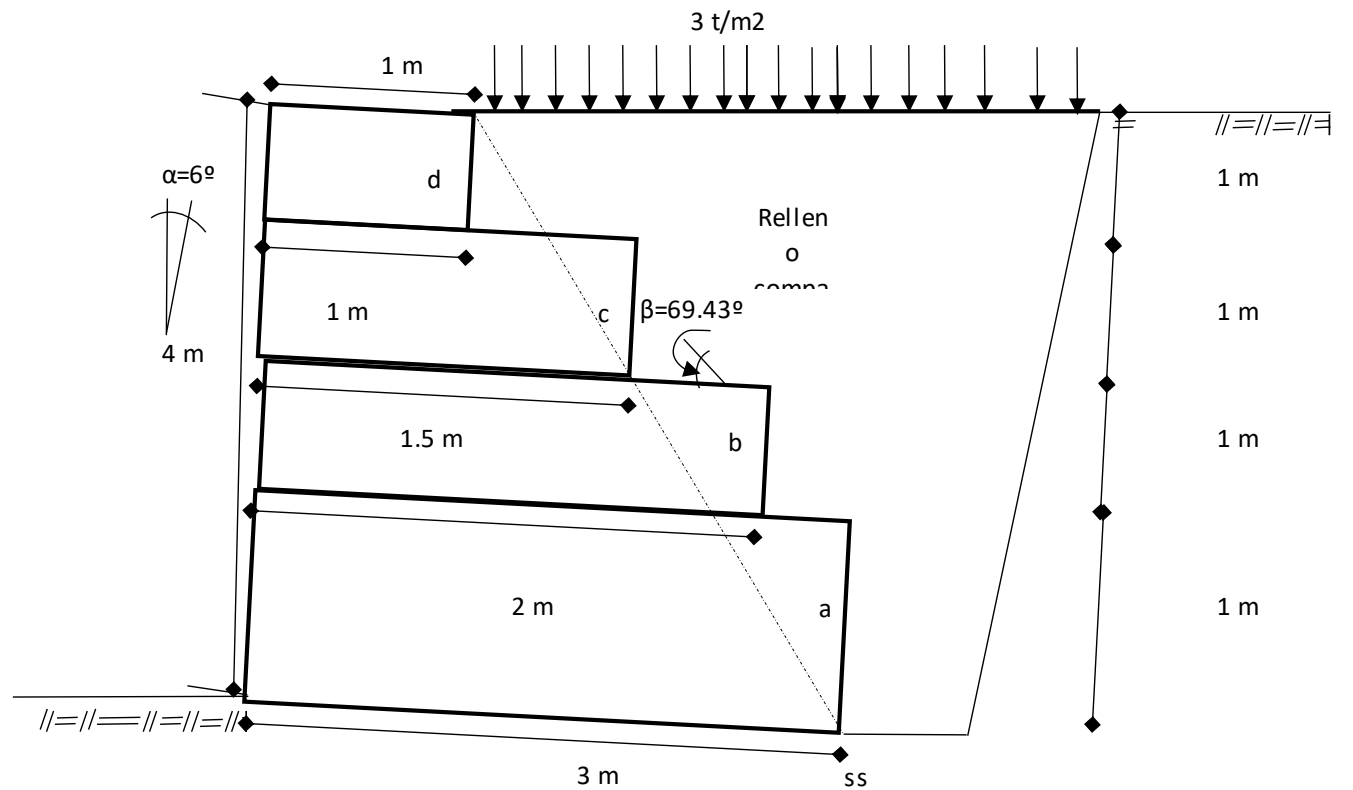
Base del Gavion

Ba =	3.00	m
Bb =	2.00	m
Bc =	1.50	m
Bd =	1.00	m

Altura del Gavion

Ha =	1.00	m
Hb =	1.00	m
Hc =	1.00	m
Hd =	1.00	m
h =	4.00	m

h:Altura del muro



Anexo C: Cálculo del centro de gravedad

3. CALCULO DEL CENTRO DE GRAVEDAD

Elemento	Ai	Xi	Yi	Ai Xi	Ai Yi
a	3.00	1.50	0.50	4.50	1.50
b	2.00	1.00	1.50	2.00	3.00
c	1.50	0.75	2.50	1.13	3.75
d	1.00	0.50	3.50	0.50	3.50
Total	7.50			8.13	11.75

Centro de Gravedad en X

$$X_g = 1.083 \text{ m}$$

Centro de Gravedad en Y

$$Y_g = 1.567 \text{ m}$$

MOMENTO:	3
METRADO DE CARGAS	2.55
GEOMETRIA	2.1
PESO ESPECIFICO DEL GAVION	1.65
	1.2

Anexo D: Diseño de muro de gavión

D.1. Chequeo de estabilidad del gavión

4. DISEÑO DEL MURO GAVION

a) CHEQUEO DE ESTABILIDAD DEL GAVION

Calculo del empuje

$$\beta = \left(\tan^{-1} \left(\frac{h}{B-a} \right) \right) + \alpha$$

h = 4.0 m
 B = 3.0 m
 a = 1.0 m
 α = 6.0 °

β = 69.435 ° Ángulo formado por el plano de empuje y la horizontal en grados

Cálculo del coeficiente del empuje activo:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \varphi)}{\sin^2 \beta \sin(\beta - \delta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \sin(\beta + \varepsilon)}} \right)^2}$$

0.973128

0.556824

3.434657

Ka = 0.509

0.433012702

0.594722859

0.728091573

0.853282821

ε = 0.00 °

φt = 30.00 °

δ = 30.00 ° Ángulo de fricción entre muro y terreno en grados, en muros de gaviones δ = φ

β = 69.435 °

Ka = 0.509

Cálculo de la altura del empuje:

$$H = (h + (B + a) \tan \alpha) \cos \alpha$$

H = 4.396 m

Cálculo hs:

$$hs = \frac{q}{\gamma_s}$$

hs = 1.667 m

Cálculo del empuje activo:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a \gamma_s H^2 \left(1 + \frac{2hs}{H} \right) - 2 K_a^{\frac{1}{2}} C H$$

Ea = 15.5612 ton/m

152.66 KN/m

Punto de aplicación "d"

H = 4.396 m

hs = 1.667 m

B = 3.000 m

α = 6.000 °

$$d = \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3hs}{H + 2hs} \right) - \sin \alpha$$

d = 1.4678 m

D.2. Verificación de la seguridad contra deslizamiento

b) ESTABILIDAD DEL MURO

b.1. Verificación de la seguridad contra deslizamiento

Vertical

$$E_v = E_a \sin(90^\circ + \delta - \beta)$$

$$E_v = 12.0186 \text{ t/m} \quad 117.90 \text{ KN/m}$$

Horizontal

$$E_h = E_a \cos(90^\circ + \delta - \beta)$$

$$E_h = 9.8845 \text{ t/m} \quad 96.97 \text{ KN/m}$$

Peso específico de los gaviones

$$\gamma_p = 2.43 \text{ t/m}^3$$

$$n = 30 \%$$

Peso específico de la piedra de relleno

Porcentaje de vacios en el gavion (valor promedio 30%)

$$\gamma_g = \gamma_p (1 - n)$$

$$\gamma_g = 1.701 \text{ t/m}^3 = 16.69 \text{ Kn/m}^3$$

Metrado de cargas:

W	W (ton)	Xi	Mi
Wa	5.103	1.50	7.655
Wb	3.402	1.00	3.402
Wc	2.552	0.75	1.914
Wd	1.701	0.50	0.851
Total	12.758		13.821

Calculo del coeficiente de deslizamiento

$$W = 12.7575 \text{ t}$$

$$126.43 \text{ KN}$$

VERIFICACIÓN DE EQUILIBRIO

$$\alpha = 6^\circ$$

$$\phi_t = 30^\circ$$

$$0.5$$

$$E_v = 12.019 \text{ m}$$

$$0.5$$

$$E_h = 9.884 \text{ m}$$

$$C = 0 \text{ t/m}^2$$

$$B = 3.00 \text{ m}$$

$$C_D = \frac{((W + E_v) \cos \alpha + E_h \sin \alpha) \tan \phi + (W + E_v) \sin \alpha + CB}{E_h \cos \alpha}$$

$$C_D = 1.771$$

$$\text{Fuerza Horizontal resistente(Hres)} = 17.41 \text{ t/m} = 170.82 \text{ kN/m}$$

$$\text{Fuerza Horizontal activa(Hact)} = 9.83 \text{ t/m} = 96.44 \text{ kN/m}$$

CD

FS

Factor de seguridad

$$1.771$$

>

$$1.5$$

OK cumple con la condición, no se produce el deslizamiento del muro

D.3. Verificación de la seguridad contra volcamiento

b.2. Verificación de la seguridad contra volteamiento

Momento de volteo

Momento de vuelco

$$Mv = E_h d$$

$$Mv = 14.508 \text{ t-m/m} = 142.327 \text{ (kNm/m)}$$

Distancia horizontal entre el punto de volteamiento F y el punto de aplicación del empuje activo

$$S' = B \cos \alpha - \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3 h_s}{H + 2 h_s} \right) \frac{1}{\tan \beta}$$

$$\begin{aligned} H &= 4.396 \text{ m} \\ \alpha &= 6.000^\circ \\ h_s &= 1.667 \text{ m} \\ \beta &= 69.435^\circ \\ B &= 3.000 \text{ m} \end{aligned}$$

$$S' = 2.315 \text{ m}$$

Punto de aplicación del peso

$$S'' = Xg \cos \alpha + Yg \sin \alpha$$

$$\begin{aligned} Xg &= 1.0833 \text{ m} \\ Yg &= 1.5667 \text{ m} \\ \alpha &= 6.0^\circ \end{aligned}$$

$$S'' = 1.241 \text{ m}$$

El momento resistente

$$Mr = W S' + E_v S''$$

$$\begin{aligned} W &= 12.7575 \text{ m} \\ S' &= 2.3152 \text{ m} \\ S'' &= 1.2412 \text{ m} \\ E_v &= 12.0186 \text{ m} \end{aligned}$$

Momento estabilizador M_{res}

$$Mr = 44.4536 \text{ t-m/m} = 436.090 \text{ (kNm/m)}$$

Coficiente de volteamiento

$$Cv = \frac{Mr}{Mv} \geq 1.5$$

$$\begin{aligned} Mr &= 44.453578 \text{ t-m/m} \\ Mv &= 14.50834 \text{ t-m/m} \end{aligned}$$

$$Cv = 3.0640017$$

Factor de seguridad

Cv		FS
3.064	>	1.5

OK cumple con la condición, el muro de retención no se volteará

D.4. Verificación de las tensiones del suelo y de la capacidad portante)

b.3 Verificación de las tensiones en el suelo

fuerzas normales

$$N = (W + Ev) \cos \alpha + Eh \operatorname{sen} \alpha$$

$$\begin{aligned} W &= 12.7575 \text{ t/m} \\ Ev &= 12.019 \text{ t/m} \\ Eh &= 9.884 \text{ t/m} \\ \alpha &= 6^\circ \end{aligned}$$

VERIFICACION DE CAPACIDAD PORTANTE

$$N = 25.674 \text{ t/m} \quad 251.86 \text{ KN/m}$$

la excentricidad de la resultante

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{Mr - Mv}{N} \right)$$

$$\begin{aligned} B &= 3.00 \text{ m} \\ d &= 0.99 \\ Mr &= 44.454 \text{ t-m/m} \\ Mv &= 14.508 \text{ t-m/m} \\ N &= 25.674 \text{ t/m} \end{aligned}$$

Considerando ese valor de nuestro excel
 $N = 251.86 \text{ KN/m}$
 $M_{ov} = 142.33 \text{ KNm/m}$
 $M_{res} = 436.09 \text{ KNm/m}$
 $d = 2.69$
 $e = 0.18$ resulta un valor más cercano a comparación del anterior

$$e = 0.3336 \text{ m} \quad \text{excentricidad de la resultante(fórmula 01)}$$

$$e < B/6$$

$$0.3336 < 0.5 \quad \text{OK cumple con la condición}$$

Los esfuerzos resultantes

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{aligned} \right\} = \frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

$$\begin{aligned} N &= 25.6736 \text{ t/m} \quad Wv & 107.9654182 \\ B &= 3.0000 \text{ m} & 14.26797023 \quad 139.968788 \\ e &= 0.3336 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 14.2680 \text{ t/m}^2 \rightarrow 1.4268 \text{ kg/cm}^2 \quad 139.968788 \text{ kPa} \\ \sigma_2 &= 2.8478 \text{ t/m}^2 \rightarrow 0.2848 \text{ kg/cm}^2 \quad 27.93653454 \end{aligned}$$

La tensión en el punto 1 está por debajo de la capacidad portante del terreno.
 La tensión en el punto 2 está por debajo de la capacidad portante del terreno.

Analytical stability analysis design summary for the gabion wall

ID	Características	Resistencia	Fuerza	FoS
1	F.O.S overturning (kN.m/m)	3173.9	948.2	3.347
2	F.O.S Sliding (kN/m)	574.4	316.1	1.817
3	F.O.S Bearing pressure (kN/m ²)	300	251.3	1.194
4	Eccentricity (mm)	La excentricidad se encuentra dentro del tercio medio de la base.		

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{Mr - Mv}{N} \right) = \frac{M_{ov} - M_{res} + \frac{Nd}{2}}{N}$$

d=B

la excentricidad de la resultante

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{Mr - Mv}{N} \right)$$

$$\begin{aligned} B &= 3.00 \text{ m} \\ Mr &= 44.454 \text{ t-m/m} & 436.09 \text{ KNm/m} \\ Mv &= 14.508 \text{ t-m/m} & 142.33 \text{ KNm/m} \\ N &= 25.674 \text{ t/m} & 251.86 \text{ KN/m} \end{aligned}$$

$$e = 0.3336 \text{ m}$$

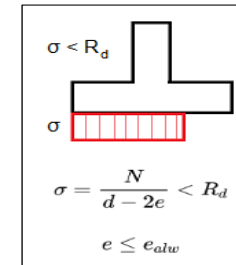
$$e < B/6$$

$$0.334 < 0.500 \quad \text{OK cumple con la condición}$$

Ancho de la sección que esta trabajando a la compresión

$$X = \frac{0.5B - e}{0.4}$$

$$X = 2.916 \text{ t/m}$$



Juver Ayala & Dante Mendoza

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

8%

★ hdl.handle.net

Fuente de Internet

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 20 words

Excluir bibliografía

Activo