UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**“Análisis Numérico Estático de Muros de Suelo
Reforzado para Plataformas de Almacenamiento de
Concentrados Mineros - Almacén Logisminsá,
Ventanilla, Callao”**

TESIS

Para optar el título profesional de: Ingeniero Civil

AUTOR

Mendoza Valencia, Carlos Alberto (0000-0003-0135-9683)

Yncio Corrales, Jorge Jhamir (0000-0002-6104-1354)

TESIS

Cárdenas Guillén, Jorge Luis (0000-0001-5420-1877)

Lima, 06 de Noviembre de 2018

Jorge Jhamir:

A Dios, quién me dio la fortaleza y sabiduría para llegar a este momento. A mi hija, por ser el motivo y motor de mis ganas de seguir adelante y nunca rendirme. A mi madre, mi padre y a mi madrina, por su gran cariño y apoyo, por alentarme siempre a seguir adelante e inculcar en mí la responsabilidad y el deseo de superación. A mi familia, por creer en mí.

Carlos Alberto:

A nuestro creador, por llenarme de valor, ímpetu y sabiduría para cerrar esta etapa. A mis padres, amor, modelo, cimiento, esfuerzo y motor incansable de mi superación. A Luis y Paola, mis hermanos, por ser parte y motivo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Jorge Jhamir:

En primer lugar agradezco a mis padres, Jorge Luis y María Elena, por todo el esfuerzo y dedicación puestos en mí, durante mi formación universitaria. Fueron años difíciles en los que estuvimos distanciados, pero siempre los sentí a mi lado entregándome todo y más de lo necesario para poder afrontar este desafío en mi vida. Sin ustedes esto no hubiese sido posible. Gracias por entregarme tanto sin pedir nada a cambio, los amo desde lo más profundo de mi corazón.

A nuestro asesor, Jorge Luis Cárdenas Guillén, por guiarnos y no dejarnos pasar inadvertidos.

Carlos Alberto:

Quiero expresar mi gratitud a mis padres Alberto y Elizabeth, ejemplo fiel de responsabilidad y esfuerzo, por el inmenso amor que me brindan siempre y su lucha incansable en busca de mi felicidad.

A mis abuelos Juan de Dios, Valentina, Juan Cancio y Carmela, por el gran esfuerzo de seguir alentando mi propósito de vida y sus valiosos consejos, reflejo de su sabiduría de vida. A Paola y Luis, con ellos inicio un camino en el cual el vínculo de amor que nos dio el hecho de ser hijos de una sola madre se incrementará con el venir de los años.

RESUMEN

El diseño de muros mecánicamente estabilizados se ve influenciado por las cargas externas, por el peso propio de la estructura, por nivel freático, refuerzo a emplear, drenaje a utilizar, no considerar estos factores, afecta directamente a la estructura del muro, en consecuencia, origina deslizamientos, desmoronamientos, asentamientos, etc. En la actualidad, se sigue evidenciando en obras las fallas anteriormente mencionadas, debido a que, se realizan análisis simplificados de fuerzas como Equilibrio Límite y lo importante es analizar la interacción suelo-estructura, el análisis más completo y adecuado para este caso, es un análisis numérico por Elementos Finitos

La presente tesis contiene conceptos de los elementos que intervienen en un muro de suelo reforzado como geosintéticos, relleno estructural, terreno de fundación. Además, contiene la metodología de diseño que se aplicó como Equilibrio Límite y Elementos Finitos.

Se desarrolló un análisis por estabilidad externa que consiste en análisis particulares de deslizamiento, volteo, capacidad de carga y asentamiento. También, se aplicó un análisis por estabilidad interna, para determinar el tipo, cantidad y separación de las geomallas. Por último se desarrolla un análisis global mediante el programa Slide, el cual utiliza la metodología de Equilibrio Límite.

La solución que se planteó en la presenta tesis, es desarrollar un análisis numérico por Elementos Finitos, este consiste en el estudio de tensiones y deformaciones en un elemento base del modelo. Para poder aplicar este análisis se hizo uso del programa Plaxis. Se interpretó los resultados obtenidos por el programa y de acuerdo a estos se plantearon las conclusiones.

Palabras Claves: Muro de suelo reforzado, muro mecánicamente estabilizado, elementos finitos, análisis tensión-deformación, estabilidad externa, estabilidad interna, estabilidad global.

ABSTRACT

The design of mechanically stabilized walls is influenced by the external loads, by the own weight of the structure, by phreatic level, reinforcement to be used, drainage to be used, not to consider these factors, directly affects the structure of the wall, consequently, landslides, collapses, settlements, etc. At present, the aforementioned failures are still evident in works, due to the fact that simplified analysis of forces such as Equilibrio Limite is carried out and the important thing is to analyze the soil-structure interaction, the most complete and adequate analysis for this case, is a numerical analysis by Finite Elements

This thesis contains concepts of the elements that intervene in a reinforced soil wall such as geosynthetics, structural fill, foundation ground. In addition, it contains the design methodology that was applied as Limit Balance and Finite Elements.

An external stability analysis was developed that consists of particular analysis of sliding, turning, loading capacity and settlement. Also, an internal stability analysis was applied to determine the type, quantity and separation of the geogrids. Finally, a global analysis is developed through the Slide program, which uses the Limit Equilibrium methodology.

The solution that was raised in the thesis, is to develop a numerical analysis by Finite Elements, this consists of the study of tensions and deformations in a base element of the model. In order to apply this analysis, the Plaxis program was used. The results obtained by the program were interpreted and according to these the conclusions were presented.

Key words: Reinforced soil wall, mechanically stabilized wall, finite elements, stress-strain analysis, external stability, internal stability, global stability.

ÍNDICE

DEDICATORIA	2
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
ÍNDICE.....	6
INTRODUCCIÓN.....	13
Estado del Arte	14
Antecedentes.....	15
Realidad problemática	15
Formulación del Problema.....	16
Hipótesis	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Alcance de la tesis	17
Descripción del Contenido	17
CAPÍTULO 1. MUROS DE SUELO REFORZADO	19
1.1. Introducción.....	19
1.2. Antecedentes.....	20
1.3. Definición	22
1.4. Elementos	24
1.4.1. Fachada.....	25
1.4.2. Refuerzo.....	25
1.4.3. Material de Relleno:	25
1.5. Proceso Constructivo.....	26
CAPÍTULO 2. ELEMENTOS DE REFUERZO.....	27
2.1. Introducción.....	27
2.2. Clasificación	27
2.3. Materiales	30
2.3.1. Policloruro de Vinilo (PVC).....	30
2.3.2. Polietileno de Alta Densidad	31
2.4. Tipos	32

2.4.1.	Uniaxial	32
2.4.2.	Biaxial.....	33
2.4.3.	Triaxial.....	33
CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO.....		35
3.1.	Introducción.....	35
3.2.	Condiciones de diseño	36
3.2.1.	Condición Estática.....	36
3.2.2.	Condición Pseudoestática	36
3.3.	Factor de seguridad.....	37
3.4.	Filosofía de diseño.....	37
3.4.1.	Equilibrio Límite	38
3.4.2.	Estado Límite.....	39
3.5.	Diseño por Estabilidad Interna	40
3.5.1.	Fallas de muros de suelo reforzado por factores internos	43
3.5.2.	Falla por extensión de los refuerzos (fluencia creep)	43
3.5.3.	Falla por extracción de refuerzo	44
3.6.	Diseño por Estabilidad Externa	44
3.6.1.	Fallas por volteo	47
3.6.2.	Falla por deslizamiento.....	49
3.6.3.	Falla por Capacidad de Carga.....	51
3.6.4.	Falla General.....	52
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS		54
4.1.	Introducción.....	54
4.2.	Análisis Numérico	55
4.2.1.	Ecuaciones.....	55
4.2.2.	Elementos	56
4.2.3.	Malla.....	56
4.3.	Herramientas.....	57
4.3.1.	PLAXIS	57
4.3.2.	Introducción al PLAXIS	59
4.3.3.	Criterios de modelación.....	60
CAPÍTULO 5. CASO APLICATIVO.....		62
5.1.	Descripción del proyecto	62
5.1.1.	Antecedentes Generales.....	62

5.1.2.	Ubicación.....	62
5.1.3.	Accesibilidad al proyecto	63
5.2.	Diseño del muro.....	63
5.2.1.	Parámetros Geotécnicos	63
5.2.2.	Geometría del muro	64
5.2.3.	Cálculo de la Estabilidad Interna.....	64
5.2.4.	Cálculo de la Estabilidad Externa.....	65
5.2.5.	Análisis Tensión - Deformación.....	72
CONCLUSIONES.....		79
RECOMENDACIONES		81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		82
ANEXOS		84
A.	Especificaciones Técnicas de Geomallas.....	84
B.	Especificaciones Técnicas de Geomallas.....	86
C.	Elaboración de Modelo Slide	89
D.	Elaboración de Modelo Plaxis	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Ubicación del proyecto. Coordenadas UTM. Fuente: CICA Ingenieros Consultores Perú SAC.	63
Tabla 5.2. Accesibilidad al área del proyecto. Fuente: CICA Ingenieros Consultores Perú SAC.	63
Tabla 5.3. Parámetros geotécnicos del terreno y del relleno. Fuente: Propia.....	64
Tabla 5.4. Resultados de las longitudes a usar para cada geomalla. Fuente: Propia	65
Tabla 5.6. Parámetros de resistencia de los elementos del muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.....	66
Tabla 5.7. Coeficiente de presión de suelo de relleno. Fuente: Propia.....	66
Tabla 5.8. Peso propio de muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.	67
Tabla 5.9. Empuje activo suelo de relleno. Fuente: Propia.	67
Tabla 5.10. Cálculo de excentricidad. Fuente: Propia.	67
Tabla 5.11. Cálculo de presión equivalente. Fuente: Propia.	67
Tabla 5.12. Factores de Seguridad por falla. Fuente: Propia.	68
Tabla 5.13. Verificación por deslizamiento. Fuente: Propia.	68
Tabla 5.14. Verificación por corte global. Fuente: Propia.	69
Tabla 5.15. Verificación por asentamiento. Fuente: Propia.	69
Tabla 5.16. Verificación por volteo. Fuente propia.....	70
Tabla 5.17. Resultado de Factor de Seguridad. Fuente propia.	72

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. Modelado del muro de dos niveles en la herramienta computacional ABAQUS. Adaptado de Chungsik (2008).....	14
Figura 1.1. Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado. Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001).....	22
Figura 1.2. Elemento de suelo sin refuerzo (izquierda) y Elemento de suelo con refuerzo (derecha). Fuente: Apunte de Estructuras De Contención En Suelo Reforzado. Skok (2010).....	24
Figura 1.3. Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado para carreteras. Fuente: Tierra Armada. © Tierra Armada Chile S.A.	24
Figura 1.4. Proceso de construcción de un muro de suelo reforzado con geosintético. Fuente: ORBE Técnicas y Medioambiente.	26
Figura 2.1. Geomalla uniaxial y biaxial. Fuente: DAS, Braja M. Principios de la ingeniería de cimentaciones.....	28
Figura 2.2. Geomalla recubierta de PVC, TeMa (Technologies and Materials). Recuperado de http://www.temacorporation.com/	31
Figura 2.3. Geomalla de polietileno de alta densidad en proceso de instalación de los mismos. ARTIFAIL geomembranes. Recuperado de https://www.atarfil.com/refuerzo-de-suelos	32
Figura 2.4. Geomalla uniaxial. Fuente: Geoace Geosynthetics. Recuperado de: http://www.geoaceperu.com/geomallas.html	33
Figura 2.5. Geomalla biaxial. Fuente: Geoace Geosynthetics. Recuperado de: http://www.geoaceperu.com/geomallas.html	33
Figura 2.6. Geomalla multiaxial. Fuente: Geoace Geosynthetics. Recuperado de: http://www.geoaceperu.com/geomallas.html	34
Figura 3.1. Fuerzas actuantes en la cuña activa (izquierda) y polígono de fuerzas indicando el equilibrio de estas (derecha). Fuente: Geotechnical earthquake engineering. Kramer (1996)	37
Figura 3.2. Fuerzas actuantes en la dovela, método Morgenstern y Price. Fuente: Métodos Generales de Equilibrio Límite. Alonso (1989).	39
Figura 3.3. Diagrama de muro de suelo reforzado con longitudes de dobles superior y geométrica hasta la falla. Fuente: Manual de diseño. PAVCO – AMANCO (2006)	42

Figura 3.4. Calculo empotramiento de refuerzo. Fuente: Manual de diseño. PAVCO – AMANCO (2006).....	43
Figura 3.5. Falla por extensión de refuerzo. Fuente: Deslizamientos-Técnicas de remediación. Suarez Diaz Jaime.....	43
Figura 3.6. Falla por extracción de refuerzo. Fuente: Deslizamientos-Técnicas de remediación. Suarez Diaz Jaime.....	44
Figura 3.7. Estructura de suelo reforzado con parámetros respectivos. Fuente: Proyecto Línea Amarilla. Municipalidad Metropolitana de Lima.....	45
Figura 3.8. Falla por volteo. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.	47
Figura 3.9. Falla por deslizamiento. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.	49
Figura 3.10. Falla por capacidad de carga. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.	51
Figura 3.11. Falla general. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.	52
Figura 4.1. Distribución de nodos en elementos de 15 y 6 nodos. Fuente: Modelamiento de Problemas de Estructuras de Contención Lateral mediante Programa de Elementos Finitos. Camargo (2011).....	56
Figura 4.2. Generación de malla de Elementos Finitos de forma triangular en una estructura de muros con anclaje. Fuente: Propia	57
Figura 4.3. Proceso de división del todo en partículas. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).....	58
Figura 4.4. Condiciones de contorno actuando sobre sistema. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).....	58
Figura 4.5. Representación de los tipos de suelo involucrados en las estructuras de suelo reforzado. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).	61
Figura 5.1. Ubicación almacén LOGISMINSa. Fuente: Google Maps.....	62
Figura 5.2. Geometría del muro. Fuente: Slide	64
Tabla 5.5. Dimensiones del muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.	66

Figura 5.3. Estado general del muro. Fuente: Slide	71
Figura 5.4. Análisis de Estabilidad Global mediante Método GLE/ Morgenstern – Price. Fuente: Slide	72
Figura 5.5. Modelo del muro de suelo reforzado del proyecto LOGISMINSA. Fuente: PLAXIS	73
Figura 5.6. Desplazamientos en el eje horizontal del muro. Fuente: PLAXIS	75
Figura 5.7. Desplazamientos en el eje horizontal del muro por regiones sombreadas. Fuente: PLAXIS	76
Figura 5.8. Desplazamientos en el eje vertical del muro. Fuente: PLAXIS	77
Figura 5.9. Desplazamientos en el eje vertical del muro por regiones sombreadas. Fuente: PLAXIS	78
Figura 5.10. Esfuerzos aplicados en el muro. Fuente: PLAXIS	78

INTRODUCCIÓN

Los muros de suelo reforzado son elementos estructurales con alta capacidad de resistencia al corte, conformados por suelo y refuerzos, los cuales pueden ser extensibles e inextensibles y le dan al conglomerado suelo-refuerzo la factibilidad de trabajar con relación a grandes cargas horizontales y verticales, así como fuerzas sísmicas.

La utilización de estas estructuras data del siglo XX, de tal manera que hoy el mundo cuenta con más de 40000 muros de suelo mecánicamente reforzados, los cuales cumplen miles de funciones y han beneficiado y transformado al mundo de la ingeniería con positivismo, en el Perú la introducción de esta técnica habla de finales de los años 90 y su mayor apogeo durante el segundo quinteto de siglo XXI, es por eso que nacen interrogantes con respecto a elementos estructurales que cumplen las mismas funciones de los muros de suelo reforzado y que son de diferente material, así como las ventajas y desventajas de los muros de suelo reforzado frente a estos, uno de ellos, el principal y más importante por excelencia, el concreto.

Los muros de concreto armado representan y representaron siempre solidez, rigidez y mayor resistencia dentro del mundo de la infraestructura, pero el nacimiento de los muros de suelo reforzado ha dado un vuelco con referencia a muros de estabilidad de taludes, defensas riverenas, plataformas y otros elementos estructurales; estructuras en las cuales los muros de suelo reforzado realizan su labor con mayor eficiencia que muros de concreto armado y a menor precio, puesto que los muros de suelo reforzado pueden alcanzar mayor altura que muros de concreto armado y son mucho más económicos que estos a partir de los tres metros de altura, por otro lado, al trabajar como un solo elemento suelo-refuerzo, de dimensiones más extensas, consigue mayor flexibilidad y resistencia a los sismos.

El análisis externo de los muros de suelo reforzado tiene que tener en cuenta fallas por volcamiento, presión equivalente, deslizamiento, capacidad de carga y general, las cuales están ligadas directamente con los parámetros de suelo (coeficiente de fricción, cohesión y resistencia al corte) y serán calculadas en esta tesis. Las fallas externas permiten diseñar el muro de suelo reforzado obteniendo valores de esfuerzos, momentos resistentes y

actuantes, los caules, al ser divididos tiene una relación directa con los factores de seguridad por cada tipo de falla, tienen que ser mayores a estos.

Otro análisis de suma importancia es el de estabilidad interna, PLAXIS cumple una función importante que aún en la detección de las fallas ya mencionadas.

Estado del Arte

La técnica de Elementos Finitos se ha ido desarrollando conforme a la nueva tecnología (nuevas herramientas computacionales), es así que, la evaluación mediante la técnica de Elementos Finitos hace uso de la herramienta computacional ABAQUS. El aporte que este programa ofrece es sin lugar a dudas la simulación del modelado de Elementos Finitos 3D.

Se presenta los resultados de una prueba de carga a escala completa y un análisis de elementos finitos en 3D en un muro de contención reforzado geosintéticamente de dos niveles y 5 m de altura sometida a una sobrecarga. La prueba de carga se llevó a cabo con el objetivo de obtener información sobre el rendimiento del muro bajo una carga de trabajo y proporcionar un conjunto completo de datos para la calibración del modelo de elementos finitos 3D. El modelo de elementos finitos 3D calibrado se utilizó para investigar el comportamiento del muro bajo una sobrecarga mayor a la carga de ensayo. A continuación, se presentará una imagen modelada en el ABAQUS:

Figura 1. Modelado del muro de dos niveles en la herramienta computacional ABAQUS.
Adaptado de Chungsik (2008)

Esta imagen muestra las mallas, estas mallas son producidas por los nodos empleados en los Elementos Finitos. Se observa en la parte derecha la malla interior de color marrón que corresponde al refuerzo (geosintético), esta imagen representa la interacción suelo – refuerzo, la cual nos dará tensiones en el refuerzo y deformación en el suelo. La parte izquierda representa el análisis de forma global de la estructura, aquí se obtendrá el factor de seguridad global para el muro de suelo reforzado. Además, se diseñó estos modelos con datos reales de la estructura, es decir, parámetros de resistencia del suelo (cohesión, ángulo de fricción), rigidez del suelo, entre otros.

Antecedentes

Tradicionalmente los muros de concreto armado representaban la única solución como elementos estructurales capaces de resistir grandes esfuerzos horizontales en la conformación de plataformas de relave mineral.

Es así que los muros de suelo reforzado nacen como una alternativa con capacidades estructurales y económicas mayores a los muros de concreto tradicionales, dentro de las cuales se pueden observar que los muros de suelo reforzado no cuentan con una limitación de altura, a diferencia de los muros tradicionales que encontraban limitaciones a partir de los 10 m de altura.

Esta metodología ya se aplica en gran parte del mundo y ha obtenido resultados positivos en las estructuras, como es el caso del aeropuerto de Bombay (India), lo que tiende a aplicar esta metodología en las construcciones modernas.

Realidad problemática

La necesidad de obtener plataformas en suelos con pendiente, capaces de cumplir la función de almacenes de concentrado mineral, obliga al uso de sistemas de contención adecuados, los sistemas más comunes son los muros de concreto, siendo estos no adecuados por factores de exceso de altura.

La aparición de fallas en muro de suelo reforzado, los mismos que trabajan como elemento de contención en plataformas industriales, buscan que se verifique los criterios de diseño en términos de deslizamiento, hundimiento, volteo, falla general y local, mediante la técnica de elementos finitos. El problema es cómo comprobar que un diseño es el correcto, la respuesta reside en el análisis que se realice a la estructura. La presente

tesis se enfoca en la solución de estos problemas mediante la técnica de Elementos Finitos.

Dada la complejidad de las interacciones entre elementos estructurales y el relleno estructural, sumado al escaso número de muros debidamente instrumentados, el modelamiento numérico ha proporcionado una herramienta útil para el análisis de los principales factores que influyen en el comportamiento de este tipo de estructuras reforzadas.

El suelo tiene que ser sometido a simulaciones con datos reales acerca de los parámetros de resistencia del suelo, propiedades de los materiales, entre otros. ¿Cómo obtener esta información? Mediante pruebas de laboratorio como por ejemplo pruebas de compresión triaxial del suelo, resistencia a la compresión.

La presente investigación permitirá evaluar mediante técnicas numéricas de Elementos Finitos el comportamiento Tensión – Deformación de los refuerzos mediante el uso de la herramienta computacional PLAXIS, con la finalidad de observar la sección más crítica.

Formulación del Problema

¿Qué método numérico permitirá la estimación de las tensiones y deformaciones en muros de suelo reforzado sometido a cargas elevadas?

Hipótesis

La aplicación del método de elementos finitos en el análisis numérico de la plataforma de suelo reforzado, permitirá conocer el comportamiento tensión deformación de los refuerzos ante la carga externa, mediante el análisis unitario de la interacción suelo-refuerzo.

Objetivo General

Diseñar el refuerzo interno (geomalla) del muro de suelo reforzado y verificar la condición del muro con un análisis numérico mediante Elementos Finitos con ayuda del Plaxis, y la estabilidad global del muro con la técnica de Equilibrio Límite con la herramienta Slide.

Objetivos Específicos

- Definir los componentes y materiales que intervienen en el desarrollo de muros de suelo reforzado.
- Indicar las propiedades de resistencia de los elementos o tipos de refuerzos y los parámetros geotécnicos de los distintos estratos de suelos que intervienen.
- Definir los criterios de diseño en muros de suelo reforzado.
- Verificar la estabilidad externa del muro por deslizamiento, capacidad de carga, asentamiento y volteo con respecto a factores de seguridad mínimos propuestos.

Alcance de la tesis

En esta investigación propone un alcance de acuerdo al problema planteado, teniendo en cuenta toda la información reunida hasta el momento, a su vez, se profundizará en la definición de muros de suelo reforzado, los elementos que intervienen para construir este tipo de estructuras, el diseño y análisis mediante una herramienta computacional y un caso aplicativo.

Descripción del Contenido

Capítulo I – Muros de Suelo Reforzado: Breve descripción sobre los “Muros de Suelo Reforzado” sus aplicaciones en la ingeniería y los beneficios económicos, de tiempo y producción de los mismos.

Capítulo II - Elementos de Refuerzo: Descripción conceptual de cada uno de los elementos que conforman los muros de suelo reforzado, su función en el diseño y la resistencia de estos elementos estructurales.

Capítulo III – Criterios de Diseño: Verificar la condición de los muros mediante la técnica de Equilibrio Límite o Estado Límite.

Capítulo IV – Análisis Numérico mediante Elementos Finitos: Análisis numérico del muro de suelo reforzado con el fin de obtener esfuerzos y deformaciones.

Capítulo V – Caso aplicativo: Muro de Suelo Reforzado en el proyecto de LOGISMINSA – Pampa de los Perros

Capítulo VI – Conclusiones y Recomendaciones: Conclusiones generales de todo lo estudiado y sus aportes a en el campo de la ingeniería.

Capítulo VII – Bibliografía: Autores, textos e información usada en la investigación.

CAPÍTULO 1. MUROS DE SUELO REFORZADO

1.1. Introducción

La historia de los muros de suelo reforzado, su definición como un solo elemento, los elementos que lo integran y el procedimiento constructivo son los temas que se tocarán en este capítulo.

La historia se encuentra ampliamente ligada a los “muros de suelo reforzados”, estructuras que fueron usadas por culturas en la edad antigua, media, moderna y sin duda alguna siguen siendo utilizadas en la edad contemporánea, pero son las grandes culturas de la antigüedad que asombran a la ingeniería moderna al demostrar que hicieron uso de este sistema constructivo mucho antes de que la ingeniería civil nazca como tal. Romanos, chinos, caldeos asirios y otros, aplicaron la técnica de compactación mecánica del suelo y les dieron forma y altitud a las estructuras del pasado, sean religiosas, militares o gubernamentales.

Los muros de suelo mecánicamente compactado deslumbraron la ingeniería en siglos pasados, pero son su conformación y proceso constructivo, puntos importantes dentro de su desempeño futuro y estructuración. Estas estructuras están conformadas por elementos como el suelo compactados en secciones longitudinales alargadas, las mismas que son reforzadas para mejorar las capacidades del suelo, tales como la fricción, cohesión y resistencia al corte. Los refuerzos que se usan para las estructuras antes mencionadas tienen que pasar por un análisis de fricción entre estos elementos y el suelo, estudio que permite analizar el comportamiento de la estructura como un solo elemento y no como una composición de elementos con diferentes funciones.

Un muro de suelo reforzado está compuesto por 3 elementos principales: Fachada, Refuerzo y Relleno Estructural. Entre los cual destacan el refuerzo y relleno estructural porque estos conformar la mayor parte de la estructura y depende de estos la capacidad de resistencia de la estructura. Su proceso constructivo consiste básicamente en el tendido de geomallas y compactación del relleno estructural hasta alcanzar la altura final.

1.2. Antecedentes

Hablar de muros de suelo reforzado es remontar al principio de compresión de suelo y la relación de este sistema constructivo con las primeras grandes culturas del mundo, una de ellas, la más grande de Asia pre-mongólica, el imperio chino.

Fue durante la construcción de la gran muralla china que se aplicó la compactación de suelo propio del terreno como medio constructivo, sistema que sigue vigente hasta el día de hoy.

“En las planicies, los trabajadores de la Gran Muralla hicieron uso del suelo local (arena, loess, etc.) y lo empujaron en capas compactas. La sección de la Gran Muralla de Jiayuguan en el oeste de China fue construida principalmente con suelo de loess polvoriento - "el suelo más erosionable del planeta". ¡Es increíble que las secciones de 2.000 años sigan siendo intactas!” Todo esto obtenido de “Cómo se construyó la Gran Muralla – Materiales y Métodos, China HIGHLIGHTS”. Recuperado de <https://www.viaje-a-china.com/gran-muralla/dato/como-se-construyo-la-gran-muralla.htm>.

Pero no solo fueron los asiáticos quienes aplicaron este sistema constructivo, el imperio occidental más grande de todos los tiempos, el gran imperio romano, revolucionó el mundo de la ingeniería en la edad antigua, construyendo diques alrededor del gran río Tíber, uno de los más grandes de península italiana, y defensas para el puerto de la ciudad de Londinium en la isla de los pueblo bretones, hoy Londres, defensas para un puerto que cubre una longitud de casi 1,5 km y tiene una altura de dos metros por encima del mar, con recubrimientos de madera de 9 metros de largo obtenida de árboles de roble y que desde su construcción ha perdurado por más de 1900 años. (Bassett, 1981, citado por Jones, 1996).

Sin duda alguna la cultura china y romana son un ejemplo de tecnificación de los muros de suelo reforzado, pero es la cultura Caldeo-Asiria, primera gran cultura del mundo, la cual le dio un uso constructivo mayor que las otras dos culturas, puesto que fue en base a este método constructivo que se construyó una estructura de 45 metros de alto conocida como “la gran ziguratt de la ciudad de Dur-Kurigatzu”, hoy ubicada a 5 km de la ciudad de Bagdag. El proceso constructivo de esta torre se dio con material de la zona, el cual se reforzaba con mallas de caña que se colocaban de forma horizontal como refuerzo, y se

recubría la estructura con ladrillos de arcilla, sistema muy parecido al actual y que hizo que la estructura duré más de 3000 años. (Jones, 1996 citado por Pinedo Arévalo, 2012).

De esta manera, la ingeniería ha demostrado la gran utilidad de los elementos de suelo reforzado, logrando que los integrantes del mundo ingenieril estudien y transformen este método, teniendo como padre de los muros de suelo reforzados modernos al arquitecto francés Henri Vidal, quien en la década del 60 lo patentó.

Llega por primera vez a América en el año 1972. Al principio, se utilizaron láminas de acero como refuerzo, pero con el tiempo el sistema ha ido evolucionando para incluir otro tipo de refuerzo, especialmente los geosintéticos (Geomallas y geotextiles tejidos).

Los muros de suelo reforzado con geosintéticos se han convertido mundialmente en una alternativa de construcción frente a los tradicionales muros de contención de concreto y los terraplenes conformados naturalmente, principalmente cuando hay deficiencias en la capacidad portante del suelo de fundación (suelo pobre).

“Dentro del campo de las geomallas existen las geomallas uniaxiales de polietileno de alta densidad, las cuales se vienen usando dentro del campo de la ingeniería civil desde la década de 1960. Una de sus primeras aplicaciones fue en la construcción de terraplenes para una estación ferroviaria, estas geomallas uniaxiales sirvieron como refuerzo del relleno formado por ceniza volcánica y con el propósito de poder conseguir niveles más altos de compactación. Por esa misma década, las geomallas biaxiales de polipropileno fueron empleadas para recuperar suelos blandos en el Aeropuerto de Nyeta en Tokio y a su vez mejorar la capacidad portante de la sub-base”, todo de esto de acuerdo a la línea de acción de la “California Highway Authority” y la West Yorkshire Metropolitan Country. (Jones y Hassan, 1992)

Actualmente, la utilización de materiales geosintéticos en suelos reforzados ha crecido con gran popularidad. Este crecimiento se debe principalmente a que el sistema en general constituye una alternativa económica y de fácil construcción. Los muros de suelo reforzado tienen mayores ventajas sobre los tradicionales muros de contención de concreto armado. A continuación, se detallará las principales ventajas:

- La prefabricación de los materiales (geosintéticos) y la construcción sistemática se ve reflejada en una baja de costos en comparación a los muros de contención tradicionales.
- Emplean procesos de construcción rápidos, simples y no requieren de gran cantidad de equipos para la construcción.
- Son alternativas más rentables en comparación con los muros de concreto.

1.3. Definición

La utilización de los muros de suelo reforzado es bastante habitual hoy en día, estas estructuras se han posicionado y son irremplazables en ramas como el transporte, la geotecnia e hidráulica, pero la pregunta es la siguiente: ¿Qué es un muro de suelo reforzado?

Un “Muro de Suelo Reforzado” es una estructura de suelo compactado, a la cual se le introduce elementos de refuerzo que trabajan a tensión, estos tienen que estar convenientemente ubicados, ya que aumentan la resistencia del suelo y disminuyen las deformaciones del muro. Este método, conocido como refuerzo de suelos, permite que el comportamiento global del muro sea mejorado debido a la transferencia de las cargas a los refuerzos a lo largo de todo el suelo compactado.

Figura 1.1. Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado. Fuente: FHWA, Publication No FHWA-NHI-00-043 (2001).

Por lo tanto, los dos componentes principales de muros de suelo reforzado son el suelo compactado y los refuerzos, los cuales pueden ser extensibles o inextensibles y cada uno de ellos cumple una misión importante en su trabajo conjunto. El suelo que trabaja eficientemente a compresión, pero no muestra buenos resultados de trabajo a tracción, puede incrementar la poca tracción con la que cuenta, la cual es efecto de la cohesión y fricción de los granos. Curiel y Forteza en su libro “Muro de contención en suelo reforzado - Solución alternativa a un muro tradicional de hormigón” nos hablan de esto y dicen lo siguiente:

“Como es sabido, todo suelo (en estado confinado) resiste adecuadamente esfuerzos de compresión, pero no así a tracción. La resistencia a tracción en el suelo, que naturalmente se obtiene por efecto cohesivo y por fricción interna de los granos, puede entonces ser incrementada mediante la incorporación de algún material de refuerzo, que interactúe con el mismo”.

La geomallas, que son sin duda alguna, el refuerzo más usado en estructuras de suelo mecánicamente compactado, son elementos extensibles que van entre las capas de suelo compactado y al distribuir los esfuerzos provenientes del exterior con dirección a la estructura, evitan que esta sea deformada, es decir que al compactar el suelo y reforzarlo se le está dando mayor rigidez pero a la vez trabajabilidad, puesto que de no usar refuerzos y trabajar con capas de suelo superpuestas, la aplicación de una fuerza generaría grandes deformaciones verticales, ya que ningún elemento dentro de la estructura distribuiría las fuerzas a lo largo de la misma, lo cual con el tiempo llevaría a fallar a la estructura.

Tenemos que recordar que la colocación de refuerzos, dependiendo de su capacidad de resistencia a la tensión, le da a la estructura mayor flexibilidad y resistencia a fuerzas sísmicas, las cuales no encontrarán un elemento con gran rigidez y dispuesto a fallar ante la presión de las cargas, por el contrario, encontrarán un elemento capaz de resistir grandes cargas de corte vertical y horizontal, así como un elemento flexible y con capacidad de deformación elástica.

Figura 1.2. Elemento de suelo sin refuerzo (izquierda) y Elemento de suelo con refuerzo (derecha). Fuente: Apunte de Estructuras De Contención En Suelo Reforzado. Skok (2010).

1.4. Elementos

Un muro de suelo reforzado está conformado de tres elementos básicos (ver figura 1.3), los cuales son:

- Fachada
- Refuerzo
- Relleno Estructural

Estos elementos se combinan y dan vida a la estructura, la resistencia a la compresión la aporta el propio suelo compactado (material de relleno), y la resistencia a la tensión es aportada por la geomalla (refuerzo), estos son los dos elementos que aportan capacidad estructural al muro. Mientras que la fachada sirve de contención para los dos elementos anteriores y busca evitar deslizamientos de material por desgaste o por fenómenos naturales (lluvias).

Figura 1.3. Sección Transversal Típica de un Muro de Suelo Reforzado para carreteras. Fuente: Tierra Armada. © Tierra Armada Chile S.A.

1.4.1. Fachada

La fachada es la cara frontal del muro de suelo reforzado, este elemento no tiene ningún fin estructural dentro de la estructura. Sin embargo, sirve como apoyo para el material de relleno y en algunos casos como enganche para los refuerzos, es decir, sirve como un sistema de contención. La fachada puede ser formada por:

Paneles de concreto armado.

Envolturas con geosintéticos

Mallas metálicas

El tipo de fachada a usar en el muro dependerá de las necesidades del proyecto, requerimientos del cliente y factores externos que puedan afectar este elemento (clima, topografía, humedad, entre otros).

1.4.2. Refuerzo

El suelo es resistente a fuerzas de compresión, pero cuando trabaja sometido a fuerzas de tracción no es tan resistente. Por esta razón, el refuerzo se utiliza para proporcionar una mayor resistencia a la tensión en el suelo, en el cual se colocan elementos de refuerzos horizontales para poder mejorar las propiedades mecánicas del suelo. El refuerzo puede ser:

- **Metálico:** Armaduras o tiras de acero.
- **Geosintéticos:** Materiales fabricados a partir de polímeros, son convertidos en fibras, láminas, mallas, etc.

1.4.3. Material de Relleno:

Es un suelo tratado, es decir, un suelo bueno (presenta capacidad portante) que aporta resistencia a la estructura. Este relleno estructural es compactado por capas.

El suelo que será tratado puede ser extraído de la zona, si el terreno in situ es de buena calidad, esto es una gran ventaja, puesto que reduce el costo, ya que el material principal es tierra de la zona. Usar suelo de relleno también permite construir en zonas de acceso complicado, puesto que este material se adapta a las características del terreno.

1.5. Proceso Constructivo

Primero se tendrá que analizar el suelo que soportará esta estructura, si el suelo es de baja calidad, se tendrá que excavar y colocar relleno estructural, se compacta y nivela.

Si el suelo es de buena calidad, se omite este paso.

Luego se procede a la construcción del sistema de drenaje, este dependerá del diseño del muro y de las características de la zona. Como paso a seguir, se realiza la colocación del geosintético (refuerzo), se debe prevenir al máximo el movimiento de la malla durante la colocación del relleno estructural, porque este puede arrugarse y luego se puede romper, en consecuencia, ya no cumplirá su función de refuerzo en esa sección.

Una vez colocada la primera capa del refuerzo, se procede a la colocación del relleno estructural y se realiza la compactación de éste, tener en cuenta que el grado de compactación del relleno debe ser del 95% de la densidad máxima del ensayo Proctor Modificado. Se recomienda que al menos los primeros 60cm de altura se realicen con compactadores manuales. El proceso se repite hasta alcanzar la altura final de diseño. Por último, se colocará la fachada.

Figura 1.4. Proceso de construcción de un muro de suelo reforzado con geosintético. Fuente: ORBE Técnicas y Medioambiente.

CAPÍTULO 2. ELEMENTOS DE REFUERZO

2.1. Introducción

Los refuerzos en las estructuras de suelo reforzado son esenciales para dar resistencia a la tensión, ya que el propio suelo no responde bien ante esta solicitud. Se puede usar como refuerzo tiras de acero o geosintéticos (geotextiles, geomembranas, geoceldas, geomallas). En la presente investigación, se abarcará solo el uso de geomallas.

Las geomallas son elementos que pueden estar hechos de polímeros, nylon o fibras de vidrio, polietileno, polipropileno. Presenta una óptima interacción con el suelo, debido a su estructura. El uso de geomallas es ventajoso porque permite una rápida y fácil instalación, sin embargo, debe ser instalada por personal calificado, ya que una inadecuada instalación puede presentar desgarros luego de la colocación del relleno. Las geomallas pueden ser utilizadas para estructuras como:

- Pavimentos
- Muros de suelo reforzado
- Refuerzo en taludes
- Aumento de la capacidad portante en Suelos blandos

Según la forma de las geomallas se clasifican en: Uniaxial, Biaxial, Multiaxial. Estas clasificaciones tienen que ver directamente con las direcciones en las cuales se distribuyen las cargas. Las uniaxiales trabajan en una única dirección, mientras las biaxiales trabajan en dos direcciones (longitudinal y transversal). Por último, la multiaxial es una geomalla rígida que trabaja en dirección radial.

2.2. Clasificación

Los refuerzos dentro de las estructuras de suelo se dividen en dos grandes grupos, extensibles e inextensibles.

Los primeros, como su nombre dice, cuentan con la capacidad de extenderse y le brindan mayor capacidad de resistencia a tensión a los muros, estos en su mayoría están conformados por elementos obtenidos gracias a los polímeros, en este caso geomallas,

pero ¿Qué son las geomallas?, según Espada Loli en su tesis “Estudio comparativo de costo entre muros de contención por el método convencional y por el método del suelo reforzado con geomallas”, las mallas son elementos que trabajan tanto en sentido vertical y horizontal o en ambos de acuerdo al uso que se les quiera dar, estas a su vez poseen una gran resistencia a la tenacidad en el sentido longitudinal del muro y son mucho más rígidas que cualquier otro geotextil, por lo tanto su deformación es menor con referencia a estos elementos.

Figura 2.1. *Geomalla uniaxial y biaxial. Fuente: DAS, Braja M. Principios de la ingeniería de cimentaciones.*

Estos refuerzos pueden sufrir alteración de tipo físicas al momento de la colocación o durante la vida útil de la estructura, todo esto dependiendo del tipo de polímero, ya sea por envejecimiento o factores físico-químicos como la oxidación y temperatura, es por eso que considerar la instalación de los mismos como un punto de quiebre entre el perfecto funcionamiento de estos elementos y el mal funcionamiento de los mismos, es de suma importancia.

Pinedo Arévalo en sus tesis “Comportamiento de Muros de Suelo reforzados con elementos extensibles y no extensibles”, es quien pide tener cuidado en la instalación y con las restricciones ya antes mencionadas:

“Es muy importante tener en cuenta que estos elementos de refuerzo son muy susceptibles a los daños por instalación, así como también a los efectos por altas temperaturas. Las condiciones de durabilidad de estos elementos de refuerzo con geosintéticos dependen básicamente del tipo de polímero, es decir, del tipo de resina, el grado los aditivos empleados y del proceso de manufactura empleado para su fabricación, así como también de la macroestructura del refuerzo”.

Con respecto a los refuerzos inextensibles, estos pueden ser flejes o mallas de acero, que cuentan con mayor rigidez y menos trabajabilidad que los geotextiles, la data de aplicación de elementos inextensibles viene de la época romana, en la cual se usaba elementos de madera o ramas de árboles.

Los elementos inextensibles tienen el defecto de ser afectados por la corrosión, esto reduce significativamente la vida útil de la estructura de suelo reforzado. El acero trabaja a tracción y puede recibir mayores cargas que los elementos de poliestireno, pero es indudable que el poliestireno tiene mayor vida útil que el acero.

Es así que el área del acero es de suma importancia en el cálculo de la resistencia a tensión de estos elementos y demostrar cual es la pérdida de la misma a lo largo del tiempo es primordial, la fórmula es muy sencilla, el espesor del acero al final de su vida útil es igual al espesor inicial menos el espesor que se tiene que considerar que se pierde por la corrosión.

$$E_c = E_o - E_R \quad \text{Ec 2.1.}$$

Donde:

- E_c : Espesor al final de la vida útil.
- E_o : Espesor inicial o de diseño.
- E_R : Espesor que se tiene esperado perder por corrosión.

Para el cálculo de la resistencia de estos refuerzos a la tracción, citamos nuevamente a Pinedo Arévalo, quien aplica la siguiente formula:

$$T_{per} = \frac{E_c * F_y}{b} \quad \text{Ec 2.2.}$$

Donde:

- T_{per} : Resistencia de estos refuerzos a la tracción
- F_y : Esfuerzo de fluencia del acero
- E_c : Espesor de acero al final de vida útil.
- b : Ancho de fleje o malla.

2.3. Materiales

Los elementos de refuerzo en los “muros de suelo reforzado” son de diversos materiales, entre ellos tenemos polyester, polietileno, polipropileno y acero, dependiendo de su trabajabilidad estos materiales pueden ser tejidos, fundidos y soldados. Pero son las geomallas de polímeros las que mejor cumplen la función de refuerzo, ya que le brindan a la estructura mayor flexibilidad y trabajabilidad ante cargas externas, teniendo capacidades de resistencia a la tensión desde 15 KN/M hasta 1000 KN/M. Este trabajo se centrará en analizar poliestireno de alta densidad y el PVC.

2.3.1. Policloruro de Vinilo (PVC)

Derivado del petróleo, denominado Policloruro de Vinilo ya que es originado por la polimerización de cloruro de vinilo, en su estado original es un polvo blanco que luego de un proceso de transformación se convierte en una resina con capacidad de ser moldeada de acuerdo a la necesidad y uso que se le quiera dar, beneficio que le brinda el hecho de ser un termoplástico.

Los refuerzos poliéster recubiertos de PVC son elementos en formas de malla, concebidas desde un principio como estructuras tejidas, que tienen gran capacidad de resistencia a la erosión generada por el suelo y que puede soportar temperaturas mayores a las que puede resistir otros refuerzos.

Las principales características de los refuerzos cubiertos de PVC son las siguientes:

- Resistente a la abrasión, fricción entre superficies (suelo-refuerzo)
- Duradero, mayor vida útil del refuerzo, por lo tanto, mayor vida útil de la estructura.
- Versatilidad al momento de transformarse de su estado inicial (polvo) a resina, una vez finalizado el proceso de transformación obtiene estabilidad y rigidez.

Figura 2.2. Geomalla recubierta de PVC, TeMa (Technologies and Materials). Recuperado de <http://www.temacorporation.com/>

2.3.2. Polietileno de Alta Densidad

El Polietileno de Alta Densidad se obtiene del gas etileno polimerizado a baja presión, es fácil de procesar ya que no necesita de tratamiento especial, su sencillez al momento de ser tratado le da un color blanquecino, es menos flexible que el polietileno de baja densidad, pero es recompensado con su resistencia.

Las geomallas de polietileno están diseñadas para trabajar de manera conjunta con el suelo, generando mayor estabilidad en la estructura. El polietileno es el polímero de mayor vida útil entre los derivados del petróleo, tiene beneficios físico-químicos con respecto a la corrosión y reacciona ante las sales que tiene todo suelo. Los principales beneficios de las geomallas de alta densidad son:

- Larga vida útil, entre 100 y 120 años.
- Alta resistencia a reacciones químicas como la oxidación y corrosión.
- Bajo costo en comparación con el acero y otros refuerzos inextensibles.
- El transporte y su facilidad en la instalación es sencilla.
- Resistencia a bacterias y ácidos que se puedan encontrar en el suelo usado para la estructura.
- No sufre deformaciones permanentes, puede ser moldeada por fuerzas externas, pero retorna a su estado natural.

Figura 2.3. *Geomalla de polietileno de alta densidad en proceso de instalación de los mismos. ARTIFAIL geomembranes. Recuperado de <https://www.atarfil.com/refuerzo-de-suelos>*

2.4. Tipos

Analizaremos los tipos de geomalla que existen, dado que, se usará este geosintético como refuerzo del MSR en esta tesis. La geomalla presenta distintas composiciones de acuerdo con el requerimiento solicitado, es así que puede estar hecha de hilos de poliéster, nylon o fibra de vidrio de alta tenacidad, para casos especiales estará compuesta de polietileno, polipropileno y fibra de vidrio. El porcentaje del área abierta debe estar entre 50 a 80%, según recomendación del Cuerpo de Ingenieros de los Estado Unidos.

Se presenta los tipos de geomallas de acuerdo a su forma:

2.4.1. Uniaxial

La geomalla uniaxial presenta su estructura completamente alineada en una sola dirección y tiene alta resistencia a la tensión.

Es la más utilizada en muros de suelo reforzado debido a que, la aplicación de las cargas en estas estructuras se da en sentido paralelo a la geomalla.

Figura 2.4. *Geomalla uniaxial. Fuente: Geoace Geosynthetics. Recuperado de: <http://www.geoaceperu.com/geomallas.html>*

2.4.2. Biaxial

Este tipo de geomalla presenta una estructura reforzada en ambas direcciones (longitudinal y transversal), en consecuencia, la distribución de los esfuerzos será más eficiente. Se utiliza para altas solicitaciones de cargas como en pavimentos.

La dirección de su instalación no es relevante, debido a que, trabaja en las dos direcciones.

Figura 2.5. *Geomalla biaxial. Fuente: Geoace Geosynthetics. Recuperado de: <http://www.geoaceperu.com/geomallas.html>*

2.4.3. Triaxial

La geomalla triaxial surge como una mejora de la biaxial y presenta una alta resistencia a la tensión “radial”, es decir, en todas las direcciones. Sus aberturas son de forma triangular debido a que, es la forma geométrica más estable y sus juntas son más fuertes. Es una geomalla rígida y presenta alta resistencia con bajas deformaciones.

Figura 2.6. *Geomalla multiaxial.* Fuente: *Geoace Geosynthetics.* Recuperado de:
<http://www.geoaceperu.com/geomallas.html>

CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO

3.1. Introducción

El diseño de los muros de suelo reforzado involucra los parámetros internos y externos de la estructura, parámetros que de no ser analizados generan actividades anómalas que tienen como síntesis las fallas en muros mecánicamente compactados, es por eso que las condiciones matemáticas con las cuales se analiza la estructura tienen que brindar información Estática y Pseudoestática.

Para la condición estática se utilizó la metodología de Equilibrio Límite, el cual hace uso del Método de Morgenstern y Price.

Las fallas en los muros de suelo reforzado son divididas en dos grandes grupos, fallas por factores externos e internos, las primeras, generadas por cálculos erróneos de esfuerzos físicos y sobrecarga, generan un desplazamiento total de toda la estructura, este desplazamiento puede ser horizontal, vertical o angular, dependiendo de la dirección de las fuerzas o de su naturaleza como tal, dentro de este grupo se encuentran las fallas por volteo, desplazamiento, capacidad de carga y general.

Por otro lado, las fallas por factores internos son generadas por un mal desempeño de los elementos de nuestra estructura, teniendo como principal agente de falla a los refuerzos, los mismos que de no tener un adecuado proceso de colocación, desencadenaran fallas por extensión de refuerzo o fallas por extracción de refuerzos.

El análisis de estabilidad interna, externa y global, brinda confiabilidad en el diseño, puesto que su función es conceptualizar la estructura como un solo elemento, el cual tiene que resistir las distintas fallas a las cuales puede ser sometida la misma. Una vez que se cumplen estos tres criterios de diseño la estructura queda apta para su construcción.

El desempeño de estos tres criterios está ligado a un buen funcionamiento del muro de suelo reforzado a lo largo de su vida útil, puesto que al analizar la estabilidad externa, se asegura el cumplimiento de parámetros que hacen eficiente a la estructura ante fallas generadas por actividades de esfuerzo externo, por su parte, una vez hecho el análisis externo se procede a analizar los elementos internos de la estructura, de tal forma que se

pueda evitar fallas que afecten la relación refuerzo-suelo y eviten desplomes o sedimentos de muro.

El análisis global, es sin duda alguna, un criterio muy importante en el diseño, puesto que estudia el comportamiento del muro de suelo reforzado, suelo de fundación y suelo relleno, los cual tiene que interactuar de tal manera que no se susciten efectos negativos o destructivos con relación a la estructura.

3.2. Condiciones de diseño

El diseño de muros de suelo reforzado se desarrolla teniendo en cuenta la estabilidad externa como la estabilidad interna de la masa del suelo reforzado detrás de la fachada. Además, es necesario realizar análisis de estabilidad global.

La estabilidad interna de muros de suelo reforzado tiene que ver con la estabilidad de los refuerzos para esto es necesario conocer las propiedades de estos refuerzos, así como también las propiedades del suelo reforzado.

La estabilidad externa depende directamente de las características geométricas del muro, de las propiedades del relleno estructural y de las cargas externas (sobrecargas).

3.2.1. Condición Estática

Para la condición estática de muros de suelo reforzado se utilizan métodos de Equilibrio Límite, esta metodología explicada en la sección 3.4.1., menciona el método de Morgenstern y Price, debe usarse un factor de seguridad mínimo de 1.3 para el diseño de muros para cargas estáticas.

La condición estática analiza la estructura sin tener en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en algunos casos, no son realistas.

3.2.2. Condición Pseudoestática

Para la condición pseudo-estática, se considera la fuerza que se producen debido a los sismos, se hace uso de las teorías de Okabe, Monobe y Matsuo, esta teoría es un complemento del Método de Coulomb, método que calcula las fuerzas de inercia que corresponden a las aceleraciones horizontales y verticales que existen en la cuña activa de Coulomb, se detalla más acerca de este método en el siguiente párrafo:

“El método pseudo estático está basado en el equilibrio de fuerzas estáticas y dinámicas, en la determinación de las fuerzas que actúan sobre el muro y sus puntos de aplicación con fines de determinar factores de seguridad al desplazamiento, vuelco y giro en la base, es decir contra la falla del muro. El método de Mononobe – Okabe (M-O) es una prolongación de la teoría estática de Coulomb para condiciones pseudo estáticas., en el cual las aceleraciones pseudo estáticas son aplicadas a la cuña activa (o pasiva) de Coulomb. El empuje de suelo pseudo estático es obtenido del equilibrio de fuerzas sobre la cuña de falla” (Afanador, N., Sanjuán, Y., Medina, D., 2012, p. 98-99)

Figura 3.1. Fuerzas actuantes en la cuña activa (izquierda) y polígono de fuerzas indicando el equilibrio de estas (derecha). Fuente: Geotechnical earthquake engineering. Kramer (1996)

3.3. Factor de seguridad

El FS se define como el cociente entre las fuerzas resistentes al corte disponible y las tensiones actuantes a lo largo de la superficie potencial de falla.

Los factores de seguridad mínimos en ocasiones son propuestos por normas y dependen del caso de estudio. Sin embargo, es posible que para cumplir los criterios de comportamiento se requieran factores de seguridad mayores a los mínimos. Calcular el factor de seguridad depende del método a utilizar. Los principales métodos son explicados en el ítem 3.4.

3.4. Filosofía de diseño

El diseño de muros de suelo reforzado se puede desarrollar de acuerdo con las normas establecidas en la metodología LFRD (Load And Resistance Factor Design). Esta metodología evalúa la estabilidad externa como interna en todos los estados límites de resistencia. Además, la estabilidad general y el movimiento vertical o lateral de la fachada se evalúan en los estados límite de servicio.

Por otra parte, los muros de suelo reforzado también se pueden diseñar bajo condiciones de Equilibrio Límite, que se basan en la estática, suponiendo que la resistencia al corte es la misma en toda la superficie de falla.

3.4.1. Equilibrio Límite

Es un método que se basa en las leyes de la estática. El método del equilibrio límite propone que la falla del suelo se desarrolla a través de una línea que representa la superficie de falla, esto produce que la sección superior a la línea (superficie de falla) se desplace con respecto a la sección inferior. Los métodos de equilibrio límite tienen en común la relación de las fuerzas resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla. Estos métodos se diferencian en el tipo de superficie de falla y en la interacción de las fuerzas. A continuación, se detallará el método de Morgenstern y Price.

3.4.1.1. Método de Morgenstern y Price

Propuesto por Morgenstern y Price (1965) llamado también Método General de Equilibrio Límite (GLE, por sus siglas en inglés “General Limit Equilibrium Method of Slices”).

El método GLE considera a todas las ecuaciones de equilibrio y la superficie de ruptura puede tener una forma cualquiera (circular, no circular o compuesta).

Los esfuerzos normales y cortantes entre las dovelas mantienen una relación definida por una función $f(x)$. Este método proporciona factores de seguridad exactos, pero conlleva a muchos cálculos complicados para obtener tal exactitud. En la figura 3.2. se puede observar el esquema general de análisis mediante este método, donde E_L y E_R son las fuerzas normales a la izquierda y derecha entre dovelas; X_L y X_R son las fuerzas verticales entre dovelas a la izquierda y derecha; P y S son las fuerzas normal y tangencial en la base de la dovela.

Figura 3.2. Fuerzas actuantes en la dovela, método Morgenstern y Price. Fuente: *Métodos Generales de Equilibrio Límite*. Alonso (1989).

3.4.2. Estado Límite

La filosofía de estado límite hace un análisis de los esfuerzos que puede resistir una estructura y los esfuerzos que causan falla en la misma, es así como se llega a la siguiente deducción:

$$X_{RES} > X_{ERROR} \quad \text{Ec 3.1.}$$

Donde:

X_{RES} : Variable de resistencia a los esfuerzos de la estructura.

X_{ERROR} : Variable de falla de la estructura.

Los factores de seguridad que se analizan bajo esta filosofía logran mejores resultados y cuentan con mayor reconocimiento, con referencia a otras filosofías de análisis.

Una de las filosofías de diseño de los muros de suelo reforzado es el estado límite, filosofía que analiza la capacidad máxima a la cual puede ser sometido un refuerzo, antes de llegar a su punto de quiebre. Para poder diseñar adecuadamente un elemento estructural suelo-refuerzo, es primordial considerar un factor de seguridad a la ruptura de los refuerzos, claro, basada en los factores de seguridad habituales. Pinedo Arévalo, nos da más información sobre el tema y enfatiza lo siguiente:

“Dichos factores de seguridad se les deberá de aplicar los factores de carga, los cuales amplifican las sobrecargas entre un 30 y 60% y a su vez aumentan los empujes que actúan en la misma dirección”.

Es así que se pasa a controlar las “tensiones admisibles”, esta información nos brinda el factor antes mencionado.

El factor de estado límite puede variar entre 1.5 y 2 dependiendo del material y su resistencia.

3.5. Diseño por Estabilidad Interna

El diseño de un muro de suelo reforzado sigue un listado de actividades que le permiten alcanzar los límites requeridos.

En primer lugar, se tiene que diseñar las dimensiones del muro, largo, alto y base. Es necesario considerar que la altura máxima de separación de refuerzos es de 1 m como máximo, de esta manera se evitan expansiones volumétricas que afecten la cara del muro, con relación a la base, la cual se considera el 0.7 de la altura.

El cálculo de la separación entre refuerzos se da en base a la siguiente fórmula:

$$S_V = T_{adm}/(\sigma_h * FS) \quad \text{Ec 3.2.}$$

Donde:

- S_V : Separación vertical o espesor de capa de suelo.
- T_{adm} : Esfuerzo admisible del geo-sintético.
- σ_h : Presión lateral total a una cierta profundidad.
- FS : Factor de Seguridad global (1.5 según AASHTO)

Se analizará la presión lateral de tierra que es generada por el suelo, cargas externas y cargas vivas. Este coeficiente se obtiene de la sumatoria de las presiones de los esfuerzos ya mencionados y está dada por la siguiente ecuación.

$$\sigma_h = \sigma_{PS} + \sigma_{SC} + \sigma_{CV} \quad \text{Ec 3.3.}$$

Donde:

- σ_{PS} : Presión generada por el suelo.
- σ_{SC} : Presión generada por sobrecarga.
- σ_{CV} : Presión generada por carga viva.

Cada una de estas presiones tiene una ecuación propia que nos permite calcularlas:

$$\sigma_{PS} = K_a + \gamma + z \quad \text{Ec 3.4.}$$

$$\sigma_{SC} = K_a + q \quad \text{Ec 3.5.}$$

$$\sigma_{CV} > P(x^2 z / R^5) \quad \text{Ec 3.6.}$$

$$K_a > \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad \text{Ec 3.7.}$$

$$q = \gamma_{SC} * D \quad \text{Ec 3.8.}$$

Donde:

- K_a : Coeficiente de presión activa.
- ϕ : Angulo de resistencia al corte por parte del suelo de relleno en la zona reforzada.
- γ : Peso unitario suelo de relleno.
- z : Profundidad desde la superficie hasta la capa de estudio.
- q : Sobrecarga en la superficie
- γ_{SC} : Peso unitario sobre carga.
- D : Profundidad suelo de descarga.
- P : Cargas concentradas.
- x : Distancia horizontal entre la carga y la cara vertical del muro.
- R : Distancia radial entre el punto de carga sobre el muro y donde la presión está siendo calculada.

Es en base a estas ecuaciones que se logra hallar el espesor de suelo compactado. Los refuerzos necesitan cálculos para analizar su longitud total. La longitud total del geo-sintético está dada por la siguiente ecuación:

$$L_T = L_G + L_E + L_O + S_V \quad \text{Ec 3.9.}$$

Donde:

- L_G : Longitud geométrica hasta la zona de falla.
- L_E : Longitud de empotramiento.
- L_O : Longitud de doblez superior, siempre considerada 1 metro.
- S_V : Separación vertical

El cálculo para L_G está dado por la siguiente ecuación:

$$L_G = (H - z) * \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{Ec 3.10.}$$

Figura 3.3. Diagrama de muro de suelo reforzado con longitudes de dobles superior y geométrica hasta la falla. Fuente: Manual de diseño. PAVCO – AMANCO (2006)

De la misma forma el cálculo para L_E está dado por la siguiente ecuación:

$$L_E = \sigma_h * CV * FS / (2 * (C + \sigma_h * \tan(\delta))) \quad \text{Ec 3.11.}$$

Donde:

- CV: Carga viva.
- FS: Factor de seguridad.
- δ : Ángulo de fricción entre el suelo y el geo-sintético de refuerzo. Obtenido por medio del método de ensayo de la norma ASTM D 5321.

Figura 3.4. Cálculo del empotramiento de refuerzo. Fuente: Manual de diseño. PAVCO – AMANCO (2006)

3.5.1. Fallas de muros de suelo reforzado por factores internos

Fallas generadas por actividad de algunos de los elementos que conforman el muro de suelo reforzado, en la mayoría de los casos los refuerzos, los cuales son alterados por su extensión o extracción. La debilidad de muro pantalla también puede generar este tipo de fallas, pero no son muy comunes.

3.5.2. Falla por extensión de los refuerzos (fluencia creep)

Generan un desplazamiento lento en la parte superior del muro, que con el tiempo va cediendo con dirección horizontal, para luego iniciar un proceso de colapso generado por el desplazamiento del muro, que a su vez es producido por el cedimiento de la parte superior del muro. Esta falla es producida por el estiramiento o ruptura de los refuerzos.

Figura 3.5. Falla por extensión de refuerzo. Fuente: Deslizamientos-Técnicas de remediación. Suarez Diaz Jaime

3.5.3. Falla por extracción de refuerzo

Falla menos común dentro del grupo de fallas internas, puesto que la resistencia suelo refuerzo es grande, impidiendo la extracción de mallas o láminas de refuerzo. En este tipo de falla, la estructura va colapsando homogéneamente, inclinando la cara (superficie) del muro, creando así un ángulo de inclinación entre el suelo y la superficie del muro.

Figura 3.6. Falla por extracción de refuerzo. Fuente: Deslizamientos-Técnicas de remediación. Suarez Diaz Jaime.

3.6. Diseño por Estabilidad Externa

La gran mayoría de muros de suelo reforzado sufren fallas por factores externos, fallas que son generadas por el tipo de suelo de soporte, a veces humedad, errores en factores de seguridad, longitud de refuerzo y pendiente del muro.

Dentro de este grupo encontramos las fallas por volteo, deslizamiento, capacidad de carga, falla general y global, cada una de ellas generada por factores externos, en muy pocas ocasiones por falla de los elementos de refuerzo. Los cálculos que requieren cada uno de los análisis de fallas son:

- Cálculo de presión de suelo

Obtención de presión generada por el suelo de relleno, la cual afecta al muro de suelo reforzado. El muro de suelo reforzado actúa como un elemento rígido que recibe una presión lateral por parte del suelo de relleno. Para este cálculo se obtiene “el coeficiente activo de presión de suelo (K)”.

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Ec 3.12}$$

Donde:

- ϕ : Angulo de fricción
- Cálculo de excentricidad.

El análisis de los esfuerzos verticales, incluido el peso propio de la estructura, nos permite conocer la excentricidad de la estructura en base a las siguientes formulas.

Figura 3.7. Estructura de suelo reforzado con parámetros respectivos. Fuente: Proyecto Línea Amarilla. Municipalidad Metropolitana de Lima

El cálculo de la excentricidad se da siguiendo los pasos indicados.

- Cálculo empuje activo

$$F_t = \frac{1}{2} * K_a * \gamma * h^2 \quad - \quad \text{Ec 3.13}$$

Donde:

- K_a : Coeficiente de empuje activo.
- γ : Peso específico de suelo.
- h : Altura muro

- Cálculo de excentricidad

Definida por la siguiente formula.

$$e = \frac{Ft(\cos\beta)h - Ft(\sin\beta)L/2 - V_2L/6}{V_1 + V_2 + Ft(\sin\beta)} \quad \text{Ec 3.14}$$

Al no contar con un ángulo de inclinación entre el suelo reforzado y el suelo retenido (β), ni esfuerzo vertical generado por el suelo retenido inclinado (V_2), la formula se simplifica.

$$e = \frac{Ft \cdot h}{V_1} \quad \text{Ec 3.15}$$

Donde:

- Ft : Empuje activo.
- h : Altura muro de suelo reforzado.
- V_1 : Peso propio muro de suelo reforzado.

- Cálculo de presión equivalente uniforme en la base

Esta ecuación asume que la carga excéntrica resulta en una carga uniforme redistribuida sobre el muro, la misma que está sometida a un área definida por la longitud de la base menos dos veces la excentricidad.

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F(\sin\beta)}{L - 2e} \quad \text{Ec 3.16}$$

Al igual que la ecuación de excentricidad (e), esta ecuación se reduce.

$$\sigma_v = \frac{V_1}{L - 2e} \quad \text{Ec 3.17}$$

Donde:

- σ_v : Presión equivalente uniforme en la base.
- e : Excentricidad.
- L : Base de muro de suelo reforzado.
- V_1 : Peso propio muro de suelo reforzado.

3.6.1. Fallas por volteo

Desplazamiento angular del muro de suelo reforzado en su totalidad, una diferencia con respecto a la falla por capacidad de carga es que no se asienta sobre su eje horizontal base, voltea todo el elemento estructural sin generar fallas internas en la estructura por encima del eje horizontal inicial. En la mayoría de los casos generados por falta de cálculos de esfuerzos verticales.

Figura 3.8. Falla por volteo. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.

- Verificación por volcamiento.

Se analiza el momento producido por las fuerzas horizontales actuantes, comparado con los momentos resistentes no vayan a ocasionar un volcamiento de muro.

El análisis se hace tomando momentos en relación con el extremo inferior de la sección transversal del muro.

$$FS_v = \frac{\sum \text{Momentos resistentes}}{\sum \text{Momentos actuantes}} \quad \text{Ec 3.18}$$

El cálculo del momento resistente se da siguiendo estos pasos.

- Momento generado por sobrecarga

$$M_{sc} = q * L * \left(\frac{L}{2}\right) \quad \text{Ec 3.19}$$

Donde:

- q: sobrecarga de muro de suelo reforzado.

-
- L: base de muro de suelo reforzado
 - Momento generado por peso propio del muro

$$M_{pm} = H * L * \gamma * \left(\frac{L}{2}\right) \quad \text{Ec 3.20}$$

Donde:

- H: altura de muro de suelo reforzado.
- L: base de muro de suelo reforzado
- γ : Peso específico de suelo.
- Por su parte el cálculo del momento actuante se desarrolla siguiendo los pasos indicados.
- Momento generado por la presión lateral de suelo

$$M_{pt} = H * P_a * \left(\frac{1}{3}\right) \quad \text{Ec 3.21}$$

Donde:

- H: altura de muro de suelo reforzado.
- P_a : Fuerzas actuantes
- Momento generado por sobrecarga

$$M_{sca} = H * P_{sc} * \left(\frac{1}{3}\right) \quad \text{Ec 3.22}$$

Donde:

- H: altura de muro de suelo reforzado.
- P_{sc} : Fuerzas resistentes.
- Momento generado por cargas vivas

$$M_{cv} = H * P_{cv} * 0.55 \quad \text{Ec 3.23}$$

Donde:

- H: altura de muro de suelo reforzado.

- Pcv: Fuerzas por carga viva.

Para finalizar se calcula el factor de seguridad por volcamiento.

3.6.2. Falla por deslizamiento

Al igual que la falla por volteo, desplaza a todo el elemento en forma horizontal, sin ninguna alteración de tipo angular y sin variar la estructuración interna del elemento. Falla generada por la masa de suelo retenida.

Figura 3.9. Falla por deslizamiento. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.

- Verificación al deslizamiento

Basada en la idea de que las fuerzas resistentes que posee el muro sean por lo menos un 50% más grandes que las que actúan sobre el mismo.

$$FS = \frac{\sum \text{fuerzas resistentes horizontales}}{\sum \text{fuerzas actuantes horizontales}} = \frac{\sum PR}{\sum PA} \geq 1.5 \quad \text{Ec 3.24}$$

Para este cálculo se prosigue con los siguientes pasos.

- Cálculo de fuerza activa del suelo

$$\sigma_v = \frac{1}{2} * Ka * \gamma * h^2 + SC \quad \text{Ec 3.25}$$

Donde:

- Ka : Coeficiente de empuje activo.
- γ : Peso específico de suelo.
- h : Altura muro

-
- SC: Sobre carga

- Cálculo de fuerzas actuantes (Fuerza cortante)

$$PA = \sigma_v * \mu \quad \text{Ec 3.26}$$

- μ : Mínimo entre $\tan(\varphi_r)$ y $\tan(\varphi_r)$.

Al no contar con un ángulo de inclinación entre el suelo reforzado y el suelo retenido (β), la única fuerza actuante sería la fuerza activa del suelo de relleno.

- Cálculo de fricciones críticas en la base

Este proceso se realiza considerando las siguientes alternativas.

- Deslizamiento a lo largo del suelo de fundación, si su resistencia al corte (φ_f) es menor que la del material de relleno.
- Deslizamiento a lo largo del relleno reforzado (φ_r).

Cálculo de fuerzas resistentes por unidad de longitud

- Fuerza por relleno de confinamiento.

$$Pa = \frac{1}{2} * \gamma * H^2 * K_a \quad \text{Ec 3.27}$$

- Donde:
- γ : Densidad suelo.
- H : Altura de muro.
- K_a : Coeficiente de empuje

- Fuerza por sobrecarga.

$$Pa = q * H * K_a \quad \text{Ec 3.28}$$

Donde:

- q : Sobre carga.
- H : Altura de muro.
- K_a : Coeficiente de empuje

- Factor de seguridad de la ecuación

$$FS = \frac{\sum PR}{\sum Pa + Psc} \geq 1.5 \quad \text{Ec 3.29}$$

3.6.3. Falla por Capacidad de Carga

Estas fallas son muy frecuentes en los muros de suelo reforzado, ya que muchas veces los muros soportan cargas mayores a las cargas con la cuales fueron diseñadas, también se generan por áreas reducidas para cargas muy grandes. Generados por falta de cálculos de esfuerzos verticales.

Figura 3.10. Falla por capacidad de carga. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.

- Verificación a la capacidad de carga.

Existen 2 formas para que se produzca este tipo de falla, por corte global y corte local.

La falla por corte local se caracteriza con la formación de un asentamiento cuando el suelo de fundación es blando.

- Falla por corte global.

Para prevenir este tipo de falla, se requiere que la presión vertical del muro no supere la capacidad de carga máxima del suelo, para esto se considera un FS de 2.5.

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{2.5} \quad \text{Ec 3.30}$$

Donde σ_v ya se calculó con la siguiente formula.

$$\sigma_v = \frac{V_1}{L - 2e} \quad \text{Ec 3.31}$$

Donde:

- σ_v : Presión equivalente uniforme en la base.
- e : Excentricidad.
- L : Base de muro de suelo reforzado.
- V_1 : Peso propio muro de suelo reforzado.

Para el cálculo de la carga última se tiene la siguiente ecuación.

$$q_{ult} = c_f N_c + 0.5(l)\gamma_f N_\gamma \quad \text{Ec 3.32}$$

Donde:

- c_f : Cohesión de muro de suelo reforzado.
- γ : Peso específico de muro de suelo reforzado.
- N_c : Coeficiente adimensional dependiente de ángulo de fricción de suelo.
- N_γ : Coeficiente adimensional dependiente de ángulo de fricción de suelo.

3.6.4. Falla General

Falla generada por cedimiento del talud sobre el cual está asentado el muro de suelo reforzado y colapso del terraplén en el cual se apoya el muro de suelo reforzado, es también conocida como la falla por asentamiento rotacional o falla global, ya que involucra a todos los elementos externos que interactúan con el suelo.

Figura 3.11. Falla general. Fuente: Diseño de muros de suelo reforzado con geosintético. Suarez Diaz Jaime.

-
- Verificación de estabilidad global

Para esta verificación se utiliza un análisis rotacional utilizando el método clásico de estabilidad de muros de suelo reforzado, con un FS mínimo de 1.5.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS NUMÉRICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

4.1. Introducción.

El objetivo de este capítulo es explicar términos básicos que están inmersos en el método de Elementos Finitos, así como aplicaciones prácticas en la herramienta computacional PLAXIS con el método antes mencionado, para resolver problemas geotécnicos.

Se busca explicar en qué consiste el análisis numérico por Elementos Finitos. Esta tesis considera que dicho análisis se basa en una formación de elementos de distintas formas geométricas (cuadradas, rectangulares, triangulares, etc.), mas no, una división de la estructura. Elementos Finitos es un método que emplea ecuaciones esfuerzo – deformación, con el fin de calcular estos, obteniendo una mejor idealización de la estructura. Vale mencionar que Elementos Finitos plantea un análisis no real. Las posibilidades de modelado en la estructura dependen, en la mayoría de casos, del conocimiento y comportamiento geotécnico de la estructura, es decir, propiedades del suelo y materiales de refuerzo, así como parámetros morfológicos de la zona.

Es así que la tecnología informática ha generado herramientas computacionales con capacidad de resolver las ecuaciones planteadas por el método de elementos finitos, transformando el elemento de suelo reforzado en un conjunto de elementos finitos con ecuaciones propias. Para este caso el análisis usará el programa PLAXIS, que es capaz de iterar todos los resultados y nos permite conocer los desplazamientos y deformaciones de la estructura.

Es importante indicar que PLAXIS cuenta con 4 subprogramas, “*Inputs*” que son los datos que se ingresaran al programa, “*Calculations*” que son los cálculos e iteraciones que se realizan para solucionar las ecuaciones, “*Outputs*” que son las salidas o resultados esperados (desplazamientos y deformaciones) y “*Curve*” que son curvas que nos permiten entender mejor los resultados obtenidos.

4.2. Análisis Numérico

El análisis por Elementos Finitos es un método numérico que consiste en calcular esfuerzos y deformaciones. Esta técnica consiste en la división de la estructura a estudiar en una malla fina, sin embargo, se considera que no se trata de una división, por el contrario, es una formación que parte de un elemento definido y forma la malla. Este elemento tiene que ser considerado de forma triangular, puesto que esta forma geométrica le da al elemento mas versatilidad, es decir se adapta a todo.

Elementos Finitos es una técnica con la cual estudiamos un elemento al máximo (momento, cortante, etc). Para los métodos numéricos, se tiene que definir la condición de estabilidad. PLAXIS es una herramienta computacional que emplea el método numérico por Elementos Finitos. Además, su elemento base de formación tiene forma triangular, vale recalcar que existen otras herramientas computacionales en las cuales los elementos que conforman la malla son cuadrados. A continuación, se presentará las ecuaciones, componentes y la malla que intervienen en el método de Elementos Finitos

4.2.1. Ecuaciones

Las ecuaciones aplicadas en Elementos Finitos tienen que ver con la aplicación de las relaciones de esfuerzo-deformación en el principio del trabajo virtual, debido a la forma variacional del esfuerzo y considerando las condiciones de borde para un problema de contorno cerrado mencionadas por Hu-Washizu (1955), el principio de trabajo virtual se puede trasladar a la siguiente ecuación:

$$\delta G_{ext} = \int (\nabla \delta u) T \sigma + \delta \varepsilon T (\sigma(\varepsilon) - \sigma) \Omega + \delta \sigma T (\nabla u - \varepsilon) d\Omega \quad \text{Ec, 4.1.}$$

Donde:

- δG_{ext} : Trabajo virtual generado por las cargas externas
- u : Desplazamientos
- σ : Esfuerzos
- ε : Deformaciones
- $\sigma(\varepsilon)$: Esfuerzos calculados a partir de las deformaciones

-
- ∇ : Operador diferencial que relaciona las deformaciones con los esfuerzos

La ecuación (4.1.) presentada en su forma más general satisface las ecuaciones de equilibrio, constitutivas y de compatibilidad de deformaciones.

4.2.2. Elementos

Al momento de generar la malla se forman elementos triangulares compuestos por nodos, a mayor número de nodos, resulta más preciso el cálculo de los esfuerzos y las cargas de falla, sin embargo, el considerar mayor número de nodos implica mayor tiempo en el procesamiento.

Durante el procesamiento de datos mediante Elementos Finitos, los desplazamientos en “x” y en “y” son calculados en los nodos. A continuación, se mostrará la distribución de los nodos en un elemento de 15 y 6 nodos que son considerados en la herramienta computacional PLAXIS.

Figura 4.1. Distribución de nodos en elementos de 15 y 6 nodos. Fuente: Modelamiento de Problemas de Estructuras de Contención Lateral mediante Programa de Elementos Finitos. Camargo (2011)

4.2.3. Malla

Una vez que se tiene definido la geometría de la estructura y las propiedades del suelo y materiales, se empieza a formar elementos finitos unidos por nodos, para su posterior cálculo. La forma básica de los elementos de la malla es triangular, dado que se adecúa a cualquier situación.

Figura 4.2. *Generación de malla de Elementos Finitos de forma triangular en una estructura de muros con anclaje. Fuente: Propia*

4.3. Herramientas

Las herramientas de análisis de muros de suelo reforzado, hoy en día, son basadas en el método de elementos finitos y se han desarrollado en el campo de la informática, logrando obtener programas que le brinda al calculista información capaz de solucionar problemas matemáticos y que de la mano con sus conocimientos y experiencia logran un elemento estructural adecuado y resistente.

4.3.1. PLAXIS

El software PLAXIS es un programa de computación que tiene como finalidad brindar soluciones a problemas geotécnicos, basado en el método de elementos finitos y parámetros físicos de los suelos.

Es así que la solución de los problemas antes mencionados, tiene como resultado un conjunto de ecuaciones matemáticas complejas, que ha simple cálculo son de gran dificultad, pero que gracias a los avances de la tecnología y de la ciencia se pudieron simplificar en modelos matemáticos simple que son resultado de pruebas experimentales e intentos empíricos de solución.

El método de elementos finitos brinda una solución computacional a todas estas ecuaciones, basándose en la interacción de partículas pequeñas e interconectadas que representa un todo, aplicando las ecuaciones de solución para cada partícula

Figura 4.3. *Proceso de división del todo en partículas. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).*

Una vez que el elemento es dividido en un conjunto de partículas, que de manera individual cuentan con ecuaciones generales, se tiene un sistema de grados de libertad finitos que a diferencia de un análisis general de todo el elemento, es sectorizado y numéricamente correcto, puesto que analizar toda la unidad de estudio implicaría un sistema de grados de libertad infinitos e incalculables. Díaz Díaz y López Alvarado (2008) dan características únicas de cada una de las partículas en las cuales se subdivide el elemento, distinguiendo dentro de los elementos de análisis:

Dominio: Espacio geométrico donde se va analizar el sistema.

Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio de sistema (cargas, desplazamiento, temperatura, etc)

Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema (desplazamientos, cargas, etc).

Figura 4.4. *Condiciones de contorno actuando sobre sistema. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).*

4.3.2. Introducción al PLAXIS

PLAXIS, es un programa de cómputo que tiene como finalidad brindar el análisis de las posibles fallas que puede sufrir el Muro de Suelo Reforzado, generadas en su gran mayoría por factores externos.

Es así que este programa procesa información, transformándola, para obtener datos de suma importancia, este proceso está conformado por 4 etapas fundamentales o subprogramas, los cuales son:

- Entradas o Inputs, denominación en inglés.
- Cálculos o Calculations, denominación en inglés.
- Salidas (resultados) u Outputs, denominación en inglés.
- Curvas o Curve, denominación en inglés.

El análisis de cada una de estas etapas computacionales y sus resultados o los factores que necesitan para su funcionamiento, se analizarán en los siguientes ítems:

- Inputs:

Medidas o factores básicos que se tienen que ingresar al programa PLAXIS para poder hallar las fallas, estos ítems de ingreso son las dimensiones del Muro de Suelo Reforzado, las condiciones externas como el tipo de suelo de asentamiento, las propiedades del suelo como el ángulo de fricción, la cohesión, la fricción entre suelo y refuerzo, las dimensiones de la malla y las condiciones iniciales (cargas y esfuerzos externos) que tendrán que resolver los problemas para cada uno de los elementos finitos que conforman el muro.

- Calculations:

Una vez obtenido el modelo matemático de partículas con ecuaciones para cada una de ellas (elementos finitos), se procede al cálculo de estas.

En este proceso se insertan parámetros numéricos que limitan las iteraciones que el programa resolverá, todo esto después de activas las entradas del programa o Inputs.

- Outputs:

Subprograma posterior a los inputs y calculations, entrega los resultados esperados en el diseño, presentando el análisis mediante la metodología de elementos finitos, durante este

proceso se puede analizar los resultados en escalas reales y se pueden observar cortes (planos) de la estructura, así como observar las deformaciones en cada uno de estos cortes, las salidas obtenidas son los desplazamientos, las deformaciones, tensión y el incremento de cada uno de estos factores.

- **Curve:**

Etapa dentro del proceso de cálculo, genera curvas diversas que permiten analizar a fondo los resultados obtenidos. Las curvas que PLAXIS brindan son las siguientes:

- Curva carga desplazamiento: Brinda el avance o cambio de los desplazamientos en cualquier punto del muro.
- Curva tiempo desplazamiento: Permite analizar el comportamiento del muro a lo largo del tiempo.
- Curva tensión deformación: Brindan análisis puntual de la deformación por tensión de suelo en cualquier punto.

4.3.3. Criterios de modelación

Para modelar la estructura se tiene que tomar en cuenta las dimensiones del área que será analizada tanto en plano como en altura, esta consideración es de suma importancia, puesto que brinda información geométrica de los niveles del terreno de fundación, terreno básico para soportar la estructura.

Otro criterio importante dentro de la modelación de muros de suelo reforzado es el análisis de los distintos tipos de suelos que interactuaran como una sola estructura, así como los aspectos físicos y químicos de estos, por ejemplo, la resistencia a corte del suelo en el cual cimentará la estructura de suelo reforzado. Para este proceso se hace uso de calicatas, con las cuales obtendremos muestras, teniendo siempre en cuenta la existencia de un cuerpo de agua que pueda alterar el resultado de las mismas.

Figura 4.5. Representación de los tipos de suelo involucrados en las estructuras de suelo reforzado. Fuente: PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Díaz (Yamile) & López (Elizabeth).

Paso siguiente, el análisis en laboratorio de las muestras de suelo de fundación, de relleno y de retención, para obtener sus parámetros físicos como por ejemplo la densidad, humedad, granulometría, saturación y otros; es importante resaltar que el análisis de parámetros físicos no es el único, también se cuenta con un análisis de parámetros mecánicos, dentro de los cuales encontramos el ángulo de fricción, la capacidad de compresión, la capacidad de consolidación y cohesión entre otros.

Una vez realizadas todas las actividades previas al modelamiento de la estructura (análisis de laboratorio), se inicia el dimensionamiento y estructuración de los muros de suelo reforzado.

CAPÍTULO 5. CASO APLICATIVO

5.1. Descripción del proyecto

5.1.1. Antecedentes Generales

El presente proyecto está ubicado en los “Almacenes de Concentrados de Minerales LOGISMINSA” cuya propietaria es Logistic Industry & Mining S.A. (en adelante LOGISMINSA), empresa que se encuentra debidamente inscrita en la SUNARP; cuyo Representante Legal es el Sr. Wilfredo Mario Guevara Ocsas, identificado con DNI N°08512516 con poderes inscritos en el asiento N°A00001 de la Partida N°13001338 del Registro de Personas Jurídicas de la Oficina Registral de Lima.

5.1.2. Ubicación

El área del proyecto “Almacén de Concentrados de Minerales LOGISMINSA” se ubica políticamente en la Av. Del Bierzo Km 3.2, Fundo Valle Alegre, al margen derecho del Río Chillón; en el distrito de Ventanilla, provincia constitucional del Callao, Región Callao.

Figura 5.1. Ubicación almacén LOGISMINSA. Fuente: Google Maps.

Geográficamente se encuentra ubicado en la costa central, en una planicie encajonado por tres flancos; norte, este y oeste del Cerro Respiro, a una altitud promedio con respecto al nivel del mar es de 70 m.s.n.m., se presenta las coordenadas del proyecto en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. *Ubicación del proyecto. Coordenadas UTM. Fuente: CICA Ingenieros Consultores Perú SAC.*

Proyecto	Este	Norte
LOGISMINSA	271139 m E	8678702 m S

5.1.3. Accesibilidad al proyecto

El acceso al área del Proyecto es desde Lima partiendo hacia el ovalo centenario, siguiendo la Av. Néstor Gambeta hasta la intersección con la Av. Del Bierzo, prosiguiendo la Av. Del Bierzo hasta la ubicación del proyecto. Se detalla los tiempos, recorridos y el tipo de vía en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. *Accesibilidad al área del proyecto. Fuente: CICA Ingenieros Consultores Perú SAC.*

Accesibilidad hacia el área del proyecto	Tiempo	Recorrido	Tipo de Vía
Lima – Ovalo Centenario	40 min	9.5 Km	Asfaltada
Ovalo Centenario – Av. Néstor Gambetta con Av. del Bierzo	40 min	13.1 Km	Asfaltada
Av. Néstor Gambetta con Av. Del Bierzo - Ubicación del Proyecto	10 min	3.2 Km	Afirmada
TOTAL	1 h 30 min	25.8 Km	

5.2. Diseño del muro

5.2.1. Parámetros Geotécnicos

En la tabla 5.3 se dan los parámetros geotécnicos correspondientes al terreno natural y al relleno estructural a utilizar, de acuerdo al estudio de suelos realizado en la zona.

Tabla 5.3. *Parámetros geotécnicos del terreno y del relleno. Fuente: Propia*

Propiedades	Terreno	Relleno	Relleno NC
Cohesión	5	0	0
Ángulo de fricción	38	36	32
Peso Unitario Natural	20	22	16
Peso Unitario Saturado	20	22	16
Clasificación SUCS/ AASHTO	GP / A-1-a	GW / A-1-a	Relleno Antrópico

5.2.2. Geometría del muro

El muro de suelo reforzado será levantado utilizando relleno estructural y geomallas, la geometría del muro fue propuesta por el especialista geotécnico del proyecto (ver figura 5.2), donde la región inferior de color mostaza, es el terreno natural, la región gris es el relleno no contralado y la región verde es el relleno estructural a utilizar para el muro.

Figura 5.2. *Geometría del muro. Fuente: Plaxis*

5.2.3. Cálculo de la Estabilidad Interna

Como se explicó en el subcapítulo 3.5, la estabilidad interna tiene que ver con el refuerzo del muro, en este caso la estructura se dividió en tres bloques, la razón de esta división radica en los esfuerzos, a mayor profundidad los esfuerzos se incrementan, conforme va creciendo la estructura soportará menos carga, por esta razón, se diseñó para 2 tipos de

geomallas. Se calculó la longitud de los 2 tipos de refuerzo y la separación vertical entre las geomallas.

Como se mencionó anteriormente, la profundidad es importante. El MSR se diseña por bloques, por motivos económicos, ya que no sería apropiado utilizar la misma geomalla en toda la estructura, recordemos que el esfuerzo a soportar no es el mismo en la parte inferior del muro que en la parte superior, por lo que no es viable utilizar solo un tipo de geomalla, ya que, encarece el proyecto. Para conocer más acerca de las propiedades mecánicas de las geomallas, revisar los anexos A.1. y A.2. A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 5.4. Resultados de las longitudes a usar para cada geomalla. Fuente: Propia

Material de Refuerzo	Altura (m)	Separación Vertical	Longitud Total
		(m)	(m)
MacGrid WG120	0 a 2	1	12
MacGrid WG120	2 a 6	1	7
MacGrid WG200	6 a 13	1	7

Se observa que el bloque más crítico es el de profundidad de 6 a 13m, en el que se utilizará la geomalla MacGrid WG200, la cual tiene una resistencia longitudinal a la tracción de 200kN/m y según los cálculos tiene una longitud de 7m. De la misma manera para el bloque de 2 a 6m, se utilizará la geomalla MacGrid WG120, la cual tiene una resistencia longitudinal a la tracción de 120kN/m y de acuerdo a los cálculos se proyectó una longitud de 7m. Por último, para el bloque superior de 0 a 2m, se volvió a utilizar la geomalla MacGrid WG120, pero de acuerdo a la geometría del muro y el área de aplicación de las sobrecargas, se estimó una longitud de 12m. Es importante señalar, que la separación vertical entre las geomallas para los 3 bloques analizados es de 1m. Para conocer más acerca de los cálculos de las longitudes de las geomallas, revisar los anexos A.3., A.4. y A.5.

5.2.4. Cálculo de la Estabilidad Externa

La estabilidad externa depende de los esfuerzos y momentos generados por los componentes del muro de suelo reforzado, además de parámetros de resistencia y diseño de los suelos (altura, base, coeficiente de fricción, cohesión y peso específico).

El análisis y procesamiento de estos datos nos permite conocer el valor numérico de los esfuerzos y calcular las distintas verificaciones mediante los factores de seguridad propios de cada tipo de falla externa.

Los datos obtenidos para este estudio fueron los siguientes:

Tabla 5.5. Dimensiones del muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.

Dimensiones		
H	13.00	m
B	9.10	m
L	80	m

Tabla 5.6. Parámetros de resistencia de los elementos del muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.

Datos				
Parámetros	Unidad	Relleno No Controlado	Relleno del muro	Terreno Natural
C	kN/m ²	0.00	0.00	5.00
ϕ	°	32.00	36.00	38.00
γ	kN/m ³	16.00	22.00	20.00

Una vez obtenida la información de laboratorio y dimensionamiento, se inicia el cálculo del coeficiente de presión de suelo, presión propia del suelo, cálculo de empuje y excentricidad. Toda esta información nos permitirá verificar cada uno de las fallas ya mencionadas.

Tabla 5.7. Coeficiente de presión de suelo de relleno. Fuente: Propia.

Coeficiente de presión de suelo		
ϕ (relleno)	32.00	°
Ka	0.31	
ϕ (reforzado)	36.00	°
Ka	0.26	

Tabla 5.8. *Peso propio de muro de suelo reforzado. Fuente: Propia.*

Peso propio Muro de Suelo		
H	13.00	m
B	9.10	m
γ	22.00	kN/m ³
V1	2602.60	kN/m

Tabla 5.9. *Empuje activo suelo de relleno. Fuente: Propia.*

Cálculo de empuje activo		
H (relleno)	7.00	m
γ	16.00	kN/m ³
Ka	0.31	
Ft (relleno)	120.45	kN/m
H (estruc.)	13.00	m
γ	22.00	kN/m ³
Ka	0.26	
Ft (estruc.)	482.63	kN/m
Ft total	603.07	kN/m

Tabla 5.10. *Cálculo de excentricidad. Fuente: Propia.*

Cálculo de excentricidad		
H	13.00	m
V1	2602.60	kN/m
Ft	603.07	kN/m
e	1.00	m

Tabla 5.11. *Cálculo de presión equivalente. Fuente: Propia.*

Presión equivalente		
SC	3900.00	kN/m
Ft	603.07	kN/m
σ_h	4503.07	kN/m

Una vez calculados estos coeficientes, se da inicio a la verificación por cada tipo falla, para esto se tiene que tener presente los “Factores de Seguridad” por falla.

Tabla 5.12. Factores de Seguridad por falla. Fuente: Propia.

Factor de Seguridad por Tipo de Falla	
Deslizamiento	≥ 1.5
Capacidad Portante	≥ 2.5
Volteo	≥ 2.0
Estabilidad Global	≥ 1.5
Estabilidad Interna	≥ 1.5

La división de las reacciones y momentos resistentes entre los actuantes nos permite conocer los factores de seguridad para cada análisis de estabilidad, estos factores no deben de ser menores a 1.5 en la mayoría de fallas, excepto de la falla de capacidad portante y volteo.

5.2.4.1. Verificación por deslizamiento

La verificación por deslizamiento se da mediante la sumatoria de fuerzas en X, donde la división fuerza resistente y la actuante tiene que ser menor a 1.5.

Tabla 5.13. Verificación por deslizamiento. Fuente: Propia.

Verificación al deslizamiento				
σ	4503.07	kN/m		
φ_f	38.00	°		
φ_r	36.00	°		
μ	0.73			
Pr	3271.67	kN/m		
Relleno confinado				
γ	22.00	kN/m ³		
H	13.00	m		
Ka	0.26			
Pa	965.25	kN/m		
Relleno sobre carga				
q	300	kN/m ²		
H	13.00	m		
Ka	0.26			
Psc	1012.5031	kN/m		
Pact	1977.76	kN/m		
FS	1.65	$\geq$	1.5	OK

5.2.4.2. Verificación capacidad de carga

Para la verificación de capacidad por carga se realiza el análisis por corte global.

Tabla 5.14. Verificación por corte global. Fuente: Propia.

Verificación a la capacidad de carga			
Falla por corte global			
V1	2602.60	kN/m	
Ft	603.07	kN/m	
e	1.00	m	
B	9.10	m	
σ_v	452.03	kN/m ²	
C	5.00	kN/m ²	
γ	20.00	kN/m ³	
Nc	61.35		
Ny	78.02		
q_{ult}	7406.97	KN	
q_a	2962.79	kN/m ²	
$\sigma(kN/m^2)$	$\leq$	$q_a(kN/m^2)$	OK
452.03	$\leq$	2962.79	

5.2.4.3. Verificación por asentamiento

Es muy importante recalcar que el módulo de elasticidad (E), es castigado por un factor de seguridad que depende del tipo de suelo y juicio de expertos.

Tabla 5.15. Verificación por asentamiento. Fuente: Propia.

Verificación asentamiento			
v	0.35		
E	84.98	kg/cm ²	
B	9.10	m	
Δq	1.00	kg/cm ²	
L	80	m	
I_s	2.44	m/m	
s	23	cm	
s	<	L/200	
23	<	40	OK

5.2.4.4. Verificación por volteo

Para verificar el volteo se realiza el cálculo de los momentos resistente y actuantes, como se indica en la tabla.

Tabla 5.16. Verificación por volteo. Fuente propia.

Verificación volteo				
Momento Resistente				
MR	24263.33	kN/m		
Momento por sobrecarga				
SC	300.00	kN/m		
B	9.10	m		
Msc	12421.50	kN/m		Momento Resistente
Momento por peso propio				
H	13.00	m		
B	9.10	m		
y	22.00	kN		
Mpm	11841.83	kN/m		
Momento actuante				
MA	8713.28	kN/m		
Momento por presión lateral				
Pa	965.25	kN/m		
H	13.00	m		
Mpl	4182.76	kN/m		
Momento por sobrecarga				
Pa	1012.50	kN/m		Momento Actuante
H	13.00	m		
Msca	4387.51	kN/m		
Momento por Carga viva				
Pcv	20.00	kN/m		
H	13.00	m		
Mcv	143.00	kN/m		
FSv	2.78	≥	2.00	OK

5.2.4.5. Estabilidad Global

Para la estabilidad general, se usó el software Slide 5.0, el cual se basa en Equilibrio Límite, se modeló el muro reforzado con las geomallas y con la carga promedio correspondiente al concentrado de mineral que se almacena en LOGISMINSA. A continuación, se muestra el modelo del muro de suelo reforzado a analizar:

Figura 5.3. Estado general del muro. Fuente: Slide

Como se puede apreciar en el modelo, la zona verde es el terreno natural, la zona crema es el relleno no controlado y la zona celeste es el relleno del muro. Con respecto a las geomallas, las tiras de color azul son las que representan a la geomalla MacGrid WG120, mientras que las tiras de color verde representan a la geomalla MacGrid WG200. Slide 5.0 da la facilidad de escoger el método de análisis de Equilibrio Límite a usar, para este caso, se utilizó el método de Morgenstern-Price, el cual se explicó en la sección 3.4.1.1., con este método se obtuvo un factor de seguridad de 1.5 (ver Figura 5.4.), el cual cumple con el factor de seguridad mínimo utilizado en esta investigación.

Figura 5.4. *Análisis de Estabilidad Global mediante Método GLE/ Morgenstern – Price. Fuente: Slide*

En la figura 5.4 se aprecia la posible superficie de falla de la estructura (curva verde), que desarrollaría el muro ante la carga propuesta. A continuación, se muestra la tabla del resultado calculado mediante Slide, para estabilidad global del muro.

Tabla 5.17. *Resultado de Factor de Seguridad. Fuente propia.*

FS Estabilidad Global	FS Calculado Slide	Condición
≥ 1.5	1.5	Cumple

5.2.5. Análisis Tensión - Deformación

Para poder realizar este tipo de análisis, se ha utilizado un programa dedicado al área de la Geotecnia, es el PLAXIS, este nos va ayudar a poder encontrar las deformaciones, así como también los esfuerzos. Para esto, se diseñó el muro de suelo reforzado en el programa. A continuación se muestra la estructura a analizar:

Figura 5.5. Modelo del muro de suelo reforzado del proyecto LOGISMINSA. Fuente: PLAXIS

En la figura 5.5 se identifican 3 tipos de suelo, sus parámetros geotécnicos se detallan en la tabla 5.3, el suelo de fundación es el de color mostaza, el relleno no controlado (suelo pobre, de baja capacidad portante) se representa en la región de color plomo. El relleno del muro es la región de color verde. Las tiras de color amarillo representan las geomallas, el programa automáticamente les asigna un orden mediante números, las geomallas del 1 al 8, le corresponden al tipo MacGrid WG200, mientras que las geomallas restantes son las de tipo MacGrid WG120. Por último, la sobrecarga distribuida a lo largo de todo el muro es de 200 kN/m que corresponde al concentrado de mineral.

El primer paso es definir las características geotécnicas de los estratos de suelo, las propiedades mecánicas de los refuerzos y la geometría del muro. Todos esos datos se introducen en el PLAXIS. Luego, se rigidiza la estructura, también se le puede asignar nivel freático, pero para este proyecto, no se encontró nivel freático. El paso siguiente es asignar las fases del muro, es decir el proceso constructivo, como fase inicial se tendrá el muro sin reforzar, luego se designa la fase del muro ya con las geomallas y la carga aplicada al mismo. Finalmente, se ejecuta el programa, y se obtendrán modelados para cada fase propuesta.

- **Limitaciones en desplazamientos generados por tensión deformación.**

Con respecto al desplazamiento lateral, la FHWA en su libro “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I”, indica que estos desplazamientos se pueden generar durante la construcción del muro y en una etapa posterior a este proceso.

La manera de calcular el desplazamiento máximo en Muros de Suelo Reforzados se indica en la siguiente imagen.

Figura 5.6. Curva empírica para estimar desplazamiento lateral para MSR (FHWRD 89-043).

Para esta tesis se calculará el desplazamiento con la fórmula de muros con refuerzo extensible, en la cual tenemos que dividir la altura (H) entre 75 y multiplicarla por coeficiente que se halla con la curva que muestra la **Figura 5.6**, para este cálculo dividimos la longitud del muro en 4 y obtuvimos elementos de 20 m de longitud. El coeficiente empírico para calcular el desplazamiento lateral que usamos fue 1.2 (según curva) que al ser multiplicado por la altura entre 75 nos da como resultado 26 cm de desplazamiento lateral máximo.

Los desplazamientos verticales generados por la tensión deformación en el muro se calcularán con la metodología AASHTO, puesto que la FHWA también toma como referencia a esta norma.

Es así que el calculo del desplazamiento vertical máximo se calculará con la siguiente formula:

$$\delta v_{max} = \frac{L}{200} \quad \text{Ec 5.1}$$

El asentamiento vertical máximo calculado para el muro es de 20 cm.

5.2.5.1. Resultados

Se analizó deformaciones y esfuerzos en los ejes horizontal y vertical. La Figura 5.6 corresponde a los desplazamientos horizontales, siendo el de mayor desplazamiento de 1cm. Además, se aprecia que los que la mayoría de desplazamientos se dan en el cuerpo del muro, esto tiene coherencia, debido al empuje ocasionado por el relleno no controlado y parte del terreno de fundación.

Figura 5.7. Desplazamientos en el eje horizontal del muro. Fuente: PLAXIS

Las flechas que se aprecian en la cara frontal del muro en la Figura 5.6 representan los posibles desplazamientos que podrían darse. Sin embargo, para una mejor visualización de las zonas donde se puede dar los desplazamientos, se presenta la Figura 5.7 que indica los desplazamientos por zonas sombreadas.

Figura 5.8. Desplazamientos en el eje horizontal del muro por regiones sombreadas. Fuente: PLAXIS

La figura 5.7 representa los desplazamientos por zonas. Se puede apreciar que la zona de mayor desplazamiento corresponde a la punta de la parte superior de la cara frontal del muro. Esto no significa que la estructura vaya a colapsar, solo indica la zona más probable a desplazarse. Siendo este desplazamiento de 1cm, que, de acuerdo a especialistas geotécnicos, este valor no ocasionará algún daño a la estructura, ya que se encuentra dentro de los límites recomendables de desplazamiento de un muro en su eje horizontal. De acuerdo a esta consideración, la estructura cumple con lo solicitado.

Por otro lado, para el desplazamiento vertical, es decir, para el asentamiento, sí existe una norma según AASHTO, para determinar el valor máximo de asentamiento solo en muros de suelo reforzado. A continuación, se presenta parte de la norma:

“En general, las estructuras MSE con revestimiento de hormigón que usan paneles articulados discretos pueden acomodar asentamientos diferenciales longitudinales máximos de aproximadamente 1/100, sin la introducción de juntas deslizantes especiales entre paneles. Los paneles de hormigón de altura completa son considerablemente menos tolerantes y, por lo general, no deben considerarse

cuando se anticipan asentamientos diferenciales. Las paredes enfrentadas de la unidad MBW pueden acomodar asentamientos diferenciales longitudinales máximos de aproximadamente 1/200, con la introducción de juntas deslizantes especiales” (National Highway Institute, 2009, p.36)

De acuerdo a lo indicado en “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I”, se consideró el asentamiento máximo como:

$$\text{Desplazamiento vertical máximo} = \frac{L}{200} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Dónde:

- L : Largo del muro

De acuerdo a los planos, el largo del muro es de 80m. Entonces reemplazando este valor en la Ec 5.1 se tendrá un asentamiento máximo de 0.40m. La Figura 5.8 representa los desplazamientos verticales, siendo el máximo de 1.3cm, este valor es mínimo si se le compara con el máximo permitido, por lo que el asentamiento del muro cumple con la norma dada por la AASHTO.

Figura 5.9. Desplazamientos en el eje vertical del muro. Fuente: PLAXIS

La Figura 5.9 representa las regiones donde se da el asentamiento máximo. Como se puede apreciar los asentamientos se dan en la parte superior del muro, estos son ocasionados por el mineral almacenado en la plataforma superior.

Figura 5.10. Desplazamientos en el eje vertical del muro por regiones sombreadas. Fuente: PLAXIS

Por otra parte, PLAXIS también nos proporciona los esfuerzos que se generan por la sobrecarga y por el mismo peso del muro. Como se puede apreciar en la Figura 5.10 los esfuerzos van aumentando de acuerdo a la profundidad. Esto tiene sentido, porque a mayor profundidad se generará mayor esfuerzo, debido al peso del muro. Siendo el esfuerzo máximo promedio en la parte inferior del muro de 250 kN/m^2 aproximadamente.

Figura 5.11. Esfuerzos aplicados en el muro. Fuente: PLAXIS

CONCLUSIONES

- Se diseñó las longitudes de las geomallas MacGrid WG120 y MacGrid WG200, siendo las longitudes de 12 para la MacGrid WG120 y de 7m para la geomalla MacGrid WG200, estas longitudes se verificaron con un análisis tensión – deformación utilizando el Plaxis, obteniendo una deformación vertical de 1.3cm y una deformación horizontal de 1cm, esta deformación se debe al empuje que generan el relleno no controlado y las cargas generadas por el concentrado mineral en la superficie del muro, el esfuerzo máximo promedio generado en el muro es de 250kN/m^2 aproximadamente. También, se verificó la estabilidad global con ayuda del Slide obtenido así un factor de seguridad de 1.5, cumpliendo con el mínimo requerido.
- Se definió como elemento de refuerzo la geomalla biaxial, ya que este material aportará resistencia a la tracción en la estructura. Además, las geomallas son especialmente indicadas para la estabilización de estructuras de contención de suelo reforzado. Se definió como sistema de drenaje, el geocompuesto MacDrain, este sistema está compuesto por un núcleo drenante y unido a una o dos capas de geomalla, el núcleo retiene los finos y solo pasa el agua, la cual es conducida directamente hacia un dren colector.
- Se indicó las propiedades de resistencia de los dos tipos de geomalla utilizadas, MacGrid WG120 y MacGrid WG200, las cuales tienen una resistencia longitudinal a la tracción de 120 y 200 kN/m respectivamente. Por otra parte, se dan a conocer tres tipos de suelo: Terreno Natural, Relleno del muro y Relleno no controlado, teniendo como peso unitario 20, 22 y 16 kN/m³ respectivamente, para la cohesión presentan 5, 0 y 0 kN/m². Por último, presentan un ángulo de fricción de 38, 36 y 32° respectivamente.

- Se definió tres criterios de análisis para el muro de suelo reforzado, se realizó un análisis de estabilidad interna, análisis de estabilidad externa y análisis de estabilidad global. La estabilidad interna permitió diseñar la longitud y número de geomallas a utilizar, la estabilidad externa permitió calcular factores de seguridad para volteo, deslizamiento, capacidad portante y asentamiento. Para finalizar, la estabilidad global permitió conocer la superficie de falla y su respectivo factor de seguridad.
- Se verificó los factores de seguridad (FS) de estabilidad externa con respecto a los factores de seguridad mínimos propuestos, obteniendo así los siguientes resultados:

Tipo de Falla	FS Mínimo Requerido	FS calculado
Deslizamiento	≥ 1.5	1.65
Volteo	≥ 2.0	2.78
Estabilidad Global	≥ 1.5	1.5

Tipo de Falla	Admisible	Calculado
Capacidad Portante	2962.79 kN/m ²	452.03 kN/m ²
Asentamiento	40 cm	23cm

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis sísmico, con la finalidad de obtener resultados más certeros con respecto a los desplazamientos y esfuerzos capaces de deformar la estructura.
- Aplicar un análisis de pseudo-estático brinda mayor confiabilidad a los cálculos, es recomendable la aplicación de este análisis de manera paralela al análisis estático.
- Es recomendable realizar un análisis más profundo de las propiedades de los refuerzos que conformaran la estructura, esfuerzos de fricción ante el suelo estructural y capacidad de resistencia a la tensión y corte.
- La clasificación del tipo de suelo que conforma el relleno estructural, relleno no estructural y suelo de fundación, permite afirmar las propiedades presentadas en esta tesis, por lo tanto, es recomendable realizar estudios que permitan identificar estos suelos.
- La implementación de un dren para el drenaje de agua, establece nuevos parámetros en la estructuración, es recomendable analizar a fondo las propiedades de este elemento, así como su dimensionamiento mediante un software hidráulico.
- Es importante controlar los elementos finos en el relleno estructural, puestos que la pérdida de estos genera la reducción de la densidad del ya mencionado relleno, así como resistencia. Para evitar este fenómeno, es importante asegurar un adecuado proceso constructivo del muro, en especial el tendido de refuerzo, que será el que evite que los finos se asienten.
- La influencia del agua en la estructura tiene que ser analizada de acuerdo zona en la cual se construye y la utilidad que se le da. Para plataformas de concentrado minero, se tiene que considerar el uso de agua para el lavado del material procedente de mina.
- El análisis de fallas por factores internos permite mejorar el diseño de la estructura, para realizar este análisis es importante conocer las propiedades de los refuerzos, que para este estudio fueron brindadas por una empresa dedicada a este rubro. Es recomendable realizar estudios que permitan verificar esta información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AASHTO-AGC_ARTBA Task force 27 (1991). "Design Guidelines for the use of extensible reinforcement (Geosynthetic) for Mechanically Stabilized Earth Walls in Permanent Applications"
2. Abbasi, O., Ghanbari, A., Hosseini, S. (2014). An analytical method for calculating the natural frequency of reinforced retaining walls with soil-structure interaction effect. *Geosynth. Int.*, 21 (1), 53-61.
3. Afanador, N., Sanjuán, Y., Medina, D. (2012). Diseño Sísmico de Muros de Contención en Gravedad y Voladizo. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. 2(20), 97-104
4. Akhlaghi, T., Nikkar, A. (2014). Numerical analyses of dynamic response of geosynthetic-reinforced soil retaining wall. *Geosystem Eng.*, 17 (2), 142-149.
5. Allen, T., Bathurst, R. (2014). Performance of an 11 m high block-faced geogrid wall designed using the K-stiffness method. *Can. Geotechnical J.*, 51 (1), 16-29.
6. Alonso, Eduardo (1989). Análisis de la estabilidad de taludes. Casos simples. En Corominas, J. (editor), "Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales", Monografía nº 3, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 97–118.
7. Alonso, Eduardo (1989). Métodos generales de equilibrio límite. En Corominas, J. (editor), "Estabilidad de Taludes y Laderas Naturales", Monografía nº 3, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 119–166.
8. Arya, L. M., and Paris, J. F. (1981). "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1023–1030.
9. Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E. (2002). An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soil. *Soils Found.*, 42 (5), 47-57.
10. Bathurst, R., Cai, Z. (1995). Pseudo-static seismic design of geosynthetic-reinforced segmental retaining walls. *Geosynth. Int.*, 2 (5), 787-830.
11. Blake, J. R., Renaud, J.-P., Anderson, M. G., and Hencher, S. R. (2003). "Prediction of rainfall-induced transient water pressure head behind a retaining wall using a high-resolution finite element model." *Comput. Geotech.*, 30 (6), 431–442.
12. Chen, R., Chiu, Y. (2008). Model tests of geocell retaining structures. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (1), 56–57.
13. Chen, H., Hung, W., Chang, C., Chen, Y., Lee, C. (2007). Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill. *Geotextiles and Geomembranes* 25 (6), 346–359.
14. Curiel & Forteza. 2007. Muro de contención en suelo reforzado "Solución alternativa a un muro tradicional de hormigón". Departamento Técnico - América T&S.
15. Davis, E. H. (1968). "Theories of plasticity and the failure of soil masses." *Soil mechanics: Selected topics*, Butterworth's, London, 341–380.

-
16. Espada Loli. 2017. "Estudio comparativo de costos entre muros de contención por el método convencional y por el método del suelo reforzado con geomallas". Universidad Nacional "Santiago Antunez de Mayolo".
 17. Gan, J. K. M., and Fredlund, D. G. (1988). "Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." *Can. Geotech. J.*, 25 (3), 500–510.
 18. Jones, J.F.P. 1996. *Earth Reinforcement & Soil Structures*. Nueva Edición. Editorial Thomas Telford. New York, USA. 379 pp.
 19. Hatami, K., Bathurst, R. (2006). Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132 (6), 673–684.
 20. Koerner, R. M., and Soong, T. Y. (2001). "Geosynthetic reinforced segmental retaining walls." *Geotext. Geomembr.*, 19 (6), 359–386.
 21. Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Inc. United States of America.
 22. Lee, K., Wu, J. (2004). A synthesis of case histories on GRS bridge-supporting structures with flexible facing. *Geotextiles and Geomembranes* 22 (4), 181–204.
 23. Leshchinsky, D. (1999). "Putting technology to work: MSEW and Re-Slope for reinforced soil-structure design." *Geotechnical Fabrics Rep.*, 17 (3), 34–39.
 24. Leshchinsky, D., Han, J., (2004). Geosynthetic reinforced multitiered walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (12), 1225–1235.
 25. Ling, H.I., Leshchinsky, D., Chou, N.N.S., 2001. Post-earthquake investigation on several geosynthetic-reinforced soil retaining walls and slopes during the Ji-Ji earthquake of Taiwan. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 21 (4), 297–313.
 26. Ling, H., Mohri, Y., Leshchinsky, D., Burke, C., Matsushima, K., Liu, H., (2005). LargeScale shaking table tests on Modular-block reinforced soil retaining walls. *J. Geotechnical Geoenvironmental Eng.*, 131 (4), 465–476.
 27. Nouri, H., Fakher, A., Jones, C. (2006). Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2), 175–187.

ANEXOS

A. Especificaciones Técnicas de Geomallas

MacGrid® WG120

Geomalla Tejida

Características técnicas

MacGrid® WG120 es una geomalla tejida producida a partir de hilos de poliéster de alta tenacidad los cuales reciben revestimiento en PVC para la protección del núcleo, es resistente a la daños de instalación, ataques químicos, biológicos, ambientales y son especialmente indicadas para estabilización de estructuras de contención en suelo reforzado, refuerzo de terraplenes sobre suelos blandos, refuerzo de pavimentos entre otras aplicaciones.

Propiedades Mecánicas	Unidad	Ensayo	WG120/30
Resist. Longitudinal a la Tracción	T_{ult} kN/m	ASTM D 6637	120
Deformación a la Rotura	e %	ASTM D 6637	≤ 11
Resist. Transversal a la Tracción	T_{ult} kN/m	ASTM D 6637	30

Propiedades Físicas	Unidad	Ensayo	WG120/30
Abertura nominal de la malla longitudinal	mm		21
Abertura nominal de la malla transversal	mm		25

Propiedades a Largo Plazo	Unidad	Ensayo	WG120/30
Factor Reducción, Fluencia - Creep	RF_{CR} ---	ASTM D 5262	1.43
Factor Reducción, Durabilidad	RF_D ---	FHWA RD 97-144	1.15
Factor Reducción, Daños de Instalación	RF_{ID} ---	ASTM D 5818	1.03
Factor de Reducción Total, $RF_G = (RF_{CR} \times RF_D \times RF_{ID})$			1.69
Resistencia a Largo Plazo, $LTDS = T_{ult} / RF_G$	kN/m		71.0

Presentación	Unidad	Ensayo	WG120/30
Ancho del Rollo	m		3.90
Largo del Rollo	m		100.0

Anexo A.1. Propiedades mecánicas de la geomalla MacGrid WG120. Fuente: Maccaferri

MacGrid® WG200

Geomalla Tejida

Características técnicas

MacGrid® WG200 es una geomalla tejida producida a partir de hilos de poliéster de alta tenacidad los cuales reciben revestimiento en PVC para la protección del núcleo, es resistente a la daños de instalación, ataques químicos, biológicos, ambientales y son especialmente indicadas para estabilización de estructuras de contención en suelo reforzado, refuerzo de terraplenes sobre suelos blandos, refuerzo de pavimentos entre otras aplicaciones.

Propiedades Mecánicas		Unidad	Norma	WG200/30
Resist. Longitudinal a la Tracción	T_{ut}	kN/m	ASTM D 6637	200
Deformación a la Rotura	e	%	ASTM D 6637	≤ 12
Resist. Transversal a la Tracción	T_{ut}	kN/m	ASTM D 6637	30

Propiedades Físicas		Unidad	Norma	WG200/30
Abertura nominal de la malla longitudinal		mm		20
Abertura nominal de la malla transversal		mm		25

Propiedades a Largo Plazo		Unidad	Norma	WG200/30
Factor Reducción, Fluencia - Creep	RF_{CR}	---	ASTM D 5262	1.43
Factor Reducción, Durabilidad	RF_D	---	FHWA RD 97-144	1.15
Factor Reducción, Daños de Instalación	RF_{ID}	---	ASTM D 5818	1.03
Factor de Reducción Total, $RF_G = (RF_{CR} \times RF_D \times RF_{ID})$				1.69
Resistencia a Largo Plazo, $LTDS = T_{ut} / RF_G$		kN/m		118.0

Presentación		Unidad	Norma	WG200/30
Ancho del Rollo		m		3.90
Largo del Rollo		m		100.0

Anexo A.2. Propiedades mecánicas de la geomalla MacGrid WG200. Fuente: Maccaferri

B. Especificaciones Técnicas de Geomallas

Diseño de Estabilidad Interna

Proyecto: Almacén Logisminsá

Ubicación: Fundo Valle Alegre - Callao

Realizado por: J. Yncio

Revisión : A

Revisado por: J. Cárdenas

Fecha: 13-sep-18

Factor de Seguridad

Datos del Suelo

Angulo de Fricción : 36 °
Cohesión : 0 KN/m²
Peso Unitario del Relleno : 22 KN/m³

Datos del Muro

Altura máxima : 13 m
Base : 30 m
Sobrecargas : 450 KN/m²

Tercio Inferior $6 \leq z \leq 13$

Profundidad : 12 m

Material de Refuerzo

MacGrid WG 200
 T_{ult} 200 KN/m
 T_{adm} 118.1 KN/m

Presión lateral total

K_a 0.26
 σ_{cv} 0.2 KN/m²
 σ_h 185.57 KN/m²

Factor de Seguridad Global (FS)

FSg 1.30

Longitud geométrica hasta la zona de falla

L_g 0.51 m

Separación Vertical

S_v 1.0 m

Longitud de empotramiento

L_e 0.41 m
 $L_{e \min}$ 1 m

Longitud del Refuerzo Total

L_T 7 m

Anexo B.1. Cálculo de longitud de geomalla MacGrid WG200 en la zona inferior del muro.

Diseño de Estabilidad Interna

Proyecto: Almacén Logisminsa
Ubicación: Fundo Valle Alegre - Callao

Realizado por: J. Yncio
Revisado por: J. Cárdenas
Revisión: A
Fecha: 13-sep-18

Factor de Seguridad

Datos del Suelo

Angulo de Fricción : 36 °
Cohesión : 0 KN/m²
Peso Unitario del Relleno : 22 KN/m³

Datos del Muro

Altura máxima : 13 m
Base : 30 m
Sobrecargas : 450 KN/m²

Tercio Inferior 2 ≤ z ≤ 6

Profundidad : 4 m

Material de Refuerzo

MacGrid WG 120
 T_{ult} 120 KN/m
 T_{adm} 70.8 KN/m

Presión lateral total

Ka 0.26
 σ_{CV} 1.73 KN/m²
 σ_h 141.40 KN/m²

Factor de Seguridad Global (FS)

FSg 1.30

Longitud geométrica hasta la zona de falla

L_g 4.59 m

Separación Vertical

S_v 1.0 m

Longitud de empotramiento

L_e 0.73 m
 $L_{e\ min}$ 1 m

Longitud del Refuerzo Total

L_T 7.00 m

Anexo B.2. Cálculo de longitud de geomalla MacGrid WG120 en la zona media del muro.

Diseño de Estabilidad Interna

Proyecto: Almacén Logisminsa
Ubicación: Fundo Valle Alegre - Callao

Realizado por: J. Yncio
Revisado por: J. Cárdenas
Revisión: A
Fecha: 13-sep-18

Factor de Seguridad

Datos del Suelo

Angulo de Fricción : 36 °
Cohesión : 0 KN/m²
Peso Unitario del Relleno : 22 KN/m³

Datos del Muro

Altura máxima : 13 m
Base : 30 m
Sobrecargas : 450 KN/m²

Tercio Inferior $0 \leq z \leq 2$

Profundidad : 2 m

Material de Refuerzo

MacGrid WG 120
 T_{ult} 120 KN/m
 T_{adm} 70.8 KN/m

Presión lateral total

Ka 0.26
 σ_{cv} 1.73 KN/m²
 σ_h 129.98 KN/m²

Factor de Seguridad Global (FS)

FSg 1.30

Longitud geométrica hasta la zona de falla

L_g 5.60 m

Separación Vertical

S_v 1.0 m

Longitud de empotramiento

L_e 1.46 m
 $L_{e \text{ min}}$ 1 m

Longitud del Refuerzo Total

L_T 12.00 m

Anexo B.3. Cálculo de longitud de geomalla MacGrid WG120 en la zona superior del muro.

C. Elaboración de Modelo Slide

Anexo C.1. Comando para definir los materiales a usar.

Anexo C.2. Definir las propiedades geotécnicas de los tipos de suelo.

Anexo C.3. Comando para realizar la geometría de la estructura.

Anexo C.4. Digitar “t” para generar tabla e insertar coordenadas.

Anexo C.5. Con la geometría lista y asignado los materiales, se procede a colocar la carga.

Anexo C.6. Definir la carga.

Anexo C.7. Ya teniendo lista la estructura, se genera el auto grid, en el comando encerrado en el círculo rojo.

Anexo C.8. Ya definida la estructura y generada la zona del grid, se procede a calcular, con el comando “Compute” encerrado en el círculo rojo.

Anexo C.9. Luego de calcular, con el comando “Surface”, que esta al costado del Comado “Compute”, se procede a ver el Factor de Seguridad (F.S.)

D. Elaboración de Modelo Plaxis

Anexo D.1. Elegir las unidades

Anexo D.2. Creación de materiales con el comando encerrado en el círculo rojo. Luego elegir en Set Type, la opción “Soil & Interfaces” y dar click en “New”.

Mohr-Coulomb - Relleno del muro

General | Parameters | Interfaces

Material Set

Identification:

Material model:

Material type:

General properties

γ_{unsat} kN/m³

γ_{sat} kN/m³

Comments

Permeability

k_x : m/day

k_y : m/day

[Advanced...](#)

Anexo D.3. Editar el nombre, modelo de material, peso específico.

Mohr-Coulomb - Relleno del muro

General | Parameters | Interfaces

Stiffness

E_{ref} : kN/m²

ν (nu):

Strength

c_{ref} : kN/m²

ϕ (phi): °

ψ (psi): °

Alternatives

G_{ref} : kN/m²

E_{oed} : kN/m²

Velocities

V_s : m/s

V_p : m/s

[Advanced...](#)

Anexo D.4. Editar las propiedades geotécnicas que tendrá el material (Tipo de suelo).

Anexo D.5. Para las geomallas elegir en Set Type, la opción “Geogrids” y dar click en “New”.

Anexo D.6. Editar las propiedades de la geomalla.

Anexo D.7. Crear la geometría de la estructura.

Anexo D.8. Establecer nivel freático, para este proyecto no existe nivel freático, por lo que se dejó en la base de la estructura.

Anexo D.9. Click en “Update”

Anexo D.10. Click en el comando encerrado en el círculo rojo, aparecerá ese cuadro, dar OK.

Anexo D.11. Click en “Update”

Anexo D.12. Luego dar click en “Initial Conditions”. Para poder crear las fases (proceso constructivo del muro de suelo reforzado)

Anexo D.13. Cambiar a la pestaña de “Parameters” y da click en “Define”.

Anexo D.14. Definir el proceso constructivo, para cada fase.

Anexo D.15. Se crea una nueva fase y se define el proceso constructivo, se repite hasta llegar a la fase final de construcción de la estructura.

Anexo D.16. Fase final de la estructura.

Anexo D.17. Click en “Calculate”, para correr el modelo.

Anexo D.18. Para ver los resultados de deformaciones y esfuerzos, en el menú superior en las opciones de “Deformations” y “Stresses”.