



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL

Análisis del comportamiento geomecánico de suelos a partir de un modelo físico del suelo.

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Cueva Velásquez Gustavo Adolfo

DIRECTORA: Esparza Villalba Carmen Antonieta, Ing. M.Sc.

LOJA - ECUADOR

2015

APROBACIÓN DE LA DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. M.Sc. Carmen Antonieta Esparza Villalba

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: Análisis del comportamiento geomecánico de los suelos a partir de un modelo físico del suelo, realizado por Gustavo Adolfo Cueva Velásquez, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Junio de 2015

f).....

Ing. M.Sc. Esparza Villalba Carmen Antonieta.

C.I: 1711239713.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Gustavo Adolfo Cueva Velásquez” declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Análisis del comportamiento geomecánico de los suelos a partir de un modelo físico del suelo, de la Titulación de Ingeniero Civil, siendo Carmen Antonieta Esparza Villalba directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).....

Cueva Velásquez Gustavo Adolfo.

C.I: 1104275621.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, se lo dedico a mis padres Gustavo Adolfo y Juana América, que me dieron todo su amor, su pasión y sabiduría para que yo pueda seguir el camino correcto para realizarme como persona, a ustedes padres queridos se los debo todo y este trabajo para la obtención de mi título de Ingeniero Civil, se los entrego con todo mi amor.

AGRADECIMIENTO

Primeramente quisiera darle las gracias a Dios, por permitirme tener la hermosa familia y la maravillosa vida junto a ellos.

A mis hermanas María Fernanda y Pamela Stefanía, por estar siempre cuidando de mí, son mis hermanas mayores pero siempre las veré como aquellas niñas alegres y llenas de energía que desde el comienzo vivieron todas las travesuras en las que yo fui cómplice y autor de muchas.

A mi novia Martina Pilar, que atravesó conmigo toda mi vida universitaria, a ella quisiera agradecerle de manera especial por estar en los momentos tristes y de gloria, por saber soportar muchas cosas a mi lado y por saber controlar y enfocar mi energía al estudio, para no desperdiciar el tiempo en actividades poco o nada enriquecedoras.

Quisiera agradecerle a mi abuelo que en paz descanse, ya que él siempre pensó que yo sería un excelente profesional, siempre me veía con esos ojos llenos de amor y de alegría, siempre anheló verme como ingeniero, y al no tenerte a mi lado abuelito créeme que daré lo mejor de mí, a esta vida llena de retos.

A la ingeniera, M.Sc. Carmen Esparza directora de este trabajo, por su aporte fundamental en todo lo elaborado, le agradezco por confiar en mí para la realización de esta investigación, y por ayudarme a culminar con mi formación como profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Autorización.....	ii
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice de contenidos.....	vi
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I.....	5
GENERALIDADES.....	5
1.1. Preámbulo.....	6
1.2. Alcance.....	7
1.3. Justificación.....	7
1.4. Objetivos.....	8
1.4.1. General.....	8
1.4.2. Específicos.....	8
1.5. Ubicación y metodología.....	8
1.5.1. Muestreo.....	11
1.5.2. Ensayos.....	13
1.6. Perfiles considerados zonas de estudio.....	15
1.6.1. Zona 1.....	15
1.6.2. Zona 2.....	16
1.6.3. Zona 3.....	17
1.6.4. Zona 4.....	18
CAPÍTULO II.....	19
MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. Suelo.....	20
2.1.1. Definición.....	20
2.1.2. Propiedades geomecánicas.....	20
2.2. Movimientos de masa.....	25
2.2.1. Tipos de falla en taludes.....	25
2.2.2. Falla por deslizamiento superficial.....	26
2.2.3. Falla por movimiento del cuerpo del talud.....	26
2.2.4. Falla por flujos.....	27

2.3.	Estabilidad de taludes.....	27
2.3.1.	Definición talud.....	27
2.3.2.	Definición de estabilidad.....	28
2.3.3.	Análisis de estabilidad de taludes.....	28
2.3.4.	Metodología de equilibrio límite.....	29
2.3.5.	Metodología de elementos finitos.....	32
CAPÍTULO III.....		33
BANCO DE PRUEBA.....		33
3.1.	Definición banco de prueba.....	34
3.2.	Metodología.....	34
3.3.	Condiciones del terreno y parámetros a considerar.....	35
3.4.	Distribución estratos de prueba modelación número 1.....	35
3.4.1.	Ejecución banco de prueba número 1.....	39
3.4.2.	Resultados mediante análisis de equilibrio límite.....	41
3.4.3.	Resultados mediante análisis de elementos finitos.....	43
3.5.	Distribución estratos de prueba modelación número 2.....	55
3.5.1.	Ejecución banco de prueba número 2.....	57
3.5.2.	Resultados mediante análisis de equilibrio límite.....	59
3.5.3.	Resultados mediante análisis de elementos finitos.....	61
CAPÍTULO IV.....		72
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		72
4.1.	Resultados banco de prueba.....	73
4.1.1.	Resultados modelo de análisis número 1.....	75
4.1.2.	Resultados modelo de análisis número 2.....	75
4.2.	Discusión de resultados.....	76
4.2.1.	Ventajas metodológicas.....	76
4.2.2.	Desventajas metodológicas.....	77
4.3.	Medidas preventivas.....	77
4.3.1.	Drenaje.....	77
4.3.2.	Cambio de geometría.....	78
4.4.	Soluciones planteadas.....	79
4.4.1.	Muros de hormigón.....	79
4.4.2.	Muros de tierra armada.....	81
4.4.3.	Geosintéticos.....	81
5.	Conclusiones.....	83

6. Recomendaciones.....	85
7. Referencias Bibliográficas.....	87
Anexos	88
8.1. Anexo Fotográfico zonas de estudio y muestreo.....	89
8.2. Anexo fotográfico ensayos de laboratorio.....	93
8.3. Anexo resultados ensayos de laboratorio.....	97
8.3.1. Ensayos de clasificación y resistencia al corte zona de estudio 1.	97
8.3.2. Ensayos de clasificación y resistencia al corte zona de estudio 2.	125
8.3.3. Ensayos de clasificación y resistencia al corte zona de estudio 3.	167
8.3.4. Ensayos de clasificación y resistencia al corte zona de estudio 4.	191
8.4. Construcción Banco de prueba 1.....	213
8.5. Construcción Banco de prueba 2.....	214

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación, permite entender la importancia de tener un estudio geomecánico de los suelos en zonas donde se pretende implantar obras civiles, el motivo se debe a que una falta de conocimiento en este aspecto puede significar daños a gran escala de las obras implantadas en dichas zonas.

Como se puede analizar a lo largo de este trabajo investigativo, también se comparan métodos muy prácticos con los cuáles un técnico puede conocer las propiedades geomecánicas de los suelos, su comportamiento y reacción frente agentes internos y externos que tienen influencia de un modo u otro sobre el suelo.

De manera general el trabajo de investigación aquí presentado, simula el comportamiento de un talud, que se ve afectado bajo condiciones de carga adicionales y a condiciones naturales que afectan directamente las propiedades geomecánicas de los estratos que lo componen, produciendo una inestabilidad y posterior falla.

PALABRAS CLAVES: Suelo, talud, geomecánica, falla.

ABSTRACT

The following research, can allow to understand the importance of having a geomechanical study of soils in areas where it is intended to implement civil works, the reason is because a lack of knowledge in this aspect can mean large-scale damage of the implemented works in those areas.

As can be analyzed along this research, very practical methods are also compared which a technician can meet the geomechanical properties of soils, their behavior and reaction to internal and external factors that influence one way or another on the soil.

In general the research presented here, simulates the behavior of a slope, which is affected under additional load conditions and natural conditions that directly affect the geomechanical properties of the layers that are composed, producing instability and subsequent failure.

KEYWORDS: Soil, slope, geomechanics, fails.

INTRODUCCIÓN

El tema desarrollado en el presente trabajo de fin de titulación, consistió en analizar las propiedades geomecánicas de los suelos que conforman una ladera natural, ya que esto es de vital importancia para prevenir cualquier tipo de falla que se pueda producir en dicha ladera.

En este trabajo se presentaron algunos ejemplos de los riesgos que ocasiona el desconocimiento de esta temática, se simularon de manera práctica y mediante la ayuda de programas computacionales el comportamiento de los estratos de suelo encontrados.

Además, mediante el modelo físico escogido llamado banco de prueba, se pudo observar de manera medible el comportamiento de 3 diferentes estratos correspondientes a la zona de estudio marcada en el capítulo 3, este banco de prueba fue un prototipo que podría inclusive ser utilizado para investigaciones más puntuales.

El trabajo de fin de titulación se dividió en 4 capítulos que abarcan en su totalidad el desarrollo, en el capítulo 1 se habló del porqué de la investigación, la metodología utilizada y las zonas preliminares de estudio, el capítulo 2 abarcó todo la teoría correspondiente al marco teórico que fueron las bases del estudio, en el capítulo 3 en cambio se explicó todo el procedimiento del análisis de los dos bancos de prueba considerados, finalmente en el capítulo 4 se analizaron los resultados obtenidos y se explicaron las medidas preventivas que se deberían tener en laderas naturales donde pretende intervenir el ser humano y las soluciones planteadas para corregir las fallas existentes.

Conociendo las propiedades geomecánicas de los diferentes estratos que se puedan encontrar, se podrán tomar las mejores decisiones en el momento que exista la necesidad de realizar cualquier tipo de obra civil, esto es muchas veces menospreciado por algunos técnicos y personas particulares que no comprenden el riesgo de sus malas decisiones, por esto se presentan pérdidas económicas y a veces pérdidas humanas.

Las diferentes zonas escogidas para el estudio, ya presentaban previamente algún tipo de falla como las explicadas en el capítulo 2, por lo tanto mediante muestreo de los diferentes estratos que presentaban dichas zonas se logró una adecuada clasificación, que permitió desarrollar toda la temática planteada, por lo tanto el problema por el cuál es indispensable un estudio formal de las propiedades geomecánicas de los suelos, quedó juiciosamente fundamentado en este trabajo de investigación.

Los objetivos marcan la base que se debe lograr, y estos fueron claros y concisos, se buscó las pautas para un correcto análisis de estabilidad de taludes, aplicando metodologías existentes y comparando con un parámetro físico tangible. Dicho esto, cabe mencionar que

los objetivos fueron cumplidos a cabalidad, ya que se logró una adecuada clasificación de las propiedades geomecánicas de los diferentes estratos estudiados, y se analizaron según la metodología planteada.

Para todo el desarrollo se tuvo la facilidad de contar con todos los equipos necesarios en el laboratorio, por lo cual existieron pocos inconvenientes, principalmente el tiempo, ya que se debía caracterizar estratos de 13 calicatas que se distribuyeron en las 4 zonas de estudio, además, la preparación para el banco de prueba fue trabajoso por la elaboración del mismo.

La metodología utilizada fue una combinación de sondeos en campo y análisis en laboratorio, para de esta forma simular de la manera más real posible, el verdadero comportamiento geomecánico de los suelos, y como resultado poder emitir las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

1.1. Preámbulo

El suelo es la capa superficial y suelta de la corteza terrestre, creada a partir de la meteorización y erosión de la roca madre, por medio de factores climáticos y acción de los seres vivos. El suelo es el punto de partida necesario para todos los seres vivos de coexistir, con el suelo ha sido posible el desarrollo de los seres vivos, todos dependemos de él, ya sea para obtener alimento o para elaborar cualquier actividad constructiva que a medida que pasa el tiempo, se necesita conocer mucho más acerca de las propiedades geomecánicas del mismo.

El suelo es el principal elemento para la creación de una obra de ingeniería civil, lo que genera la necesidad de evaluar las propiedades que posee y su comportamiento geomecánico, a fin de generar información que permita plantear las mejores decisiones para el diseño y construcción de una obra civil.

El suelo puede ser afectado por la interacción de diferentes fases que experimenta, como en estado seco, saturado, con gases o vacíos, con presencia de microorganismos, etcétera, que deterioran sus propiedades, afectando directamente la integridad de obras civiles existentes.

La clasificación de suelos es muy amplia, debido a ello se consideró la subdivisión en 5 grupos puntuales tales como: grava, arena, limo, arcilla y materia orgánica. Cada una de estas clasificaciones presenta diferentes propiedades y características que son de vital importancia para la creación de casi todo lo conocido hasta ahora.

Estos grupos de suelos están presentes en la superficie de manera individual o combinada por estratos bien definidos, pero el ser humano puede utilizar el suelo según sea su conveniencia, y conociendo las propiedades geomecánicas es mayor el aprovechamiento de las ventajas y facilidades que este nos brinda para lograr nuestros objetivos.

Para la evaluación de los diferentes tipos de suelos, se deben obtener muestras ya sean alteradas o inalteradas que nos permita lograr una clasificación adecuada mediante la elaboración de ensayos normados, para esto se ha trabajado con las normas INEN que se basan en las normas ASTM Y AASHTO.

1.2. Alcance

Este trabajo de investigación permitirá conocer de manera real los factores que influyen en la modificación de las propiedades geomecánicas de los suelos, ya que un cambio considerable de estas propiedades produce inestabilidad en los diferentes estratos existentes.

Realizando un banco de prueba lo que se buscó es lograr un modelo físico que permita apreciar de manera evidente los problemas que se producen debido a los factores desencadenantes de falla, analizando mediante la metodología de equilibrio límite y correlacionando con elementos finitos las condiciones críticas en las cuales se encuentran las zonas de estudio o que podrían verse afectadas en un futuro, se tomarán las medidas adecuadas para solucionar los problemas de estabilidad o en su defecto poder prevenir futuras fallas.

De manera general, lo que se pretende es evaluar los problemas causantes de inestabilidad de taludes, para así emitir criterios de prevención que evitarían tener zonas damnificadas producto de una falta de seguimiento.

1.3. Justificación

El presente estudio se ha realizado en la ciudad de Loja en 4 diferentes sectores, con el objetivo de evaluar los problemas que han provocado las diferentes fallas encontradas en las zonas, los cuales afectan de manera severa a los moradores de los sectores en cuestión.

Las pérdidas económicas tanto públicas como privadas por cuestión de la afectación ocasionada por taludes presentes de forma natural o artificial, hacen necesario profundizar en el estudio del comportamiento geomecánico de los suelos, ya que dichas pérdidas pueden evitarse tomando ciertas consideraciones que se expondrán mediante este trabajo de investigación.

La falta de información referente a esta temática hace que las obras civiles sean propensas a fallas, debido que toda obra civil está cimentada en diferentes tipos de suelos, con varios problemas que deben analizarse de manera proyectada, es decir se debe considerar posibles causas de afectación inmediata y futura.

La caracterización geomecánica de los suelos está sujeta a resultados experimentales tanto de campo como de laboratorio, que a partir de sus resultados pueden dar soluciones particulares a problemas presentados al momento de implantar cualquier obra civil.

Por todo lo antes mencionado se crea la necesidad de conocer mejor el comportamiento geomecánico de los suelos, argumentando de esta manera la viabilidad e importancia del presente trabajo de investigación.

1.4. Objetivos

1.4.1. General.

- Desarrollar un modelo físico que permita determinar la influencia de ciertos agentes internos y externos que afectan el comportamiento geomecánico del suelo.

1.4.2. Específicos.

- Clasificar el suelo según sus propiedades geomecánicas.
- Determinar las principales propiedades que intervienen en el comportamiento del suelo.

1.5. Ubicación y metodología

Para la ejecución del trabajo se ha escogido 4 zonas para la obtención de muestras de suelo que permitan cumplir con los objetivos planteados, estas zonas se escogieron debido a que presentan ciertos inconvenientes o fallas, las cuales se explican en el capítulo 2.

Se realizaron perfiles de las zonas donde se ubicaron las calicatas obteniendo una correcta apreciación del terreno, se tomó el plano geológico de la ciudad de Loja realizado por el municipio, de este plano mediante la utilización de GPS y conociendo la zona en el campo se cuadraron los perfiles consiguiendo un correcto estudio.

1. La primera zona está ubicada en el barrio "La Banda" de la ciudad de Loja, afectando principalmente a la calle Luis Vargas Torres y todo en su perímetro como se ilustra en la imagen 1.1.

En esta zona, se realizaron 3 calicatas de un ancho de (1x1) metros y a una profundidad de 1 metro, para muestras correspondientes a clasificación y a una profundidad de 1,50 metros para muestras necesarias para ensayos de resistencia al corte.



Imagen 1.1. Zona 1.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

2. La segunda zona se localizó vía Catamayo, a la altura del barrio "Belén", se toma un desvío a la derecha de la vía principal, con coordenadas UTM: N: 9560711.24 E: 696898.85, de referencia para la zona, lo afectado es una vivienda del sector.

En esta zona, se realizaron 4 calicatas de un ancho de (1x1) metros y a una profundidad de 1 metro, para muestras correspondientes a clasificación y una profundidad de 1,50 metros para muestras necesarias para ensayos de resistencia al corte.



Imagen 1.2. Zona 2.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

3. La tercera zona se puede divisar en la vía a Catamayo junto a una mecánica de la cooperativa Loja con coordenadas UTM: N: 9559682.37 E: 695991.16, en este lugar se pudo observar un asentamiento que provoca daños a la construcción de la mecánica y estos daños a su vez afectan a los terrenos vecinos.

En esta zona se realizaron 2 calicatas, de las cuales en la primera calicata se la realizó de un ancho de (1x1) metros y a una profundidad de 1 metro, para muestras correspondientes a clasificación y una profundidad de 1,50 metros para muestras necesarias para ensayos de resistencia al corte, en la segunda calicata se tomó una muestra a 0,90 metros de profundidad y otra a 1,50 metros, ya que se encontró dos estratos diferenciados, ambas muestras se obtuvieron a dichas alturas tanto para clasificación como para ensayos de resistencia al corte.



Imagen 1.3. Zona 3.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

4. La cuarta y última zona de estudio, se encuentra ubicada en el barrio "La Florida", con coordenadas UTM de referencia N: 9562032.21 E: 696757.93, esta zona es la más crítica por el área de afectación, los moradores han tenido que abandonar sus viviendas en el año 2011, por los daños irreparables que sufrieron las construcciones, no obstante cabe mencionar que algunas familias siguen habitando este lugar temiendo que algún día los constantes asentamientos afecten su integridad.
- En esta zona se realizaron 3 calicatas, de un ancho de (1x1) metros y a una profundidad de 1,50 metros en la calicata 1 y 2, y de 2 metros en la calicata 3, tanto para muestras correspondientes a clasificación y para muestras necesarias para ensayos de resistencia al corte.



Imagen 1.4. Zona 4.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

1.5.1. Muestreo.

Para conocer los motivos que influyeron para que ocurran todos estos problemas en las diferentes zonas de estudio consideradas en este trabajo, fue necesario la toma de muestras para realizar su caracterización y poder conocer cuáles son sus propiedades mecánicas. Además de observar en campo agentes externos que estén afectando directamente las condiciones iniciales del suelo.

La obtención de muestras se hizo en pozos a cielo abierto, para la obtención de muestras alteradas, siguiendo la norma NTE INEN 686.

- Se utilizó las siguientes herramientas: palas, picos, y barretas para la excavación correspondiente, además de la utilización de una retroexcavadora para obtener un mayor rendimiento y lograr acabar con el muestreo en condiciones óptimas.
- Para perfilar la muestra se llevó machete y cuchillo.
- Para la obtención de la muestras necesarias, se utilizó fundas gruesas transparentes para mantener la humedad natural, aparte se colocaron etiquetas con la correspondiente clasificación e información necesaria como describe la norma.
- Para el muestreo se siguió la siguiente estructura para la toma de muestras, ilustrada en la imagen 1.5.

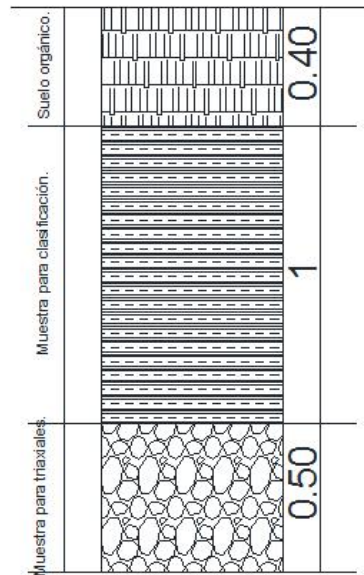


Imagen 1.5. Descripción calicata.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

En el Anexo número 1 están indicadas las imágenes del muestreo por cada zona de estudio.

1.5.2. Ensayos

1.5.2.1. Determinación del contenido de humedad.

Para la obtención de contenido de humedad real, se procuró realizarlo lo antes posible luego del muestreo, siguiendo la norma AASHTO T 265-93(2000), ASTM D2216, para esto se tomó 3 porciones de suelo que arrojaron una diferencia máxima de uno por ciento entre sí.

1.5.2.2. Determinación de la granulometría por lavado.

Para la obtención de la granulometría de los materiales escogidos se optó por seguir la norma AASHTO T 88-00 - ASTM D 422, la cual menciona que materiales que posean partículas de un tamaño máximo de 3/8 de pulgada, se deberá tomar una porción de 500gr de material para ensayar mediante vía húmeda por tratarse de suelos finos, como es el caso de las zonas de estudio.

1.5.2.3. Determinación del límite líquido.

Para su determinación se aplicó la norma AASHTO T 89-02 - ASTM D4318, el alcance de este ensayo es conocer el contenido de agua que el material posee, pasando de un estado plástico a uno líquido mediante la adición de agua como lo indica el procedimiento de ensayo, además se veló por la correcta utilización de la copa de Casagrande y su equipo necesario para la preparación de la muestra y realización del ensayo. La norma menciona una diferencia de al menos 10 golpes en 3 puntos a realizar, para una mejor apreciación se ha decidido ejecutar 5 puntos en rangos de 15 a 20, 20 a 25, 25 a 30, 30 a 35 y 35 a 40 golpes.

1.5.2.4. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad.

Para esto se ha seguido la norma AASHTO T 90-00 - ASTM D 4318, este ensayo a diferencia del límite líquido permite conocer el bajo contenido de humedad estando el suelo en estado

plástico, se tomaron 3 porciones de material para poder realizar un promedio, asegurando la veracidad del ensayo.

El índice plástico se obtuvo de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, esto marca la plasticidad de un suelo, conociendo que si el límite plástico obtenido es mayor al límite líquido se caracteriza el suelo como no plástico.

1.5.2.5. Ensayo de resistencia al corte mediante compresión triaxial.

Se siguió la norma AASHTO T 234, para la realización del ensayo no consolidado - no drenado (UU), el cual permitió conocer la cohesión y el ángulo de fricción interna de la muestra ensayada, parámetros necesarios para el posterior modelamiento, para la ejecución de este ensayo se necesitó un equipo de carga axial, la cámara de compresión triaxial para contener el espécimen, el agua que genera el confinamiento y las presiones en todos los sentidos y un deformímetro como partes fundamentales del equipo para la realización del ensayo.

Como se realizan dos tipos de ensayos triaxiales adicionales al mencionado, que son el consolidado drenado (CD), y el consolidado no drenado (CU), cabe mencionar que el ensayo triaxial no consolidado - no drenado (UU), no permite drenar el agua durante la aplicación de la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador.

En el Anexo número 2 se podrán ver imágenes de la realización de cada uno de los ensayos citados en este literal y en el Anexo número 3 se verán todos los cálculos pertinentes.

1.6. Perfiles considerados zonas de estudio

1.6.1. Zona 1.

Los perfiles topográficos correspondientes a esta zona se indican en la imagen 1.6; las coordenadas UTM de referencia de las calicatas realizadas son las siguientes:

- Calicata N°1: N 9561868,71; E 698002,60.
- Calicata N°2: N 9561881,28; E 698018,09.
- Calicata N°3: N 9561893,88; E 698044,53.

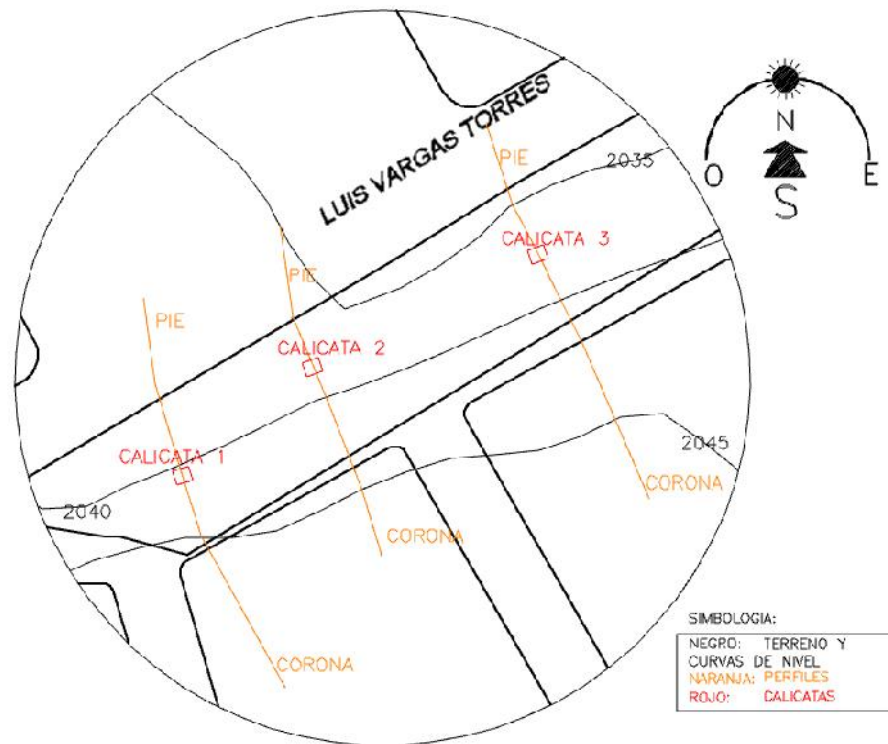


Imagen 1.6. Perfiles zona 1.

Fuente: Plano geológico ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

1.6.2. Zona 2.

Los perfiles considerados para esta zona se indican en la imagen 1.7; las coordenadas UTM de referencia de las calicatas realizadas son las siguientes:

- Calicata N°1: N 9560716,11; E 696871,81.
- Calicata N°2: N 9560732,79; E 696877,12.
- Calicata N°3: N 9560721,61; E 696845,83.
- Calicata N°4: N 9560739,24; E 696845,09.

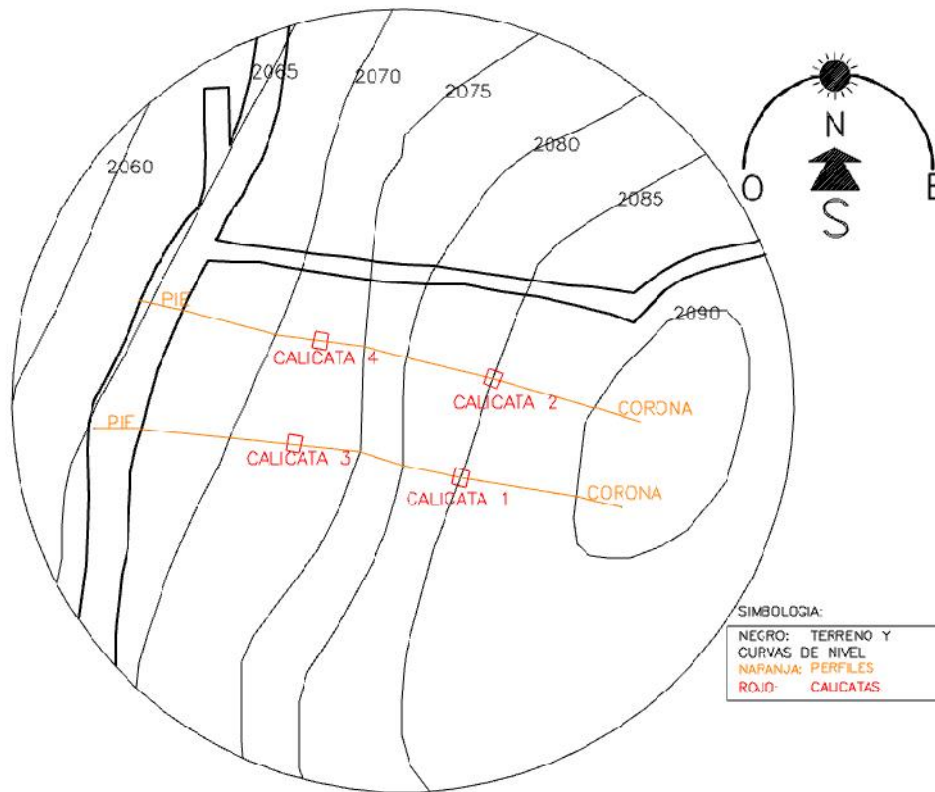


Imagen 1.7. Perfiles zona 2.

Fuente: Plano geológico ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

1.6.3. Zona 3.

Los perfiles correspondientes para esta zona se indican en la imagen 1.8; las coordenadas UTM de referencia de las calicatas realizadas son las siguientes:

- Calicata N°1: N 9560716,11; E 696871,81.
- Calicata N°2: N 9560732,79; E 696877,12.

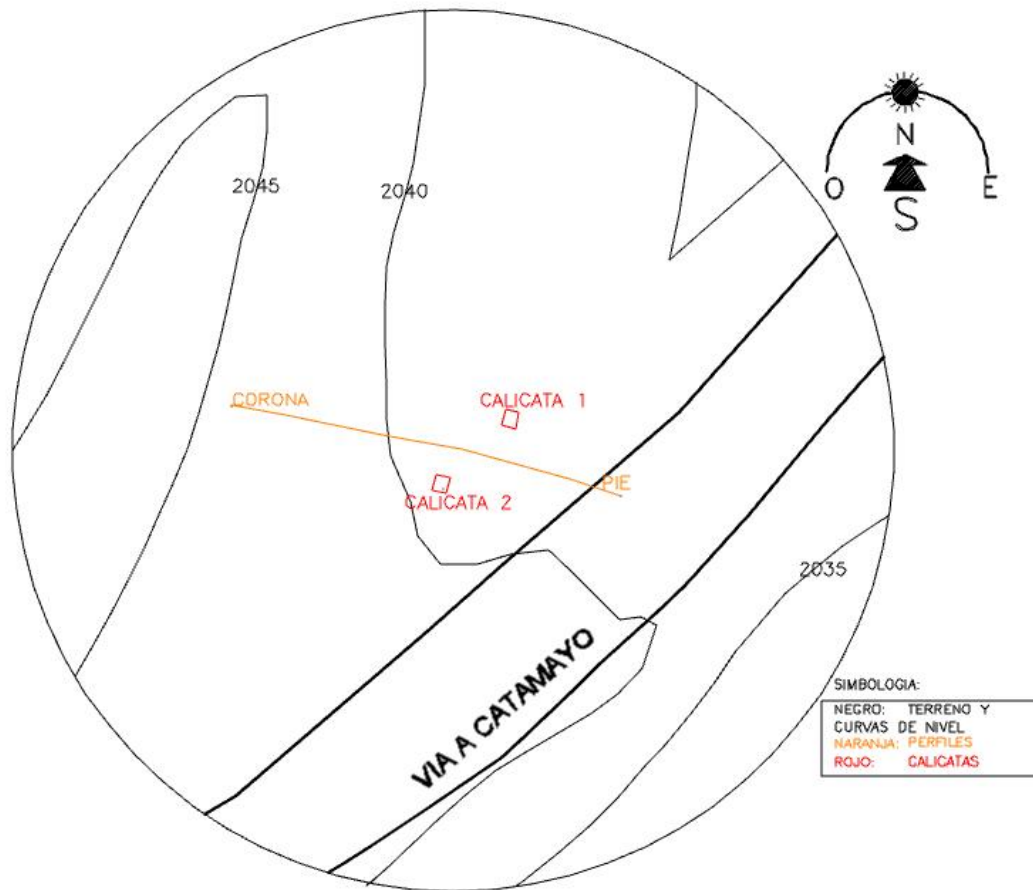


Imagen 1.8. Perfiles zona 3.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

1.6.4. Zona 4.

Los perfiles de esta zona se realizaron de acuerdo a lo mostrado en la imagen 1.9, las coordenadas UTM de referencia de las calicatas realizadas son las siguientes:

- Calicata N°1: N 9561998; E 696943.
- Calicata N°2: N 9562018; E 696917.
- Calicata N°2: N 9562015; E 696764.

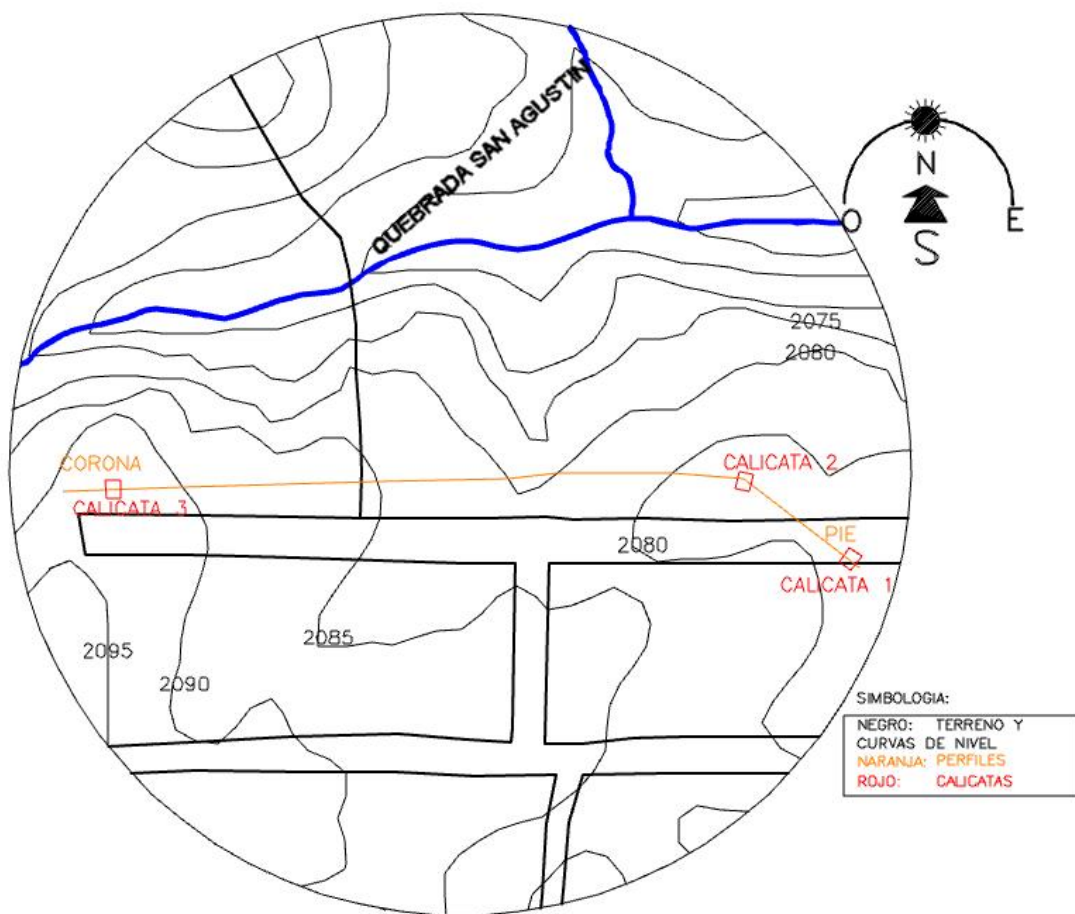


Imagen 1.9. Perfiles zona 4.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Suelo

2.1.1. Definición.

Crespo, C. (2011) definió lo siguiente:

Suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan. (p.18).

Para entender un poco más en términos de ingeniería civil, el suelo es donde se transmiten las cargas aplicadas por cualquier obra de construcción, y este devuelve una reacción que dependerá del tipo de suelo para que soporte o no, de manera eficiente a lo largo del tiempo estas aplicaciones de carga.

2.1.2. Propiedades geomecánicas.

La geomecánica en general hace referencia a las características mecánicas de los suelos que conjuntamente con los resultados experimentales de campo y laboratorio se puede solucionar analíticamente un problema en particular, lo que hace necesario la correcta clasificación de los diferentes tipos de suelo y conocer su resistencia al corte mediante compresión triaxial, identificando su comportamiento esfuerzo-deformación de una muestra de suelo a una presión de confinamiento.

2.1.2.1. Clasificación de suelos.

El sistema SUCS es empleado específicamente para la clasificación de suelos destinados para cimentaciones, y la clasificación según AASHTO fue destinada principalmente para la clasificación de suelos para la utilización en carreteras. Por fines comparativos se clasificará de acuerdo a estos dos sistemas, en la tabla 2.3 se puede apreciar el sistema AASHTO de clasificación de suelos.

Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), la clasificación de un suelo depende de algunos factores, como su granulometría y límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad), de acuerdo a las tablas 2.1 y 2.2:

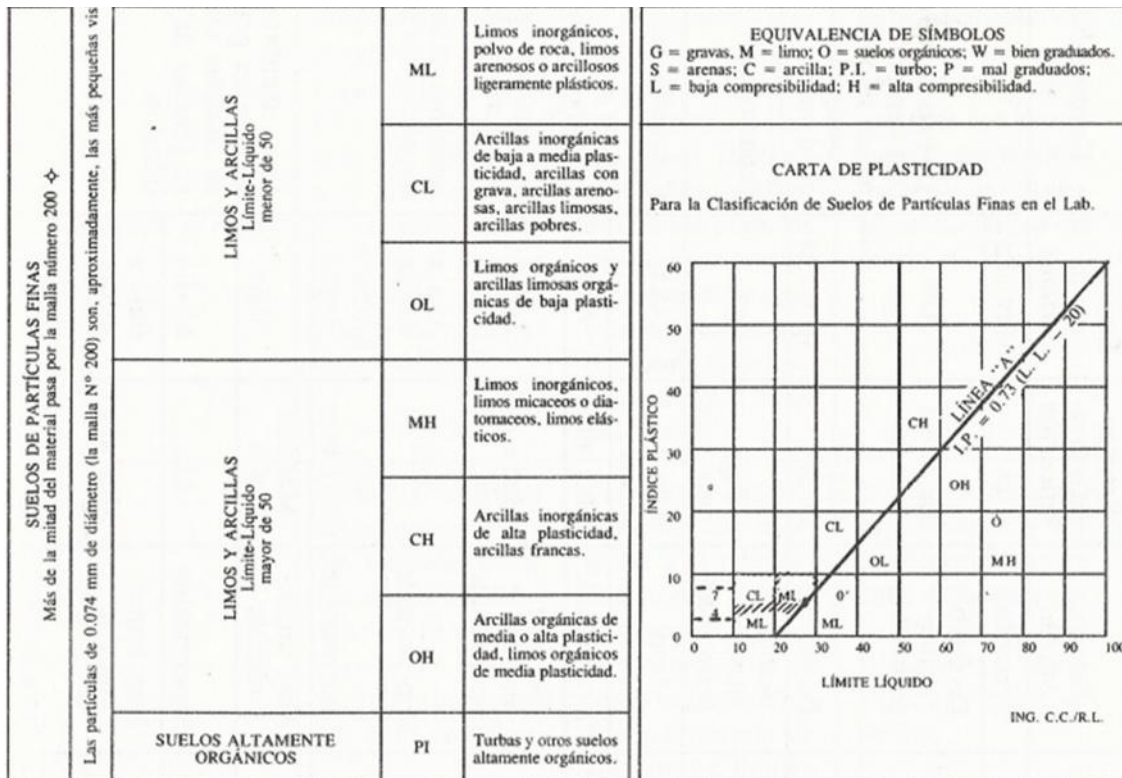
Tabla 2.1 Sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS), serie gruesa.

DIVISIÓN MAYOR		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELO DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 (ver tabla 2.1).	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N° 4.	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4. Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3. $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$		
			GP		Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.	
		GM	d		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.	NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.
			u			
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.		Límites de Atterberg abajo de la "línea A" o I.P. menor que 4.	
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla N° 4.	(PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/8 CM. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA N° 4)		SW	
	SP			Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.		
	SM			d	Arenas limosas, mezclas de arenas y limo.	
			u	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW.		
	SC		ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas).	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	Límites de Atterberg abajo de la "línea A" con I.P. menor que 4.	
				ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas).	Límites de Atterberg arriba de la "línea A" con I.P. mayor que 7.	
	DETERMÍNENSE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla N° 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW, GP, SW, SP. Más de 12%: GM, GC, SM, SC. 5% al 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **				Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
				Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requiere el uso de símbolos dobles.		

Fuente: Crespo, C. (2011). Mecánica de suelos y cimentaciones.

Elaboración: Crespo, C. (2011).

Tabla 2.2 Sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS), serie fina.



** Clasificación de frontera — Los suelos que posean las características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos, por ejemplo GW-GC, mezcla de arena y grava bien graduadas con cementante arcilloso.
 ⇨ Todos los tamaños de las mallas en esta carta son los U.S. Standard.
 * La división de los grupos GM y SM en subdivisiones d. y u. son para caminos y aeropuertos únicamente, la subdivisión está basada en los límites de Atterberg. El sufijo *d* se usa cuando el L.L. es de 28 o menos y el I.P. es de 6 o menos. El sufijo *u* es usado cuando el L.L. es mayor que 28.

Fuente: Crespo, C. (2011). Mecánica de suelos y cimentaciones.

Elaboración: Crespo, C. (2011).

En conclusión de acuerdo a los parámetros presentados en las tablas anteriores, se clasifica el suelo en: gravas, arenas, limos, arcillas y suelo orgánico. Con diferentes combinaciones de estos suelos que puede presentar un estrato.

Tabla 2.3. Sistema AASHTO de clasificación de suelos.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa por la malla no. 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Clasificación del grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Cribado por mallas (% que pasa)							
Malla no. 10	50 máx						
Malla no. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla no. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa la malla no. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (PI)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo de material más común	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosas o arcillosas			
Calificación de la subrasante	Excelente a buena						

Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (Más del 35% de la muestra total pasa por la malla no. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Clasificación del grupo				
Análisis de mallas (% que pasa)				
Malla no. 10				
Malla no. 40				
Malla no. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Para la fracción que pasa la malla no. 40				
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (PI)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos	
Calificación de la subrasante	Regular a pobre			

^a Si $PI \leq LL - 30$, es un A-7-5.
^b Si $PI > LL - 30$, es un A-7-6.

Fuente: BRAJA M. DAS. (2006). Principios de ingeniería de cimentaciones.

Elaboración: BRAJA M. DAS. (2006).

2.1.2.2. Fases del suelo.

De acuerdo a Juárez, E. Rico, A. (2014), el suelo se presenta en tres estados que son el sólido, líquido y gaseoso. En su estado sólido está presente únicamente por presencia de sus partículas minerales, en estado líquido presenta agua dentro de su composición, y en estado gaseoso presenta aire u otros gases.

De estos estados que atraviesa el suelo también depende su comportamiento, se considera además un suelo completamente saturado cuando el agua ocupa todos los lugares libres o vacíos, presentándose en este caso el suelo en dos estados que serían el sólido y líquido únicamente.

2.1.2.3. Nivel freático.

El nivel freático es el nivel libre de agua subterránea, que separa el suelo completamente saturado del suelo no saturado, este nivel no es del todo horizontal, por lo general toma la forma de la topografía del lugar.

2.1.2.4. Grietas de tensión.

De acuerdo a Suárez, J. (1998), las grietas de tensión provocan que un suelo tenga una tendencia mayor a la falla, también se produce una reducida resistencia a lo largo de la superficie de falla, además estas grietas de tensión pueden llenarse de agua debido a las lluvias.

2.1.2.5. Resistencia al corte de los suelos.

De acuerdo a Crespo, C. (2011), los suelos pueden comportarse de manera elástica dentro de un rango menor a otros materiales de mayor rigidez como el acero cuando se les aplica una carga, cuando ocurren fallas en mayor proporción a las normales que puede presentar un suelo dependiendo de sus propiedades mecánicas, se recurre a usar teorías de plasticidad para conocer el comportamiento del mismo.

En sí, lo que da a conocer este parámetro es la magnitud que tiene cada tipo de suelo para contrarrestar los movimientos o disgregamientos de las partículas que lo componen.

Cuando hablamos de resistencia al corte de los suelos, se tiene presente dos componentes fundamentales para la determinación de esta propiedad, estas son la cohesión que marca el enlace que existe entre las partículas del suelo debido a su atracción molecular, y el ángulo de fricción interna de un suelo que da a conocer el nivel de oposición al deslizamiento, debido al rozamiento generado por las diferentes superficies de contacto de las fracciones de suelo.

2.1.2.6. Teorías de falla.

Juárez, E. Rico, A (2014) asumieron lo siguiente:

Teoría de Coulomb; Un material falla cuando el esfuerzo cortante actuante en un plano a su través alcanza un valor límite máximo, dicho esfuerzo cortante límite depende del esfuerzo normal actuante en el plano de falla, y existe una ley de variación lineal entre ambos tipos de esfuerzos.

Teoría de Mohr; En general, la falla por deslizamiento ocurre a lo largo de la superficie particular en la que la relación del esfuerzo tangencial al normal (oblicuidad) alcance un cierto valor máximo. (p. 370).

En la actualidad, generalmente se usa una mezcla de estas dos teorías analizando en conjunto la conocida teoría Mohr-Coulomb, que utiliza líneas de falla curvas en su análisis, esta teoría se basa en que la relación entre la falla por esfuerzo cortante y el esfuerzo normal que actúa en el plano de falla, no es constante. Algunos tipos de suelos se adaptan mejor por separado a estas dos teorías, pero como siempre se quiere obtener resultados más próximos a la realidad, se optó por escoger el criterio Mohr-Coulomb para el análisis de la resistencia al corte de los suelos.

2.2. Movimientos de masa

2.2.1. Tipos de falla en taludes.

Juárez, E. Rico, A (2014), definen las fallas más comunes que se pueden presentar en un talud, de las cuales se consideraron a 3 de ellas más importantes debido a que se originan con mayor frecuencia en nuestro medio, además son de gran riesgo para los habitantes y para la integridad de obras civiles, ya que pueden presentarse de manera súbita o también puede ser un proceso un poco más lento, estas fallas se denominan de la siguiente manera.

- Deslizamiento superficial.
- Movimiento del cuerpo del talud.
- Flujo.

2.2.2. Falla por deslizamiento superficial.

Todo talud siempre está involucrado en el efecto de fuerzas naturales que provocan que la capa de suelo superficial se deslice, este motivo se debe principalmente a que la capa de suelo en la superficie no tiene la misma resistencia al corte que las partículas inferiores o internas del talud, no obstante este desequilibrio en la estabilidad del talud puede ser acelerado por variaciones en las cargas colocadas sobre la corona, y a la acción climática que constantemente mantiene esa capa superficial en un proceso de saturación y secado, que expande y contrae las partículas del suelo.

Este fenómeno se puede divisar antes de que ocurra, ya que pueden presentarse agrietamientos notorios, escalonamientos o en caso de existir árboles o postes por alumbrado público, estos estarían inclinados.

2.2.3. Falla por movimiento del cuerpo del talud.

Se produce un movimiento súbito de las partículas internas de un talud, ya que la superficie de falla se profundiza en el cuerpo del talud, esto depende de la inclinación del talud y de su resistencia al corte.

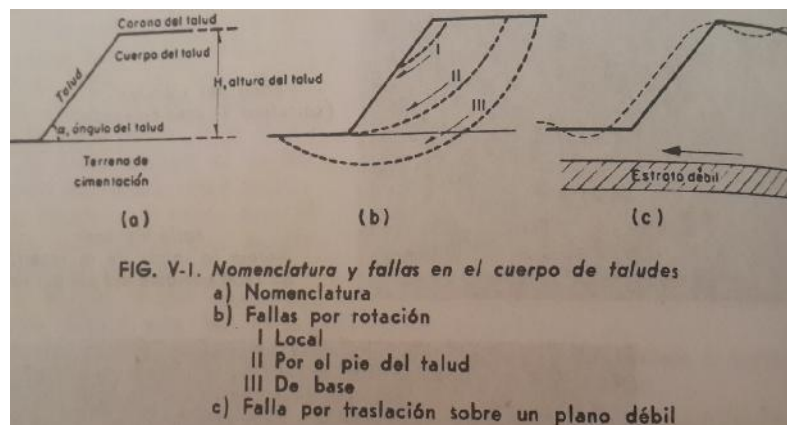


Imagen 2.1. Tipos de fallas.

Fuente: Juárez, E. Rico, A. (2013). Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos.

Elaboración: Juárez, E. Rico, A. (2013).

Existen dos tipos de falla que están comprendidos en el grupo de falla por movimiento del cuerpo del talud, estos son:

- Falla por rotación: se precisa una extensión de falla curva, y tomando como referencia el plano horizontal, esta falla se compara a una circunferencia, puede presentarse falla local, por pie y de base, como se mostró en la imagen 2.1.
- Falla por traslación: ocurren cuando se tiene un estrato débil asociado al terreno de fundación, provocando la falla de forma paralela a dicho estrato concluyendo en los extremos con extensiones curvas.

2.2.4. Falla por flujos.

Pueden ser desplazamientos lentos o rápidos de zonas localizadas de una ladera, los movimientos que ocurren se comparan con un líquido viscoso cuando fluye. No se logra determinar con certeza una superficie de falla, además este fenómeno se vincula con problemas de presión de aire y agua que afectan directamente las propiedades de los suelos, estos dos agentes son los encargados de producir fallas por el denominado flujo húmedo característico de suelos finos, o también se suele asociar esta falla con temblores que aceleran algunos procesos involucrados en el fenómeno llamado flujo seco exclusivo de limos, arenas y rocas fragmentadas.

2.3. Estabilidad de taludes

2.3.1. Definición talud.

Talud, es toda superficie de tierra inclinada con respecto a una referencia horizontal, esta superficie puede presentarse en estado natural conocido además como ladera natural sin intervención del humano para cambiar o alterar sus propiedades originales, o también están presentes de manera artificial, ya que el ingeniero necesita salvaguardar la integridad de toda obra civil.

El estudio de la estabilidad de taludes se ha vuelto de vital importancia en el campo de la ingeniería civil, ya que el ingeniero además de evitar que se ponga en riesgo la integridad de cualquier persona, debe lograr una factibilidad económica para un proyecto que amerite se realice una estabilidad de taludes.

2.3.2. Definición de estabilidad

Se puede decir que estabilidad es la firmeza que tiene una masa de tierra contra el deslizamiento o falla, para tener estabilidad en laderas naturales o taludes artificiales se debe tener en cuenta el tipo de propiedades mecánicas del material que compone el talud, al ángulo de inclinación necesario para lograr esa estabilidad y los agentes internos o externos que afectan la integridad del mismo.

2.3.3. Análisis de estabilidad de taludes

“Implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla, con la resistencia al cortante del suelo.” (DAS, BRAJA M. 1999, p. 339).

Para el análisis se tomaron en cuenta varios criterios y métodos que se describen más adelante, como son las metodologías de equilibrio límite y elementos finitos.

Algo que debe tener en cuenta el ingeniero o técnico que analiza la estabilidad de un talud, es el factor de seguridad, ya que esto determina si el talud es estable o no, un valor de 1.5 es tolerable para un diseño.

Para el correcto análisis se ha dividido los taludes en finitos e infinitos, los cuáles generalizan las propiedades del suelo y todo lo mencionado hasta ahora acerca de estabilidad.

- Taludes finitos: se denomina así, ya que la altura crítica preponderante de falla tiende a ser igual que la altura del talud en cuestión.
- Talud infinito: se considera de esta manera cuando la altura del estrato de falla o de la profundidad más probable de falla es mucho mayor a la altura del talud.

2.3.4. Metodología de equilibrio límite.

En el año 2003, Krahn, J. publicó su investigación científica acerca de los límites existentes en el análisis de equilibrio límite, el cual menciona las ventajas y desventajas de un estudio aplicando equilibrio límite, además se recomienda entender de la mejor manera el método para no esperar resultados que no le corresponden al análisis.

2.3.4.1. Ventajas.

En la actualidad software de equilibrio límite, permiten al ingeniero o al técnico encargado de realizar el estudio de un sitio, contemplar la mayor parte de las situaciones reales que se presentan, tales como, estratigrafía variable de cada zona, ubicación de nivel freático, casi todas las formas de superficies de deslizamiento, colocación de cargas en lugares que permitan simular las reales y refuerzo estructural como anclajes, muros, etc.

En la década de 1970, Fredlund, D. desarrolló la formulación general de equilibrio límite (GLE), esta formulación incluye todos los parámetros fundamentales de los métodos mostrados en la tabla 3.2, además la formulación GLE, se basa en dos ecuaciones de factor de seguridad, una con respecto al momento de equilibrio y la otra con respecto a la fuerza de equilibrio horizontal.

En el año 1965, Morgenstern y Price, formularon la ecuación para calcular las fuerzas de corte entre segmentos utilizada en la formulación GLE, la ecuación es:

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

Ecuación 2.1.

Donde $f(x)$ es una función, λ es el porcentaje de la función usada (en forma decimal), E es la fuerza normal entre segmentos, y X es la fuerza de corte entre segmentos.

A pesar de los inconvenientes que muestran algunas desventajas de la formulación de equilibrio límite, el factor de seguridad a nivel global de un modelo es realista para su utilización en la práctica, siempre y cuando la experiencia sepa intervenir para solventar las deficiencias de la formulación.

Tabla 2.4. Estática satisfecha y fuerzas entre segmentos para varios métodos.

Método	Momento de equilibrio	Fuerza horizontal de equilibrio	Fuerza normal entre segmentos (E.)	Fuerza de corte entre segmentos (X)	Inclinación de X/E resultante
Fellenius u Ordinario	SI	NO	NO	NO	No hay fuerza
Bishop simplificado	SI	NO	SI	NO	Horizontal
Jambu simplificado	NO	SI	SI	NO	Horizontal
Spencer	SI	SI	SI	SI	Constante
Morgenstern-Price	SI	SI	SI	SI	Variable
Cuerpo de ingenieros - 1	NO	SI	SI	SI	Inclinación de una línea desde la corona hasta el pie
Cuerpo de ingenieros - 2	NO	SI	SI	SI	Superficie de inclinación del segmento de suelo superior
Lowe-Karafiath	NO	SI	SI	SI	Superficie media de la pendiente del terreno e inclinación en la base del segmento

Fuente: Krahn, J. (2003). Límites en el análisis de equilibrio límite.

Elaboración: Autor.

Como se mencionó al inicio de este literal, la formulación general de equilibrio límite desarrollada por Fredlund se basa 2 ecuaciones.

El factor de seguridad de la ecuación GLE con respecto al momento de equilibrio es:

$$F_m = \frac{\sum [\zeta' \beta R + (N - \beta u) R \tan \phi']}{\sum Wx + \sum Nf + Dd}$$

Ecuación 2.2.

La ecuación de factor de seguridad con respecto a la fuerza de equilibrio horizontal es:

$$F_f = \frac{\sum [\zeta' \beta \cos \alpha + (N - \beta u) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha + D \cos \omega}$$

Ecuación 2.3.

Donde:

c' = cohesión efectiva.
 ϕ' = ángulo de fricción efectivo.
 u = presión de poro.
 N = fuerza normal base de superficie.
 W = peso de superficie.
 D = línea de carga.
 β, R, x, f, d, w = parámetros geométricos.
 a = inclinación base de la superficie.

Cuando se habla que una de las ventajas de la formulación GLE es explotar todas las características positivas de los métodos mostrados en la tabla 3.2, se puede hablar de estos métodos como el de Bishop simplificado y el de Spencer como métodos principales para llevar a cabo los análisis que se ejecutaron en este trabajo de investigación.

2.3.4.2. Desventajas.

A pesar que el método de equilibrio límite es utilizado en la práctica frecuentemente ya que se podría decir que el factor de seguridad global que ofrece es realista, la falta de física para análisis más complejos lo hace ser deficiente en varios aspectos.

Este método de análisis se basa únicamente en la estática o en el equilibrio, pero no toma en cuenta la tensión y el desplazamiento que son dos parámetros fundamentales a tener en cuenta para asimilar un modelo a la realidad.

2.3.4.3. Método de Bishop simplificado.

El método de Bishop asume que las fuerzas de corte entre segmentos es cero, con esto solo satisface el momento de equilibrio, y se asume que la función de fuerzas entre segmentos no existe. Este método fue desarrollado para analizar superficies de deslizamiento circulares, pero las características del mismo hacen posible analizar superficies de deslizamiento no circulares. Este método difiere en tan sólo un 5% de los resultados obtenidos con métodos más complejos como el de Spencer, por lo tanto es utilizado con mayor frecuencia por su simplicidad.

2.3.4.4. Método de Spencer.

El método de Spencer es matemáticamente más riguroso ya que no desprecia las fuerzas entre segmentos, y de esta manera satisface las 3 ecuaciones de equilibrio, que vendrían a ser las de fuerza en dirección vertical y horizontal y la ecuación de momento de equilibrio, no obstante la resultante que se genera entre las fuerzas normales y de corte entre segmentos

tienen una inclinación constante pero desconocida, lo que no ocurre en el método de Morgenstern-Price que asume esta inclinación variable para cada dovela.

2.3.5. Metodología de elementos finitos.

La idea de utilizar un método basado en elementos finitos, es tener un enfoque basado en tensión-deformación, para poder modelar el comportamiento de un talud artificial o ladera natural en el caso de esta investigación, bajo ciertas condiciones de carga.

Un importante objetivo de utilizar esta metodología de estudio, es conocer la deformación post-falla o la razón por la cual ocurrió la falla, esto permite mediante modelos solucionar los problemas correspondientes a las propiedades geomecánicas de los suelos, o en su defecto mejorar alguna técnica constructiva que se haya escogido.

Como todo método hay ciertas consideraciones implícitas que se deben tomar en cuenta, como, que un análisis de elementos finitos no da una medida cuantitativa del margen de seguridad del sistema en cuestión, lo que se conoce discretamente es donde el factor de seguridad es 1, esto quiere decir que analiza un modelo hasta que se provoque la falla.

Esto vendría a ser compensado por el método ya que para cada segmento se analiza la tensión y deformación en períodos de tiempo, además se puede concentrar más la rigurosidad del análisis en cierta zona puntual, con un correcto uso de las herramientas disponibles combinadas con la experiencia del analista, se obtienen resultados óptimos que permiten solventar cualquier complicación existente, no obstante siempre existe evolución y preguntas que necesitarán ser resueltas a su debido tiempo.

La utilización de esta metodología puede ser muy útil para encontrar las diversas fallas que ocurren en distintas zonas del talud, además de verificar como ayudan los diferentes métodos de estabilización en cualquier punto, el método tiene algunas desventajas, como es la de no conocer un factor de seguridad y la necesidad de tener una amplia experiencia para saber interpretar los resultados correctamente.

CAPÍTULO III
BANCO DE PRUEBA

3.1. Definición banco de prueba

El banco de prueba que se idealizó, fue una propuesta de simulación real de los estratos de suelo del talud real construido a escala, con el cual se pretendió simular la acción que sufre el suelo con el paso del tiempo, con la interacción con el agua, y con ciertas cargas aplicadas para poder divisar que comportamiento puede tener.

3.2. Metodología

La metodología se desglosó a lo largo de este capítulo, el banco de prueba se utilizó en la zona de estudio número 1 citada en el primer capítulo, se realizó modelaciones en las cuales se distribuyeron los estratos definidos en esta zona.

Como la zona 1 presentó tres diferentes estratos, se realizó dos pruebas con distintas distribuciones de suelo, para analizar de mejor manera el comportamiento del talud, a continuación se muestra un resumen de las propiedades de los diferentes estratos.

Tabla 3.1. Propiedades de los estratos.

CALICATA 1	
Clasificación según SUCS:	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas (CH).
Clasificación según AASHTO:	Principalmente suelos arcillosos (A-7-5).
Cohesion (Kg/cm ²)/(KN/m ²):	0.75 / 73.58
Angulo de fricción interna (Grados):	11.3
Peso específico seco/saturado (KN/m ³):	13.70 / 18.01

CALICATA 2	
Clasificación según SUCS:	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad (OH).
Clasificación según AASHTO:	Principalmente suelos arcillosos (A-7-5).
Cohesion (Kg/cm ²)/(KN/m ²):	0.45 / 44.15
Angulo de fricción interna (Grados):	28.4
Peso específico seco/saturado (KN/m ³):	12.80 / 15.92

Sigue →

Continuación Tabla 3.1. Propiedades de los estratos.

CALICATA 3	
Clasificación según SUCS:	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla (SC).
Clasificación según AASHTO:	Principalmente suelos arcillosos (A-6).
Cohesion (Kg/cm ²)/(KN/m ²):	0.4 / 39.24
Angulo de fricción interna (Grados):	31
Peso específico seco/saturado (KN/m ³):	15.62 / 18.07

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

3.3. Condiciones del terreno y parámetros a considerar

La zona de estudio número uno se clasificó como suelos finos especialmente arcillas, en la imagen 3.1 se evidencia que la falla se produjo por la adición de carga en la parte superior del terreno o corona y principalmente por el aporte de agua superficial y aguas subterráneas, puede suponerse que las condiciones del terreno son no drenadas para los estratos CH y OH obtenidos en laboratorio, ya que estas arcillas pudieron no haber tenido el tiempo suficiente para drenar mientras se adicionaba la carga y la condición para el último estrato obtenido en laboratorio SC, sería drenada por contener arenas en mayor proporción.

El nivel freático considerado para ambas modelaciones es diferente, asumido así para obtener una mejor valoración del comportamiento del suelo.

Para el análisis no se consideró grietas de tensión, ya que en el banco de prueba no se lograría una apreciación de este parámetro.

3.4. Distribución estratos de prueba modelación número 1

La primera prueba se realizó en el perfil crítico de la zona, ya que presenta un aporte constante de agua, no solo de las intensas precipitaciones a las que se ve sometida, sino que además se ve afectada por tuberías de desagüe de aguas lluvias pertenecientes a las edificaciones del sitio. Este modelo además simuló las cargas que aportan las edificaciones ya que estas son considerables.

En la imagen 3.1 se puede observar el estado crítico de la zona de estudio uno y el grado de afectación de las edificaciones del lugar.



Imagen 3.1. Zona de estudio 1.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

El primer perfil con el cual se ejecutó la primera simulación en el banco de prueba, corresponde al perfil de la zona donde está ubicada la calicata número 1, dicha zona del talud se ha escogido debido a que abarca la zona donde se aplican las cargas provenientes de mayor número de edificaciones.

El talud tiene una altura real de 11.50 m y una longitud de 48.83 m, se ha idealizado esta propuesta para el banco de prueba ejecutado a una escala de 1:50 tanto vertical como horizontal, garantizando que con estas escalas iguales se mantuvieron las pendientes reales del terreno.

Para la simulación de cargas se asumió que la edificación fue de 4 pisos, y aporta una carga de 1.5 t/m² por losa, además tiene un área por planta de 100 m². Para el banco de prueba la carga correspondiente a una escala de 1:50 vendría a ser lo mostrado en la tabla 3.2:

Tabla 3.2. Aplicación de cargas.

# PISOS	# LOSAS	PESO POR LOSA (T/m ²)	AREA POR PISO 10X10 (m ²)	AREA TOTAL APORTE	PESO TOTAL (t.)
4	3	1.5	100	300	450

CARGA EN (KN)	DISTRIBUCION CARGA EN 10 m (kN/m)	EQUIVALENCIA 10 m A ESCALA 1:50 (m)	DISTRIBUCION CARGA ESCALADA (kN)	PESO EN (Kg) NECESARIO
4414.5	441.45	0.2	1.766	180.0

CARGA EN (KN)	AREA BANCO DE PRUEBA PARA CARGA 0.2*0.5 (m ²)	EQUIVALENCIA DE AREA BANCO DE PRUEBA A REAL (10*25) (m ²)	CARGA REAL REQUERIDA (kN/m ²)	DISTRIBUCION CARGA ESCALADA (kN)	PESO EN (Kg) NECESARIO
4414.50	0.1	250	17.658	1.766	180.0

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Las cargas están expresadas tanto en kN/m, como en kN/m² debido a que los programas correspondientes a los métodos de equilibrio límite y de elementos finitos, establecen formatos distintos para el ingreso de datos.

Los estratos de suelo se distribuyeron tal como se muestra en la imagen 3.2 correspondiente al perfil de análisis zona 1, que abarcó los 3 estratos definidos en esta zona, de manera que en la parte inferior se construyó con un estrato de arcilla orgánica de mediana plasticidad (OH), seguido de un estrato de arena arcillosa (SC) y en la parte superior se concluirá con un estrato de arcilla inorgánica de elevada plasticidad (CH).

Se consideró de la altura total del perfil un 60% para el estrato OH, y en proporciones casi iguales de la parte restante los otros dos estratos, además un nivel freático ubicado a la mitad de la altura del estrato inferior que culmina en el final del mismo.

ZONA 1 DER 3 ESTRATOS

ESCALA HORIZONTAL 1 : 50
ESCALA VERTICAL 1 : 50

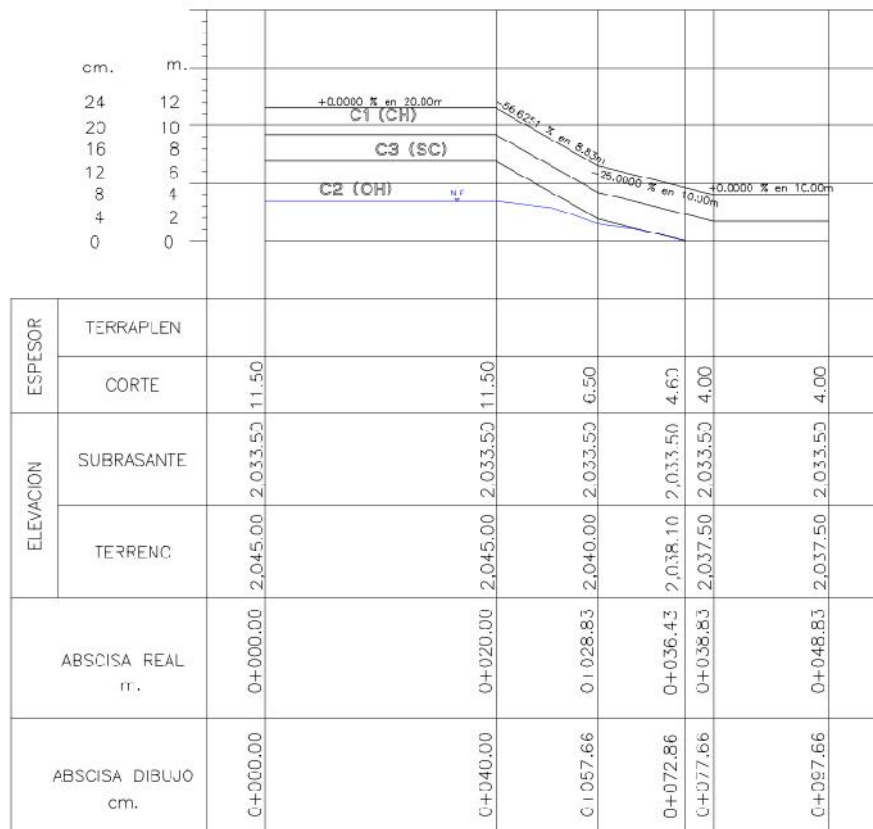


Imagen 3.2. Perfil de análisis zona 1.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Como se puede observar en el perfil mostrado, la pendiente máxima del terreno es de 56.6%, además se consideró dejar 20 m para la zona perteneciente a la corona y 10 m para el pie, consideraciones evaluadas de la zona de estudio.

3.4.1. Ejecución banco de prueba número 1.

Para la realización de este banco de prueba, se secó la muestra para posteriormente añadir el contenido de humedad con el cuál se realizaron los ensayos triaxiales, tratando de asemejar lo más posible a la realidad.

- El estrato CH, tuvo un contenido de humedad de 31.47% para la parte no saturada.
- El estrato OH, tuvo un contenido de humedad de 24.31% para la parte no saturada.
- El estrato SC, tuvo un contenido de humedad de 15.71% para la parte no saturada.

Para la parte saturada o bajo la línea de nivel freático, se consideró un 50% de contenido de humedad para saturar la muestra completamente. Más adelante se ilustra en (Imagen 3.3) el banco de prueba con la modelación del perfil de análisis zona 1 y su aplicación de carga.

Para la simulación de carga se utilizó lo siguiente:

- Bloque 1, peso de 18.36 kg.
- Bloque 2, peso de 17.88 kg.
- Bloque 3, peso de 17.68 kg.
- Pesa de acero, peso de 70.84 kg.



Imagen 3.3. Banco de prueba 1.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Tabla 3.3. Lecturas banco de prueba 1.

		NOTAS
Día:	11/05/2015	
Hora:	8:10	
Magnitud (kg):	124.76	Aplicación del 69.31% de la carga
Deformación acumulada (mm):	0	
Desplazamiento acumulado (mm):	0	

		NOTAS
Día:	11/05/2015	
Hora:	8:10	
Magnitud (kg):	124.76	Constante
Deformación acumulada (mm):	3	
Desplazamiento acumulado (mm):	10	

		NOTAS
Día:	11/05/2015	
Hora:	8:15	
Magnitud (kg):	124.76	Constante
Deformación acumulada (mm):	3	Constante
Desplazamiento acumulado (mm):	10	Constante

		NOTAS
Día:	11/05/2015	
Hora:	8:15	
Magnitud (kg):	124.76	Constante
Deformación acumulada (mm):	5	Máxima
Desplazamiento acumulado (mm):	23.4	Máxima

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Por motivos de integridad del banco de prueba colocó únicamente el 69.3% de la carga total, esto sería a escala un peso de 124.76 kg, además se puede apreciar que la máxima deformación es de 5mm y el máximo desplazamiento de 23.4mm, que transformados a escala real del talud vendrían a ser 25cm y 117cm respectivamente.

Debido a que los dos estratos superiores no se encuentran en condiciones saturadas, se pudo apreciar que las condiciones del suelo sufren una afectación menor a la que se pudo producir, las propiedades mecánicas de los estratos CH y SC, tienen características que en condiciones óptimas que se pueden lograr con la construcción de obras preventivas auxiliares como se

explica en el capítulo 4, no se deberían producir daños como los existentes, apreciables en la imagen 3.1.

Se pudo evaluar que el banco de prueba no se ve afectado mayormente por el estrato inferior OH que se encuentra en condiciones de saturación, cabe mencionar que además se trata de un suelo orgánico, que contiene mayor porosidad e impurezas, debido a esto es completamente inadecuado el uso del mismo en cualquier actividad constructiva o para generar estabilidad en un talud, desgraciadamente la presencia de estratos de este tipo en la naturaleza es inevitable, y deben ser localizados oportunamente para tomar las medidas necesarias evitando problemas como el analizado en la zona 1.

En el Anexo número 4 se podrá observar el procedimiento para la elaboración del banco de prueba 1.

3.4.2. Resultados mediante análisis de equilibrio límite.

Los resultados que permite analizar esta metodología son de mucha ayuda, ya que brinda una idea global del comportamiento del talud, utilizando el método de Bishop simplificado y Spencer, métodos escogidos para el estudio de la zona 1.

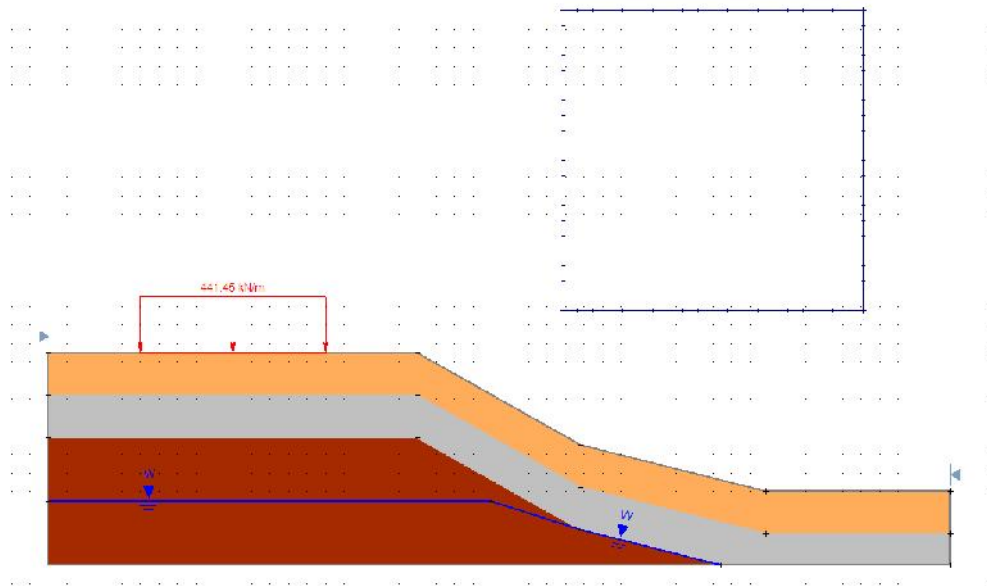


Imagen 3.4. Modelación banco de prueba 1.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

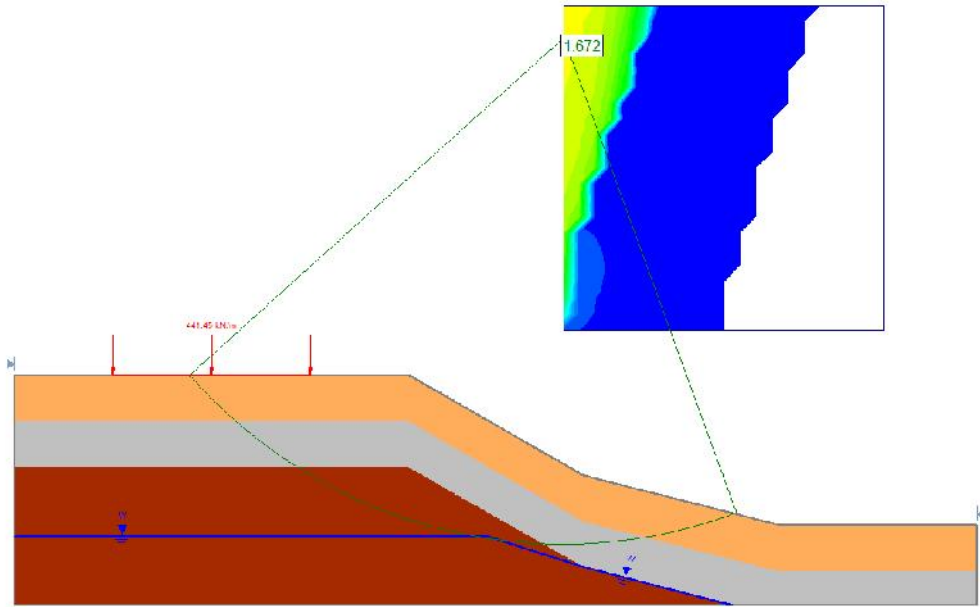


Imagen 3.5. Factor de seguridad de Bishop simplificado.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

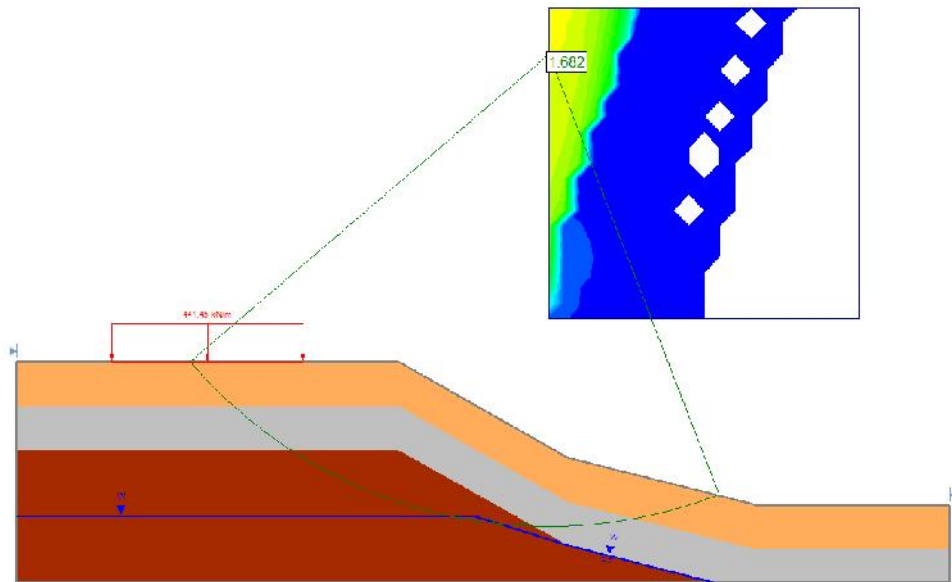


Imagen 3.6. Factor de seguridad de Spencer.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

Como se pudo observar en las imágenes 3.5 y 3.6 el factor de seguridad global por Bishop simplificado fue de 1.672 y el de Spencer de 1.682, además el grid estuvo con intervalos de 20 y no se consideró grietas de tensión como se mencionó con anterioridad.

Este modelo presentó falla por rotación local, y la diferencia numérica en los factores de seguridad es despreciable, lo que indica que una metodología matemáticamente inferior como la de Bishop simplificado otorga un análisis semejante a la realidad como la metodología de Spencer que es más compleja, no obstante esto se compara de manera global, ya que se explicó en el literal 2.3.4 del capítulo 2 la extensión de las metodologías aquí planteadas.

Como se pudo observar en los resultados mostrados en las imágenes 3.5 y 3.6, la altura preponderante de falla afecta directamente a los estratos superiores, haciendo notorio que las propiedades mecánicas del estrato CH primero, seguido del estrato SC tienen las condiciones adecuadas para garantizar la estabilidad global del talud. Pero en campo se nota un comportamiento diferente debido a que el elevado contenido de humedad afecta de manera drástica al estrato SC, y al estrato OH, por lo cual se presentan desplazamientos apreciables de manera semejante en el banco de prueba y en el campo, más no en el modelo de equilibrio límite.

3.4.3. Resultados mediante análisis de elementos finitos.

Mediante elementos finitos, se obtienen resultados en zonas puntuales de la malla de análisis utilizada por esta metodología, conociendo de esta manera varios parámetros que afectan la integridad del talud, a continuación se presenta el modelo idealizado con una aplicación de carga de 17.66 kN/m^2 :

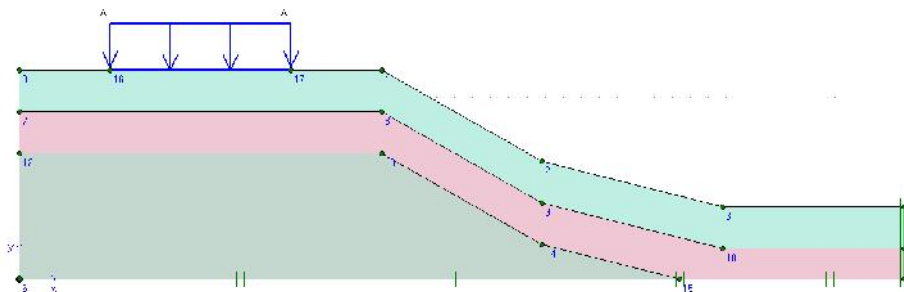


Imagen 3.7. Perfil del terreno.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

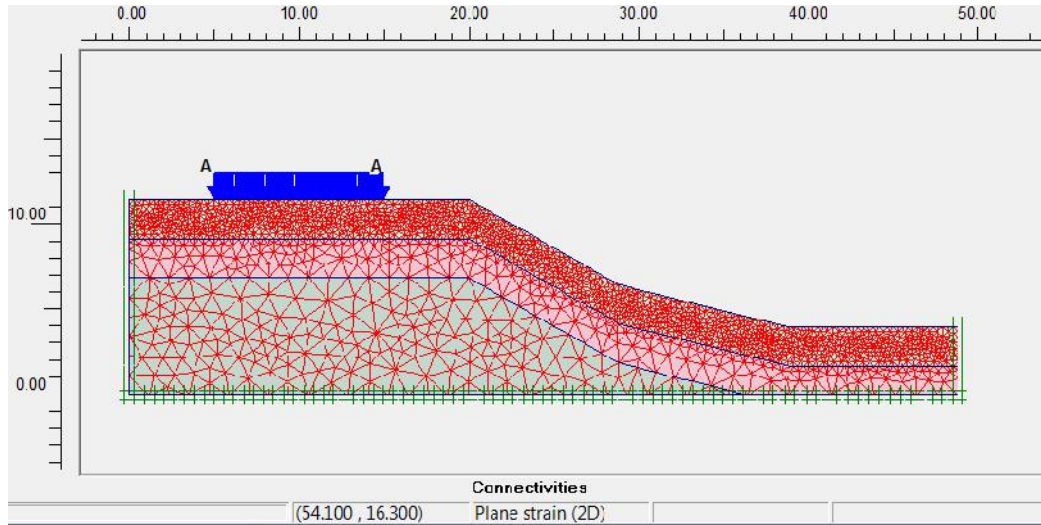


Imagen 3.8. Malla refinada globalmente para el análisis.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

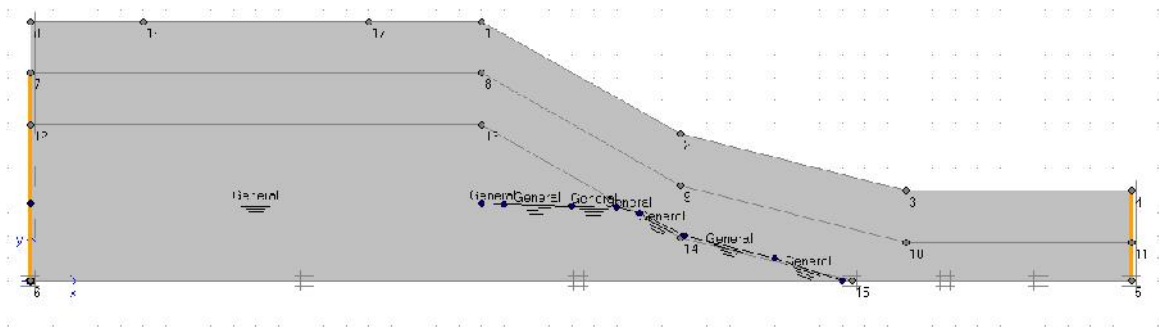


Imagen 3.9. Límite consolidado de análisis.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Como se pudo observar en la imagen 3.7 se ha indicado la conformación del modelo con sus respectivos estratos y condiciones de carga. De la misma forma se supo apreciar el refinado global de la malla de análisis utilizado por la metodología de elementos finitos en la imagen 3.8.

- En la imagen 3.9 se pudo apreciar que se colocaron límites de consolidación al modelo, para poder realizar una comparación con el banco de prueba que funcionó de esta manera, además se observó la ubicación del nivel freático.

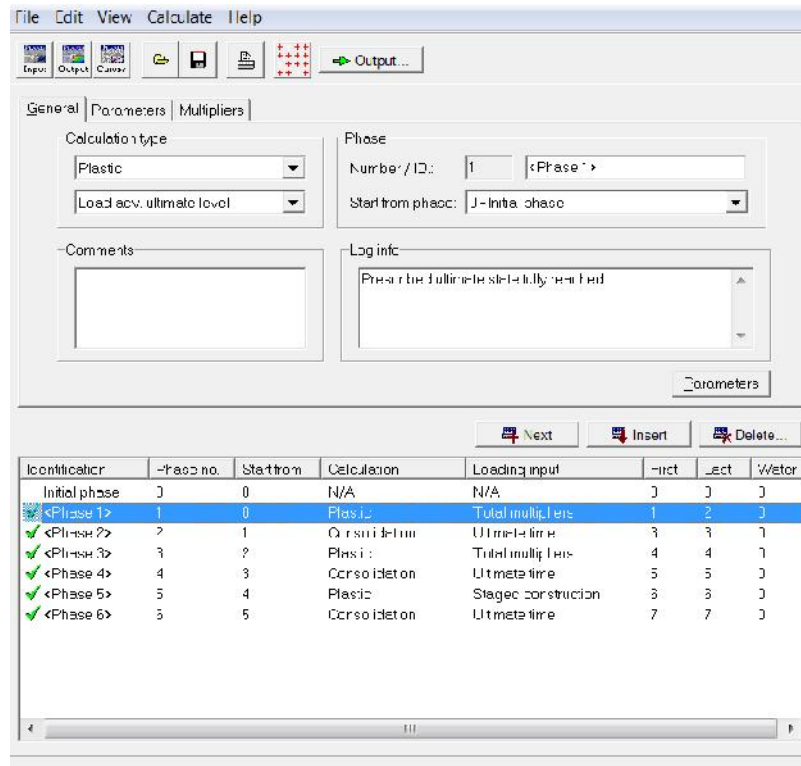


Imagen 3.10. Condiciones fases de cálculo.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

- Las fases de cálculo se definen en la interfaz mostrada en la imagen 3.10, las fases de cálculo del modelo se realizaron de manera progresiva en el orden mostrado, se ha considerado un análisis del tipo plástico y del tipo consolidado para cada tipo de estrato.
- El cálculo de tipo plástico de nivel último de avance de carga, tuvo a su vez dos condiciones de análisis, que fueron la de multiplicadores totales; en esta zona se pueden agregar combinaciones de carga que sería la multiplicación de la carga por el multiplicador escogido, en este caso se dejó en uno para no variar las condiciones planteadas.

- La segunda condición de análisis fue la de construcción por etapas; que asume niveles de carga, estados diferentes de tensiones debidas principalmente al cambio de geometría, hasta llegar al final de la etapa constructiva.
- El cálculo de tipo consolidado de tiempo último, se generó para realizar el análisis del desarrollo de las presiones de poro en el tiempo. Aquí se generan análisis elástico-plástico excelentes especialmente en suelos arcillosos con alto contenido de humedad.

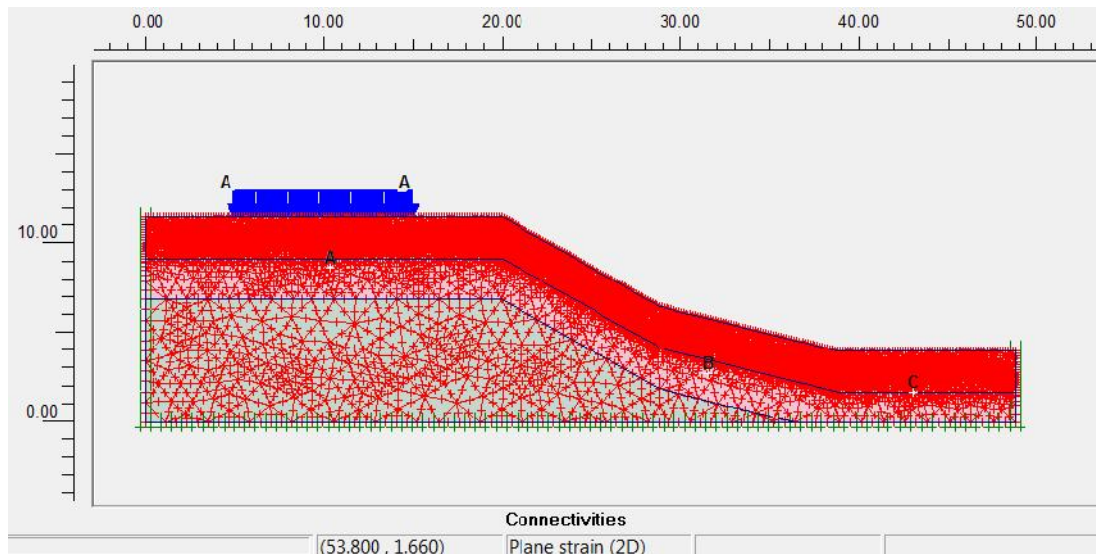


Imagen 3.11. Puntos para curvas carga-desplazamiento.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

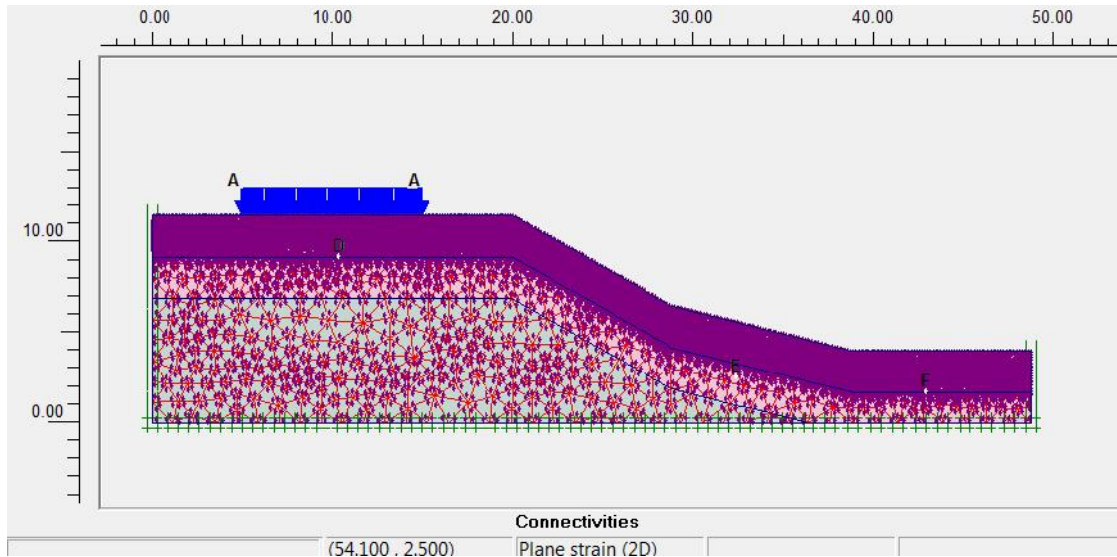


Imagen 3.12. Puntos para curvas tensión deformación.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Para la generación de curvas carga-desplazamiento y tensión deformación, se colocaron puntos de análisis donde las condiciones del terreno son críticas debido a las cargas actuantes.
- En las imágenes 3.11 y 3.12 se pudo ver los puntos A y D, colocados en la corona del talud bajo la acción de la carga, los puntos B y E, ubicados en la zona de inclinación del talud, y los puntos C y F, situados en el pie del talud, todos los puntos fueron dispuestos de tal forma que permitió analizar el talud en las zonas de mayor afectación.

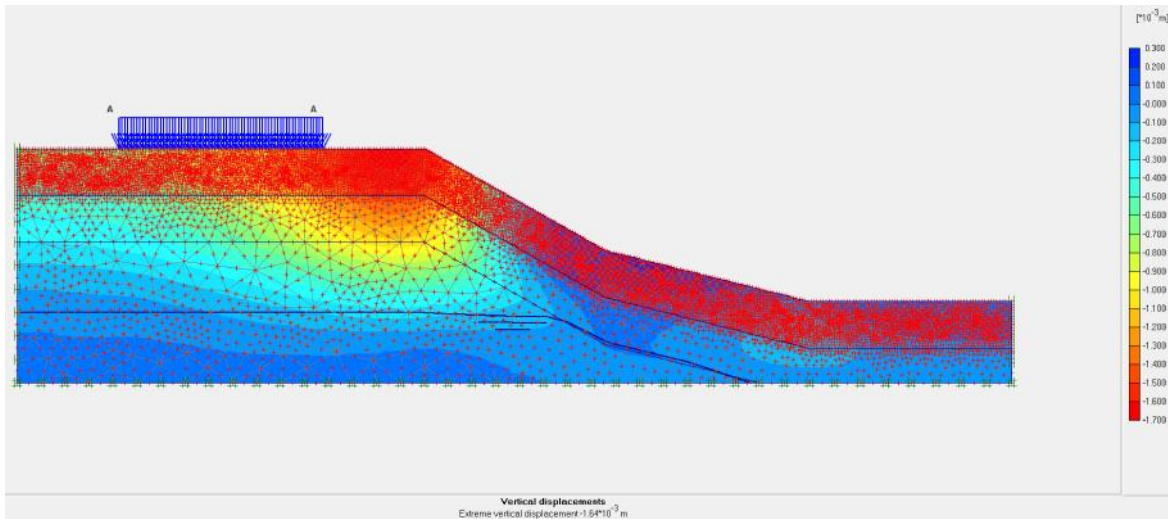


Imagen 3.13. Desplazamientos verticales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

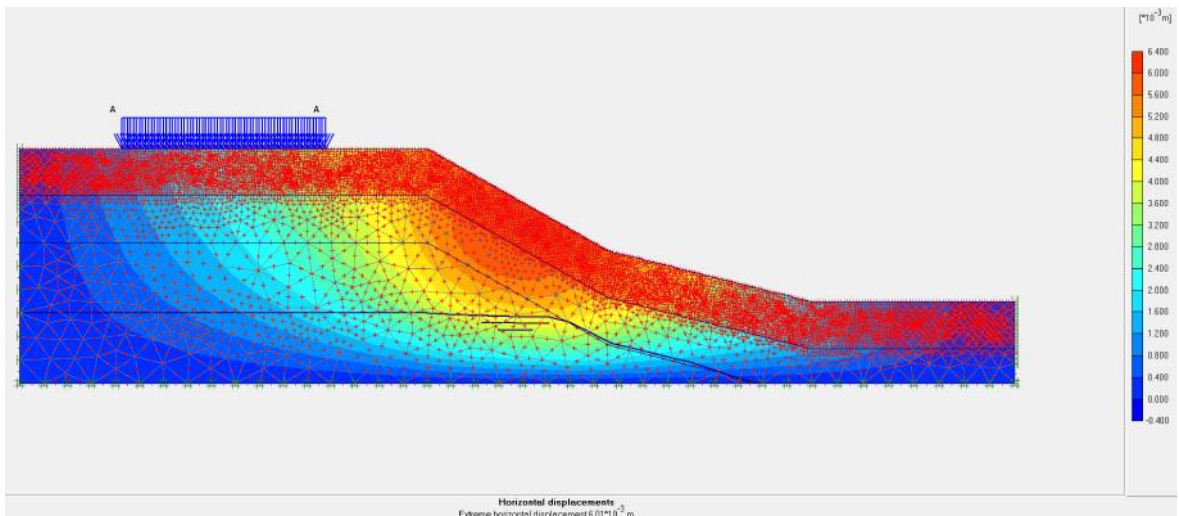


Imagen 3.14. Desplazamientos Horizontales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- En las imágenes 3.13 y 3.14 se logró ver las zonas de concentración de desplazamientos tanto verticales como horizontales, por la acumulación en cada uno de los nudos que se analizan mediante la malla de elementos finitos.

- Como se pudo ver, los desplazamientos se produjeron por acción de la carga cerca del borde de la corona del talud, afectando a su vez la zona de inclinación del mismo, la carga afecta a mayor medida mientras más cerca se ubique del borde de la corona, a pesar de esto se logró apreciar que las propiedades del estrato superior CH, como las propiedades del estrato SC, en condiciones con bajo contenido de humedad tienen una resistencia al corte considerable.

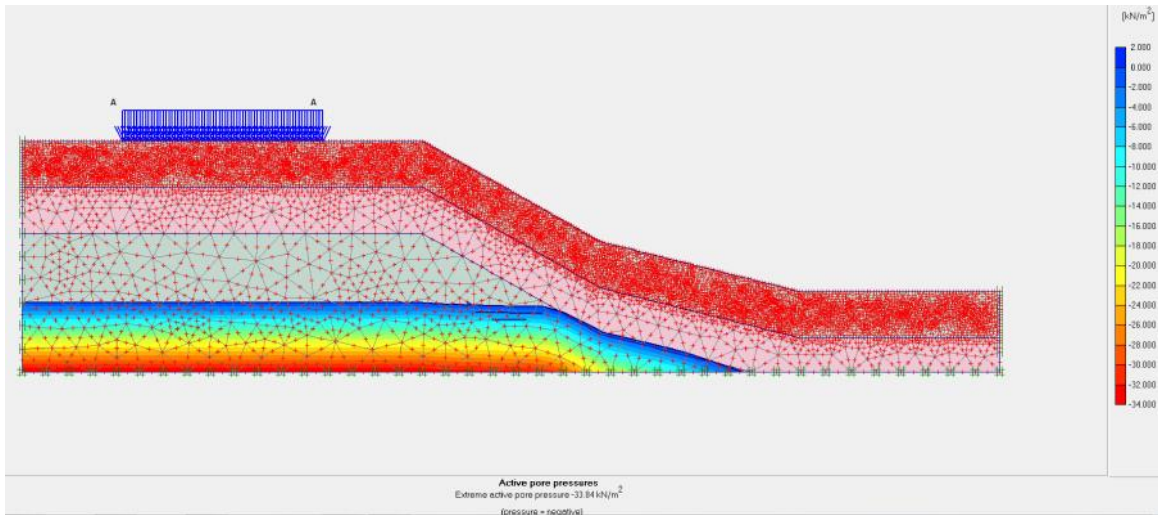


Imagen 3.15. Presión de poro activa.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- La presión de poro activa mostrada en la imagen 3.15 hace referencia a la acción de las presiones de poro estacionarias más los excesos de presión de poro, después de haber concluido el cálculo en toda la geometría del talud.
- La presión de poro se concentró en la zona inferior del estrato OH, por su gran contenido de impurezas y alto nivel de porosidad el agua rápidamente se infiltra. En el banco de prueba 1 mencionado en el literal 3.4.1, se observó una mayor afectación debido al contacto del agua con el estrato SC, que rápidamente fue cambiando sus propiedades mecánicas.

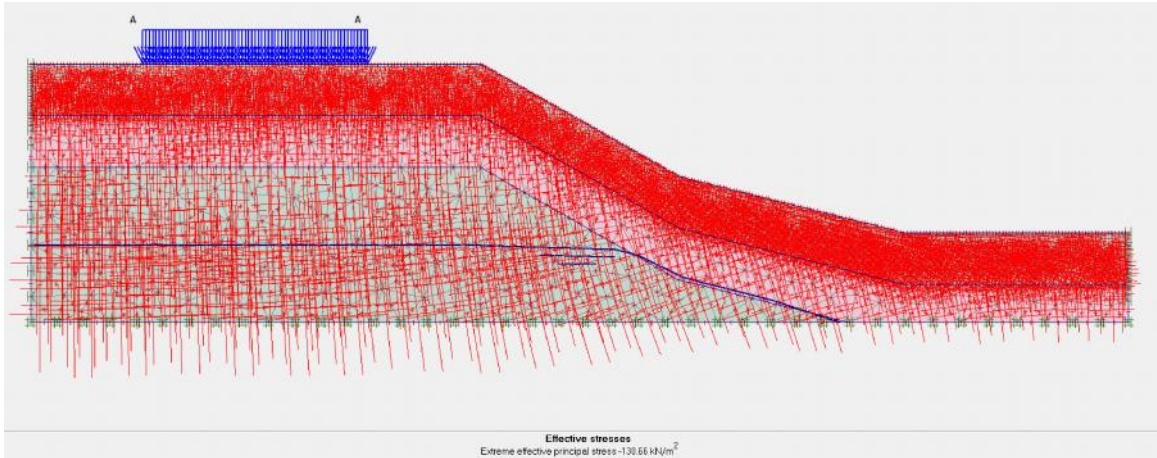


Imagen 3.16. Tensiones efectivas en direcciones principales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

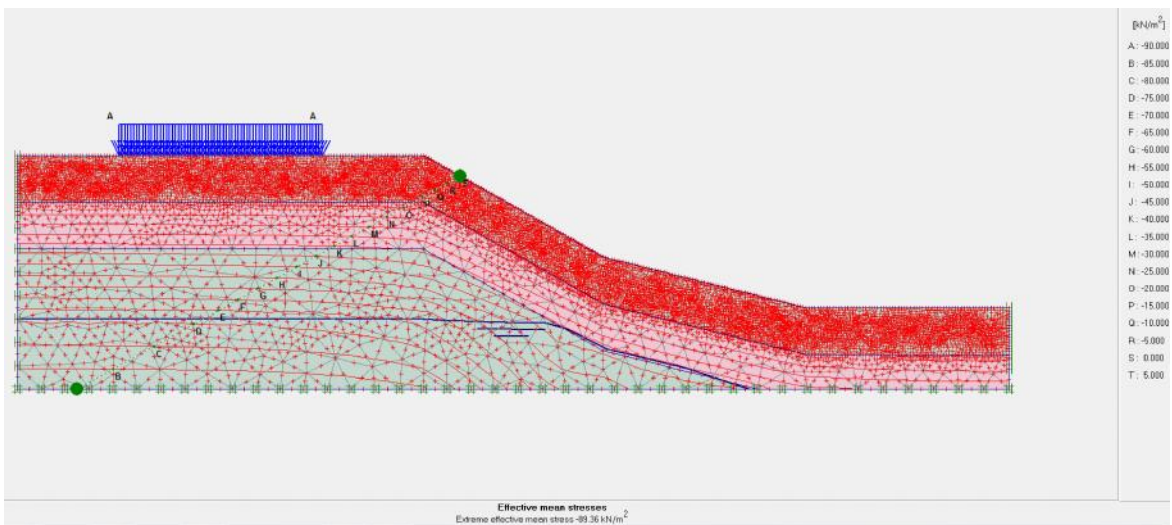


Imagen 3.17. Tensiones efectivas promedio.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- La tensión efectiva es el parámetro fundamental para conocer el comportamiento del suelo, cuando este parámetro se altera por la acción de cargas o debido a la presión de poro, se producen las deformaciones.

- En las imágenes 3.16 y 3.17 se pudo observar las tensiones efectivas en sus direcciones de mayor influencia y las tensiones efectivas promedio respectivamente.

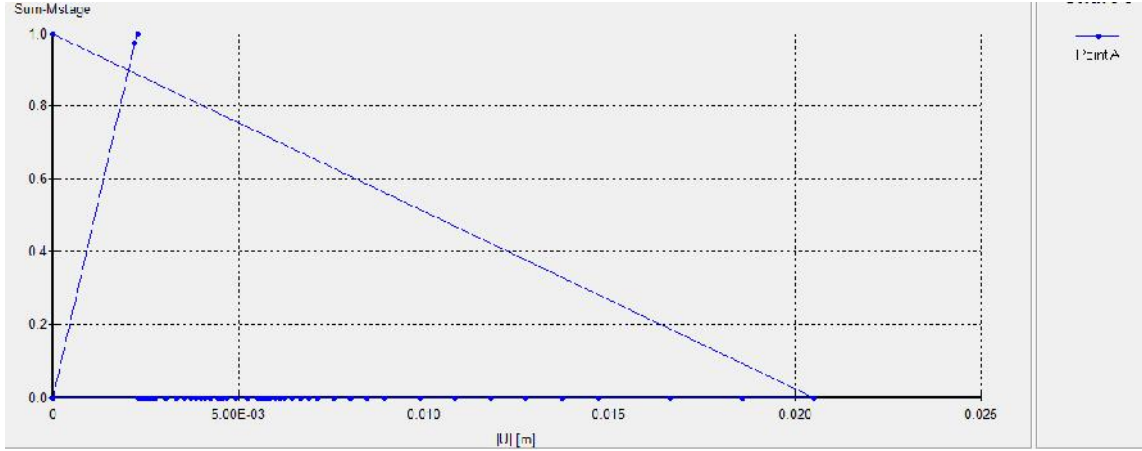


Imagen 3.18. Curva carga-desplazamiento en el punto A.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

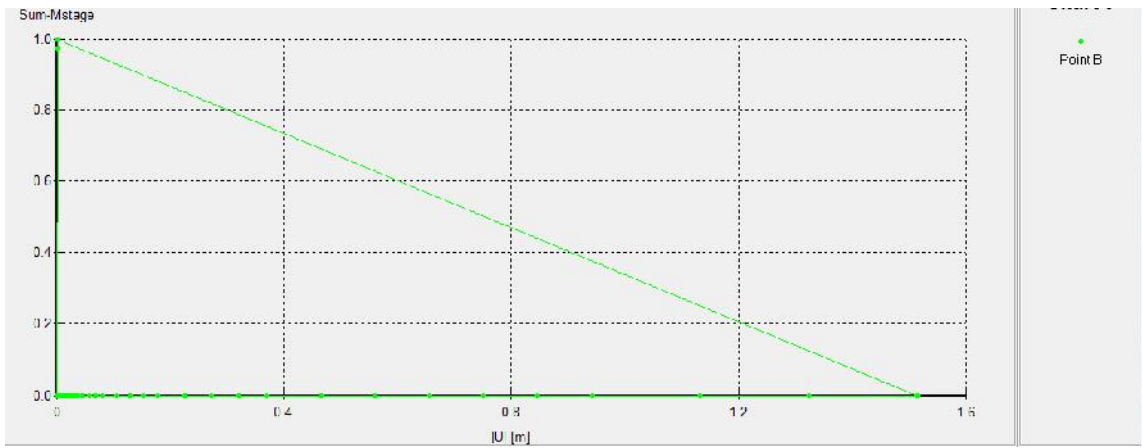


Imagen 3.19. Curva carga-desplazamiento en el punto B.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

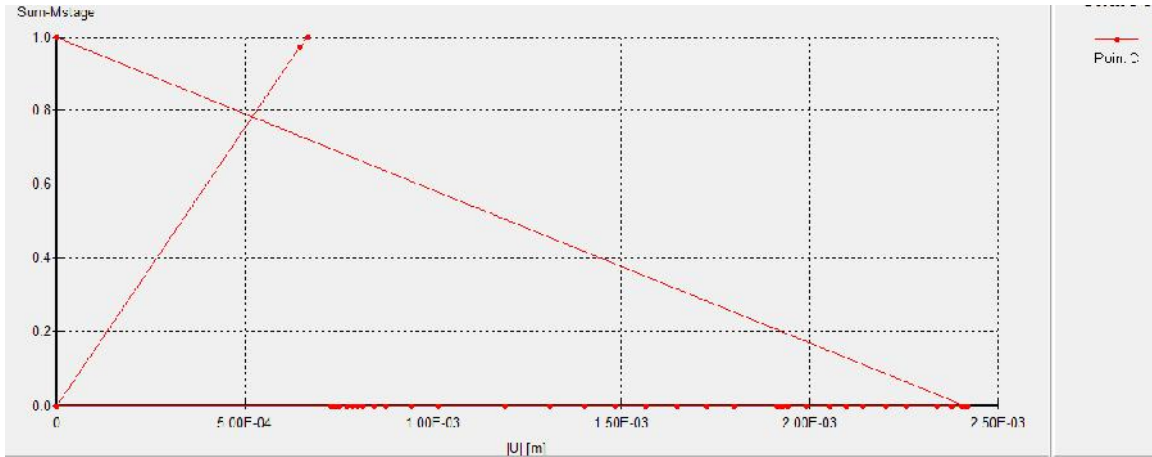


Imagen 3.20. Curva carga-desplazamiento en el punto C.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Los puntos A, B y C mencionados en la etapa de fases de cálculo, permitieron la obtención de curvas carga-desplazamiento, con las cuales se logró apreciar en las imágenes 3.18, 3.19 y 3.20 de manera más específica el comportamiento del talud en las zonas de mayor afectación debido a la aplicación de carga, geometría y propiedades mecánicas de los estratos definidos.
- Las curvas para carga-desplazamiento tienen simbología en su eje horizontal o eje (x), y en su eje vertical o eje (y), por lo que el significado que tiene cada uno de ellos es el siguiente:
 En el eje (x) se tiene la simbología |U| (m), que significa el desplazamiento absoluto obtenido por la combinación de desplazamiento de sus componentes tanto horizontal como vertical. En el eje (y) se observó la simbología Sum-Mstage, esto da el porcentaje de una etapa de construcción que ha sido completada.
- Como se pudo apreciar en las imágenes mencionadas, mientras va avanzando una etapa de cálculo se generan los desplazamientos del modelo, hasta que la carga ya no afecta más al suelo para la generación de mayores desplazamientos.

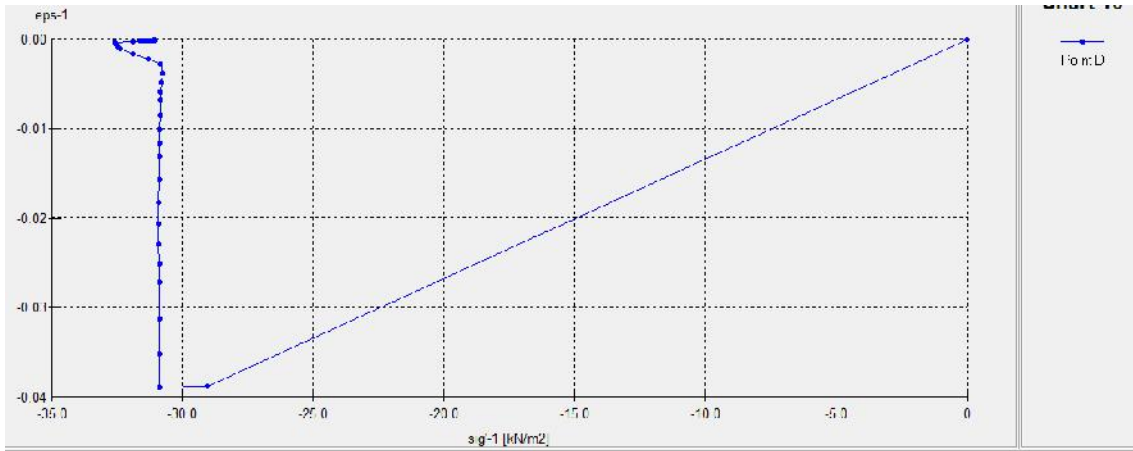


Imagen 3.21. Curva tensión-deformación punto D.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

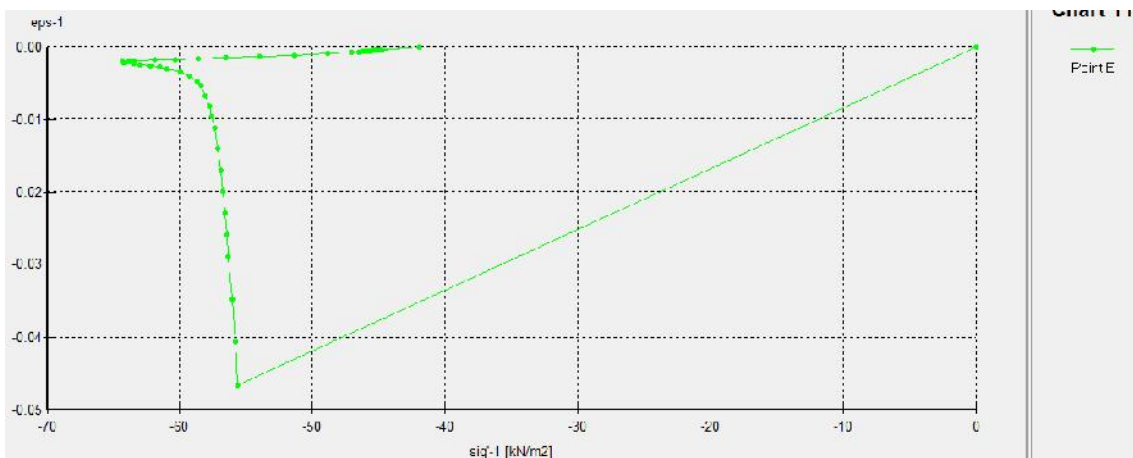


Imagen 3.22. Curva tensión-deformación punto E.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

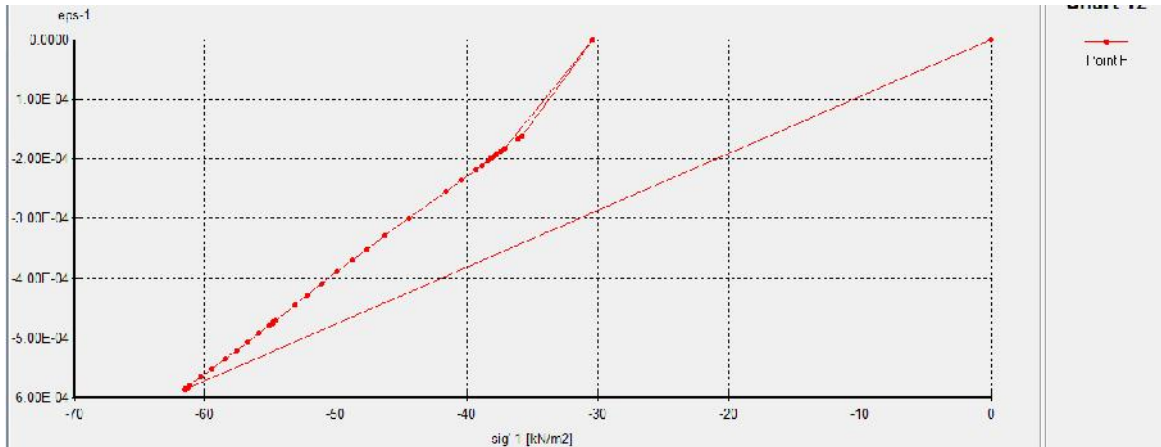


Imagen 3.23. Curva tensión-deformación punto F.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Los puntos D, E y F fueron necesarios para conocer el nivel de deformación provocado en el modelo del talud, con respecto al incremento de tensiones en el mismo.
- Se pudo analizar en las imágenes 3.21, 3.22 y 3.23 que el suelo alcanzó una deformación máxima debido a las tensiones producidas por el incremento de carga, hasta que los estratos que conformaron el modelo reaccionaron y empezó a disminuir la deformación gradualmente hasta alcanzar una deformación plástica final.
- En los puntos D y E, se notó mayor proporcionalidad entre la tensión y deformación hasta alcanzar el punto de equilibrio, contrario al punto F, ubicado en la zona de inclinación del talud donde el suelo tuvo un comportamiento un poco irregular, esto pudo producirse por el cambio de inclinación que posee el talud.
- Las curvas para tensión-deformación tienen simbología en sus eje horizontal o eje (x), y en sus eje vertical o eje (y), por lo que el significado que tiene cada uno de ellos es el siguiente:
- Para las curvas tensión-deformación; se tiene en el eje (x) la simbología σ'^{-1} (kN/m²), que significa la tensión principal efectiva mayor en valor absoluto. En el eje (y) se apreció la simbología ϵ^{-1} , que significa la deformación principal mayor en valor absoluto.

3.5. Distribución estratos de prueba modelación número 2

Esta es la segunda prueba realizada en la zona 1, analizando el comportamiento del tercer estrato, como se puede observar en la imagen 3.24, se aprecia una considerable depresión en el terreno, esta diferencia se nota comparando la altura de la corona del terreno con respecto a la masa del cuerpo del talud desplazado.



Imagen 3.24. Zona de estudio 1.

Fuente: Ciudad de Loja.

Elaboración: Autor.

Este perfil en el cual se ejecutó el segundo banco de prueba corresponde al tercer estrato encontrado en la calicata 3. El talud tiene una altura real de 11 m y una longitud de 47.82m, se idealizó esta propuesta para el banco de prueba ejecutado a una escala de 1:50 tanto vertical como horizontal, garantizando que con estas escalas iguales se mantuvieron las pendientes reales del terreno.

Para la simulación de cargas se tomará lo explicado con anterioridad para el banco de prueba 1 citado en el literal 3.4. El perfil mostrado a continuación consta de un solo estrato y tiene un nivel freático ubicado a la mitad del mismo que culminó en el pie del talud.

ZONA 1 IZQ (SC)
 ESCALA HORIZONTAL 1 : 50
 ESCALA VERTICAL 1 : 50

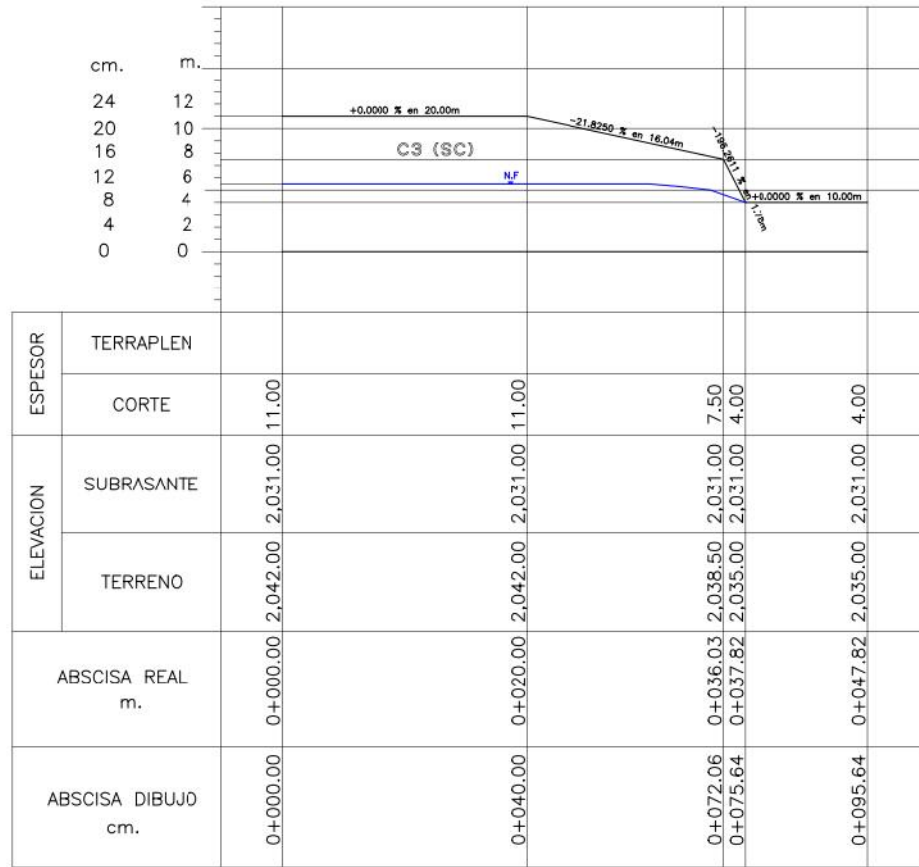


Imagen 3.25. Perfil de análisis zona 1.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Al igual que el banco de prueba 1 se dejó una corona de 20m y un pie de 10m de longitud, además se realizó cambios en las pendientes originales del terreno, de manera que para la mayor pendiente se consideró dejar un 70% de un ángulo recto, en este caso se obtuvo una pendiente máxima de 196.26%.

3.5.1. Ejecución banco de prueba número 2.

Para la realización de este banco de prueba, se ha secado de igual manera la muestra como lo explicado en el primer banco de prueba.

- El estrato (SC) tuvo un contenido de humedad de 15.71% para la parte no saturada.

Para la parte saturada o bajo la línea de nivel freático, se consideró un 45% de contenido de humedad para saturar la muestra completamente, este contenido de humedad se logró alcanzar en los dos primeros días de lectura de cambios. A continuación se mostrará el banco de prueba ejecutado con su respectiva carga y lecturas de deformación y desplazamiento.



Imagen 3.26. Banco de prueba 2.

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Para la obtención del peso para cargar el talud se tiene lo siguiente:

- Bloque 1, peso de 18.36 kg.
- Bloque 2, peso de 17.88 kg.
- Bloque 3, peso de 17.68 kg.
- Bloque 4, peso de 17.28 kg.
- Bloque 5, peso de 17.46 kg.

Con esta aplicación de carga se logró alcanzar el 49.26% del total de la carga calculada al inicio, esto fue ocasionado por el efecto que se pudo observar en el banco de prueba cuando se produjo el incremento de carga, ya que este se deformó aceleradamente, por lo cual se consideró también la adición pausada del contenido de humedad hasta alcanzar el 45% de saturación.

Tabla 3.4. Lecturas Banco de prueba 2.

		NOTAS
Día:	20/05/2015	Contenido de humedad zona saturada al 36%
Hora:	12:00	
Magnitud (kg):	53.92	Carga al 30% del cálculo
Deformación acumulada (mm):	30	
Desplazamiento acumulado (mm):	33.6	

		NOTAS
Día:	21/05/2015	Contenido de humedad zona saturada al 41.6%
Hora:	12:00	
Magnitud (kg):	88.66	Carga al 49.26% del cálculo
Deformación acumulada (mm):	45	
Desplazamiento acumulado (mm):	53.6	

		NOTAS
Día:	22/05/2015	Contenido de humedad zona saturada alcanza 45% final
Hora:	12:00	
Magnitud (kg):	88.66	Constante
Deformación acumulada (mm):	50	
Desplazamiento acumulado (mm):	83.6	

		NOTAS
Día:	23/05/2015	
Hora:	12:00	
Magnitud (kg):	88.66	Constante
Deformación acumulada (mm):	50	Máxima
Desplazamiento acumulado (mm):	83.6	Máxima

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

La carga máxima aplicada fue del 49.26% como se mencionó anteriormente, lo que equivale a 88.66 kg, además se pudo apreciar que la máxima deformación fue de 50mm y el máximo desplazamiento de 83.6mm, que transformados a escala real del talud vendrían a ser 2.5m y 4.18m respectivamente.

Debido a que el banco de prueba se conformó por un estrato de arena arcillosa completamente, se pudo apreciar la afectación que se produjo por un alto contenido de humedad. En el banco de prueba 1, se observó que el estrato SC ayudo a la estabilidad del talud por sus propiedades mecánicas en condiciones con bajo contenido de humedad, a diferencia de este que presentó una gran deformación y desplazamiento. De esta manera se entendió de mejor manera las complicaciones que acarrea una falta de conocimiento de las propiedades geomecánicas del suelo de fundación de una obra y se entiende la necesidad de obras auxiliares de prevención.

En el Anexo número 5 se podrá observar el procedimiento para la elaboración del banco de prueba 2.

3.5.2. Resultados mediante análisis de equilibrio límite.

Los resultados que permite analizar esta metodología son de mucha ayuda, ya que brinda una idea global del comportamiento del talud, se utilizó el método de Bishop simplificado y Spencer, métodos escogidos para el estudio de la zona 1.

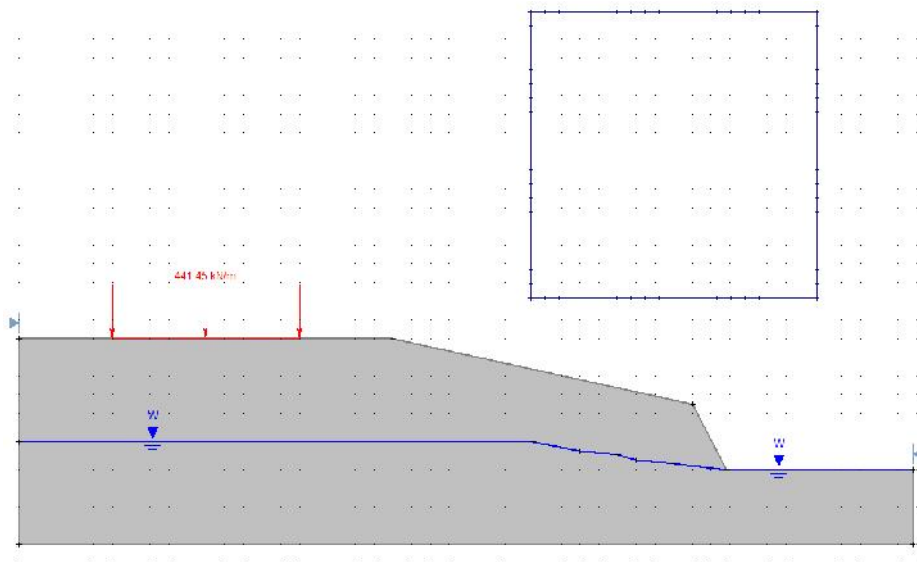


Imagen 3.27. Modelación banco de prueba 2.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

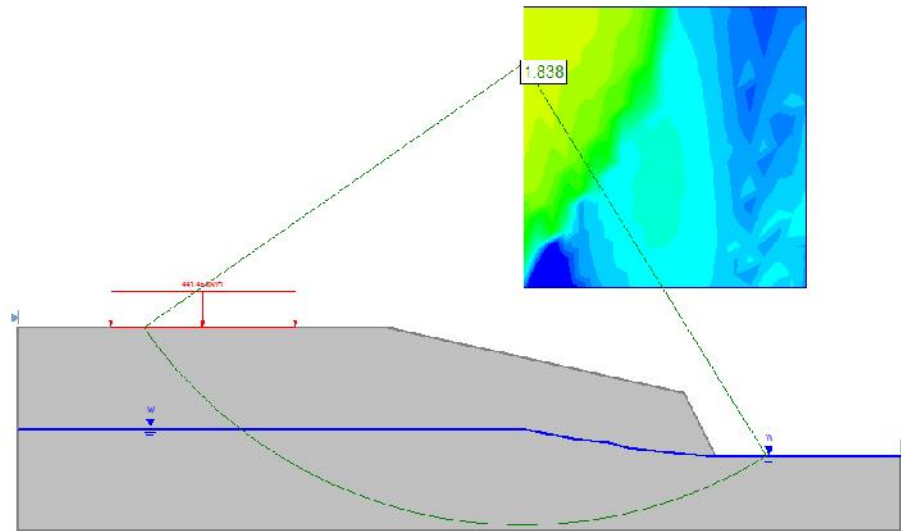


Imagen 3.28. Factor de seguridad de Bishop simplificado.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

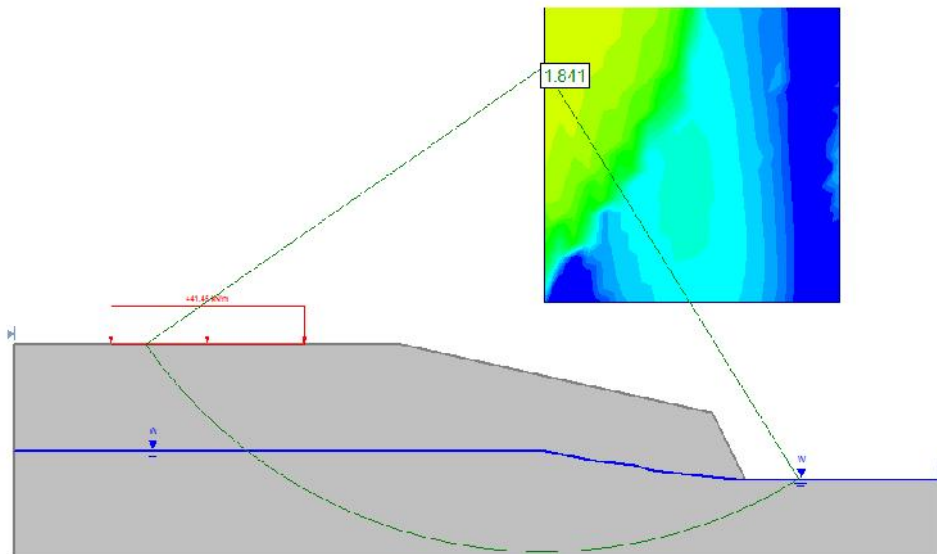


Imagen 3.29. Factor de seguridad de Spencer.

Fuente: Software Slide.

Elaboración: Autor.

Como se pudo observar el factor de seguridad global por Bishop simplificado fue de 1.838 y el de Spencer de 1.841, ilustrados en las imágenes 3.28 y 3.29 respectivamente, la diferencia

numérica en los factores de seguridad es despreciable, además el grid está con intervalos de 20 y no se consideraron grietas de tensión.

Este modelo presentó falla por rotación de base, y se asumió también, que el talud es infinito por lo que se apreció una altura preponderante de falla mayor a la altura del talud, donde se ve que mientras mayor sea el espesor del estrato en condiciones saturadas, mayor será la altura de falla en el talud.

El factor de seguridad otorgado por la metodología de equilibrio límite no se asemeja a la realidad, ya que en campo como se pudo apreciar en la imagen 3.24 se produce una falla de gran magnitud, dejando al banco de prueba con mayor validez en este caso.

3.5.3. Resultados mediante análisis de elementos finitos.

Para el análisis siguiendo esta metodología se utilizará la carga expresada en kN/m^2 mostrada en el literal 3.4, y las propiedades del estrato (SC) en el literal 3.2, a continuación se presenta el modelo idealizado que se pretende analizar utilizando elementos finitos.

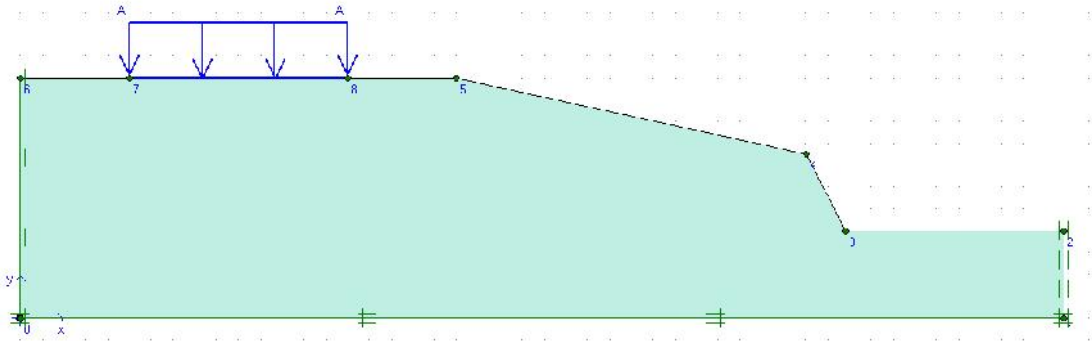


Imagen 3.30. Perfil del terreno.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

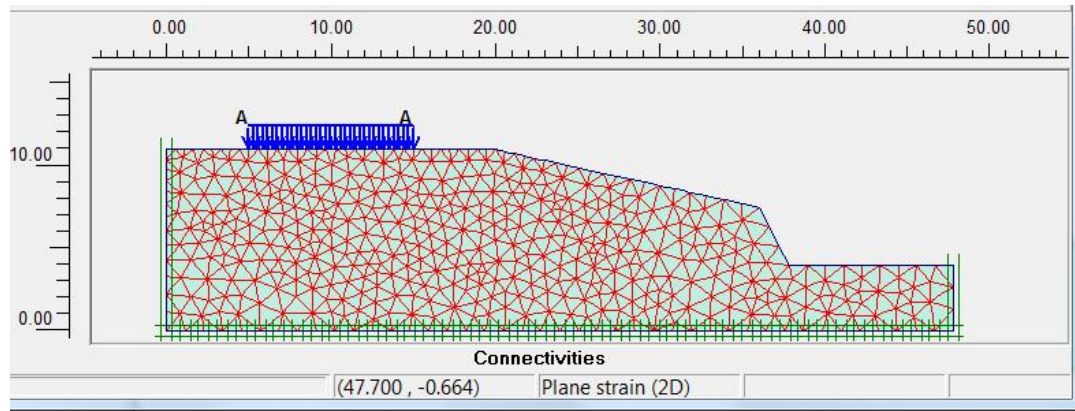


Imagen 3.31. Malla refinada globalmente para el análisis.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

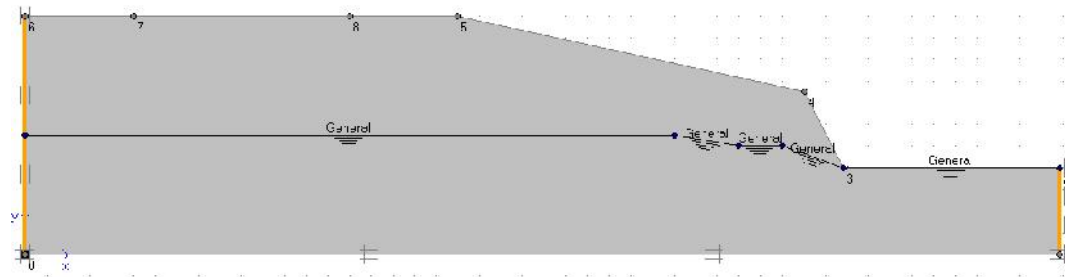


Imagen 3.32. Límite consolidado de análisis.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Como se pudo observar en la imagen 3.30 se indicó la conformación del modelo con su respectivo estrato y condiciones de carga. De la misma forma se supo apreciar el refinado global de la malla de análisis utilizado por la metodología de elementos finitos en la imagen 3.8.
- En la imagen 3.9 se pudo apreciar que se colocaron límites de consolidación al modelo, de igual forma que en el primer análisis ejecutado.

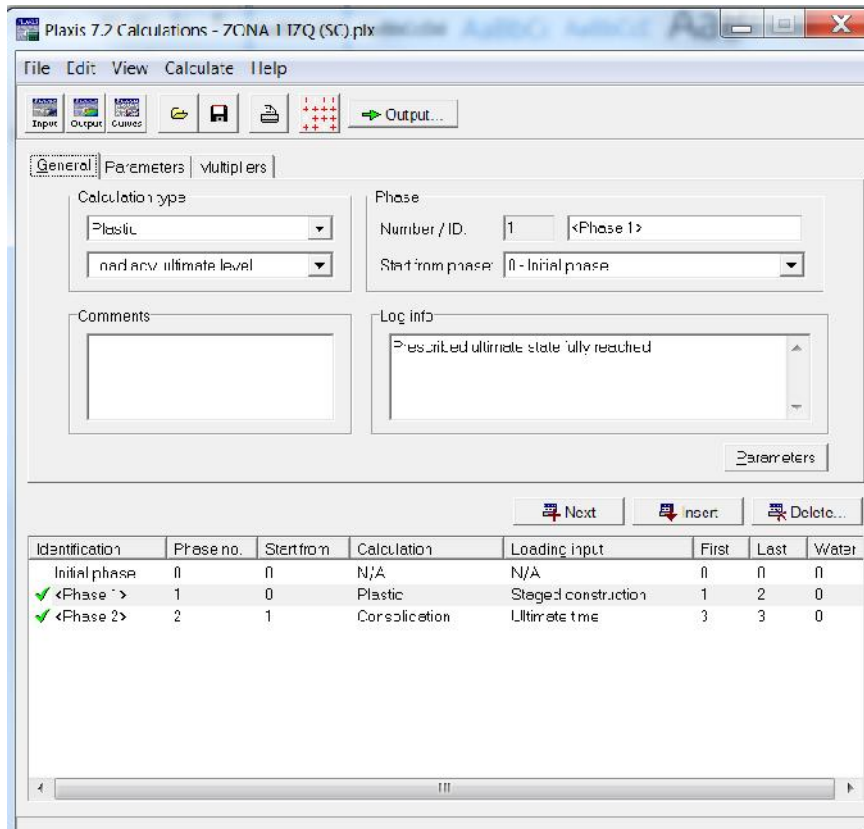


Imagen 3.33. Condiciones fases de cálculo.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Las fases de cálculo se definen en la interfaz mostrada en la imagen 3.33, se consideró un análisis del tipo plástico y del tipo consolidado para el análisis del talud en cuestión.
- El cálculo de tipo plástico de nivel último de avance de carga, tuvo la condición de análisis de construcción por etapas; que asume niveles de carga, estados diferentes de tensiones debidas principalmente al cambio de geometría, hasta llegar al final de la etapa constructiva.
- El cálculo de tipo consolidado de tiempo último, se generó para realizar el análisis del desarrollo de las presiones de poro en el tiempo. Aquí se generan análisis elástico-plástico excelentes, especialmente en suelos arcillosos con alto contenido de humedad.

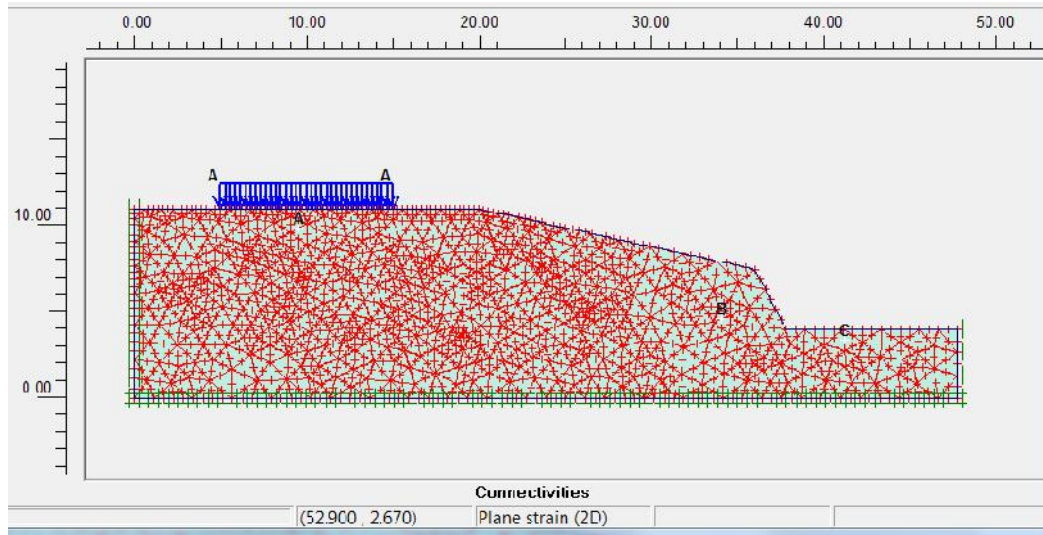


Imagen 3.34. Nudos para curvas carga-desplazamiento.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

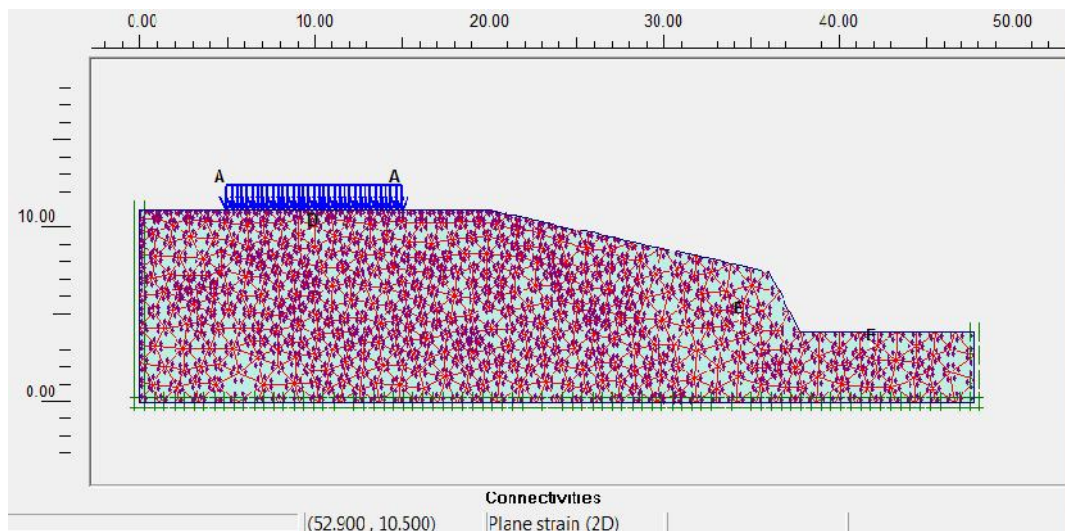


Imagen 3.35. Puntos para curvas tensión-deformación.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Para la generación de curvas carga-desplazamiento y tensión deformación, se colocaron puntos de análisis donde las condiciones del terreno son críticas debido a las cargas actuantes y por la afectación de la presión de poro.
- En las imágenes 3.34 y 3.35 se pudo ver los puntos A y D, colocados en la corona del talud bajo la acción de la carga, los puntos B y E, ubicados en la zona de mayor inclinación del talud, y los puntos C y F, situados en el pie del talud, todos estos puntos fueron dispuestos de tal forma que permitió analizar el talud en las zonas de mayor riesgo.

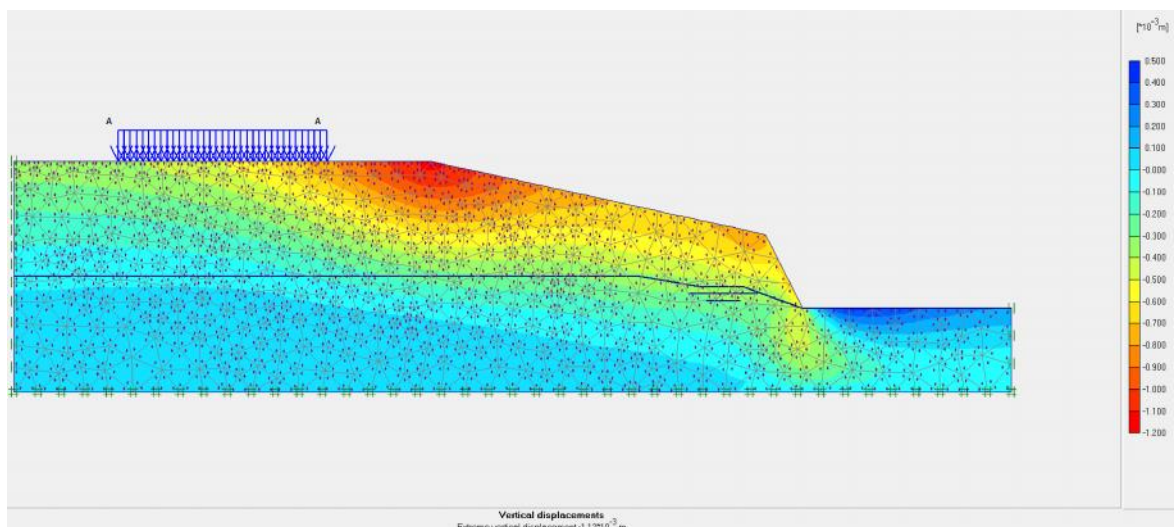


Imagen 3.36. Desplazamientos verticales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

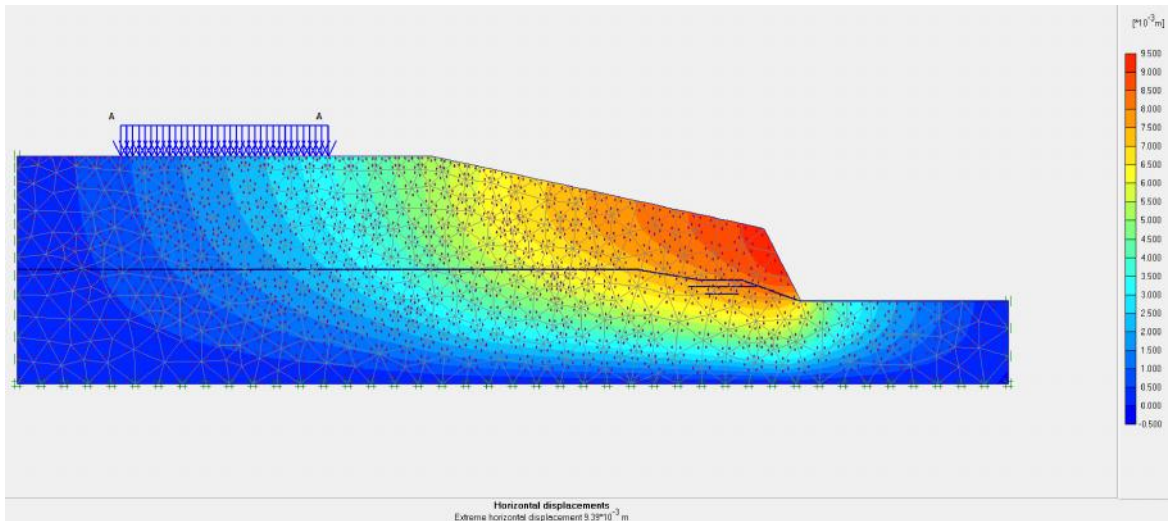


Imagen 3.37. Desplazamientos horizontales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- En las imágenes 3.36 y 3.37 se logró ver las zonas de concentración de desplazamientos tanto verticales como horizontales, por la acumulación en cada uno de los nudos que se analizan mediante la malla de elementos finitos.
- Como se pudo ver en las imágenes mencionadas, los desplazamientos se produjeron por acción de la carga cerca del borde de la corona del talud, afectando a su vez la zona de inclinación del mismo que en este caso presentó una gran pendiente, la carga afecta a mayor medida mientras más cerca se ubique del borde de la corona, se logró apreciar que las propiedades del estrato SC, se ven afectadas directamente por el alto contenido de humedad, además las concentraciones de desplazamientos son semejantes al banco de prueba a pesar de presentar un menor valor numérico.

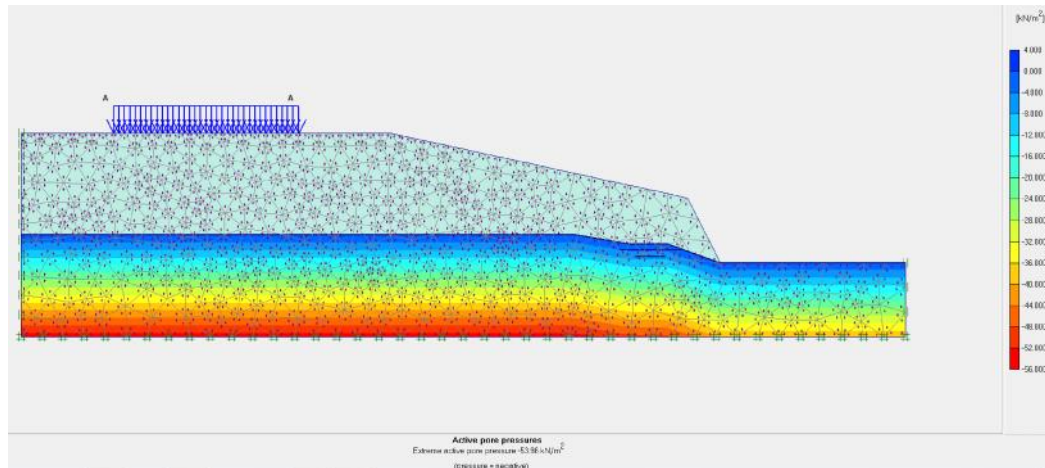


Imagen 3.38. Presión de poro activa.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- La presión de poro activa mostrada en la imagen 3.38 hace referencia a la acción de las presiones de poro estacionarias más los excesos de presión de poro, después de haber concluido el cálculo en toda la geometría del talud.
- La presión de poro se concentró en la zona inferior del estrato, por su gran nivel de porosidad el agua rápidamente se infiltra, cambia drásticamente las propiedades mecánicas del estrato y se vieron afectadas las principales zonas del talud.

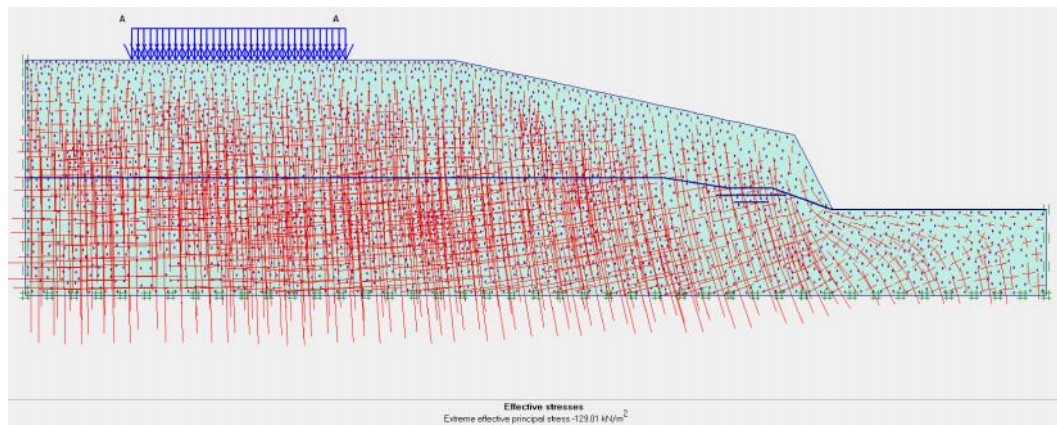


Imagen 3.39. Tensiones efectivas en direcciones principales.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

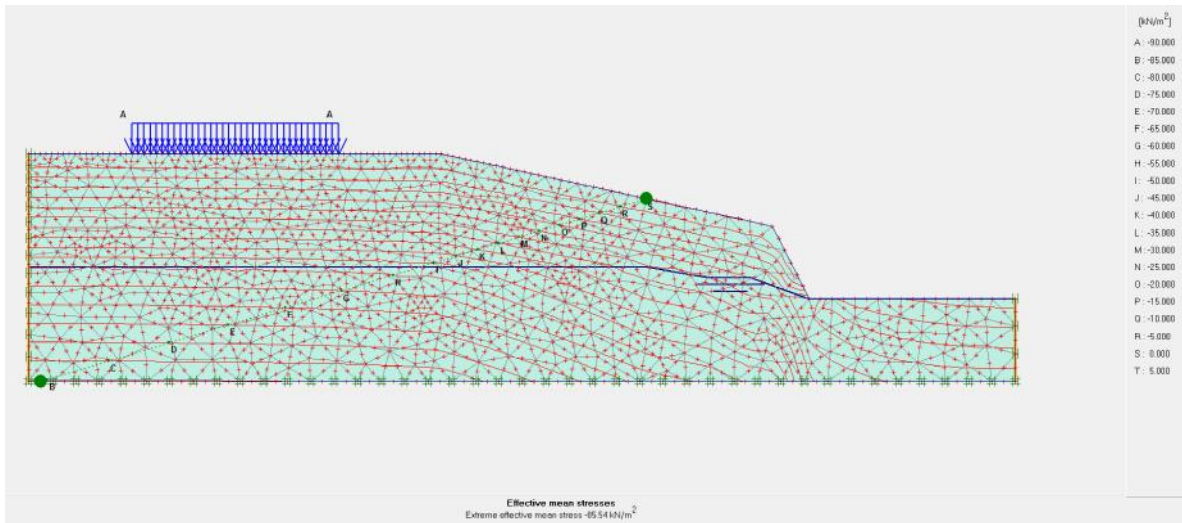


Imagen 3.40. Tensiones efectivas promedio.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- La tensión efectiva es el parámetro fundamental para conocer el comportamiento del suelo, cuando este parámetro se altera por la acción de cargas o debido a la presión de poro, se producen las deformaciones.
- En las imágenes 3.16 y 3.17 se pudo observar las tensiones efectivas en sus direcciones de mayor influencia y las tensiones efectivas promedio respectivamente. Además como se pudo apreciar las tensiones principales se generan en la zona intermedia y baja del cuerpo del talud.

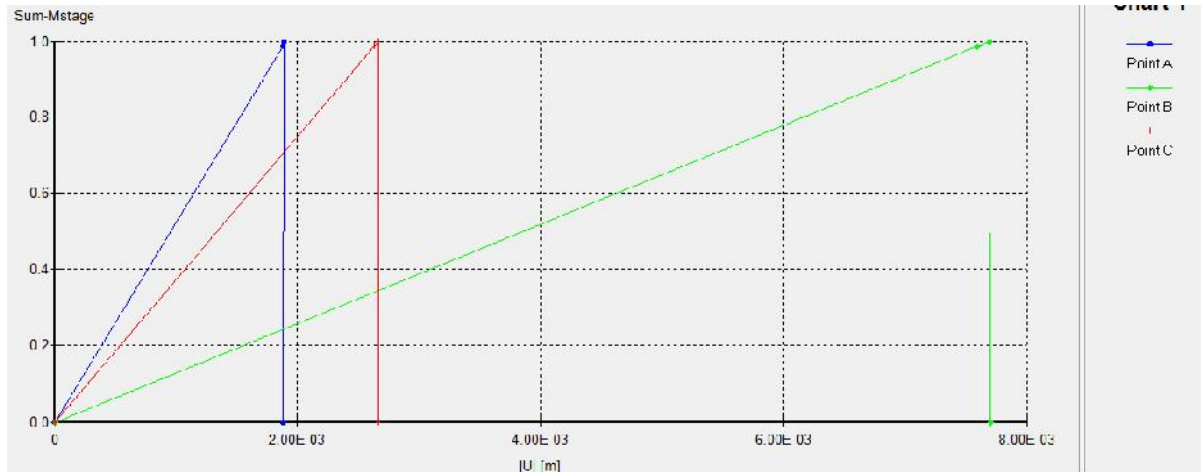


Imagen 3.41. Curvas carga-desplazamiento puntos A, B y C.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Los puntos A, B y C mencionados en la etapa de fases de cálculo, permitieron la obtención de curvas carga-desplazamiento, las cuales se logró apreciar en la imagen 3.41 de manera más específica el comportamiento del talud en las zonas de mayor afectación debido a la aplicación de carga, geometría y propiedades mecánicas del estrato definido, esta vez se colocó las curvas en una sola gráfica debido a la similitud de las mismas.
- Las curvas para carga-desplazamiento tienen simbología en su eje horizontal o eje (x), y en su eje vertical o eje (y), por lo que el significado que tiene cada uno de ellos es el siguiente:
 En el eje (x) se tiene la simbología $|U|$ (m), que significa el desplazamiento absoluto obtenido por la combinación de desplazamiento de sus componentes tanto horizontal como vertical. En el eje (y) se observó la simbología Sum-Mstage, esto da el porcentaje de una etapa de construcción que ha sido completada.
- Como se pudo apreciar en la imagen mencionada, se avanzó regularmente con la construcción de la etapa de cálculo, hasta que se alcanzó el máximo desplazamiento, esta regularidad se debe a que se tuvo un solo estrato para el análisis, lo cual simplificó mucho el cálculo.

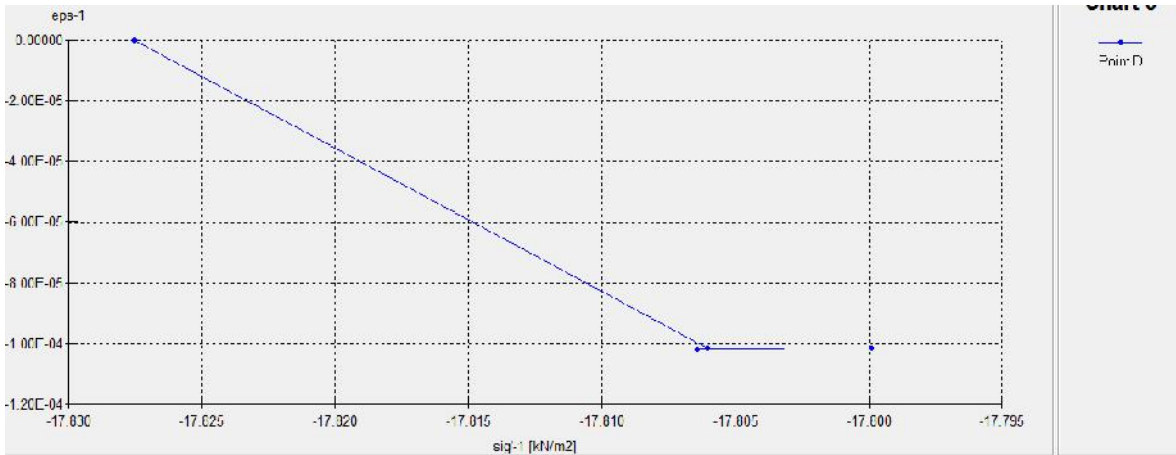


Imagen 3.42. Curva tensión-deformación punto D.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

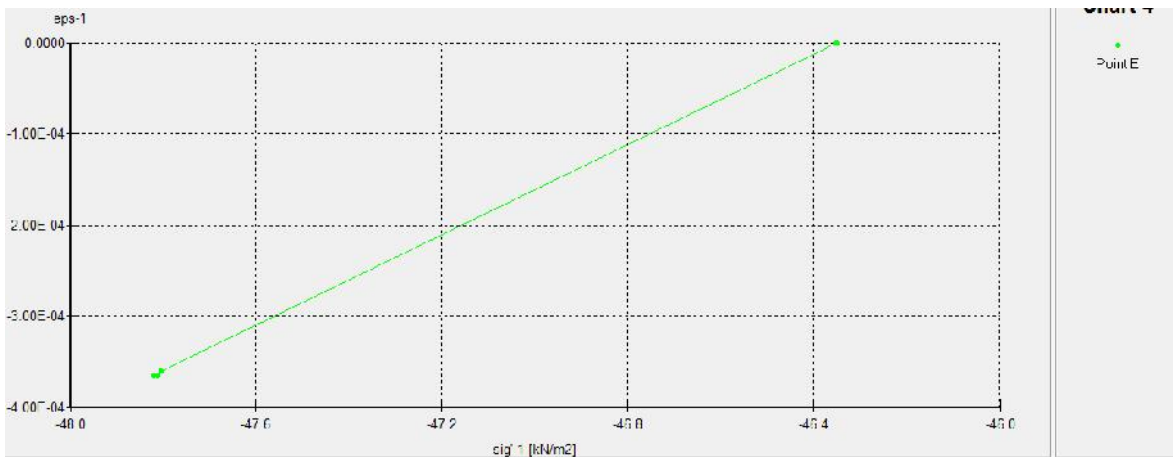


Imagen 3.43. Curva tensión-deformación punto E.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

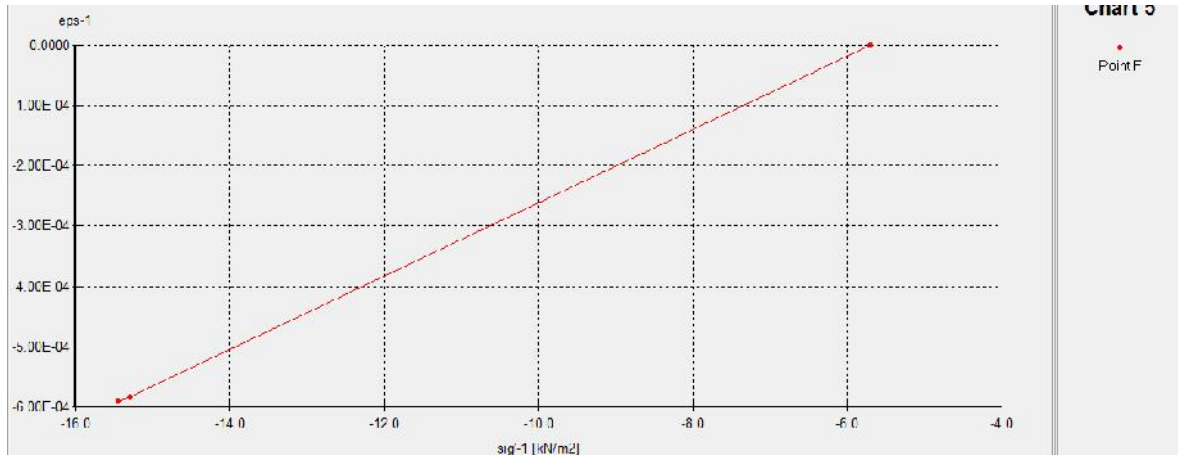


Imagen 3.44. Curva tensión-deformación punto F.

Fuente: Software Plaxis.

Elaboración: Autor.

- Los puntos D, E y F fueron necesarios para conocer el nivel de deformación provocado en el modelo del talud, con respecto al incremento de tensiones en el mismo.
- Se pudo analizar en las imágenes 3.42, 3.43 y 3.44 que existió una peculiaridad en el análisis, debido a que el punto D es contrario al E y al F, en el punto D; mientras la tensión fue disminuyendo, la deformación fue aumentando hasta alcanzar un equilibrio en ambos aspectos, mientras que los puntos E y F; siguieron la tendencia esperada al deformarse directamente proporcional a la tensión provocada, hasta que se alcanzó un punto máximo.
- Como se pudo observar las curvas tensión-deformación tienen simbología en sus ejes horizontales o eje (x), y en sus ejes verticales o eje (y), por lo que el significado que tiene cada uno de ellos es el siguiente:
- Para las curvas tensión-deformación; se tiene en el eje (x) la simbología sig^{-1} (kN/m^2), que significa la tensión principal efectiva mayor en valor absoluto. En el eje (y) se apreció la simbología eps^{-1} , que significa la deformación principal mayor en valor absoluto.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados banco de prueba

El banco de prueba se idealizó en la zona de estudio número 1, ya que esta tiene serios problemas, que interviniendo de la mejor manera se podrían evitar aún más inconvenientes, la zona número 2 y 3 no afectan bienes o la integridad de personas directamente en la magnitud de la zona número 1, y hablando de la zona número 4, es un claro ejemplo de las fallas que se producen por un inexistente estudio de las propiedades geomecánicas de los suelos y como se ven afectadas bajo ciertos factores internos y externos, esta zona es la más crítica de todas y requiere también de estudios geológicos que no competen a la temática planteada en este trabajo de investigación, por lo tanto la zona número 1 fue la escogida para el análisis completo que pretende esta investigación.

A continuación se presenta de manera resumida una comparación de las 3 metodologías ejecutadas.

Tabla 4.1. Resultados banco de prueba 1.

	Banco de prueba 1:	Equilibrio límite:	Elementos finitos:
Desplazamiento vertical a escala y equivalencia real (mm)/(m):	5 / 0.25		
Desplazamiento horizontal a escala y equivalencia real (mm)/(m):	23.4 / 1.17		
Factor de seguridad Bishop simplificado:		1.672	
Factor de seguridad Spencer:		1.682	
Presión de poro activa (KN/m ²):			-33.84
Tensión efectiva extrema principal (KN/m ²):			-130.66
Tensión efectiva promedio (KN/m ²):			-89.36
Desplazamiento vertical real y equivalencia a escala (m)/(mm):			0.00164 / 0.033
Desplazamiento horizontal real y equivalencia a escala (m)/(mm):			0.00601 / 0.12

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

Tabla 4.2. Resultados banco de prueba 2.

	Banco de prueba 2:	Equilibrio límite:	Elementos finitos:
Deformación a escala y equivalencia real (mm)/(m):	50 / 2.5		
Desplazamiento a escala y equivalencia real (mm)/(m):	83.6 / 4.18		
Factor de seguridad Bishop simplificado:		1.838	
Factor de seguridad Spencer:		1.841	
Presión de poro activa (KN/m ²):			-53.96
Tensión efectiva extrema principal (KN/m ²):			-129.01
Tensión efectiva promedio (KN/m ²):			-85.54
Desplazamiento vertical real y equivalencia a escala (m)/(mm):			0.00112 / 0.022
Desplazamiento horizontal real y equivalencia a escala (m)/(mm):			0.00939 / 0.19

Fuente: Autor.

Elaboración: Autor.

- Como se puede ver, los factores de seguridad en los bancos de prueba varían en tan solo un 0.6% y un 0.16% respectivamente.
- Se aprecia que mediante la utilización de elementos finitos, se pueden obtener parámetros en puntos escogidos por el analista.
- Los desplazamientos obtenidos mediante la metodología de elementos finitos, simulando condiciones reales, varían con los resultados mostrados por el banco de prueba elaborado a escala, pero en este se observó directamente el grado de afectación producido por el contenido de humedad, las condiciones de carga y las propiedades mecánicas del suelo.
- Como se pudieron observar en el banco de prueba y en el análisis mediante elementos finitos, se producen desplazamientos en zonas críticas del talud, que son indetectables mediante análisis estáticos como equilibrio límite, ya que este proporciona un factor de seguridad global que impide el análisis en diferentes zonas que podrían afectar directamente la integridad de la estructura.

4.1.1. Resultados modelo de análisis número 1.

Este modelo presentó una falla por rotación local, el comportamiento de los estratos definidos en el análisis no se vio afectado directamente por el nivel freático, en el capítulo 3 se especificó de manera detallada los resultados obtenidos mediante las metodologías de análisis y mediante la conformación del banco de prueba.

El banco de prueba arrojó resultados semejantes a la realidad, mientras que el modelo de análisis en los programas computacionales no comparó de la mejor manera los resultados de las propiedades mecánicas de los estratos, obtenidas mediante ensayos de laboratorio, con las condiciones reales a las que se vio expuesta la zona de estudio 1.

Los resultados obtenidos con las metodologías empleadas de análisis se comparan con el banco de prueba en la ubicación de las zonas damnificadas del talud, más no en valores numéricos reales.

4.1.2. Resultados modelo de análisis número 2.

Este modelo presentó una falla por rotación de base, se analizó el talud con una altura preponderante de falla mayor a la altura del mismo, y se logró apreciar la afectación directa que produjeron factores externos como el agua en las propiedades geomecánicas del estrato SC.

De la misma manera que el modelo de análisis número 1, se apreció que los programas computacionales apuntaron a una correcta elaboración del banco de prueba, así no se asemejen los resultados numéricamente.

Se puede comparar los resultados mediante el análisis de equilibrio límite y elementos finitos, ya que la idea global de estabilidad brindada por la metodología de equilibrio límite no difiere del análisis refinado en zonas puntuales del talud, debido a que no se presentaron fallas de gran consideración en los puntos de análisis del modelo.

4.2. Discusión de resultados

Para el banco de prueba número 1, que se conformó con los 3 diferentes estratos encontrados en la zona, no se presentó un comportamiento de los suelos tan agresivo bajo las condiciones de contenidos de humedad y de carga aplicada como se explicó en el capítulo 3. Este banco de prueba presentó un desplazamiento lento, que no se vio afectado tanto con la presencia del agua, por motivos de tratarse de arcillas casi en su totalidad, estas no absorben tan rápidamente el agua y se necesitaría de un tiempo prolongado bajo estas condiciones para afectar mucho más sus propiedades mecánicas y cambiar drásticamente su comportamiento, como es el caso de la zona de estudio que lleva años de tal forma.

El banco de prueba número 2, se trató de una arena arcillosa únicamente, preponderando el contenido de arenas, para este análisis fue necesario adicionar tanto el agua para la zona saturada como la aplicación de cargas paulatinamente, debido que la reacción que tuvo el estrato fue completamente negativa, y se pudo observar que el contenido de humedad alto afecta directamente las propiedades mecánicas del mencionado suelo. Cómo se puede observar en el literal anterior el desplazamiento es alto con una carga inferior a la calculada como se explicó en el capítulo anterior, y más que divisar dichos parámetros, se pudo apreciar un agrietamiento considerable que para fines explicativos de este trabajo se considerará más como una falla, correspondiente al tipo de movimiento del cuerpo del talud.

4.2.1. Ventajas metodológicas.

Contar con un modelo físico que permita observar en un período de tiempo el comportamiento de diferentes estratos que conforman un talud, es una gran ventaja para comprender de mejor manera cada tipo de suelo, se puede apreciar el efecto que tiene cada factor influyente en la conformación del talud.

Teniendo la ayuda de metodologías desarrolladas a lo largo de la historia por grandes personajes que dedicaron su vida a la investigación en esta temática, y aplicando dichos procesos metodológicos en un programa computacional se hace cada vez más fácil analizar el comportamiento real de los suelos. Mediante un factor de seguridad se puede entender la estabilidad global que presenta un talud en este caso, dicho esto, la metodología de equilibrio límite es de gran ayuda para tener una idea global, y como se pudo observar en el análisis, los factores de seguridad que brinda el método de Bishop simplificado que no satisface todas

las condiciones de equilibrio como el método de Spencer, no varía considerablemente, asumiendo ambas condiciones de seguridad como semejantes a la realidad.

Analizando un talud mediante la aplicación de la metodología de elementos finitos, se obtienen resultados mucho más refinados, ya que se puede zonificar la zona de análisis para conocer las condiciones de tensiones en cualquier punto que uno desee.

4.2.2. Desventajas metodológicas.

Como es de esperarse, cada vez se generan problemas de mayor complejidad que deberán ser solucionados a su momento, y la aplicación de las metodologías explicadas en este trabajo cada vez tiene más restricciones para su aplicación, pero sobretodo de la interpretación de los resultados obtenidos. Se requiere de una nutrida experiencia para poder analizar y entender de la mejor manera la magnitud de las mencionadas metodologías.

4.3. Medidas preventivas

Para evitar todos los problemas observados en las 4 zonas de estudio, existen varias soluciones que se pueden generar antes de que exista la falla, la prevención de dichas fallas mediante algunas técnicas que se explicarán a continuación, vienen fundamentadas previo un estudio de las propiedades geomecánicas de los suelos que existen en dicha zona.

Con el estudio previo, se conocerá el nivel de riesgo por el que atraviesa el talud, con esto se deberán tomar las decisiones necesarias para cumplir con las condiciones técnicas de la obra que se requiere implantar o la obra que se desea salvaguardar.

4.3.1. Drenaje.

Cómo el agua es uno de los principales factores para que un suelo pierda sus propiedades mecánicas, se debe controlar de la mejor manera, ya que una correcta evacuación del recurso hídrico, puede evitar se provoque inestabilidad de una estructura.

De acuerdo a Suárez, J. (1998), existen varios métodos para el correcto control de agua y presión de poro, pero muchos son para el control de agua en la construcción de carreteras, por lo cual se explicará únicamente lo que compete a la estabilidad de taludes.

- **Canales superficiales para control de escorrentía:** Una de las primeras opciones que se puede implementar, es una obra en la corona para evacuar todo el aporte de caudal que afecta al cuerpo del talud, esta obra consiste en realizar una zanja cubierta con una geomembrana, en el eje de dicha zanja se colocaría tubería de PVC perforada, rellena con material granular que permita la conducción del agua hacia una zona de evacuación sin riesgo, esta zona puede ser una quebrada, un sumidero para evacuar directamente al alcantarillado pluvial de existir o como se mencionó una zona sin riesgo.

Uno de los problemas que genera este tipo de obra, es la construcción de zonas disipadoras de energía, ya que muchas de las veces la carga de velocidad es alta y debe tener necesariamente esta zona que evite la erosión del suelo.

Cualquier aporte de caudal considerable extra que no provenga de lluvias, deberá ser conducido de la misma manera a esta zona de evacuación de aguas.

Otra opción complementaria a este canal superficial, sería generar una cobertura vegetal en el cuerpo del talud, que ayuda de gran manera al control del efecto del agua sobre el suelo, ya que proporciona una mejor estabilidad.

4.3.2. Cambio de geometría

En muchos de los casos, un alivio en las condiciones de humedad no llega a ser suficiente, debido a las propiedades mecánicas de los suelos, y a la adición de cargas en la corona del talud que serían un aporte considerable extra al peso de la masa de suelo, en este caso otra medida preventiva es un cambio de las condiciones geométricas existentes, a otras que produzcan mayor estabilidad,

- Si la altura del talud no es muy grande, se puede considerar tender el material buscando un ángulo de inclinación menor que genere estabilidad, teóricamente el ángulo de inclinación más adecuado es el de 45 grados, no obstante esto generaría un excesivo movimiento de tierras que debe ser analizado previamente para buscar su respaldo técnico, gracias a las técnicas de análisis explicadas en este trabajo de investigación se puede buscar un ángulo que sea suficiente para garantizar la estabilidad y que no requiera de la magnitud de la intervención mencionada.

Esta técnica se ve condicionada al tipo de suelo, ya que estratos con fricción alta se verían beneficiados completamente con esta técnica, pero suelos cohesivos pobremente ganarían beneficios en la estabilidad, dicho esto un estrato con fricción y cohesión entre sus partículas ganaría estabilidad en general.

- Para alturas considerables se debe analizar la manera de generar algunas terrazas con la debida inclinación entre ellas, hasta alcanzar la referencia horizontal, este Terraceo complementado con canales superficiales de control de escorrentía mencionado anteriormente y a su vez combinado con cubierta vegetal, sería una de las mejores técnicas utilizables para la prevención de riesgos a futuro. Todo esto debe tener su correspondiente respaldo técnico ya que resulta costoso implementar dichas técnicas.

4.4. Soluciones planteadas

Ya que las zonas de estudio presentan fallas y además tienen aún obras civiles que se requiere salvaguardar, se describirán a continuación técnicas para la retención de tierra que generen la estabilidad inexistente en dichas zonas.

4.4.1. Muros de hormigón.

Como es conocido, los muros de hormigón tienen un coste elevado pero es una de las formas de retención de tierra más efectivas que existen, por lo tanto su diseño y construcción debe considerar todas las condiciones críticas del terreno, además debe contar con un equipo especializado ya que debe cumplir con todos los parámetros técnicos establecidos por la norma ecuatoriana de la construcción.

Para que los muros puedan funcionar correctamente según se espera con el diseño escogido, se deben considerar todas las condiciones a las que está expuesto el talud, como son las propiedades mecánicas del suelo que lo conforma, el nivel freático y el efecto causante al terreno, ya que suelos cohesivos incrementan las condiciones de empuje debido al contenido de humedad que tengan, en fin se debe tener en cuenta cada parámetro que pueda influir principalmente en la cimentación del muro, dicho esto, a continuación se explicarán 3 tipos de muros de hormigón mayormente utilizados para contener este tipo de deslizamientos.

- **Muros por gravedad:** Este tipo de estructuras dependen netamente de su peso propio para alcanzar la estabilidad deseada, son costosos y tienen algunas complicaciones, principalmente son factibles para alturas menores a 5 metros.

Este tipo de muro se convertiría en antieconómico para alturas que redondean los 3 metros por el volumen de hormigón requerido, además no soportan deformaciones considerables.

El muro por gravedad tipo con una condición del suelo de mala a normal, consta de una punta y un talón, en la parte del talón hasta la corona, se coloca material que ayuda a la estabilidad del muro, este material debe ser permeable y en la zona inferior del muro se puede colocar una tubería perforada para evacuar el caudal de agua afectante, además se adicionan mechinales en el cuerpo del talud distribuidos según la normativa para aliviar la presión hidrostática, en la punta también se debe dejar una altura de suelo compactado hasta cierta altura del muro que se pueda comprobar que ayudará que no se vea comprometida la cimentación.

- **Muros en voladizo:** Este tipo de muro en particular tiene la ventaja de soportar tensiones altas del suelo y deformaciones mayores a las del muro por gravedad, debido a las características que ofrece el refuerzo de acero a la estructura.

Pueden construirse para alturas menores a 10 metros para que tengan una mejor factibilidad, deben tener las condiciones previamente explicadas como la del subdren y los mechinales.

Uno de los problemas con este tipo de diseños es que pueden ser ineficientes para sostener grandes masas de tierra, y dependen netamente de su resistencia interna que es fruto de un correcto refuerzo de acero. Este refuerzo puede ser distribuido de manera eficaz, analizando las condiciones de las tensiones actuantes a las diferentes alturas del muro, constructivamente un diseño con 3 tipos de refuerzo es viable económicamente, por lo cual se requiere un diseño meticuloso para obtener economía y estabilidad.

- **Muros con hormigón ciclópeo:** Es una técnica empleada para disminuir los volúmenes de hormigón necesarios para un muro por gravedad, ya que estos contienen 60% de cantos de roca de alrededor de 20cm y un 40% de concreto.

El problema con este tipo de diseño es que no soportan tensiones semejantes a las de muros por gravedad y mucho menos a las de muros en voladizo, su aplicación es limitada a zonas específicas que necesiten este tipo de estructura, pero de gran utilidad ya que es de fácil construcción.

4.4.2. Muros de tierra armada.

Estas estructuras son innovadoras y buscan reemplazar los comunes métodos para retención de masas de tierra, a diferencia de los muros de hormigón estos no necesitan un personal tan capacitado ni cumplir con tantas normativas que conlleva el trabajo con hormigón armado. Su diseño es simple y su construcción aún más, ya que el principal componente es el suelo, este actúa por gravedad y simplemente necesita satisfacer condiciones que aumenten su resistencia al corte, esto se logra con refuerzo de acero distribuido en capas de tierra, un geotextil o geomalla, o una combinación de estos con prefabricados de concreto o paredes de roca en su cara de fachada, que muchas veces se los utiliza para que cumplan una función decorativa y otras como parte estructural.

4.4.3. Geosintéticos.

A lo largo de las soluciones planteadas se han hablado de algunos geosintéticos utilizables en estabilidad de taludes, sus ventajas y defectos se explicarán en este literal.

Los geosintéticos son materiales poliméricos utilizables con suelos y rocas, estos pretenden ayudar a la economía de las estructuras y a la mejora en facilidades constructivas, estos no necesitan un gran mantenimiento y son muy útiles en zonas que necesiten el control de asentamientos.

Los geosintéticos se clasifican de la siguiente manera:

1. **Geotextiles:** Elásticos y permeables, pueden soportar partículas mayores a la separación entre sus celdas.
2. **Geomallas:** Tienen una gran adherencia al suelo y mejor resistencia que los Geotextiles.
3. **Geomembranas:** Su composición los hace impermeables a fluidos y partículas.
4. **Geocompuestos:** Son diseñados exclusivamente para estabilización de suelos y permite separar tipos de suelo según se lo requiera.
5. **Geoceldas:** Se elaboran mediante técnicas en tres dimensiones, donde se rellenan de suelo y se compacta, esta metodología es utilizada para mejoramiento de la subrasante en carreteras.

Los geosintéticos expuestos aquí se subdividen en productos muy prácticos y útiles que el fabricante crea para satisfacer necesidades simples pero que se presentan en casi toda obra.

El principal defecto o desventaja que presenta la utilización de estos geosintéticos, es que se ven comprometidos directamente cuando están expuestos al sol, y también se ven expuestos cuando un suelo puede corroerlos y desintegrarlos, es decir su comportamiento no es el mejor bajo condiciones agresivas que pueden presentar algunos suelos.

CONCLUSIONES

- El presente trabajo de investigación explica la necesidad de realizar un correcto estudio de las propiedades geomecánicas de los suelos, que siguiendo la metodología de análisis expuesta se podrían prevenir grandes catástrofes que se ven a menudo por la inexperiencia de algunos técnicos o la imprudencia de personas particulares.
- La comparación de métodos prácticos y programas computacionales, generan una idea global y refinada de la estabilidad de un talud y sus zonas de riesgo.
- Como se pudo comprobar a lo largo del desarrollo del proyecto, las propiedades mecánicas de los suelos se ven directamente comprometidas por el efecto que el agua provoca en sus partículas, sumado a esto cargas prolongadas o permanentes adicionales ubicadas en la corona del talud desestabilizando por completo la conformación de los estratos del mismo.
- Cada tipo de suelo se caracteriza por tener propiedades totalmente diferentes, debido a esto cada uno reacciona de manera agresiva o leve a las condiciones del sitio.
- El banco de prueba siendo un prototipo para el análisis del comportamiento geomecánico de los suelos, fue una medida importante que permitió ser comparado con metodologías netamente estáticas y ver la importancia de conocer el comportamiento en zonas puntuales del talud, haciendo notar el estudio categórico que se realiza mediante elementos finitos.
- Siguiendo una metodología como la elaborada en este trabajo, se puede diseñar las obras de la manera más eficiente, y brindar al constructor todas las medidas necesarias para asegurar una obra de calidad.
- Conociendo el comportamiento de los estratos de suelo que conforman un talud, como se explicó en los resultados de los modelos de análisis planteados en este trabajo de investigación, se tomarán las mejores decisiones al momento de prevenir o solucionar un problema generado por las propiedades geomecánicas de los suelos.
- Los estratos de suelo encontrados en las zonas de estudio son suelos finos, específicamente en la zona de estudio uno, estos presentaban un contenido de humedad considerable y un aporte constante por factores externos, lo cual provoca una mayor afectación en sus propiedades geomecánicas. Principalmente arenas y limos encontrados, cambian drásticamente su comportamiento en condiciones secas y saturadas.

- Para la elaboración del banco de prueba se requirió de varias pruebas previas para conocer la factibilidad de su ejecución, la necesidad de reforzar el vidrio fue inminente, ya que este material fue escogido por la facilidad que otorgó al momento de observar el comportamiento del suelo, esto se logró con ayuda de acero conformando una estructura resistente necesaria para el ensayo, el siguiente problema con el banco de prueba fue definir el material que simularía la carga de edificaciones, ya que se contó con un espacio reducido, en conclusión solo el módulo para lograr conformar el banco de prueba fue laborioso, además se empleó una gran cantidad de material necesario para su conformación.
- La metodología de equilibrio límite es una herramienta sencilla pero de gran ayuda en la actualidad, los métodos de cálculo se asemejan a la realidad siempre y cuando se consideren todas las propiedades de los suelos con estudios más extensos. Los factores de seguridad obtenidos mediante los métodos de Bishop simplificado y de Spencer brindan una idea global de estabilidad de un talud satisfaciendo únicamente condiciones de estática, en el caso de este trabajo de investigación permitió observar el tipo de falla producido por la inclinación y aplicaciones de carga en un talud.
- La utilización de la metodología de elementos finitos permitió conocer las zonas puntuales de mayor afectación en los taludes analizados, para poder prevenir y controlar la estabilidad de los mismos, en la investigación realizada se pudo observar el procedimiento adecuado y los parámetros a considerar en un análisis.

RECOMENDACIONES

- Un estudio formal de las propiedades geomecánicas de los suelos debe realizarse en cada zona donde se pretenda implementar una obra civil, para realizar un correcto diseño y una adecuada distribución de obras complementarias que aseguren la estabilidad de dicha obra.
- Se debe tener mucho cuidado en la interpretación de resultados arrojados por los programas computacionales, ya que se debe tener una clara idea de su enfoque y alcance.
- El técnico encargado de realizar el estudio de una zona, debe considerar el efecto adverso que producen agentes internos y externos, las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y todo lo que pueda afectar en el futuro proyectado.
- Todo muestreo y posterior ensayo debe seguir las normativas correspondientes, para evitar cualquier error o malinterpretación de los resultados que conlleven a tener análisis poco o nada realistas.
- Elaborar un modelo físico como el banco de prueba descrito en esta investigación, podría implementarse en cada estudio que necesite un enfoque de las condiciones del terreno y de su comportamiento.
- La metodología de equilibrio límite es una herramienta favorable para el análisis de estabilidad, pero se recomienda utilizar metodologías de elementos finitos para conocer de forma más puntual las zonas de mayor riesgo.
- Se recomienda analizar de la mejor manera los resultados obtenidos mediante las metodologías planteadas, para enfocar los diseños de obras de prevención u obras que solucionen un problema de estabilidad, que procuren mantener la seguridad y estabilidad gobernada por la viabilidad de un proyecto.
- Para la elaboración del banco de prueba debe contarse con un espacio adecuado y equipo necesario para conformar cada capa del cuerpo del talud, evitando improvisaciones al momento de su conformación, todo debe estar totalmente claro antes de ejecutarlo, debido al tiempo y al trabajo que requiere.
- Se requiere contar con una experiencia amplia para saber aprovechar las ventajas y facilidades que otorga una metodología como la de equilibrio límite.
- Para estudios u obras de gran envergadura se recomienda la utilización de herramientas más sofisticadas como la de elementos finitos, que encaminen un análisis a tener la menor cantidad de errores evitando cualquier complicación.

- Para el caso puntual de análisis de la zona de estudio número 1 descrita en este trabajo de investigación, se recomienda cambio en la geometría del talud, en este caso sería la remoción del suelo deslizado hasta alcanzar una geometría adecuada que garantice estabilidad, además de la utilización de drenes horizontales donde se pueda captar el agua subterránea hasta conducirla a un punto seguro de evacuación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. The American Association of State Highway and Transportation Officials (444 North Capitol Street, NW Suite 249 Washington, DC 20001).
- ASTM. Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (100 Barr Harbor Drive, West Conshohoken, PA 19428-2959).
- Das M. Braja. (2004). Principios de ingeniería de cimentaciones (5ª ed.). USA: Thomson/Brooks/Cole.
- DAS M. Braja. (1999). Fundamentos de ingeniería geotécnica. USA: Brooks Cole.
- Juárez, E. Rico, A. (2014). Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos. México: Limusa.
- Crespo, C. (2011). Mecánica de suelos y cimentaciones (6ª ed.). México: Limusa.
- Juárez, E. Rico, A. (2013). Mecánica de suelos 2: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos (2ª ed.). México: Limusa.
- Krahn, J. (2003, Marzo 5). Los límites en el análisis de equilibrio límite. Publicado el 21 de Mayo de 2003 en NRC Research Press Web site, de <http://cgj.nrc.ca>.
- Normativa peruana, Lima, Perú, 2000. Manual de ensayos de materiales para obras viales (EM-2000). Sección número 1, suelos.
- QuimiNet. (2010, Junio 1). Tipos de geosintéticos y sus diversas aplicaciones, de <http://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-geosinteticos-y-sus-diversas-aplicaciones-43030.htm>.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. (1ª ed.). Colombia: Ingeniería de suelos Ltda.