



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

“Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos en condiciones de carga estática y pseudo-estática”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Garay Vásquez, Jair Alfredo

ASESOR

Mg. Ing. Villegas Martínez, Carlos Alberto

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Diseño de infraestructura vial

LIMA-PERÚ

2018

El **Jurado** encargado de evaluar la tesis presentada por don:

Garay Vásquez Jair Alfredo

Cuyo título es:

"COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EQUILIBRIO LIMITE Y POR MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDICIONES DE CARGA ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA"

Reunido en la fecha, escuchó la sustentación y la resolución de preguntas por el estudiante, otorgándole el calificativo de:

15 (número) QUINCE (letras).


Lugar y fecha LOS OLIVOS 04-DIC-18



PRESIDENTE
 Ing. Pinto Barrantes Raúl A.



SECRETARIO
 Ing. Córdova Salcedo Felimon



VOCAL
 Ing. Villegas Martínez Carlos A.

NOTA: En el caso de que haya nuevas observaciones en el informe, el estudiante debe levantar las observaciones para dar el pase a Resolución.

ACTA DE REVISIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN POR EL JURADO

El **Jurado** encargado de evaluar el Trabajo de Investigación, *PRESENTADO EN LA MODALIDAD DE: INFORME DE TESIS*

Elaboró	Dirección de Investigación	Revisó	Responsable de SGC	Aprobó	Vicerrectorado de Investigación
---------	----------------------------	--------	--------------------	--------	---------------------------------

DEDICATORIA

A mi padre Javier y a mi madre Tarcila
por el apoyo completo y sincero, a las
buenas instrucciones de valores y
costumbres, y hacer de mi persona
cada día mejor y un ejemplo para mis
hermanos.

AGRADECIMIENTO

Doy las gracias a dios por iluminar día a día mi camino, seguidamente las gracias infinitas a mi familia por su amor, comprensión y ser una base durante mi vida universitaria y en el progreso de este proyecto de investigación.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, JAIR ALFREDO GARAY VÁSQUEZ con DNI N° 73976838, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico profesional de Ingeniería Civil, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y auténtica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se muestra en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento y omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Lima, 16 de noviembre del 2018

Garay Vásquez, Jair Alfredo

DNI: 73976838

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo presento ante ustedes la Tesis titulada “COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EQUILIBRIO LÍMITE Y POR MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDICIONES DE CARGA ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA”, la misma que someto a vuestra consideración y espero que cumpla con los requisitos de aprobación para obtener el título profesional de Ingeniero Civil.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	v
PRESENTACIÓN	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLA	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	xvi
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	17
1.2. TRABAJOS PREVIOS	19
1.2.1. Antecedentes nacionales.....	19
1.2.2. Antecedentes internacionales	21
1.3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA	22
1.3.1. Estabilidad de taludes	22
1.3.1.1. Trabajos previos de ingeniería	23
1.3.1.1.1. Ensayos de laboratorio.....	23
1.3.1.1.2. Ensayos de campo.....	23
1.3.1.2. Método de equilibrio límite	24
1.3.1.2.1. Método de Bishop simplificado.....	25
1.3.1.2.2. Método de Spencer	26
1.3.1.2.3. Software SLIDE.....	28
1.3.1.3. Método numérico.....	29
1.3.1.3.1. Método de elementos finitos.....	29
1.3.1.3.2. Software PLAXIS	31
1.3.2. Condiciones de carga.....	32
1.3.2.1. Zonificación	34
1.3.2.2. Superficie de falla	34
1.3.2.3. Factor de seguridad	35
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	35
1.4.1. Problema general	35
1.4.2. Problemas específicos	35

1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	36
1.5.1. Justificación teórica	36
1.5.2. Justificación práctica	36
1.5.3. Justificación económica	36
1.6. HIPÓTESIS	37
1.6.1. Hipótesis general	37
1.6.2. Hipótesis específicos	37
1.7. OBJETIVOS	37
1.7.1. Objetivo general	37
1.7.2. Objetivos específicos	37
2. MÉTODO	38
2.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	39
2.1.1. Método de la investigación	39
2.1.2. Tipo de investigación	39
2.1.3. Nivel de investigación	39
2.1.4. Diseño de investigación	39
2.1.5. Enfoque de la investigación	40
2.2. OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE	41
2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA	42
2.3.1. Población	42
2.3.2. Muestra	42
2.3.3. Muestreo	42
2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, VALIDEZ Y CONFIABILIDAD	43
2.4.1. Técnica	43
2.4.2. Instrumento	43
2.4.3. Validez	43
2.4.4. Confiabilidad	43
2.5. MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS	44
2.6. ASPECTOS ÉTICOS	44
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS	45
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	46
3.2. ZONA DE INTERVENCIÓN	47

3.2.1. Geografía de la zona de intervención	47
3.2.2. Geomorfología de la zona de intervención.....	48
3.2.3. Estratigrafía regional de la zona de intervención	48
3.3. TRABAJOS DE CAMPO	50
3.3.1. Calicatas de estudios	53
3.3.2. Ensayos de DPL	55
3.3.3. Ensayos de geofísica	56
3.3.3.1. Ensayos de Refracción Sísmica (ASTM D 5777).....	56
3.3.3.2. Ensayos de Medición de Ondas de Superficie en Arreglo Multicanal - MASW60	
3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	62
3.4.1. Clasificación granulométrica.....	62
3.4.2. Parámetros de resistencia de suelo y roca	63
3.5. ANÁLISIS DE LOS METODOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.....	75
3.5.1. Método de equilibrio límite.....	75
3.5.1.1. Análisis de talud infinito	77
3.5.1.2. Método de las dovelas.....	78
3.5.1.3. Análisis en condición estática	80
3.5.1.3.1. Método de Bishop simplificado	82
3.5.1.3.2. Método de Spencer	83
3.5.1.4. Análisis pseudo- estático.....	84
3.5.1.4.1. Método de Bishop Simplificado	84
3.5.1.4.2. Método de Spencer	84
3.5.2. Método de elementos finitos	85
3.5.2.1. Proceso del método de elementos finitos.....	85
3.5.2.2. Idealización de un medio continuo	86
3.5.2.3. Consideraciones teóricas del método de elementos finitos: requerimientos para la solución.....	86
3.5.2.4. Análisis estático	95
3.5.2.5. Análisis Pseudo-estático	96
3.6. RESULTADOS DE FACTOR SEGURIDAD.....	98
3.6.1. Método de equilibrio limite.....	98
3.6.2. Método numérico	98

4. DISCUSIÓN.....	99
Discusión 1:.....	100
Discusión 2:.....	100
Discusión 3:.....	101
5. CONCLUSIONES.....	103
Conclusión 1:.....	104
Conclusión 2:.....	104
Conclusión 3:.....	105
Conclusión 4:.....	105
Conclusión 5:.....	105
6. RECOMENDACIONES	106
Recomendación 1:	107
Recomendación 2:	107
Recomendación 3:	107
7. REFERENCIAS	108
ANEXOS	112

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1.1: valores de factor de seguridad mínimo	35
Tabla 2.1: operacionalización de variables.....	41
Tabla 3.1: columna estratigráfica generalizada de la zona evaluada.....	49
Tabla 3.2: número de puntos de investigación.	51
Tabla 3.3: ubicación de calicatas	55
Tabla 3.4: resumen de ensayos de DPL.....	56
Tabla 3.5: Resultados del ensayo de refracción sísmica LS-01	59
Tabla 3.6: Resultados del ensayo de refracción sísmica LS-02	60
Tabla 3.7: Velocidades de onda de corte, calculadas a partir del ensayo MASW01	61
Tabla 3.8: Velocidades de onda de corte, calculadas a partir del ensayo MASW02	62
Tabla 3.9: Resultados de los ensayos – parámetros físicos	63
Tabla 3.10: relaciones entre N_{SPT} y la resistencia a la compresión simple (C_u).....	64
Tabla 3.11: valores promedios de cohesión de DPL-02 y DPL-05	66
Tabla 3.12: valores promedios de cohesión de DPL-01 y DPL-04.....	68
Tabla 3.13: valores promedios de cohesión de DPL-5	70
Tabla 3.14: Resumen de parámetros de resistencia, peso específico, módulo de elasticidad y relación de Poisson.	74
Tabla 3.15: Ecuaciones de equilibrio satisfechas por los métodos de equilibrio límite más usados.	80
Tabla 3.16: Resumen de F.S estático y Pseudo-estático por Bishop y Spencer	98
Tabla 3.17: Resumen de F.S estático y Pseudo-estático por Elementos finitos	98
Tabla 4.1: resultados de factor seguridad	101
Tabla 5.1: variación porcentual de los FS obtenidos en condición estática	104
Tabla 5.2: variación porcentual de los FS obtenidos en condición pseudo-estática	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: falla del puente Solidaridad a consecuencia de la socavación de su talud.....	18
Figura 1.2: formulación del método de Bishop Simplificado	25
Figura 1.3: formulación del método Spencer.	27
Figura 1.4: fuerzas en una dovela por el método.....	27
Figura 1.5: péndulo en equilibrio	31
Figura 1.6: mapa de distribución de isoaceleraciones	33
Figura 3.1: mapa político del Perú y del departamento de Cajamarca.	46
Figura 3.2: carretera Cochabamba-Cutervo-Santo Domingo de la Capilla-Chiple entre las progresivas Km 56+160 al 56+220	47
Figura 3.3: vista panorámica del deslizamiento lento (reptación) en el sector del Km 56+160 al 56+220.....	47
Figura 3.4: vista del talud superior inestable y parte de la plataforma.	48
Figura 3.5: mapeo geológico	51
Figura 3.6: ensayos geotécnicos y geofísicos ejecutados en el sector inestable.....	52
Figura 3.7: ubicación de las calicatas	54
Figura 3.8: calicata 01	54
Figura 3.9: calicata 02	54
Figura 3.10: ubicación de ensayos DPL y calicatas.	55
Figura 3.11: distribución del 1° y 2° golpe.....	57
Figura 3.12: distribución del 3° golpe.	58
Figura 3.13: distribución del 4° y 5° golpe.....	58
Figura 3.14: líneas de Geofísica: LS-01 y LS-02	58
Figura 3.15: líneas de Geofísica: LS-02	59
Figura 3.16: Distribución de puntos de disparo del ensayo MASW.	61
Figura 3.17: Correlación clásica de Terzaghi y Peck (1948) entre la resistencia al corte no drenada y N_{SPT} para suelos cohesivos.	64
Figura 3.18: Promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-02 y MASW-02.....	67
Figura 3.19: Promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-01 y MASW-01.....	69

Figura 3.20: promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-02 y MASW-02.....	71
Figura 3.21: módulo de elasticidad promedio de la línea LS-01 - MASW-01	72
Figura 3.22: módulos de elasticidad promedio de la línea LS-02 - MASW-02	73
Figura 3.23: Perfil estratigráfico en la progresiva km 56+180.....	74
Figura 3.24: Clasificación de los métodos de equilibrio límite para estabilidad de taludes.	76
Figura 3.25: Diagrama de análisis, método del talud infinito.	78
Figura 3.26: Representación de la división en dovelas de la masa del terreno potencialmente desplazado.	79
Figura 3.27: introducción de datos y coordenadas.	81
Figura 3.28: asignación de parámetros físicos y mecánicos.....	81
Figura 3.29: calculo por el método de las dovelas	82
Figura 3.30: Análisis Estático por equilibrio límite, Bishop.	83
Figura 3.31: Análisis Estático por equilibrio límite. Spencer.....	83
Figura 3.32: Análisis pseudo-estático por equilibrio límite. Bishop simplificado	84
Figura 3.33: Análisis Pseudo-Estático por equilibrio límite, Spencer.....	85
Figura 3.34: Elemento triangular con 15 nodos y 12 puntos de gauss	86
Figura 3.35: Trayectoria de flujo de agua en una cisterna llena de arena.	87
Figura 3.36: Trayectoria de esfuerzos transmitidos a través de una viga.....	88
Figura 3.37: Esfuerzos en un elemento típico.	89
Figura 3.38: Modos de deformación.....	90
Figura 3.39: Modelo en elementos finitos.	92
Figura 3.40: Medio continuo discretizado en elementos triangulares	93
Figura 3.41: Etapas de cálculo.....	94
Figura 3.42: Proceso de análisis del factor de seguridad.....	94
Figura 3.43: Proceso de análisis del factor de seguridad.....	95
Figura 3.44: Malla deformada al final del análisis de estabilidad estática.	95
Figura 3.45: Análisis Estático por elementos finitos.....	96
Figura 3.46: Análisis Pseudo-Estático por elementos finitos	96
Figura 3.47: Desarrollo de los factores de seguridad en condiciones de carga estática y pseudo-estática.....	97
Figura 4.1: resultados de FS por MEL y MEF	102

RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como finalidad realizar la comparación de dos metodologías de estabilización de taludes las cuales son el método de equilibrio límite y el método numérico. Esta comparación está basada en el valor de un parámetro que cuantifica la estabilidad de un talud, este parámetro es el factor de seguridad.

Para el correcto de análisis de este proyecto, se deberá realizar ensayos de campo y laboratorio, con la finalidad de obtener las propiedades físicas y mecánicas de los materiales involucrados en el estudio. Al obtener las características y parámetros de los suelos, se realizara un perfil estratigráfico de acuerdo a las propiedades similares que estos estratos puedan mantener.

Para hallar el factor seguridad se empleara software de ingeniería tal como el software Plaxis para el método numérico y el software Slide para el método de equilibrio, la obtención de este valor del FS nos dará a analizar y concluir las hipótesis propuestas, como también corroborar trabajos previos citados.

Según trabajos previos, concluyen que los valores de las diferentes metodologías que abarca el método de equilibrio límite, la variación entre el mayor valor obtenido y el menor valor será de al menos 5% excepcionalmente un 7%.

ABSTRACT

This research project aims to perform the comparison of slope stabilization methodologies in the limit equilibrium method and the numerical method. This comparison is based on the value of a parameter that quantifies the stability of a user, this is the security factor.

For the correct analysis of this project, field and laboratory tests will be carried out, in order to obtain the physical and mechanical properties of the materials involved in the study. When obtaining the characteristics and parameters of the soils, a stratigraphic profile is made according to the similar properties.

For more information on this topic, click here. Engineering software, as well as software. Plaxis for the numerical method and the software Slide for the equilibrium method previous cited.

According to the previous results, the conclusion between the values of the different methodologies that cover the limit equilibrium method, the variation between the highest value and the lowest value will be at least 5%, exceptionally 7%.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

Los taludes son superficies inclinadas respecto a la horizontal que adoptan las estructuras de tierras, en el cual la mecánica de suelos, rocas y geología, los analiza, aplica diseños y hace criterios para finalmente normarlos. El estudio de la estabilidad de taludes es de suma importancia, pues el desarrollo moderno de las construcciones recientes de vías de comunicación, tales como caminos, ferrocarriles, túneles, edificaciones en taludes, etcétera, en la actualidad se está desarrollando exponencialmente.

Recientemente se presentan una serie de problemáticas causadas por fallas en taludes, esto debido a múltiples factores como la erosión del suelo, excavaciones mal planeadas, sobrecarga del terreno, etc. Para garantizar la estabilidad del talud es importante examinar las fallas más comunes que se puedan presentar y a partir de esto tomar las medidas de prevención necesarias.

En las recientes décadas se han suscitado fallas geotécnicas de taludes. Muchos de estas han involucrado no solo costos en recursos económicos sino también pérdidas de vidas humanas. A inicios del mes de febrero del 2018 en el distrito de San Antonio de los Buenos, Tijuana, México, ocurrió un deslizamiento de un talud provocando el daño de 89 viviendas. Este movimiento de suelo fue causado por la sobrecarga de las viviendas, además de los cortes que superaban los permitidos según estudios geotécnicos.

En las regiones de clima tropical donde predomina la lluvia intensa y la vegetación se manifiesta potencialmente el riesgo del deslizamiento de taludes. En Colombia, a inicios de mayo del presente año, en la ciudad de Caldas se han inducido por lo menos nueve fallas en laderas debido a la lluvia intensa por más de dos días.

A inicios del año dos mil diecisiete en Lima, Perú se manifestó el fenómeno del niño costero en una intensidad que superaba largamente el caudal máximo esperado para ese año. Debido al incremento de las lluvias de forma excesiva en el sector andino de Lima, las vertientes de los ríos en la ciudad metropolitana (Rio Rímac, Rio Lurín, Rio chillón) provocaron la socavación rápida de los taludes por lo que causó su inestabilidad. Esta condición frágil provocó daños en estructuras de viviendas, puentes, etcétera. (Ver figura 1.1)



Figura 1.1: falla del puente Solidaridad a consecuencia de la socavación de su talud
Fuente: El Comercio, 2017

En Cuzco, Perú, los constantes deslizamientos causados por las lluvias a inicio del año dos mil dieciocho ocasionaron la pérdida de una vida humana. Un desprendimiento sepultó a dos trabajadores que laboraban en la construcción de la carretera vía Huancarani-Paucartambo. El saldo fue la muerte de un obrero. El hecho ocurrió en el kilómetro 150 de la localidad de Mahuaybamba, provincia Paucartambo.

Uno de los aspectos esenciales para asegurar la estabilidad de taludes es el análisis de su estabilidad. Para ello desde las primeras décadas del siglo se han formulado métodos simplificados para analizar el equilibrio de los taludes considerando la sumatoria de fuerzas y de momentos bajo algunos supuestos como ángulo de inclinación de la interacción entre las particiones del talud (dovelas), superficies de falla circulares, etcétera.

Sin embargo, a pesar de estas hipótesis simplificadoras, el estudio del equilibrio de las pendientes de suelo ha demostrado que los resultados han sido favorables y realistas.

Por otro lado, el desarrollo de las computadoras a partir de la tercera generación desde la década del 70 del siglo anterior y con la aparición de los primeros procesadores, los métodos numéricos desarrollados varios siglos anteriores pudieron ser resueltos para problemas que involucran un gran número de incógnitas y una voluminosa cantidad de iteraciones. Una de estas metodologías es el método de elementos finitos. En la actualidad esta forma de resolver las ecuaciones diferenciales parciales es bastante usada en la práctica de ingeniería en

general. Particularmente en lo que concierne a ingeniería geotécnica uno de los usos es para la simulación del comportamiento esfuerzo-deformación de suelos.

Un modelo constitutivo es una representación matemática capaz de explicar la actividad físico macroscópico de un “sólido ideal”, que deriva luego de usar hipótesis simplificadoras sobre tal “sólido real”. Debido a esto hay muchos modelos constitutivos y actualmente se sigue laborando en la representación de estos modelos, cuyo fin es obtener una formulación idónea y concorde al problema al cual se quiere solucionar, ya que no es trivial obtener una enunciación única que haga posible la solución universal para todos los problemas. Particularmente en la ingeniería geotécnica la representación matemática del comportamiento esfuerzo-deformación en suelos se podría modelar con una gran variedad de idealizaciones numéricas; no obstante los más usuales son los siguientes: Modelo constitutivo elástico, Modelo Hiperbólico, Modelo de Mohr Coulomb, Modelo Hardening Soil y Modelo Cam Clay.

Con este trabajo se logrará ratificar o no el uso de la herramienta de método de las dovelas para el cálculo de la estabilidad de taludes que se ha realizado desde inicios del siglo anterior, mucho antes del desarrollo de las computadoras.

1.2. TRABAJOS PREVIOS

1.2.1. Antecedentes nacionales

(Mendoza Loayza, 2016) **Título** Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay. Tesis para optar el título de ingeniero civil en la Pontificia Universidad Católica del Perú. **Objetivos** El objetivo principal de este trabajo es realizar los cálculos de factores de seguridad y determinar los parámetros de diseño de taludes de suelos de más de 100 metros de altura empleando el análisis de equilibrio límite en condiciones estáticas y pseudo-estáticas, como también describir la sedimentología de los suelos, las propiedades físicas y parámetros geotécnicos para los suelos mediante ensayos de laboratorio, ejecutar el análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudo-estáticas y determinar los parámetros de diseño de los taludes. **Conclusiones** de los métodos empleando se obtuvieron distintos factores de seguridad, pero con valores muy cercanos. Estas variaciones del valor del FS entre el valor más alto y el más bajo no es mayor al 5%; excepcionalmente, pueden presentarse algunas variaciones de 7%. Por lo cual se puede

afirmar que los tres métodos empleados (Bishop Simplificado, Spencer y Morgenster-Price) tienen un grado de precisión muy similar. En cuanto al análisis de FS en condiciones pseudo-estáticas, se evidencio que el factor de este valor, para diversas regiones, no es la misma proporción de cambio que para la condición estática, siendo esta última mayor. Por cual se define que en condición pseudo-estática la geometría del talud no tiene mayor influencia en la estabilidad de esta, por lo que la estabilidad estará predeterminada por las características geotécnicas que posean los materiales que componen su estructura.

(Yalán León, 2015) **Título** Análisis comparativo de los métodos de estabilidad de taludes aplicados en la presa de tierra del depósito de relaves bateas. Informe de suficiencia para obtener el título de ingeniero civil en la Universidad Nacional de Ingeniería – Perú. **Objetivo** Aplicar los diversos métodos que existen para el estudio del análisis de la estabilidad de talud en la presa de relaves Bateas para determinar de qué manera influyen los diversos parámetros usados para la comparación. **Conclusión** No existe método que nos proporcione un coeficiente de seguridad que sea confiable y seguro, es por eso que se hizo el análisis a través de diversos métodos, para determinar el rango de variabilidad del factor de seguridad, en el cual el coeficiente más bajo fue adquirido del método de Fellenius, y por otro lado, el mayor valor fue obtenido por el método de Bishop, por lo cual, es deducible que lo demás factores están dentro de este rango de intervalo mínimo y máximo. Para el caso de la presa de relaves el coeficiente de seguridad mínimo adquirido fue de $FS = 1.586$ para la situación estática durante la operación, pudiendo concluir que la presa estudiada es estable.

(Ludeña Gutiérrez, 2014) **Título** Influencia de bermas y canales en la estabilidad de pilas de lixiviación. Tesis para obtener el título de Ingeniero civil en la Universidad Nacional de Ingeniería – Perú. **Objetivo** Analizar la influencia de las estructuras del tipo bermas y canales, en la optimización de las condiciones de estabilidad de una pila de lixiviación, que se traduce en el incremento de los factores de la seguridad de los análisis de estabilidad. Se determinó el tipo de estructura, sus dimensiones y la mejor ubicación en el interface de suelo de baja permeabilidad y a la geo membrana que favorece a la estabilidad. **Conclusión** Se concluye que al comparar los resultados que fueron obtenidos empleando diferentes procedimientos de solución para el análisis del cálculo de estabilidad (equilibrio limite y elementos finitos), los factores de seguridad obtenidos mediante elementos finitos resultan ligeramente menores que los hallados por equilibrio limite. Esto se debe comúnmente que en elementos finitos la superficie de desplazamiento se desarrolla naturalmente (reduce el

valor del parámetro de resistencia de los materiales); en cambio, con equilibrio límite la superficie de deslizamiento es inducida.

1.2.2. Antecedentes internacionales

(Aguilar Goenaga y Zúñiga Romero, 2015) **Título** Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al cerro de la Popa, casco urbano de Cartagena. Trabajo de grado para título de ingeniero civil en la Universidad de Cartagena. **Objetivo** Realizar un estudio comparativo en la estabilidad del talud mediante el método de equilibrio límite para definir qué procedimiento nos brindará un factor de seguridad confiable y certera, y a la vez describir y analizar las ventajas y desventajas que nos proporcionarían cada método aplicado en la zona de estudio. **Conclusión** Los métodos que ofrecieron mayor factor de seguridad en los sectores estudiados fueron los de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop modificado, arrojando factores de seguridad muy similares en cada uno de los perfiles típicos que representaban la zona estudiada, por otra parte los métodos que menor factor de seguridad brinda en los sectores estudiados fueron los de Janbu y Ordinario o de Fellenius, arrojando factores de seguridad muy similares en cada uno de los perfiles típicos que representaban la zona estudiada, esto debido que estos son métodos muy sencillos y prácticos, en los cuales no se satisface enteramente las condiciones para el equilibrio y se asume que las fuerzas entre las dovelas es cero, lo cual produce factores de seguridad bajos y sobre determinados.

(Severino, Betsy, 2015) **Título** Riesgo de taludes y terraplenes en obras lineales de la Republica Dominicana. Tesis para obtener el grado de máster en ingeniería de estructuras, cimentaciones y materiales en la Universidad Politécnica de Madrid. **Objetivos** plantear mecanismos de estimación de los riesgos que permitan a los ingenieros saber si el talud o terraplén de una obra lineal será o no estable, como también determinar los agentes que contribuyen a una potencial falla de taludes y sus posibles consecuencias que traería consigo. **Conclusiones** los escenarios de riesgos en taludes y terraplenes en obras lineales no son estáticos, por el contrario, son dinámicos y cambiantes, ya que estas no se mantienen estables en el tiempo. Razón por la cual se debe realizar un monitoreo constante de las condiciones de riesgos, con la finalidad de disminuir la vulnerabilidad. También es importante ejecutar inspección y supervisión de las obras, para aminorar fundamentalmente la vulnerabilidad.

(Coliente, Alfredo, 2010) **Título** Inestabilidad en laderas y taludes. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México. **Objetivo** El trabajo de tesis sirva como formato para la orientación y guía, sino también como una base, soporte y fundamento en la descripción, análisis y estudio de los múltiples deslizamientos que puedan ocurrir ya sea en suelos o en rocas. A la vez dar a conocer la importancia que tienen los estudios de campo y laboratorio, ya que estas son imprescindibles para la descripción de las características mecánicas de los materiales que están involucradas en el análisis. **Conclusión** Los tipos de fallas que se generan en los taludes son generados por factores condicionantes y desencadenantes, ya que estas alteran las fuerzas externas e internas que intervienen sobre el terreno, reduciendo el esfuerzo cortante e incrementando los esfuerzos actuantes, haciendo posible el movimiento de una determinada masa de suelo. Por otro lado, está determinado, que la estabilidad de un talud es afectado por agentes importantes como es la modificación de su topografía, estado de flujo de agua, la pérdida de resistencia, el intemperismo y la sismicidad. Finalmente se especifica que las superficies de fallas generadas en el suelo, están relacionadas y en función del tipo de material que este compuesto el suelo, donde, para materiales granulares las superficies de fallas son: poligonales, semi-circulares, planas y traslacionales, y en materiales cohesivos generalmente son circulares, donde la superficie rotacional está limitado por estratos resistentes.

1.3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA

1.3.1. Estabilidad de taludes

Suarez (1998), dice:

Es un trabajo habitual en la ingeniería determinar la estabilidad de un talud en base de una expresión, como lo es el factor de seguridad (FS), que son conseguidos mediante un análisis y estudio matemático de estabilidad [...]. El modelo tiene que considerar a la totalidad de los factores que favorecen a la inestabilidad. Estos elementos incorporan parámetros geológicos, propiedades de los suelos, presencia de grietas, geometría del talud, cargas dinámicas por actividad sísmica, flujo de agua, etc. [...]. (p. 117).

Por esta razón la estabilidad de talud es muy importante, más aun si se hacen análisis comparativos entre diversos métodos, tanto en el factor de seguridad y la superficie de falla, ya que dicha comparación verificará cual método es el más riguroso y confiable, tanto que a la vez tomar un factor mínimo permisible de seguridad. Para tener un buen análisis de

estabilidad de talud se deben considerar todos los agentes o factores que favorecen a la inestabilidad del talud.

1.3.1.1. Trabajos previos de ingeniería

Para el progreso de este proyecto de investigación, es importante y necesario hacer estudios previos para tener conocimiento de la geografía, clima, topografía, etc, del lugar (muestra), como también realizar ensayos de campo y laboratorio para adquirir tanto los datos como las características de los materiales participantes, con lo cual podremos analizar la situación real de nuestra problemática, en este caso el comportamiento de los taludes potencialmente a sufrir fallas de deslizamiento.

1.3.1.1.1. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio son pruebas que se realizan para determinar las características geotécnicas de un terreno

Ensayos de estándares de caracterización geotécnica:

- Granulometría (ASTM D 422)
- Límite de consistencia (NTP 339.129)
- Contenido de humedad (ASTM D 2216)
- Gravedad específica (ASTM C 127)

1.3.1.1.2. Ensayos de campo

- Calicatas o trincheras (ASTM D 420): son excavaciones de diversas formas que permiten una observación directa del terreno, como también la toma de muestras y ensayos in situ.
- De no encontrar nivel freático con el desarrollo de calicatas o trincheras, se realizará ensayo de geofísica por sondaje eléctrico vertical, que es un ensayo que sirve para estimar el nivel freático.
- También realizaremos ensayos de geofísica como Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y refracción sísmica (ASTM D 577) con el objetivo de determinar la variación de rigidez con la profundidad.
- Ensayos de penetración dinámica ligera.

1.3.1.2. Método de equilibrio límite

Según Pérez (2005), define:

Son métodos relativamente simples y brindan resultados razonablemente reales de cara a la evaluación de la estabilidad de un talud. Son aplicables a todo tipo de terrenos y suelen conducir a cargas de roturas superiores a las exactas (según la teoría de la plasticidad) aunque suficientemente próximas a ellas. (p.17).

Es un procedimiento de estabilidad de taludes para determinar el factor de seguridad y superficie de falla del talud discretizando el medio continuo en dovelas y aplicando las ecuaciones de equilibrio tanto en fuerza como en momentos. Estos métodos son los más convencionales y frecuentemente usados en el campo de la ingeniería para resolver problemas de estabilidad de terrenos y taludes.

Los primeros cálculos de análisis de estabilidad de taludes fueron realizados por Coulomb en el siglo XVIII al desarrollar una metodología a través de cuñas que estaba orientado al análisis de la estabilidad de muros, pero también se podía utilizar en taludes sin ningún tipo de protección.

Durante el siglo XIX la construcción de las líneas férreas empleaban grandes movimientos de tierras, lo cual trajo como consecuencia la aparición de grandes deslizamientos, por esa razón surgió la necesidad de encontrar un método para analizar deslizamientos.

En el año 1910, Fellenius desarrolla el método de las cuñas, mientras que en 1916 se usó por primera vez el método de las dovelas, solamente aplicado para tipo de suelos no cohesivos; es decir suelos granulares. Luego de veinte años se logra emplear la misma metodología, tanto para suelos granulares como suelos cohesivos. Después, en esta metodología fue incluido el Principio de las Presiones Efectivas, definido por Terzaghi en 1926.

Sin embargo, los métodos a los cuales se les considera modernos comenzaron en 1954 con el Método de Bishop, el cual considera superficies de desplazamiento circulares; y en 1956 con el de Janbu, para superficies de desplazamiento no circulares.

Al inicio la aplicación de estos métodos analíticos era muy complicada; más aún después de la sofisticación de éstos, y por esa razón se descartó su utilidad práctica, hasta que con el surgimiento de la computadora, metodologías que se consideraban antes casi imposibles, se

convirtieron en una rutina. En la actualidad, hay un sin número de programas de cómputo en el mercado, los cuales satisfacen las necesidades profesionales tanto para el análisis de equilibrio límite como para el análisis esfuerzo-deformación.

Además, antes del desarrollo de la tecnología que trajo como consecuencia el desarrollo de la computadora, se usaba típicamente ábacos que hoy en la actualidad su uso sería ineficiente. Los programas computacionales que se utilizan habitualmente en la actualidad, suelen usar las metodologías de Janbu y Bishop, así como también otros métodos reconocidos como exactos o rigurosos; como lo son los métodos de Spencer, Morgenstern - Price, y Sarma, que son los más experimentados probablemente. En esta investigación se usarán las metodologías de Spencer por ser más rigurosa y el método de Bishop por ser uno de los más básicos.

1.3.1.2.1. Método de Bishop simplificado

Dado que la metodología de las dovelas no tiene mucha precisión para suelos friccionantes, Bishop (1955) propuso otro método originalmente desarrollado para superficies circulares, el cual considera la condición de equilibrio entre las fuerzas de interacción verticales actuantes entre las dovelas. Como en los suelos que presentan fricción la resistencia cortante depende de los esfuerzos confinantes, al considerar la condición de equilibrio de fuerzas verticales (solamente se considera empuje horizontal), la determinación de las fuerzas normales se hace más precisa. (Ver figura 1.2)

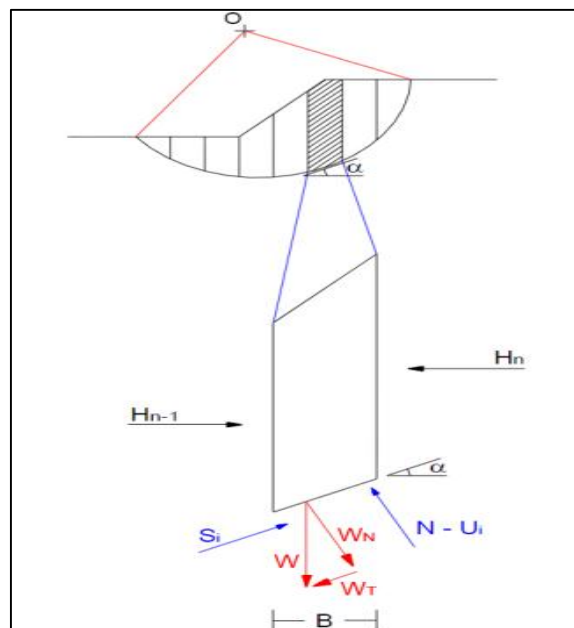


Figura 1.2: formulación del método de Bishop Simplificado

Fuente: (José Ale, 2000)

El cálculo del método original se basa en encontrar el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular que coincide con la superficie de desplazamiento; en la posterior versión modificada, se puede aplicar a superficies no curvas, teniendo que definir centros ficticios. Este es un método iterativo en el cual se parte de un Factor de Seguridad calculado de una superficie de falla dada.

$$FS = \frac{\sum [c \cdot B + (W - u \cdot B) \tan \phi / \tan ma]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

$$ma = \cos \alpha \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi}{FS} \right)$$

W : peso de la dovela

WN : componente normal del peso de la dovela

WT : componente tangencial del peso de la dovela

N : reacción normal del suelo sobre a dovela

u : presión de poros

Ui : fuerza producida por la presión de poros

B : base de la dovela

c : cohesión de suelo

ϕ : ángulo de fricción del suelo

α : ángulo de superficie de desplazamiento en la dovela

FS : factor de seguridad

1.3.1.2.2. Método de Spencer

Es uno de los métodos a los cuales se les considera rigurosos. Esta asume que la interacción entre dovelas actúa como una fuerza de empuje con un ángulo (θ) de inclinación constante, por lo que, a través de iteraciones, se estudia tanto el equilibrio de momentos como de fuerzas en función a ese ángulo (θ), hasta hacerlo converger hacia un valor constante, calculando entonces el FS correspondiente. Es aplicable tanto a superficies de desplazamientos circulares como no circulares. La siguiente figura muestra este método. (Ver figura 1.3)

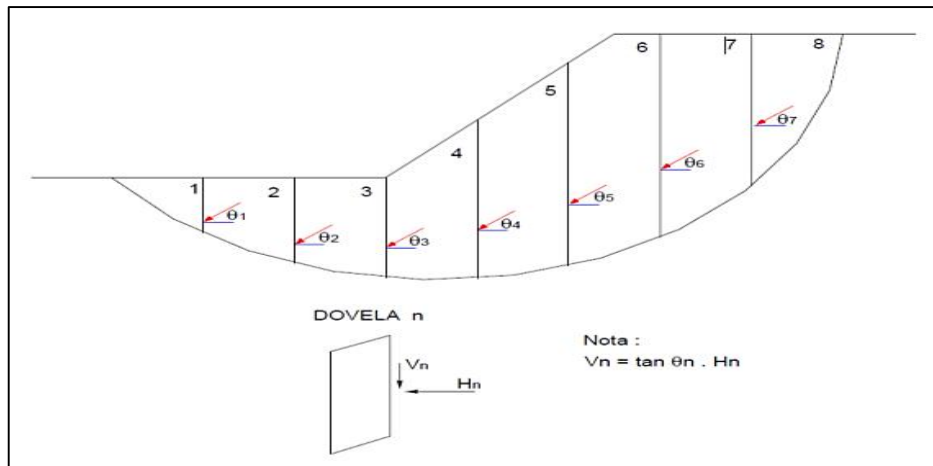


Figura 1.3: formulación del método Spencer.

Fuente: José Ale, 2000.

Inicialmente este método fue formulado para superficies de falla circulares, pero luego de ello se generaliza para cualquier tipo superficie de desplazamiento siempre que se adopte un centro de rotación friccional. En la siguiente figura se muestra el equilibrio de esfuerzos.

La figura (figura 1.4) es un esquema general de las fuerzas actuantes en una dovela analizada mediante el método de Spencer. W son las cargas verticales externas, E_L y E_R las fuerzas normales izquierda y derecha entre dovelas; X_L y X_R fuerzas verticales entre dovelas a izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la dovela respectivamente.

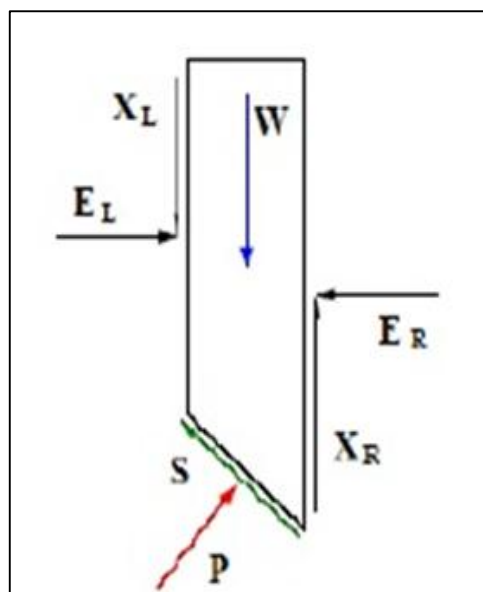


Figura 1.4: fuerzas en una dovela por el método

Fuente: (Alonso, 1989)

Entonces como se mencionó anteriormente las fuerzas entre dovelas tienen una inclinación constante, de tal modo que se puede formular la siguiente expresión.

$$\frac{X}{E} = \tan \theta$$

Donde X son las fuerzas verticales y E las fuerzas horizontales. La fuerza normal en la base del elemento será pues:

$$P = \left[W \cdot (E_R - E_L) \cdot \tan \theta - \frac{1}{FS} (c'l \sin i - ul \tan \phi' \sin i) \right] / m_i$$

Donde,

$$m_i = \cos i \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \phi'}{F} \right)$$

El FS se define como el esfuerzo de corte movilizado respecto a la disponible; E_R y E_L son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente entre los elementos de dovela; u es la presión de poro en la superficie de falla; l es la longitud de la base de la dovela; i la inclinación de la base del elemento; c y ϕ , cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de deslizamiento considerando el criterio de rotura de Mohr Coulomb.

Si se supone que el ángulo de interacción entre dovelas es constante para todos los elementos del talud, se pueden hacer ambos, el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Es posible conseguir un ángulo de interacción de manera tal que ambos FS sean el mismo número, que será el FS del talud. Spencer estudió la relación entre F_f y F_m por un problema genérico y concluyó que el FS resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a las fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coherente con la de Bishop.

1.3.1.2.3. Software SLIDE

El software SLIDE es una herramienta de análisis de estabilidad de taludes en dos dimensiones que se basa en el método de equilibrio límite para su cálculo. Este puede incluir análisis de infiltración por MEF en estado estacionario, e integra capacidades de análisis probabilísticos, de sensibilidad, y análisis en retrospectiva. Su área de aplicación en minería y obras civiles es muy variada, permitiendo de esta forma analizar una amplitud grande de

problemas geotécnicos. Entre los más comunes se estudia la estabilidad en terraplenes, represas, taludes en excavaciones de minería o en edificaciones civiles, efectos de cargas externas, cargas sísmicas, etc.

Este programa ha crecido de forma continua a la misma velocidad que se ampliaba la capacidad de análisis geotécnico en las computadoras en las últimas décadas. Este continuo esfuerzo en investigación lo convierte en un programa de referencia para los ingenieros geotécnicos. Prueba de ello es el hecho de ser uno de los softwares más reconocidos y usados que existen en el mercado de la ingeniería.

1.3.1.3. Método numérico

Los métodos numéricos son una rama de las matemáticas que consisten resolver ecuaciones complicadas como por ejemplo la famosa ecuación AASHTO 1993 para el cálculo del número estructural mediante procesos sencillos, generalmente por medio de iteraciones. Los métodos numéricos en la ingeniería civil también se utilizan para resolver ecuaciones diferenciales parciales o ecuaciones diferenciales ordinarias, de modo tal que estas se puedan resolver con aritmética más simple y por medio de algoritmos.

1.3.1.3.1. Método de elementos finitos

Suarez (1998), afirma:

El procedimiento de elementos finitos soluciona varias de las deficiencias que tiene el método de equilibrio límite, [...]. El método principalmente separa un bloque del suelo en unidades discretas a la cual se denomina elemento finito. Estos componentes se entrelazan en sus nodos y en bordes definidos. El método específicamente usado es el de la formulación de desplazamientos, el cual muestra los resultados de manera de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. [...]. (p.134).

Es un método numérico para aproximar una solución de una ecuación diferencial que gobierna algún comportamiento, en nuestro caso la ecuación diferencial es la ecuación de deformaciones. Este sistema fue incluido por Clough y Woodward en el año de 1967. Es el procedimiento matemático que se aplica (ecuaciones diferenciales) para resolver problemas continuos discretizando el dominio.

El método de elementos finitos ha logrado ser una herramienta muy poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería. Su aplicación va desde el análisis de esfuerzo-deformación de automóviles, edificios, aeronaves, estructuras de puentes, filtraciones, fluidos, análisis de campo de flujo de calor, y otros problemas de flujo, y en la

ingeniería civil ha sido estudiado en campo estructural como también en la ingeniería geotécnica. Con los avances de la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD, pueden modelarse problemas más complejos con mucha mayor simplicidad.

En este método de análisis, una región completa que define un medio continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las características del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del medio continuo.

Dentro del grupo de los métodos de elementos finitos existen varias formulaciones basadas en diferentes metodologías. Entre ellas resaltan la formulación por residuos ponderados, la formulación variacional y la formulación por cantidad de movimiento. En este proyecto de investigación se empleará un programa computacional llamado PLAXIS V8.2 que resuelve los problemas mediante el principio de mínima energía potencial; es decir la formulación variacional.

El MEF puede ser definido como un procedimiento de aproximaciones sucesivas de problemas de medio continuo donde:

- a) El medio continuo se divide en un número finito de elementos, cuyo comportamiento es especificado mediante un número determinado de parámetros.
- b) La solución del sistema completo, tomando en cuenta un ensamble de sus elementos, sigue las mismas reglas correspondientes a problemas de sistemas discretos.

Los primeros análisis de convergencia mostraron que el MEF necesitaba de un fundamento matemático mayor. Se observó entonces que este podía ser abordado a través de la minimización de una función al que, en el caso del método de los desplazamientos consistía en la energía potencial total del sistema. Este enfoque tiene también una sustentación física ya que todo sistema tiende a encontrarse en su equilibrio, lo que significa la mínima energía potencia. A manera de ejemplo si tenemos sujetado a un péndulo en una altura arbitraria respecto a un nivel de referencia este a través de la energía cinética y el trabajo desarrollado por la gravedad buscará el equilibrio en la posición vertical, que es donde presenta la mínima energía potencial. (Ver figura 1.5)

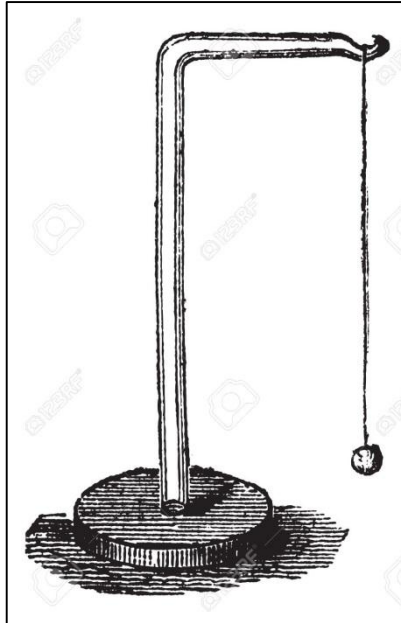


Figura 1.5: péndulo en equilibrio

Fuente: Enciclopedia Trousset (1886 - 1891)

El MEF fue considerado como una generalización del método de Ritz, permitiendo su utilidad en muchos problemas estructurales y proporcionando un importante argumento teórico a la formulación. Este enfoque llamado método variacional permitió estudiar matemáticamente los requisitos de convergencia. Para algunos ejercicios aplicados no existe el funcional correspondiente al cual minimizar. Para este tipo de situaciones el enfoque de residuos ponderados puede ser utilizado. El MEF bajo las consideraciones de residuos ponderados consiste en minimizar un resto y a través de formas matemáticas buscar la solución al problema discreto para en un paso penúltimo ensamblar la matriz global que gobierna el comportamiento de las incógnitas y finalmente solucionar la matriz.

1.3.1.3.2. Software PLAXIS

PLAXIS es un programa de ingeniería geotécnica que ha sido desarrollado específicamente para el análisis de deformaciones en suelos, estabilidad de taludes o suelos en general, flujo en régimen transiente, y problemas generales en geotecnia. El ingreso de datos al programa se realiza de forma fácil debido a su interfaz amigable. De igual forma el programa de cálculo del proceso o llamado plaxis calculation permite al usuario definir los procedimientos constructivos y las diferentes etapas de cálculo. De igual forma las otras dos interfaces: plaxis output y curves son de diseño fácil para el usuario.

1.3.2. Condiciones de carga

Para Lambe y Whitman (2001), “Cuando un talud está bajo la condición de un sismo, los esfuerzos tangenciales relacionados con la aceleración del terreno se adicionan a los esfuerzos tangenciales indispensables y necesarios para el equilibrio estático y pueden generar una inestabilidad momentánea o temporal del talud” (p.251)

Cuando la condición de la carga es pseudo-estática, esto obedece que hay una fuerza sísmica que está interviniendo en el talud, la cual agrega un esfuerzo más para realizar el equilibrio.

Carga pseudo-estática según Rochel (2012, p.31), “se entiende como cualquier descripción de los efectos provocados por los sismos. Estos efectos pueden ser representados mediante la aceleración, la velocidad o el desplazamiento sísmico del terreno”

Esto quiere decir, que aquellas cargas cíclicas que actúan sobre una estructura en forma repentina, variando su magnitud y ubicación durante el transcurso de su efecto. Son resultantes del repentino movimiento de las capas de la tierra y se propaga en forma de ondas.

Por otro lado, las cargas estáticas son aquellas cargas que no varían su magnitud durante el transcurso de un sismo; es la carga a la cual está sometida una estructura (carga viva y carga muerta). En esta condición la estructura no tiene la intervención de fuerzas sísmicas.

En relación con las condiciones de carga, estas serán dos únicamente. Condiciones de carga estática; es decir debido al peso propio como consecuencia de la gravedad y la condición de carga pseudo-estática que es regida a través del mapa de isoaceleraciones propuesta por el CISMID.

De acuerdo a la revisión el resultado que se obtuvo fue la de una aceleración sísmica pico de 0.36g, lo cual corresponde a un a un evento sísmico de 100 años de periodo de retorno y 10% de probabilidad de excedencia. A partir de la aceleración hallada se recomendó usar un coeficiente sísmico de 0.18g, para realizar el análisis del talud en condición pseudo-estática. (Ver figura 1.6)

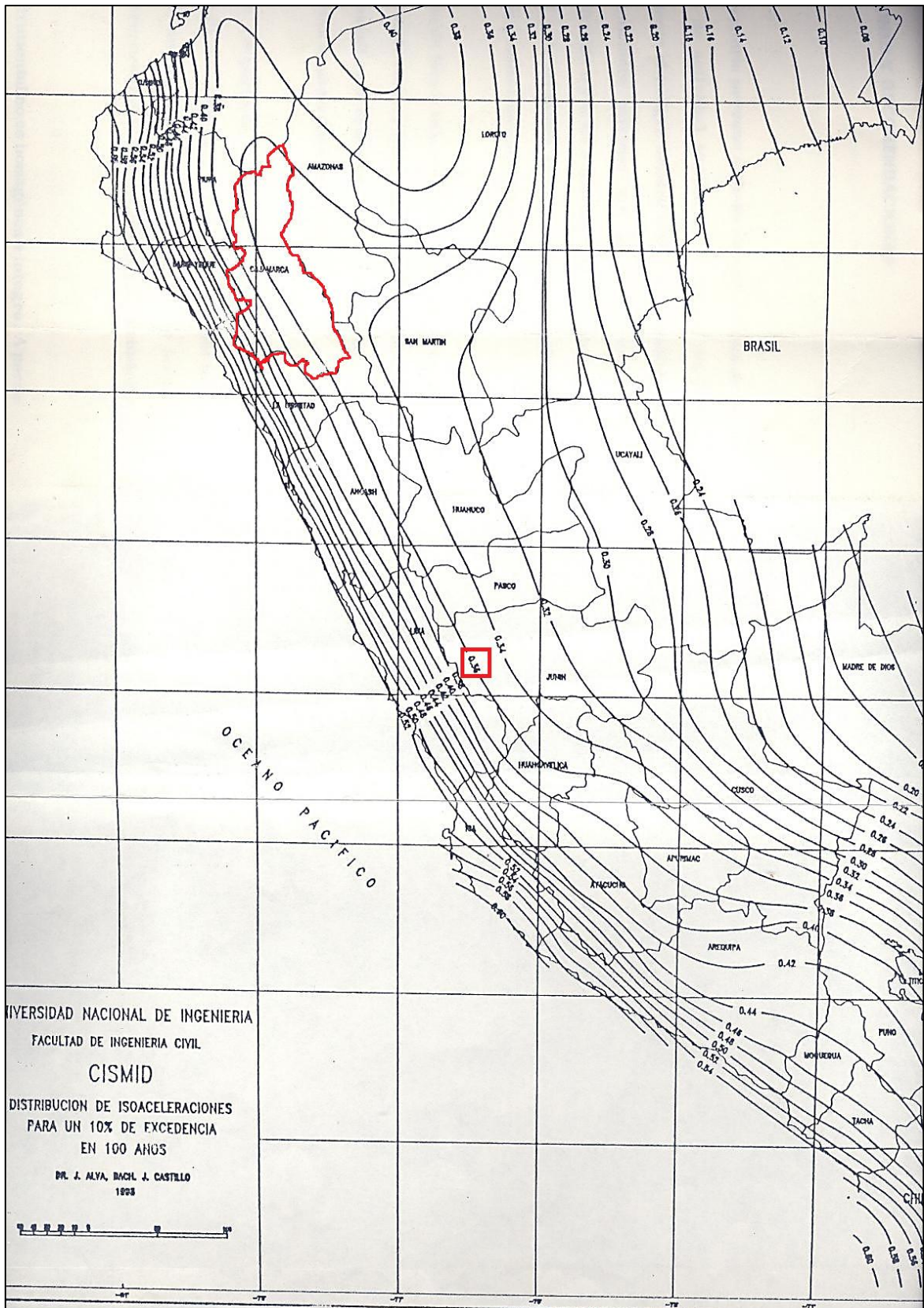


Figura 1.6: mapa de distribución de isoaceleraciones
Fuente: Castillo A., J. Peligro sísmico en el Perú. Tesis. UNI.

1.3.2.1. Zonificación

Suarez (1998), sostiene:

La zonificación de riesgos y amenazas es un instrumento muy importante para tomar decisiones, principalmente en la iniciación del planeamiento de un proyecto en sus primeras etapas. La zonificación consiste en la fracción del suelo en áreas uniformes y la calificación de cada área, de acorde al nivel del grado potencial de amenaza o riesgo que puede representar. (p.355).

De acuerdo a la cita, la zonificación de riesgos y amenazas es fundamental e importante para realizar el inicio de un proyecto, esta se puede realizar a través de un mapeo geológico y de la topografía del terreno para identificar sectores inestables.

Usualmente el primer paso para el análisis de la estabilidad de taludes consiste en la inspección visual de los especialistas, estos son el geólogo y el ingeniero geotécnico mediante la pesquisa visual, el peritaje, se formará un plano llamado mapeo geológico. En este plano se podrá identificar el sector inestable, si hubiera, y los tipos de suelo o regiones de forma macro; es decir presencia de suelos residuales, o coluviales, o afloramientos rocosos, tipo de afloramiento, tipos de roca, y similares.

El mapeo geológico y el estudio topográfico son fundamentales para identificar el sector con mayor inestabilidad, de modo tal que pueda ser analizada. Típicamente el análisis se realiza en dos dimensiones; sin embargo la geometría cóncava o convexa del talud influye en los resultados de los factores de seguridad y de la superficie de falla.

1.3.2.2. Superficie de falla

Es la forma supuesta que indica el desplazamiento potencial de la masa del suelo en el talud. En varios métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite esta superficie de falla es asumida, tanto que por métodos numéricos esta ocurre de forma natural al reducir los parámetros de resistencia.

La evaluación de la estabilidad de taludes consiste en seleccionar una sección bidimensional a través de la topografía, definiendo una posible superficie de desplazamiento. Una minuciosa evaluación de estabilidad requiere de una cuidadosa selección de una superficie de desplazamiento, además de un método de evaluación adecuada. Las superficies de falla o superficies de deslizamiento son masas de suelo potencialmente movilizadas en condiciones de carga estática o pseudoestática.

1.3.2.3. Factor de seguridad

“El factor de seguridad es usado por los ingenieros para saber cuál es el coeficiente de amenaza para que un talud colapse en las peores circunstancias de comportamiento para el cual es diseñado” (Suarez, 1998, p.123).

Es el valor que cuantifica la estabilidad o seguridad de un talud, este es la división de las fuerzas resistentes al movimiento potencial respecto a las fuerzas actuantes al movimiento. Por lo citado se exhorta a los ingenieros tener una rigurosidad para satisfacer el factor de seguridad en los taludes para que estas no colapsen, ya sea en condición estática o pseudo-estática.

En este trabajo de investigación se tendrá en cuenta los valores de factores mínimos de seguridad establecidos por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers). (Ver tabla1.1).

Tabla 1.1: valores de factor de seguridad mínimo

Caso analizado	Factor de seguridad
Al Final de la Construcción - Estático	1.30
A largo Plazo - Estático	1.50
Pseudo estático	1.00

Fuente: U.S. Army Corps of Engineers

1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1. Problema general

- ¿Cuál será la correlación entre los resultados del factor de seguridad de los taludes en la carretera Cochabamba – Cutervo – Santo Domingo de la Capilla – Chiple, cuando este análisis se realiza mediante el proceso de equilibrio limite y a vía métodos numéricos?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influyen los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb de los suelos involucrados con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo?

- ¿Cómo influye modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos?
- ¿Cómo influyen en la validez los resultados del factor de seguridad y la superficie de falla al analizar el talud en condiciones de carga estática y pseudo-estática a través del método de equilibrio límite y método numérico si se modela el problema en los software de ingeniería?

1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Este estudio es justificado debido a la importancia de investigar la validez del procedimiento de equilibrio límite a través del método de las dovelas al ser comparado con un procedimiento más riguroso: elementos finitos.

1.5.1. Justificación teórica

Desde el punto de vista teórico, se tendrá un mayor conocimiento sobre la decisión para usar un método simplificado como el de equilibrio límite, que es rápido y comprobado ampliamente a través de la práctica con el método de elementos finitos que es más riguroso; sin embargo es más demorado y adicionalmente requiere de un paso de modelamiento constitutivo de los materiales.

1.5.2. Justificación práctica

La aplicación del método de equilibrio límite resulta más económico debido a que las formas de cálculo a través de programas computacionales son más amigables y fáciles de aprender. Por el contrario en proceso de elementos finitos se requiere más conocimientos de métodos numéricos, condiciones de contorno, errores, etc. Debido a esto en la validación de este estudio resulta más práctico la aplicación del método de equilibrio límite en lugar de formulación numérica.

1.5.3. Justificación económica

En relación a lo anteriormente mencionado, la principal consecuencia desde punto de vista económico resulta un decremento de los gastos en programas computacionales y tiempo. Usualmente los software que calculan a través de equilibrio límite son más económicos que los que resuelven vía métodos numéricos. Tanto el tiempo de cómputo como el tiempo de modelación son ahorrados si es que se emplean los programas computacionales de equilibrio límite en lugar del proceso riguroso.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis general

- Los parámetros de estabilidad de las metodologías de equilibrio límite (método de las dovelas) y métodos numéricos (elementos finitos) son aproximadas tanto en condiciones de carga estática como pseudo-estática.

1.6.2. Hipótesis específicos

- Es posible determinar los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb de los suelos involucrados con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo.
- Se puede modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos.
- Es viable Validar el procedimiento de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite analizándolo por el método más riguroso de elementos finitos

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. Objetivo general

- Comparar los valores de factor de seguridad hallados mediante la formulación de equilibrio límite y métodos numéricos en condiciones de carga estática y pseudo-estática.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros de resistencia del suelo con el criterio de ruptura de Mohr Coulomb en los suelos involucrados, con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo.
- Modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos.
- Validar el procedimiento de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite analizándolo por el método más riguroso de elementos finitos.

II. MÉTODO

2.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Método de la investigación

“El método científico es una técnica para investigar las condiciones en que se presentan acontecimientos particulares o específicos, determinado habitualmente por ser tentativo, verificable, de razonamiento riguroso y observación empírica” (Tamayo, 2004, p.28).

Este plan de investigación se fundamentará en el método científico, ya que se determinó un caso tentativo y riguroso en la estabilización de taludes, usando dos métodos o procedimientos para la comparación de resultados tales como el factor de seguridad y la superficie de falla.

2.1.2. Tipo de investigación

Para Valderrama (2007, p. 29), “la investigación aplicada busca saber para hacer, proceder, construir, innovar; le interesa el empleo inmediato de sus conocimientos para una situación real y concreta”

Por lo tanto se puede inferir que el tipo de investigación del proyecto es la aplicada, ya que se va a poner en práctica conocimientos previos para solucionar una problemática en una situación concreta.

2.1.3. Nivel de investigación

Para Valarino [*et al.*] (2015, p.33), “la investigación explicativa está orientada a responder las causas de los eventos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da este, [...]”.

De acuerdo a lo descrito por Valarino, definimos que el actual proyecto de investigación es explicativo, ya que se va a responder la variación del factor de seguridad y de la superficie de falla al ser analizados mediante dos métodos diferentes

2.1.4. Diseño de investigación

(Pino, 2017, p.187) indica que:

El diseño de investigación experimental, es la manipulación deliberada de una o más variables, que actúan como variables independientes para determinar sus efectos sobre una o más variables dependientes dentro de un parámetro de control por parte del investigador.

La investigación será experimental, no necesariamente experimental pura, es por esa razón que citaremos a Valderrama.

Para definir el diseño de investigación, Valderrama afirma que:

Se llama diseños cuasi experimentales cuando no es posible aplicar el diseño experimental verdadero. Los diseños cuasi experimentales también utilizan deliberadamente al menos una variable independiente para ver su efecto y relación con una o más variables dependientes, solamente difieren de los experimentos verdaderos en el grado de seguridad o confiabilidad que pueda tenerse sobre la equivalencia inicial de los grupos. (2007, p. 57).

Por consiguiente el proyecto será cuasi experimental, ya que dependiendo del método de verificación es posible que las variables de factor seguridad y superficie de falla se mantengan aproximados o varíen considerablemente.

2.1.5. Enfoque de la investigación

Para Hernández, Fernández y Baptista (2010, p.4), “el enfoque cuantitativo utiliza el acopio de datos para comprobar la hipótesis, con base en las mediciones numéricas y el análisis estadístico, para fijar patrones de comportamiento y demostrar teorías”

Este plan de proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo, porque las variables van a ser medidas por medio de información cuantificada.

2.2. OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE

Tabla 2.1: operacionalización de variables.

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
Estabilidad de taludes	Para Braja (2013,p.335): “el estudio de estabilidad de un talud es una labor compleja, la evaluación de variables tales como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia al corte en el lugar puede llegar a ser una trabajo enorme. [...]”.	La estabilidad de taludes abarca muchos métodos como el método Spencer, Morgenstern-Price, Bishop simplificado.	trabajos previos de ingeniería	Ensayos de campo	Método: científico
				Ensayos de laboratorio	
			Método de equilibrio limite	Bishop	Enfoque: cuantitativo
				Spencer	
				Software Slide	
			Método numérico	Elementos finitos	Tipo: aplicada
Modelo constitutivo					
Software Plaxis					
Condición de carga	Suarez (1998) afirma: “los acontecimientos sísmicos son suficientes para generar fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden generar la falla apresurada en taludes y laderas” (p.148).	Las condiciones de carga pueden ser estáticas o pseudo-estáticas, eso depende de las fuerzas a la cual están sometidas en el momento de su análisis de estabilidad	zonificación	Características geológicas	Nivel: explicativo
				Características geotécnicas	
			Superficie de falla	Geometría de la falla	Diseño: cuasi experimental
				Falla circular o por bloques	
				Coefficiente pseudo-estático	
			Factor de seguridad	Equilibrio de fuerzas en dovelas (MEL)	Instrumento: . Ensayo de laboratorio .ensayo de campo
				Reducción de parámetros de resistencia	
				Factor de seguridad permisible	

Fuente: elaboración propia

2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

2.3.1. Población

“la población es el conjunto de todos los elementos [...] que pertenecen al ámbito espacial donde se desarrolla el trabajo de investigación” (Tamayo, 2004, p.24)

La población estará dada lo que conformará la carretera Cochabamba – Cutervo – Santo Domingo de la Capilla – Chiple en la totalidad de su tramo.

2.3.2. Muestra

Valderrama, indica que:

De modo más científico, se determina las muestras como una parte de un conjunto o población debidamente seleccionada, la cual será sometida a una observación científica en representación de todo el conjunto, con el objetivo de conseguir conclusiones válidas. (2007, p.164).

“La muestra es el subconjunto, o parte de la población seleccionada, esta representa al universo” (Ñaupas et al, 2014, p.246)

En el proyecto se realizarán tomas de muestras de suelo entre las progresivas Km 56+160 al 56+220; es decir 60 metros de estudio, con lo cual se determinará las características y propiedades de los materiales, en especial se tomarán muestras de las zonas de mayores problemas de estabilidad.

2.3.3. Muestreo

(Mata et al, 1997, 19), "Consiste en un conjunto de reglas, procedimientos y criterios mediante los cuales se selecciona un conjunto de elementos de una población que representan lo que sucede en toda esa población.

El muestreo fue no probabilístico, dirigido ya que se escogerán los elementos de acuerdo a criterios preestablecidos por el investigador para realizar los ensayos requeridos. Para el muestreo se usó diversos métodos y procedimientos (observación empírica) para escoger las zonas ideales que se encuentran dentro del tramo Km 56+160 al 56+220.

2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

2.4.1. Técnica

(Arias, 1999, p. 53) Indica que “las técnicas de recolección de datos son las diferentes maneras de adquirir información”.

Para realizar una óptima recopilación de información usaremos la técnica de la observación directa, esto se debe a la geografía del terreno que es muy irregular.

2.4.2. Instrumento

(Sabino, 1992, p. 149) afirma: “Un instrumento de acopio de datos es cualquier recurso de que pueda aferrarse el investigador para estudiar los fenómenos y extraer información de ellos”.

De acuerdo con sabino, los instrumentos para recolectar información en el proyecto serán las fichas de recopilación de datos de los ensayos de laboratorio y campo

2.4.3. Validez

Para Valarino [*et al.*] (2015), sostienen que:

La validez se refiere a que debe tenerse cierto grado de seguridad, que lo que se está midiendo sea lo que se pretende y no otra cosa, que la técnica empleada mida el fenómeno que se supone tiene que medir o que el observador pueda clasificar un comportamiento en una categoría con cierto grado de veracidad (p.227).

La validez en nuestro trabajo será el juicio de experto que emitan los especialistas del laboratorio y los técnicos que ejecutaran los ensayos en campo, quienes autenticaran la validez correspondiente de los ensayos realizados.

2.4.4. Confiabilidad

Valarino [*et al.*] (2015), sostienen que: “La confiabilidad se refiere a que el instrumento mida lo mismo cada vez que se emplea o que diferentes observadores midan lo mismo en condiciones similares y puedan llegar a acuerdos”. (p.229).

Entonces tomando como referencia lo dicho por Valarino, la confiabilidad será la calibración de los equipos que se utilizarán para realizar los ensayos, el personal calificado y los ISOS que cuente el laboratorio donde se realizarán.

2.5. MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS

Para el progreso del proyecto de investigación se usará programas como Microsoft office, Excel, AutoCAD y para el análisis de datos se usara los softwares de Plaxis y Slide, usando los datos obtenidos a través de un estudio de suelo y la observación directa de los taludes más vulnerables a deslizamientos potenciales.

2.6. ASPECTOS ÉTICOS

Para el progreso del proyecto de tesis se ha recopilado información de diversas tesis relacionadas, libros, revistas y otras fuentes de información, las cuales serán referenciadas por la norma ISO 690

Respeto:

Es un valor muy importante en todo ámbito de nuestra vida personal, laboral y académica, por lo consiguiente este proyecto de investigación tiene información veraz y concisa, con cual la recopilación de información de otros autores serán referenciados con la norma correspondiente

Honestidad:

Se será honesto en la elaboración del proyecto de investigación, ya sea con el análisis de dato y con las visitas a campo del proyecto, se contarán con fuentes confiables para la argumentación del proyecto

III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

La investigación se ubica en la provincia de Cutervo, que es una de las trece provincias que conforman el Departamento de Cajamarca, bajo la administración del Gobierno regional de Cajamarca, en el Perú. Limita por el norte con la provincia de Jaén; por el este con el Departamento de Amazonas; por el sur con la provincia de Chota y; por el oeste con la Departamento de Lambayeque. La ruta por carretera más corta desde Cajamarca a Cutervo, tiene una distancia de 208 Km y la duración aproximada del viaje de 5 horas. Posee un clima cálido, medianamente lluvioso. La media anual de temperatura máxima y mínima es 18°C y 9°C, respectivamente. La media en relación con la precipitación acumulada anual para el periodo es 900 mm. Las coordenadas de la zona de estudio son las siguientes: 9306680 N - 737800 E. (ver figura 3.1).

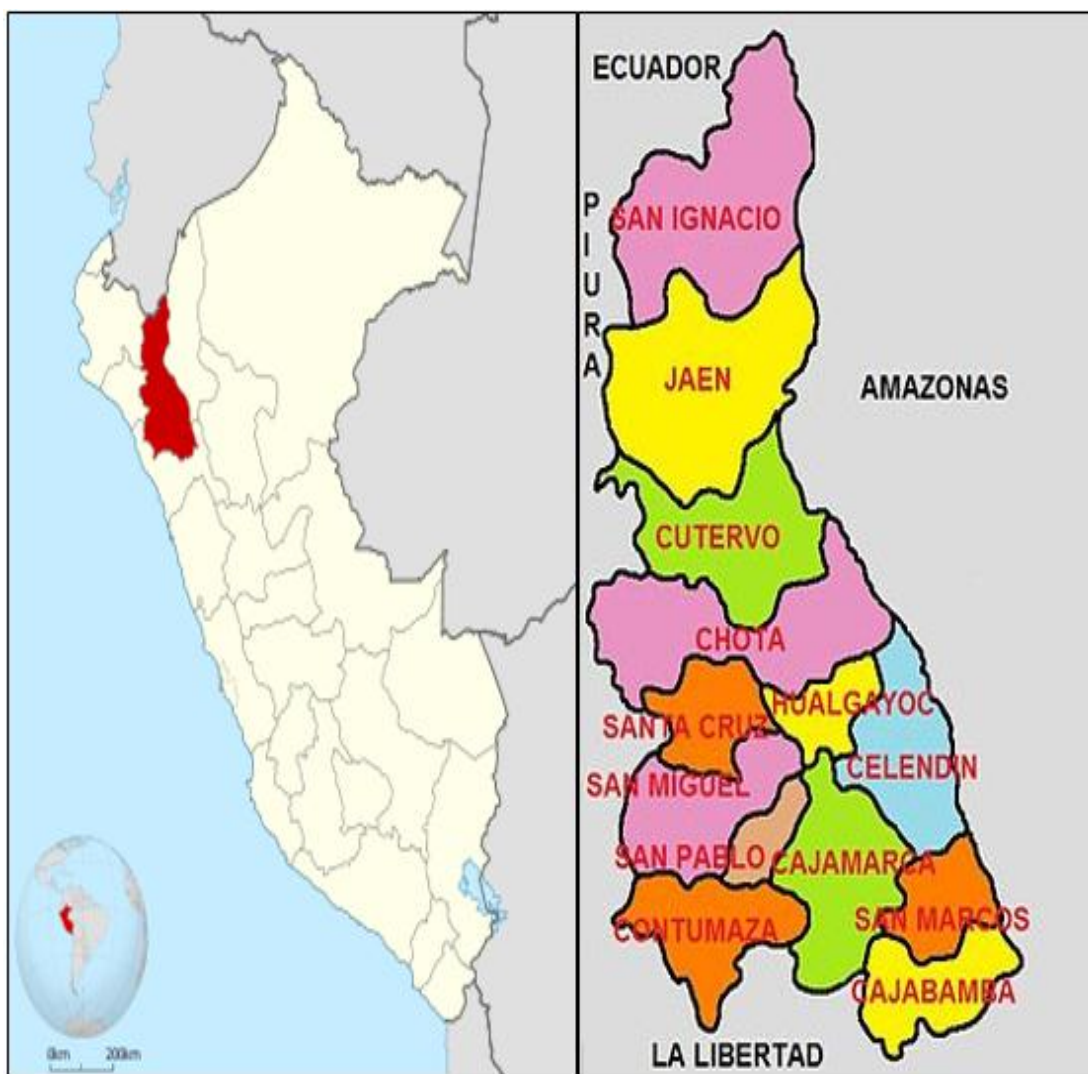


Figura 3.1: mapa político del Perú y del departamento de Cajamarca.

Fuente: adaptado de internet

3.2. ZONA DE INTERVENCIÓN

Como fue descrito en la sección anterior, en esta investigación geotécnica se ha determinado los sectores de inestabilidad de un talud de la carretera Cochabamba – Cutervo – Santo Domingo de la Capilla – Chiple. Entre las progresivas Km 56+160 al 56+220; es decir 60 metros de estudio. (Ver figura 3.2)



Figura 3.2: carretera Cochabamba-Cutervo-Santo Domingo de la Capilla-Chiple entre las progresivas Km 56+160 al 56+220
Fuente: adaptado de google earth

3.2.1. Geografía de la zona de intervención

En la geografía del terreno se observa la escarpa de falla, material deslizado de naturaleza arcillosa y arena limosa con gravas y con cantos muy aislados. Nótese la inclinación de los árboles en la parte alta del talud. (Ver figura 3.3).



Figura 3.3: vista panorámica del deslizamiento lento (reptación) en el sector del Km 56+160 al 56+220
Fuente: elaboración propia

3.2.2. Geomorfología de la zona de intervención

La geomorfología ha sido determinada mediante las imágenes satelitales (google earth) y por su ubicación de acuerdo al registro de la cartografía del INGEMMET (instituto geológico, minero y metalúrgico)

La Geomorfología regional desarrollada es el resultado final de fenómenos geodinámicos, tectónica, erosión y transporte, etc., los cuales contribuyeron a la actual configuración de su relieve. En base a criterios litológicos, estratigráficos, morfológicos, geográficos y en el cual se identificaron 3 unidades geomorfológicas principales mayores a nivel regional que se mencionan a continuación:

- Valles Interandinos
- Ladera de Valle Sub Andino
- Valles de Relieve de Ceja de Selva.



Figura 3.4: vista del talud superior inestable y parte de la plataforma.

Fuente: elaboración propia

3.2.3. Estratigrafía regional de la zona de intervención

La geomorfología ha sido determinada mediante las imágenes satelitales (google earth) y por su ubicación de acuerdo al registro de la cartografía del INGEMMET (instituto geológico, minero y metalúrgico)

La Estratigrafía Regional se desarrolla desde el Mesozoico (Jurásico) hasta el Cuaternario Reciente (Holoceno), y generalmente se tienen unidades sedimentarias calcáreas a lo largo

del proceso de formación. Los intrusivos se desarrollan desde el Cretáceo superior hasta el Terciario superior. En el siguiente cuadro se resume la estratigrafía a nivel regional donde se enmarca la zona del trabajo de investigación. (Ver tabla 3.1).

Tabla 3.1: columna estratigráfica generalizada de la zona evaluada.

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente	Dep. aluviales y fluviales	Conglomerados, gravas, arenas, limos, etc. En pisos de valles, quebradas, terrazas.	-----
		Pleistoceno	Fm. Tamborapa	Conglomerado dentro de matriz, limo arenosa de naturaleza intrusiva volcánica y sedimentaria; ocasionalmente lentes de arena gruesa limosa.	-----
	TERCIARIO	Superior	Volc. Huambos	Tobas y brechas dacíticas; contenido de piedra pomez blanquecinos. Piroclastos ácidos.	Diorita
		inferior	Volc. llama	Conglomerado basal rojizo, intercalado con toba andesítica de color morado. El conglomerado se encuentra en una secuencia de piroclastos, derrames y brechas andesíticas muy maciza.	
MESOZOICO	CRETACEO	Superior	Fm. Chota	Conglomerados, arcillas y areniscas	-----
			Fm. Celendín	Capas delgadas de calizas nodulares arcillosas de tonalidades crema oscuro a marrón; intercaladas con margas y lutitas grises a grises azuladas	Granodiorita
		Medio	Fm. Cajamarca	Calizas estratificación regular y uniforme color blanquecino a gris claro	-----
			Gpo. Quilquiñan	Lutitas friables gris oscuras: margas azuladas; pocas intercalaciones con calizas.	-----
			Gpo. Pulluicana	Calizas arcillosas grises, crema amarillenta: intercalaciones con margas marrones y lutitas gris verdosas; escasas capas de limolitas y areniscas.	-----
			Fm. Pariatambo	Calizas negras bituminosas olor fétido con intercalaciones de lutitas negro bituminosa	-----
			Fm. Chúlec	Lutitas gris, margas amarillentas y calizas nodulares marrón crema	-----
		Fm. Inca	Areniscas y lutitas con intercalaciones calcáreas	-----	
	Inferior	Gpo. Goyllarisquizga	Areniscas. Cuarzitas blanquecinas y marrones con intercalaciones de lutitas grises, marrón y rosada.	-----	
	JURÁSICO	Medio	Volc. Oyo-tún	Bancos de piroclastos, brechas y derrames andesíticos y dacíticos negros azulados; intercalados con tobas sedimentarias, grawacas y areniscas. Rara calizas silicificadas.	-----

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMET)

3.3. TRABAJOS DE CAMPO

Se realizaron ensayos de exploraciones geotécnicas con el objetivo de obtener los parámetros de resistencia del material que conforma el talud así como para señalar las características del terreno.

Las evaluaciones geotécnicas y geológicas se hicieron durante los meses de julio-agosto hasta la actualidad. Actualmente el trabajo de tesis se encuentra en su etapa de recolección de información, compatibilización de resultados y primeros análisis de estabilidad en condiciones de carga estática y pseudoestática.

Según el reglamento nacional de edificaciones en la versión reciente, en el artículo 11 se menciona lo siguiente:

Un programa de investigación de campo y laboratorio se define mediante

- a) Condiciones de frontera.
- b) Número “n” de puntos a investigar.
- c) Profundidad “p” a alcanzar en cada punto.
- d) Distribución de los puntos en la superficie del terreno.
- e) Número y tipo de muestras a extraer.
- f) Ensayos a realizar “in situ” y en laboratorio.

a) Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera, según RNE indica que es la clasificación de condiciones similares de suelo o como en esta investigación sería la delimitación del sector inestable mediante la geología y geotecnia. Las características de inestabilidad en taludes están determinadas por grietas, salidas de agua, falla en estructuras, desplazamiento de estructuras inicialmente verticales por ejemplo postes, árboles y similares, escarpas, presencia de material calcáreo, etc.

Lo primero que se hizo de acuerdo a la norma fue la delimitación de las condiciones de frontera; es decir delimitar todo el sector inestable con la asesoría de un especialista geólogo y geotécnico, que a través de grietas, salidas de agua, se pudo determinar aproximadamente el área inestable que fue 8400 metros cuadrados. (Ver figura 3.5).

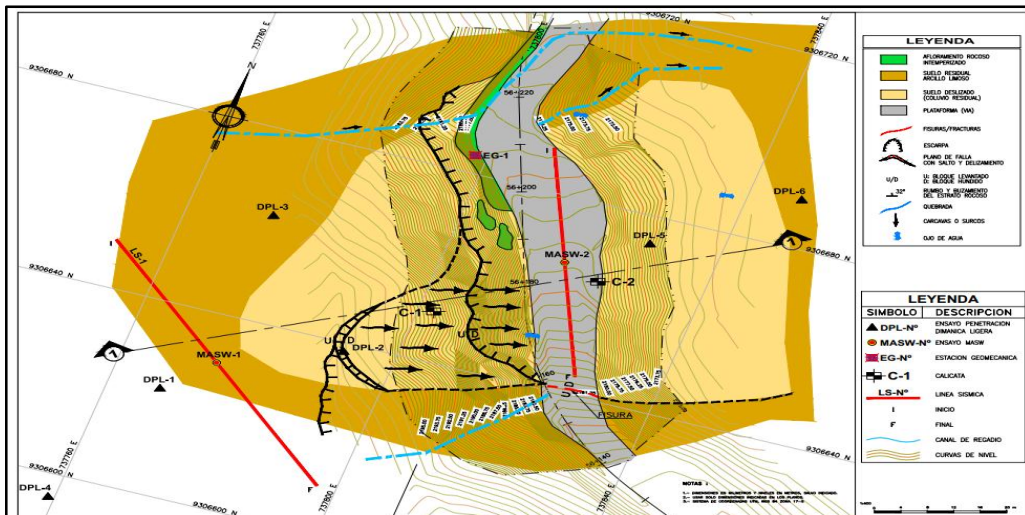


Figura 3.5: mapeo geológico

Fuente: elaboración propia

b) Número “n” de puntos de investigación

El número de ensayos geotécnicos es determinado por la importancia de la edificación. En este caso se está considerando como tipo de clasificación C porque es una vía y no existen estructuras aporricados ni obras de arte como puentes, túneles, etc. Dicho esto se ha considerado 1 sondaje por cada 800 metros cuadrados de la región limitada y descrita en el ítem a.

La cantidad de puntos de investigación se determinara según la siguiente tabla 3.2, dependiendo del tipo de edificación y del área que va a ocupar este proyecto.

Tabla 3.2: número de puntos de investigación.

NÚMEROS DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN	
Tipo de edificación	Número de puntos de investigación (n)
A	1 cada 225 m ²
B	1 cada 450 m ²
C	1 cada 800 m ²
Urbanizaciones para vivienda unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada Ha. De terreno habilitado

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones, norma E-050 de suelos y cimentaciones

En este proyecto de investigación la cantidad de sondajes fue la división entre 8400 metros cuadrados entre 800 metros cuadrados; es decir 10.4. Por tanto se puede aproximar a 10 ensayos geotécnicos y/o geofísicos. En la siguiente imagen se muestra la delimitación del

sector inestable, el área total y la distribución de los 10 ensayos de campo que fueron los siguientes: (ver figura 3.6)

- 2 calicatas. (C-01 y C-02)
- 6 ensayos de DPL. (DPL-01, DPL-02, DPL-03, DPL-04, DPL-05 y DPL-06)
- 2 ensayos de geofísica. (LS-01, LS-02, MASW-01 y MASW-02)



Figura 3.6: ensayos geotécnicos y geofísicos ejecutados en el sector inestable
Fuente: adaptado de (google earth)

c) Profundidad “p” a alcanzar en cada punto

Según el RNE indica que la profundidad mínima es de 3 metros en el caso de edificaciones; sin embargo en vías de transporte el sondaje mínimo es de 1.5 metros. Sin embargo en este caso las investigaciones se desarrollan fuera de la vía por lo que por lo menos deberán ser de 3 metros. La calicata C-01 (mostrada más adelante) alcanzó 2.5 metros debido a la presencia de bloques de roca, no obstante la información es válida.

d) Distribución de los puntos en la superficie del terreno.

La distribución de los puntos a investigación se realizó de acuerdo al criterio propio con la ayuda del mapeo geológico y un especialista en geotecnia. Esta distribución deberá garantizar la mejor representación del sector inestable.

e) Número y tipo de muestras a extraer.

El número de muestras establecidas fueron el mismo número de calicatas. En este caso no se consideró al macizo rocoso como parte del estudio de estabilidad por presentarse a mayor profundidad. Esta fue evaluada indirectamente de acuerdo a los ensayos de geofísica que permitieron llegar a profundidades mayores.

f) Ensayos a realizar “in situ” y en laboratorio.

Los ensayos que se realizaron in-situ y en laboratorio serán descritos en la ejecución de este proyecto de investigación.

Los ensayos de DPL típicamente sirvieron para delimitar la potencia del suelo con contenido limoso arcilloso o bofedal. Los resultados de clasificación de suelo muestran que el suelo es arenoso limoso y arcilla de baja plasticidad (ver en anexo). Mediante los procedimientos indirectos se va a identificar la variación de rigidez y con ello aproximar el tipo de suelo o roca.

3.3.1. Calicatas de estudios

En la exploración de calicatas se realizaron los registros de los diferentes materiales encontrados de acuerdo a la norma ASTM D 2488 (Práctica Estándar para la descripción e identificación de Suelos - Procedimiento Visual Manual). En estos registros se describe el tipo de material encontrado en toda la profundidad en concordancia al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), a su compacidad o consistencia, a la plasticidad del material fino, a la forma del material granular, a su humedad natural y color, al porcentaje estimado de cantos rodados, al porcentaje estimado de bolos o bolones, al porcentaje estimado de bloques y su tamaño máximo, a la presencia o no de material orgánico u óxidos, a la evidencia de material cementante, a la estabilidad de las paredes de la calicata, al grado de dificultad al excavar, etcétera.

En la calicata N°1 la profundidad alcanzada fue de 2.5 metros. En la calicata N°2 la profundidad alcanzada fue de 3.0 metros. En ambas calicatas se extrajo muestras a la profundidad máxima alcanzada donde los ensayos que se ejecutaron fueron:

- Análisis de granulometría por tamizado
- Contenido de humedad
- Peso específico
- Límites de consistencia

La excavación de la calicata y el respectivo registro de las mismas fueron realizadas por el autor de este trabajo de investigación con la ayuda de operarios particulares contratados. La ubicación de las calicatas se muestra en la figura 3.7 y el resumen de los datos en la siguiente tabla. (Ver tabla 3.3).



Figura 3.7: ubicación de las calicatas
Fuente: adaptado de (google earth)



Figura 3.8: calicata 01
Fuente: elaboración propia



Figura 3.9: calicata 02
Fuente: elaboración propia

Tabla 3.3: ubicación de calicatas

N°	PROGRESIVAS		Longitud del tramo (m)	Calicata y/o Trinchera	Ubicación	Profundidad Alcanzada (m)	Observación	Tipo de suelo SUCS
	Inicio	Final						
1	Km 56+160	Km 56+220	60	C-01	Km 56+180	2.5	Talud superior	SM
2				C-02	Km 56+180	3	Plataforma	CL

Fuente: elaboración propia

El reporte de la descripción del suelo encontrado en la excavación se encuentra en el anexo correspondiente.

3.3.2. Ensayos de DPL

Con el objeto de evaluar la resistencia a la penetración del suelo en los sectores de compacidad media a baja, se han ejecutado ensayos de penetración dinámica ligera (DPL) que fueron distribuidos convenientemente en el área de estudios, la profundidad máxima de penetración de los ensayos es 6.80m.

El ensayo DPL (DIN 4094), se basa en el hincado continuo en tramos de 10 cm de una punta en forma de cono con un ángulo de 60° y varilla de sondaje de 7/8” de diámetro utilizando la energía de un martillo de 10 Kg de peso, que cae libremente desde una altura de 50 cm. Esta prueba nos permite conseguir un registro continuo de resistencia del suelo a la penetración, existiendo correlaciones para encontrar el valor “N” del ensayo de resistencia a la penetración estándar (ASTM – D1586). Asimismo se obtiene, en forma indirecta, la consistencia del terreno. En la figura se muestra la ubicación de los ensayos DPL. (Ver figura 3.10)



Figura 3.10: ubicación de ensayos DPL y calicatas.

Fuente: adaptado de (google earth)

Los datos obtenidos de las 6 pruebas de DPL se muestran en la siguiente tabla con el resumen de los datos obtenidos. (Ver tabla 3.4).

Tabla 3.4: resumen de ensayos de DPL

Progresiva Km		Longitud del tramo (m)	DPL	Coordenadas UTM (WGS84)		Profundidad Alcanzada (m)	Ubicación	Cohesión (kPa) promedio	Angulo de fricción (°) promedio
Inicio	Final			Este	Norte				
Km 56+160	Km 56+220	60	DPL-1	737768	9306622	3.2	Talud superior	20	0
			DPL-2	737792	9306638	4.5	Talud medio	22	0
			DPL-3	737773	9306662	6.8	Talud medio	17	0
			DPL-4	737759	9306595	5.7	Talud superior	35	0
			DPL-5	737829	9306674	5.3	Talud inferior	21	0
			DPL-6	737848	9306690	3.8	Talud inferior	26	0

Fuente: elaboración propia

3.3.3. Ensayos de geofísica

Los ensayos anteriormente mencionados poseen la virtud de estimar tanto las propiedades mecánicas del suelo cuanto las propiedades físicas; sin embargo esta investigación requiere información a mayores profundidades. Con tal propósito se proyectaron ensayos indirectos o ensayos geofísicos. Estos ensayos fueron dos: ensayo de refracción sísmica (ASTMD 5777) y ensayo de medición de ondas superficiales en arreglo Multicanal (MASW).

3.3.3.1. Ensayos de Refracción Sísmica (ASTM D 5777)

El ensayo de refracción sísmica es un método indirecto, mediante el cual se determina perfiles de ondas sísmicos en función de las velocidades de onda compresionales tipo “P”, esta prueba tiene los siguientes objetivos:

- ✓ Hallar los perfiles sísmicos del subsuelo en función de sus propiedades dinámicas.
- ✓ hallar las cualidades dinámicas de los estratos en función de las velocidades de compresión de las ondas P.

- ✓ Determinar las propiedades de deformación dinámica de los suelos con ayuda de los datos de la onda S adquiridos de los ensayos de MASW.

Método de ensayo

Esta prueba consiste en la medición del tiempo de viaje de las ondas tipo P originadas por una energía, comúnmente esta energía es proveniente del golpe de impacto de una comba de 25 libras. Los impactos se localizan a diferentes distancias a lo largo de una línea sobre la superficie del suelo. La energía es detectada y registrada de manera tal que puede determinarse el tiempo de llegada en cada punto por medio de los sensores.

El comienzo de la grabación fue dado a partir de un dispositivo o SWITCH que nos da el tiempo cero para evaluar el tiempo de recorrido.

Los datos: distancia y tiempo de llegada, para los puntos de aplicación de la energía, permiten evaluar las velocidades de propagación de ondas “P” para los distintos tipos de suelos, cuya estructura, geometría y continuidad son estudiadas. Se usó el método de “Delete Time” para el análisis de los resultados.

En el análisis, la reflexión y refracción de ondas P están basadas en la Ley de Snell y a través del espesor y velocidad de propagación de las ondas P pueden ser correlacionadas las características geotécnicas como compacidad y densidad.

Para este estudio se utilizó la Estación Portátil de Prospección Sísmica Geode con 24 canales de registro, cables con espaciamiento de 2m, geófonos magnéticos y una computadora para almacenar los datos.

Se consideraron 5 puntos de impacto distintos para iniciar el ensayo de acuerdo a las siguientes figuras. (Ver figura 3.11, 3.12 y 3.13)

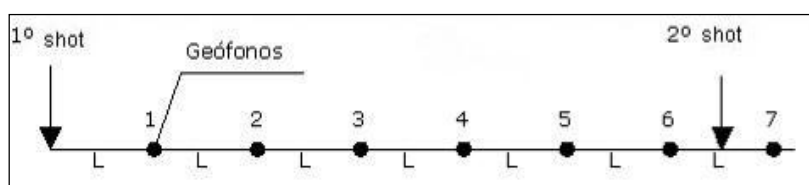


Figura 3.11: distribución del 1º y 2º golpe.

Fuente: elaboración propia

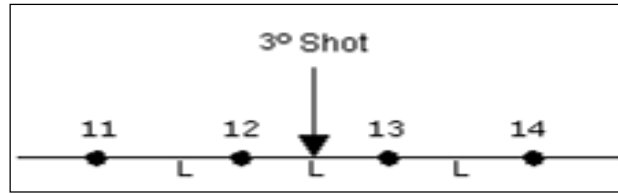


Figura 3.12: distribución del 3º golpe.
Fuente: elaboración propia

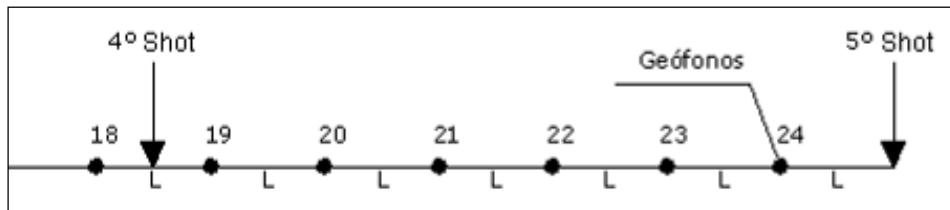


Figura 3.13: distribución del 4º y 5º golpe.
Fuente: elaboración propia

La ubicación de los ensayos de refracción sísmica se hizo convenientemente con la finalidad de abarcar la mayor área posible inestable. (Ver figura 3.14 y 3.15)



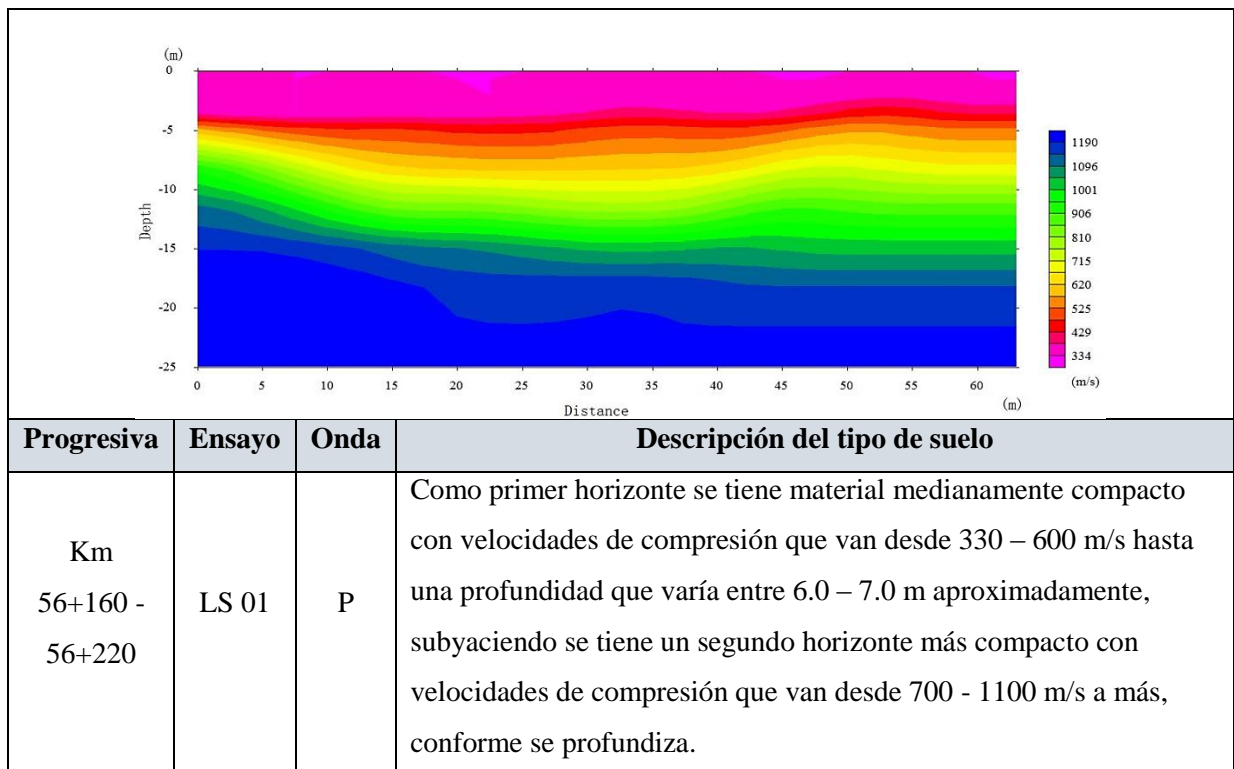
Figura 3.14: líneas de Geofísica: LS-01 y LS-02
Fuente: adaptado de (google earth)



Figura 3.15: líneas de Geofísica: LS-02
Fuente: elaboración propia

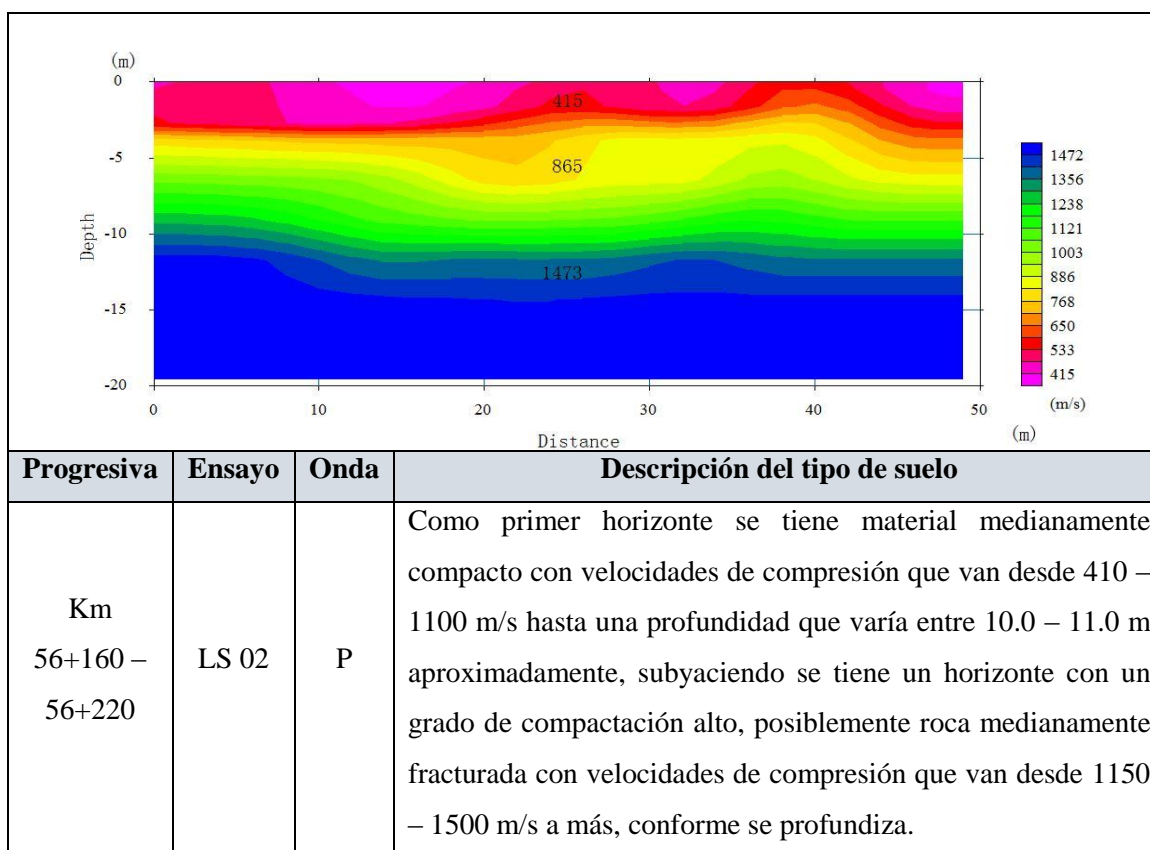
Una vez procesada la información obtenida por los tiempos de llegada de los sensores ubicados en espacios determinados se obtuvieron dos perfiles de velocidades de ondas primarias u ondas “p”. Estos Perfiles se muestran en las siguientes tablas de resúmenes. (Ver tabla 3.5 y 3.6)

Tabla 3.5: Resultados del ensayo de refracción sísmica LS-01



Fuente: elaboración propia

Tabla 3.6: Resultados del ensayo de refracción sísmica LS-02



Fuente: elaboración propia

3.3.3.2. Ensayos de Medición de Ondas de Superficie en Arreglo Multicanal - MASW

Se realizaron ensayos de MASW en toda la zona de estudio. Los propósitos primordiales del uso de este método son los siguientes:

- ✓ Hallar los perfiles sísmicos del suelo en función de las velocidades de ondas de corte (V_s).
- ✓ Hallar las propiedades dinámicas de los estratos que dependen de las velocidades de las ondas de corte (V_s).
- ✓ Determinar las características de deformación dinámica del suelo como el módulo de corte (G), módulo elástico dinámico (E).

Método de ensayo

Esta prueba es parecida al de refracción sísmica. Consiste en la medida del tiempo de llegada de las ondas de corte (V_s) generadas por una energía de impacto producidas por una comba. La desigualdad principal es que para esta metodología se utilizan geófonos de 4.5 Hz de

frecuencia, adicionalmente los puntos de golpe se ubican a 0,2 y 0,4 L a los extremos de la línea, tal y como se aprecia en la siguiente figura. (Ver figura 3.16)

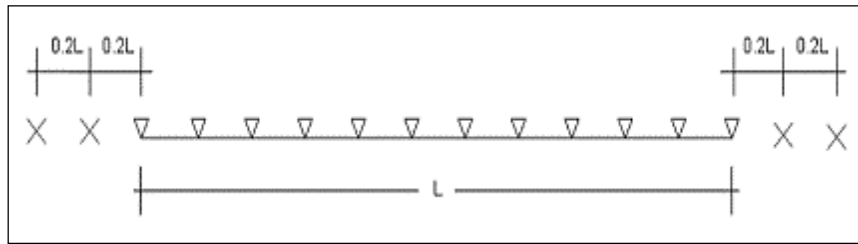


Figura 3.16: Distribución de puntos de disparo del ensayo MASW.
Fuente: elaboración propia

Una vez procesada la información obtenida por los tiempos de llegada de los sensores ubicados en espacios determinados se obtuvieron dos perfiles de velocidades de ondas secundarias u ondas “S”. Estos Perfiles se muestran en los siguientes cuadros resúmenes. (Ver tabla 3.7 y 3.8)

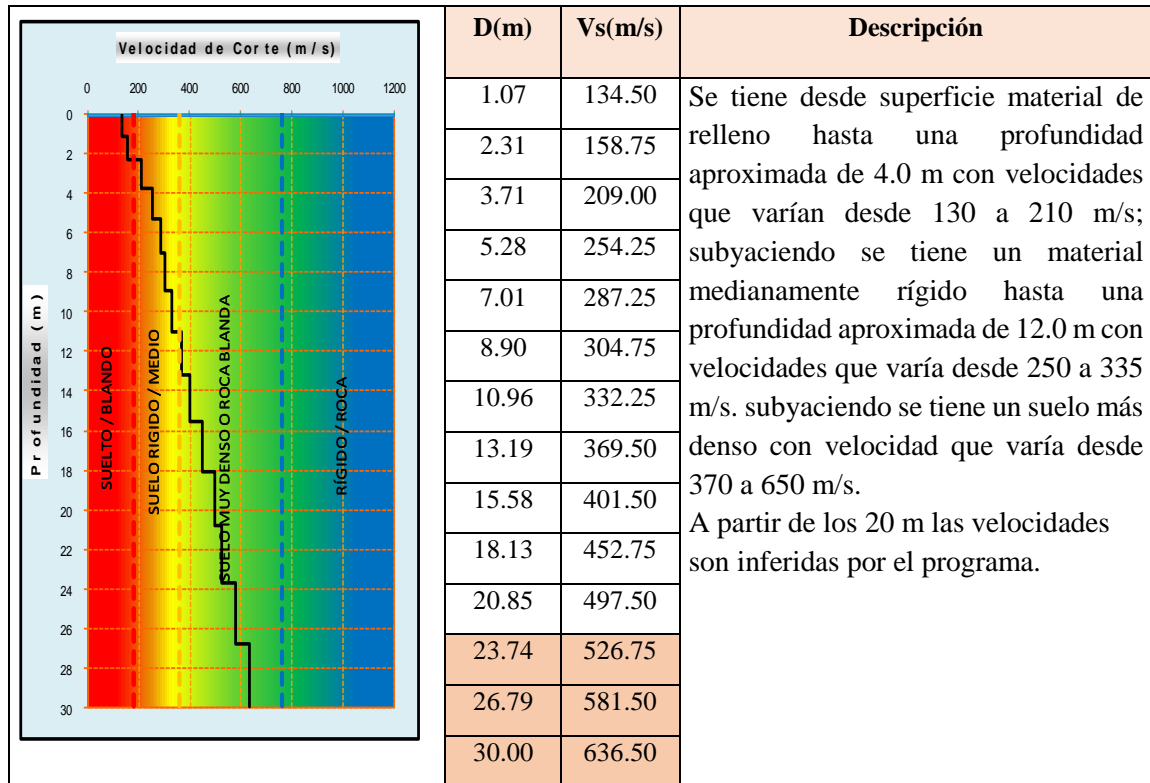
Tabla 3.7: Velocidades de onda de corte, calculadas a partir del ensayo MASW01

	D(m)	Vs(m/s)	Descripción
	1.07	174.25	Se tiene desde la superficie material de relleno hasta una profundidad aproximada de 3.5 m con velocidades que varían desde 170 a 220 m/s; subyaciendo se tiene un material medianamente rígido hasta una profundidad aproximada de 12.0 m con velocidades que varía desde 250 a 350 m/s. subyaciendo se tiene un suelo más denso con velocidad que varía desde 370 a 610 m/s.
	2.31	180.00	
	3.71	213.50	
	5.28	257.25	
	7.01	281.00	
	8.90	313.00	
	10.96	347.25	
	13.19	371.75	
	15.58	416.25	
	18.13	439.25	
	20.85	476.25	
	23.74	517.25	
	26.79	537.75	
30.00	610.25		

Fuente: elaboración propia

Nota: Las profundidades son aproximadas

Tabla 3.8: Velocidades de onda de corte, calculadas a partir del ensayo MASW02



Fuente: elaboración propia

Nota: Las profundidades son aproximadas

3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se realizaron de acuerdo a los procedimientos recomendados según las versiones más recientes de los métodos de ensayo de la Sociedad Norteamericana de Ensayos y Materiales (ASTM) y del Reglamento nacional de Edificaciones (RNE), los reportes de los ensayos de laboratorio se presentan en el anexo correspondiente. A continuación se muestra un resumen.

3.4.1. Clasificación granulométrica

Los ensayos han sido ejecutados de acuerdo a las normas de la American Society For Testing and Materials (ASTM). Estas normativas se mencionaran a continuación:

- ✓ Análisis granulométrico por tamizado ASTM D-422
- ✓ Límites de Atterberg ASTM D-4318
- ✓ Contenido de humedad ASTM D-2216
- ✓ Clasificación SUCS ASTM D-2487

Los resultados que se obtuvieron de las muestras tomadas de las calicatas N° 1 y N°2 se resumieron en la siguiente tabla. (Ver tabla 3.9)

Tabla 3.9: Resultados de los ensayos – parámetros físicos

Sondaje	Muestra	Prof.	Granulometría (%)			Límites (%)			CH	Clasificación	
		(m)	Finos	Arena	Grava	LL	LP	IP	(%)	SUSC	AASHTO
C-01	M-1	0.55-2.50	41.8	46.6	11.6	55.57	30	25.57	19	SM	A-7-6(4)
C-02	M-2	0.90-3.00	87.1	10.9	2.1	34.34	19.41	14.93	50.6	CL	A-6(2)

Fuente: elaboración propia

Con los resultados de los ensayos de campo y laboratorio ya se puede generar diferentes perfiles. El sector de mayor pendiente según la topografía de la zona e inspección del autor de este proyecto de investigación con apoyo de especialistas en geotecnia y geología, es la correspondiente a la progresiva Km 56+180. Los estratos superficiales (calicatas y los DPL) se han proyectado al corte, y las propiedades más profundas fueron determinadas considerando los ensayos de geofísica: Ensayo de refracción sísmica y ensayo MASW. Finalmente la sección que se encuentra a continuación se va a analizar tanto por el procedimiento de equilibrio limite como por elementos finitos.

3.4.2. Parámetros de resistencia de suelo y roca

El objetivo central o general de esta investigación es comparar los análisis de estabilidad de un talud de un sector crítico tanto en valores de superficie de falla como en factores de seguridad. Para ello se requiere la caracterización mecánica del suelo y roca.

La caracterización del suelo se realizó considerando el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb; es decir, con valores de cohesión en unidades de presión y ángulo de fricción en unidades de grados. En la bibliografía indicada (Cesar Atala “Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados, usando equipos de penetración”) se estudia ampliamente diversas correlaciones entre ensayos de penetración para obtener parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr-Coulomb. Una de estas correlaciones es del ensayo de DPL y el Ensayo SPT. De esta manera mediante el número de golpes del DPL puedo estimar cuantos golpes podrían haberse manifestado si se hubiera ensayado con el equipo SPT, que es más grande, más pesado y mucho más costoso. Por otro lado existen múltiples investigaciones de las correlaciones del ensayo del SPT con los parámetros de resistencia.

En este caso se ha considerado el caso más desfavorable; es decir que el suelo presenta únicamente características cohesivas, y tomando en cuenta la correlación de Terzaghi y Peck (1948) se ha conseguido finalmente estimar las características de resistencia del criterio de ruptura de Mohr-Coulomb para el suelo donde se ha ensayado el DPL. En la siguiente figura se presenta unas relaciones entre el número de golpes del SPT “ N_{SPT} ” y la resistencia a la compresión simple (C_u), y la correlación tradicional de Terzaghi y Peck (1948) entre la resistencia al corte no drenada y N_{SPT} en el caso de suelos cohesivos. (Ver tabla 3.10 y figura 3.17)

Tabla 3.10: relaciones entre N_{SPT} y la resistencia a la compresión simple (C_u).

Nspt	C_u Kg/cm ²
< 2	< 0.125
2 - 4	0.125 – 0.25
4 - 8	0.25 – 0.5
8 - 15	0.5 - 1
15 - 30	1 - 2
> 30	> 2

Fuente: geotecnia: planificación, supervisión y control

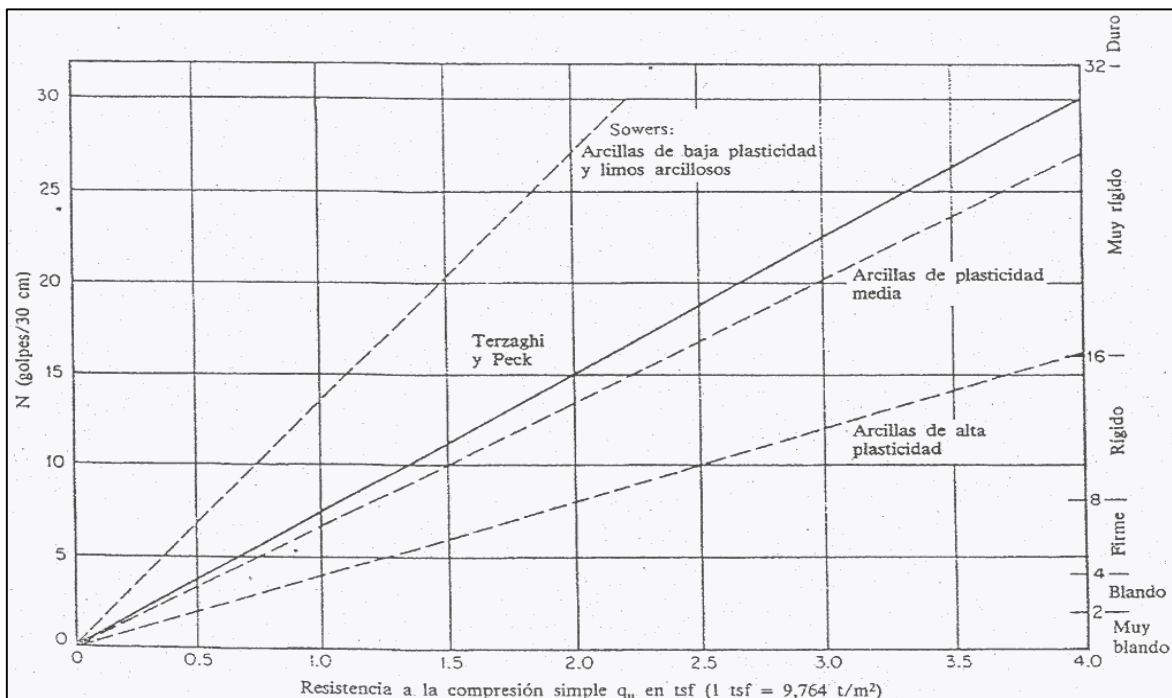


Figura 3.17: Correlación clásica de Terzaghi y Peck (1948) entre la resistencia al corte no drenada y N_{SPT} para suelos cohesivos.

Fuente: geotecnia, planificación, supervisión y control.

En relación a la roca se puede mencionar dos puntos. El primer punto es que el análisis de estabilidad será realizado en superficie, por tanto los parámetros de resistencia de la roca no influirán mucho en los resultados.

De los ensayos de geofísica (ensayo de refracción sísmica y MASW) se pueden obtener las características de propagación de ondas primarias y secundarias como se explicó en el capítulo correspondiente. Por otro lado se estima el peso específico de la roca.

Considerando el peso específico y la velocidad de onda de corte se puede obtener el módulo de corte y de V_s y V_p se obtiene la relación de Poisson. En conclusión de acuerdo a la teoría de la elasticidad con dos parámetros elásticos se puede modelar elásticamente la roca. Seguidamente se enuncia la relación de Poisson en función de las velocidades y luego la velocidad de onda de corte en función del módulo de corte y del peso específico a través de la densidad.

$$\nu = \frac{0.5(V_P/V_S)^2 - 1}{(V_P/V_S)^2 - 1}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Según la inspección in situ y los ensayos de campos directos e indirectos, se ha identificado cinco tipos de suelo/roca. De cada una de ellas se va a explicar cómo se obtuvieron los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb. Es importante recordar que los ensayos utilizados para la estimación de las características del suelo son de acuerdo a los ensayos más cercanos a la zona de trabajo. Estos materiales son denominados:

a) Suelo deslizado

Para el suelo deslizado se utilizó las calicatas C-01 y C-02, DPL-2 y DPL-5, además de la línea de refracción sísmica LS-02 y MASW-02. De los resultados del DPL-2 y DPL-5 se promedió los valores de cohesión, siendo 45 KPa (ver tabla 3.10). Por otro lado la presencia de material subanguloso se le asignó un ángulo de fricción mínimo de 0.25 grados que hace que la falla sea más profunda y no superficial. (Ver tabla 3.11)

Tabla 3.11: valores promedios de cohesión de DPL-02 y DPL-05

CORRELACIONES DPL-02				CORRELACIONES DPL-05		
N SPT	Φ (°) Suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo		N SPT	Φ (°) Suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo
1	-	0.04		8	-	0.30
1	-	0.04		3	-	0.11
1	-	0.04		3	-	0.11
6	-	0.23		3	-	0.11
16	-	0.60		11	-	0.41
10	-	0.38		13	-	0.49
14	-	0.53		19	-	0.71
19	-	0.71		16	-	0.60
36	-	1.35		25	-	0.94
				32	-	1.20
	Promedio	0.43			Promedio	0.50

Fuente: elaboración propia

Se muestra los DPL-02 y DPL-05 y los promedios: 43kPa y 50kPa, por ello se tomó 45kPa de cohesión.

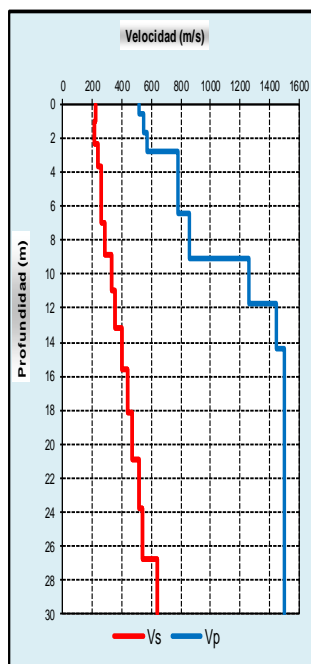
Del ensayo de geofísica N-02 se estimó el peso específico 18 KN/m³ y una rigidez promedio de 14000 KPa. Finalmente los parámetros del suelo deslizado están completamente argumentados. (Ver figura 3. 18)

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-02 & LS-02

Proyecto: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)
Coordenadas: 737823 E - 9306670 N
Fecha: JULIO_2018

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.



141.4

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ed (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ee (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm ²)
1	516	219	1.8	0.39	878.9	2443.9	3712.7	43.9	122.2	185.6
2	551	217	1.8	0.41	866.9	2441.1	4421.3	43.3	122.1	221.1
3	570	239	1.8	0.39	1051.4	2929.4	4568.9	52.6	146.5	228.4
4	781	257	1.8	0.44	1215.5	3498.6	9583.1	81.0	174.9	638.9
6	782	260	1.8	0.44	1236.9	3557.7	9592.8	82.5	177.9	639.5
8	855	287	1.8	0.44	1507.6	4332.3	11425.6	100.5	216.6	761.7
10	1264	333	1.8	0.46	2036.7	5958.4	26643.6	135.8	297.9	1776.2
12	1446	404	1.9	0.46	3160.5	9214.3	36336.6	210.7	460.7	2422.4
15	1500	436	1.9	0.45	3681.3	10704.6	38714.0	245.4	535.2	2580.9
18	1500	469	1.9	0.45	4260.0	12319.0	37942.4	355.0	1026.6	3161.9
24	1500	538	1.9	0.43	5611.7	16006.5	36140.2	467.6	1333.9	3011.7
30	1500	644	1.9	0.39	8028.3	22274.2	32918.0	669.0	1856.2	2743.2

Figura 3.18: Promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-02 y MASW-02

Fuente: elaboración propia

b) Suelo residual

En relación con el suelo residual se utilizó la data de los DPL-01 y DPL-04 además de la línea de refracción sísmica LS-01 y MASW-01. Como se muestra en el anexo correspondiente a las fotos en esta región no se presenta la bolonería subangulosa presentada talud más abajo, por ello no se ha considera ángulo de fricción interna. (ver tabla 3.12)

Tabla 3.12: valores promedios de cohesión de DPL-01 y DPL-04

CORRELACIONES DPL-01				CORRELACIONES DPL-04		
N SPT	Φ (°) Suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo		N SPT	Φ (°) Suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo
1	-	0.04		7	-	0.26
1	-	0.04		6	-	0.23
15	-	0.56		12	-	0.45
9	-	0.34		9	-	0.34
10	-	0.38		12	-	0.45
				12	-	0.45
				6	-	0.23
				15	-	0.56
				10	-	0.38
				3	-	0.11
				35	-	1.31
	Promedio	0.27			Promedio	0.35

Fuente: elaboración propia

Se muestra los DPL-01 y DPL-04 y los promedios: 27kPa y 35kPa, por ello se tomó 31kPa de cohesión.

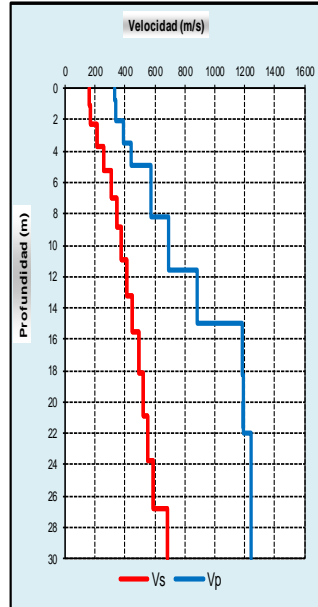
Del ensayo de geofísica N-01 se estimó el peso específico 18 kN/m³ y una rigidez promedio de 6700 kPa. Finalmente los parámetros del suelo residual están completamente argumentados. (Ver figura 3.19)

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-01 & LS-01

Proyecto: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Talud Superior)
Coordenadas: 737772 E - 9306630 N
Fecha: JULIO_2018

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.



67.9 kg/cm²

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ed (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ee (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm ²)
1	334	162	1.8	0.35	482.0	1297.8	1406.3	24.1	64.9	70.3
2	335	171	1.8	0.32	535.5	1417.9	1341.9	26.8	70.9	67.1
3	392	214	1.8	0.29	839.2	2161.7	1699.4	42.0	108.1	85.0
4	442	260	1.8	0.24	1236.9	3060.3	1940.2	82.5	153.0	129.3
6	570	307	1.8	0.30	1725.5	4473.4	3659.9	115.0	223.7	244.0
8	687	343	1.8	0.33	2157.8	5759.2	5800.8	143.9	288.0	386.7
10	884	377	1.9	0.39	2748.3	7636.6	11503.2	183.2	381.8	766.9
12	1186	447	1.9	0.42	3878.2	10991.4	22091.0	258.5	549.6	1472.7
15	1191	493	1.9	0.40	4707.4	13151.0	21247.3	313.8	657.5	1416.5
18	1191	519	1.9	0.38	5227.3	14456.5	20554.0	435.6	1204.7	1712.8
24	1242	591	1.9	0.35	6760.3	18307.2	20901.0	563.4	1525.6	1741.7
30	1242	682	2.0	0.28	9492.3	24380.7	18832.7	791.0	2031.7	1569.4

Figura 3.19: Promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-01 y MASW-01

Fuente: elaboración propia

c) Roca muy fracturada

Para la roca muy fracturada se utilizó el DPL-5 a partir de los 2 metros, además de la línea de refracción sísmica LS-02 y MASW-02. Del resultado del DPL-5 se promedió los valores de cohesión, siendo 70 kPa (según se muestra el anexo correspondiente). Por otro debido a la presencia de material confinado y bloques de roca de mayores tamaños se le asignó un ángulo de fricción de 10 grados.

Se muestra el DPL-05 el promedio: 70 kPa de cohesión. (Ver tabla 3.13)

Tabla 3.13: valores promedios de cohesión de DPL-5

CORRELACIONES DPL-05		
N SPT	Φ (°) Suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo
11	-	0.41
13	-	0.49
19	-	0.71
16	-	0.60
25	-	0.94
32	-	1.20
	Promedio	0.70

Fuente: elaboración propia

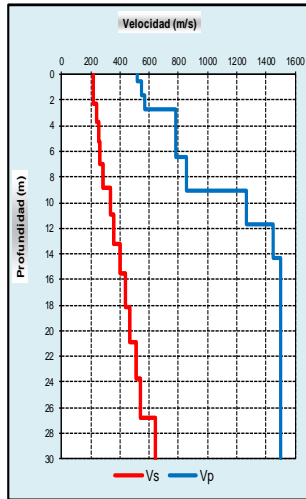
Del ensayo de geofísica N-02 se estimó el peso específico 19 kN/m³ y una rigidez promedio de 34000 kPa. Finalmente los parámetros del suelo deslizado están completamente argumentados. (Ver figura 3.20)

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-02 & LS-02

Proyecto: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
 Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)
 Coordenadas: 737823 E - 9306670 N
 Fecha: JULIO_2018

Realizado: D.E.G.M.
 Revisado: L.L.G.



337.7

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ed (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ee (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm ²)
1	516	219	1.8	0.39	878.9	2443.9	3712.7	43.9	122.2	185.6
2	551	217	1.8	0.41	866.9	2441.1	4421.3	43.3	122.1	221.1
3	570	239	1.8	0.39	1051.4	2929.4	4568.9	52.6	146.5	228.4
4	781	257	1.8	0.44	1215.5	3498.6	9583.1	81.0	174.9	638.9
6	782	260	1.8	0.44	1236.9	3557.7	9592.8	82.5	177.9	639.5
8	855	287	1.8	0.44	1507.6	4332.3	11425.6	100.5	216.6	761.7
10	1264	333	1.8	0.46	2036.7	5958.4	26643.6	135.8	297.9	1776.2
12	1446	404	1.9	0.46	3160.5	9214.3	36336.6	210.7	460.7	2422.4
15	1500	436	1.9	0.45	3681.3	10704.6	38714.0	245.4	535.2	2580.9
18	1500	469	1.9	0.45	4260.0	12319.0	37942.4	355.0	1026.6	3161.9
24	1500	538	1.9	0.43	5611.7	16006.5	36140.2	467.6	1333.9	3011.7
30	1500	644	1.9	0.39	8028.3	22274.2	32918.0	669.0	1856.2	2743.2

Figura 3.20: promedio del módulo de elasticidad y la estimación del peso específico de la línea LS-02 y MASW-02

Fuente: elaboración propia

d) Roca competente

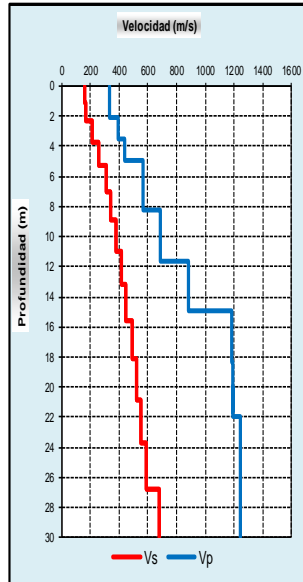
La llamada roca competente no puede ser estimada con inspecciones directas debido a su profundidad, siempre y cuando no exista afloramiento cercano. En este caso la investigación se basará utilizando los promedios de las líneas de geofísica LS-01 y MASW-01 y LS-02 y MASW-02. Del promedio de los módulos de elasticidad se llega a la conclusión que la rigidez es 122000 KPa. (Ver figura 3.21 y 3.22)

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-01 & LS-01

Proyecto: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Talud Superior)
Coordenadas: 737772 E - 9306630 N
Fecha: JULIO_2018

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.



1058.5

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m3)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm2)	Módulo de Young Ed (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm2)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm2)	Módulo de Young Ee (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm2)
1	334	162	1.8	0.35	482.0	1297.8	1406.3	24.1	64.9	70.3
2	335	171	1.8	0.32	535.5	1417.9	1341.9	26.8	70.9	67.1
3	392	214	1.8	0.29	839.2	2161.7	1699.4	42.0	108.1	85.0
4	442	260	1.8	0.24	1236.9	3060.3	1940.2	82.5	153.0	129.3
6	570	307	1.8	0.30	1725.5	4473.4	3659.9	115.0	223.7	244.0
8	687	343	1.8	0.33	2157.8	5759.2	5800.8	143.9	288.0	386.7
10	884	377	1.9	0.39	2748.3	7636.6	11503.2	183.2	381.8	766.9
12	1186	447	1.9	0.42	3878.2	10991.4	22091.0	258.5	549.6	1472.7
15	1191	493	1.9	0.40	4707.4	13151.0	21247.3	313.8	657.5	1416.5
18	1191	519	1.9	0.38	5227.3	14456.5	20554.0	435.6	1204.7	1712.8
24	1242	591	1.9	0.35	6760.3	18307.2	20901.0	563.4	1525.6	1741.7
30	1242	682	2.0	0.28	9492.3	24380.7	18832.7	791.0	2031.7	1569.4

Figura 3.21: módulo de elasticidad promedio de la línea LS-01 - MASW-01

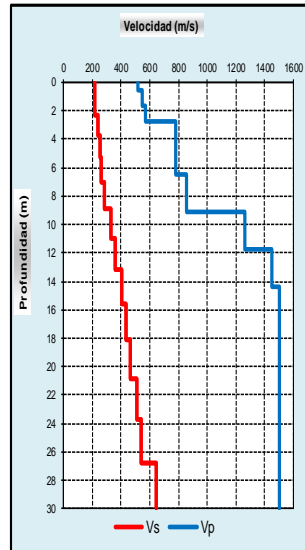
Fuente: elaboración propia

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-02 & LS-02

Proyecto: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)
Coordenadas: 737823 E - 9306670 N
Fecha: JULIO_2018

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.



1405.5

Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m ³)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ed (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm ²)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm ²)	Módulo de Young Ee (Kg/cm ²)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm ²)
1	516	219	1.8	0.39	878.9	2443.9	3712.7	43.9	122.2	185.6
2	551	217	1.8	0.41	866.9	2441.1	4421.3	43.3	122.1	221.1
3	570	239	1.8	0.39	1051.4	2929.4	4568.9	52.6	146.5	228.4
4	781	257	1.8	0.44	1215.5	3498.6	9583.1	81.0	174.9	638.9
6	782	260	1.8	0.44	1236.9	3557.7	9592.8	82.5	177.9	639.5
8	855	287	1.8	0.44	1507.6	4332.3	11425.6	100.5	216.6	761.7
10	1264	333	1.8	0.46	2036.7	5958.4	26643.6	135.8	297.9	1776.2
12	1446	404	1.9	0.46	3160.5	9214.3	36336.6	210.7	460.7	2422.4
15	1500	436	1.9	0.45	3681.3	10704.6	38714.0	245.4	535.2	2580.9
18	1500	469	1.9	0.45	4260.0	12319.0	37942.4	355.0	1026.6	3161.9
24	1500	538	1.9	0.43	5611.7	16006.5	36140.2	467.6	1333.9	3011.7
30	1500	644	1.9	0.39	8028.3	22274.2	32918.0	669.0	1856.2	2743.2

Figura 3.22: módulos de elasticidad promedio de la línea LS-02 - MASW-02

Fuente: elaboración propia

Las propiedades de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb son asumidos de acuerdo a correlaciones indicadas en la bibliografía; sin embargo estas no tienen influencia en el valor de la estabilidad en superficie.

e) Roca

Análogamente al caso anterior se tiene los parámetros de rigidez y de resistencia de acuerdo al criterio de ruptura de Mohr Coulomb.

Finalmente se puede establecer todos los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb para todos los suelos. Los mismos que se enuncian en la siguiente tabla. (Ver tabla 3.14)

Tabla 3.14: Resumen de parámetros de resistencia, peso específico, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Tipo de material		Peso específico (KN/m3)	Cohesión (KPa)	Angulo de fricción interna (°)	Módulo de elasticidad (KPa)	Relación de Poisson
Suelo deslizado		18.0	45.0	0.25	14000	0.3
Suelo residual		18.0	31.0	0.0	6700	0.3
Roca muy alterada		19.0	70.0	10.0	34000	0.3
Roca competente		21.0	34.0	45.0	122000	0.3
Roca		22.0	50.0	50.0	200000	0.3

Fuente: elaboración propia

En la figura siguiente se muestra el perfil geotécnico / geofísico y los tipos de suelo / roca establecidos por el especialista geotécnico y el geólogo. (Ver figura 3.23)

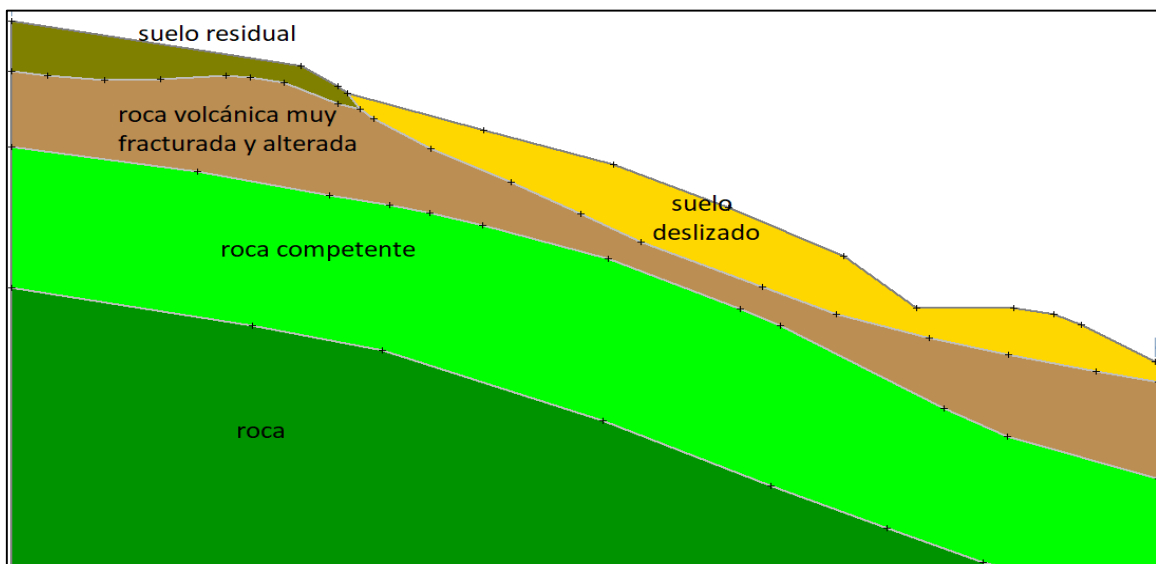


Figura 3.23: Perfil estratigráfico en la progresiva km 56+180

Fuente: elaboración propia

3.5. ANÁLISIS DE LOS METODOS DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

El objetivo general de esta investigación es la comparación de los análisis de estabilidad de un talud de un sector crítico tanto en valores de superficie de falla como en factores de seguridad.

3.5.1. Método de equilibrio límite

En los últimos años hasta la actualidad siempre se le ha dado preferencia al uso de los métodos clásicos de equilibrio límite para el análisis de la estabilidad debido a su simplicidad y el valor resultante del factor de seguridad no dista mucho de lo real. La pregunta es la siguiente ¿cómo saber cuánto es el real factor de seguridad? Como respuesta a esto se hicieron muchas pruebas de un talud en escala reducida en el cual con sensores, deflectómetros, etc, se fueron “calibrando” las metodologías y validando otras nuevas. No obstante, este tipo de método no requiere ningún tipo de relación esfuerzo-deformación.

La principal cualidad de esta metodología para conseguir el factor de seguridad (FS) es que se asume la superficie de falla por el cual suelo va a deslizar hipotéticamente. Sin embargo, cuando se dice que el suelo se encuentra cercano a la falla inminente, se referencia a que las fuerzas de corte son iguales a la resistencia cortante en ese plano de falla, que es justo cuando el FS es igual a 1.00. De esta manera se deduce que la masa superior “se mueve” por encima de la inferior a través del plano de falla hipotético mencionado.

Este cálculo en el que no interviene ningún análisis que relacione al esfuerzo con la deformación puede resultar no muy útil cuando el requerimiento sea de otro, como por ejemplo desplazamientos. En muchos casos se requiere de suma importancia saber además de la estabilidad, los desplazamientos de una pendiente si se encuentran en un rango permisible. Ejemplificando lo anteriormente mencionado, para las presas es importante conocer los desplazamientos en diferentes altitudes del talud.

Por otro lado, se define el FS, como el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones que presenta el talud en la realidad, y las condiciones que conllevan a su falla. El FS es el coeficiente mínimo de todos los coeficientes de seguridad relacionados con todas las superficies de falla posibles.

$$FS = \frac{\text{Resistencia al Corte}}{\text{Esfuerzo Cortante}}$$

$$FS = \frac{\int \tau_R ds}{\int \tau ds}$$

Donde:

τ_R Es la resistencia al corte máxima que se puede movilizar a lo largo de la superficie hipotética de falla que depende de los parámetros de resistencia del suelo.

τ es la resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie potencial de falla, (la fuerza actuante se encuentra en dependencia de las diferentes condiciones externas ya mencionadas anteriormente).

ds es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie de falla.

Cuando se asume que las superficies de falla son circulares existe un centro de giro y los momentos puede expresarse de la siguiente forma.

$$FS = \frac{\text{Momento Resistente}}{\text{Momento Actuante}}$$

Los métodos de cálculo a través de equilibrio límite pueden resumirse mediante el siguiente esquema. (Ver figura3.24)

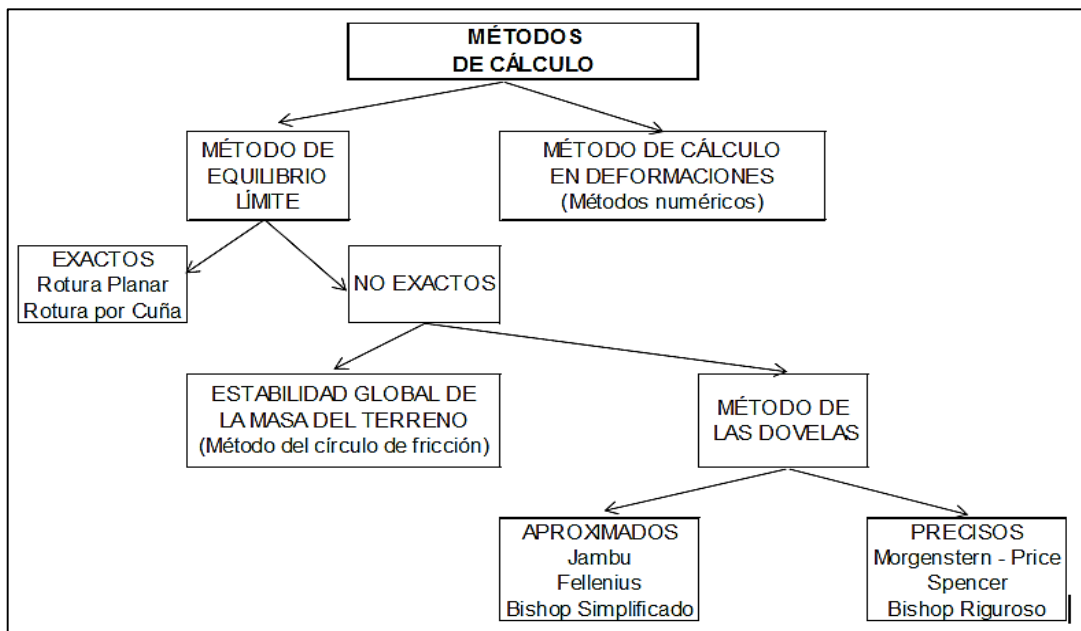


Figura 3.24: Clasificación de los métodos de equilibrio límite para estabilidad de taludes.

Fuente: Instituto Tecnológico Geominero de España, 1986.

Para la utilización del método de equilibrio límite se solicitan las siguientes etapas de cálculo:

- Definir el mecanismo de falla cinemáticamente permisible. Comúnmente se considera para la superficie de falla, geometrías simples, como pueden ser rectas o arcos de circunferencias.
- Partiendo del equilibrio estático, se manifiestan correlaciones entre las fuerzas actuantes en el problema integral. Distinguiendo entre las fuerzas que incitan al desequilibrio (peso, cargas externa, etc.), y las fuerzas internas resistentes. Las ecuaciones del equilibrio necesarios que se deben realizar en el problema son:
 - Equilibrio estático de fuerzas horizontales y verticales.
 - Equilibrio de momentos respecto a un punto de ubicación arbitrario.
- Se calcula la estabilidad del medio a partir del concepto del FS.
- Mediante cálculos de iteración se va hallando el mínimo valor del FS que se va asociando con la superficie de falla menos favorable. (Alonso, 1989).

De esta forma para el estudio de los métodos de análisis se puede previamente distinguir tres grupos grandes:

- El método de análisis que considera una superficie de desplazamiento paralela al talud.
- Una superficie de falla circular de todo el elemento sin ninguna partición.
- Mediante la discretización en dovelas.

3.5.1.1. Análisis de talud infinito

Cuando se manifiesta una deficiencia o falla paralela a la superficie de la pendiente del suelo, es decir al talud, a un calado no muy grande y la longitud de la línea de deslizamiento es larga en comparación con su espesor, es posible utilizar en forma aproximada, el análisis de talud infinito. En muchos taludes no naturales es común la presencia de fallas de talud infinito durante los análisis de estabilidad.

El método de análisis de talud infinito es un procedimiento rápido y simple, que tiene por

finalidad la estimación del FS de un talud, suponiendo un talud largo con una capa delgada de suelo, en el cual cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud. En esta se asume en el suelo un comportamiento isotrópico, homogéneo, e infinitamente largo, además de lo mencionado anteriormente, la superficie de falla es siempre paralela al talud. (ver figura 3.25)

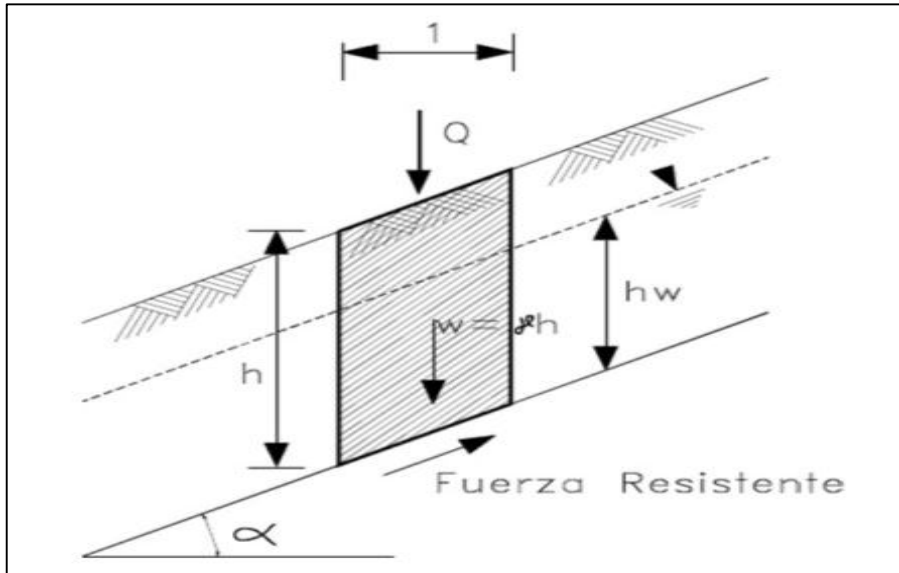


Figura 3.25: Diagrama de análisis, método del talud infinito.
Fuente: (Alonso, 1989)

Por lo tanto si se asume un talud uniforme y largo, en el cual la falla no es muy profunda, los efectos de borde son despreciables y el FS puede estimarse para una unidad de área haciendo uso del criterio de Mohr-Coulomb.

Para un talud con cohesión igual a cero se tendría el FS:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

En el caso de suelos con cohesión:

$$FS = \frac{C + (\gamma h - \gamma_{\alpha} h_{\omega}) \cos \alpha \tan \phi}{\gamma h \sin \alpha}$$

3.5.1.2. Método de las dovelas

Este procedimiento es extensamente conocido y consiste en discretizar el medio continuo que es el talud en dovelas, que independientemente pasan a ser un sólido rígido. Cada una

de las subdivisiones es sometida al equilibrio estático y al equilibrio de momentos según el método de análisis empleado. La figura representativa se muestra a continuación. (Ver figura 3.26)

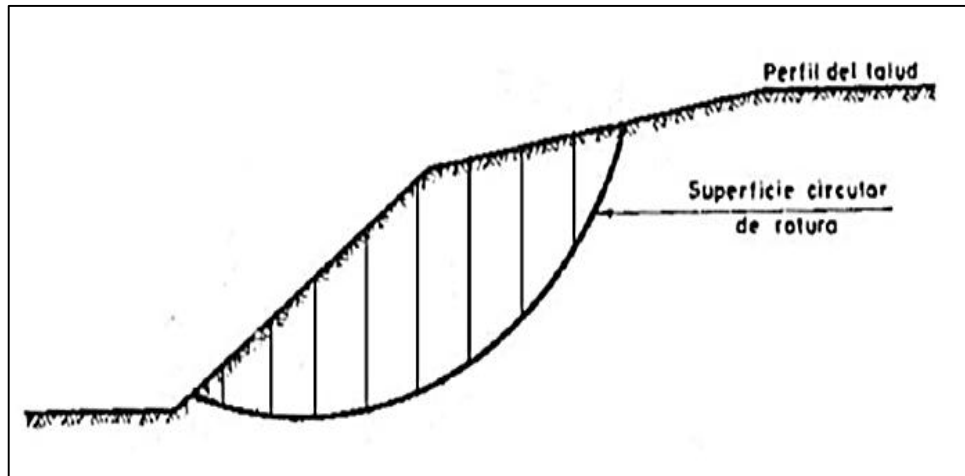


Figura 3.26: Representación de la división en dovelas de la masa del terreno potencialmente desplazado.

Fuente: (Alonso, 1989)

Por medio de la metodología de las dovelas se consigue una mejor estimación a la distribución de esfuerzos normales a lo largo de la SDF, la cual estará influenciada por la altura del suelo que haya en cada dovela. Al mismo tiempo que se facilita el análisis de suelos en el que el material es no homogéneo, debido a que únicamente es necesario definir las dovelas de manera apropiada al medio continuo.

Se emplean dos hipótesis simplificadoras a las dovelas: la primera consiste en considerar que estas son suficientemente delgadas para poder asumir que la base de cada dovela es recta; y lo segundo, se asume que la base de cada dovela está afectada únicamente por un tipo de material.

Se muestra a continuación un resumen de las metodologías de análisis de estabilidad de taludes más comunes y las consideraciones para el equilibrio en cada uno de ellos. (Ver tabla 3.15).

Tabla 3.15: Ecuaciones de equilibrio satisfechas por los métodos de equilibrio límite más usados.

Métodos de Equilibrio Límite	Equilibrio Vertical de Fuerzas	Equilibrio Horizontal de Fuerzas	Equilibrio de Fuerzas	Equilibrio de Momentos
Fellenius (ordinario) - 1927	Si	No	No	Si
Bishop Modificado - 1955	Si	No	No	Si
Jambu Generalizado - 1968	Si	Si	Si	Si*
Spencer - 1967	Si	Si	Si	Si
Morgenster - Price - 1965	Si	Si	Si	Si
GLE	Si	Si	Si	Si
Corps of Engineers - 1970	Si	Si	Si	No
Lowe- Karafiath - 1960	Si	Si	Si	No
Sama - 1973	Si	Si	Si	Si

Fuente: (Alonso, 1989)

La cantidad de ecuaciones de equilibrio estático que se encuentran disponibles es menor que el número de variables desconocidas; es decir incógnitas, por tanto los métodos que no son rigurosos desde la perspectiva de equilibrio de momentos o fuerzas, por lo que se usan hipótesis adicionales para resolver el problema. Los métodos que cumplen todas las ecuaciones de equilibrio y las suposiciones que se integran, en general, no afectan significativamente el FS. En el caso de métodos que solo satisfacen el equilibrio de fuerzas y no el de momentos, el FS es perturbado por las suposiciones de angularidad de las fuerzas entre dovelas. Por ello estos métodos no presentan siempre una buena precisión como los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio; es decir las de fuerzas y de momento.

3.5.1.3. Análisis en condición estática

Para la ejecución del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite primero se deberá tener la sección a analizar. En este caso la sección corresponde a la progresiva km 56+180. Con esta información en coordenadas se procede a importarlas desde el programa Slide V 06. Adicionalmente se ingresa los parámetros del análisis de estabilidad; es decir los métodos de análisis que se utilizarán, además de datos del proyecto.

En la figura se observa a la izquierda, la importación de las coordenadas, mientras que en la derecha se ve los datos generales de ingreso. (Ver figura 3.27)

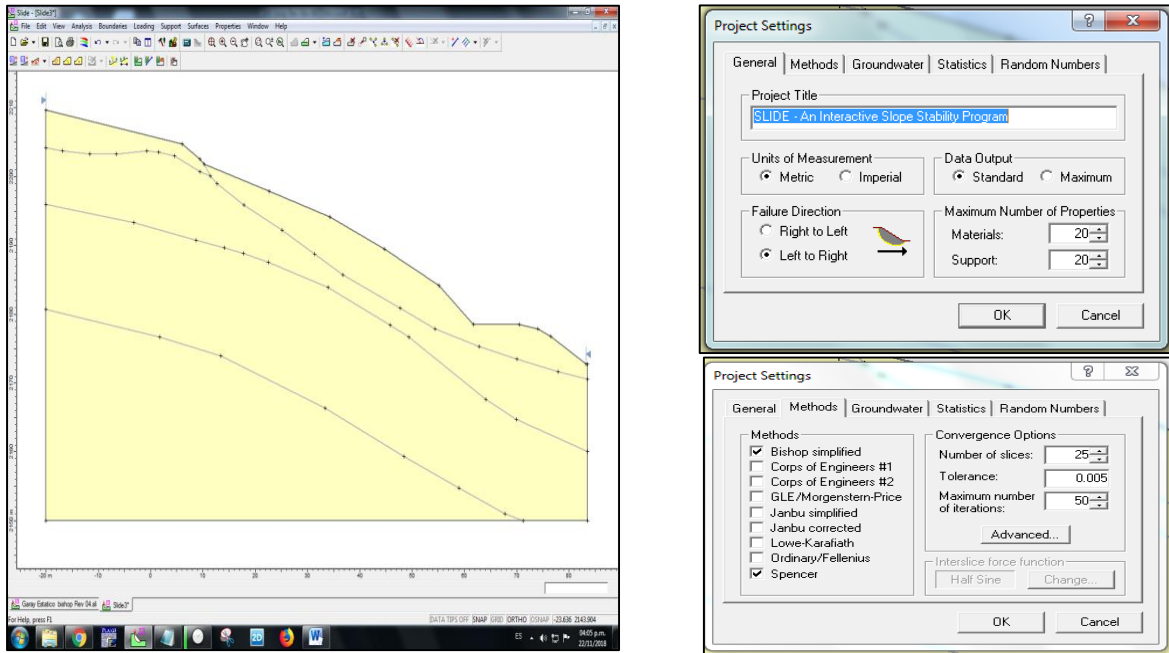


Figura 3.27: introducción de datos y coordenadas.
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

Se asigna parámetros mecánicos y físicos a los diferentes materiales en relación con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Luego se guarda el archivo y con el icono indicado se corre el programa.

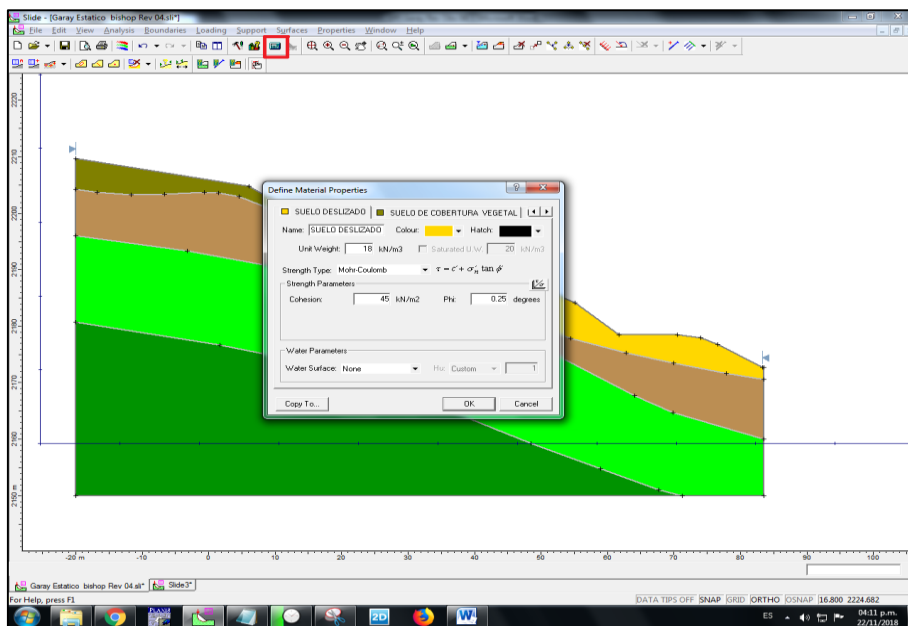


Figura 3.28: asignación de parámetros físicos y mecánicos
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

Luego se corre el programa, el cual hará los cálculos por el método de las dovelas y se muestra también la superficie de falla con el valor del factor de seguridad. (Ver 3.29).

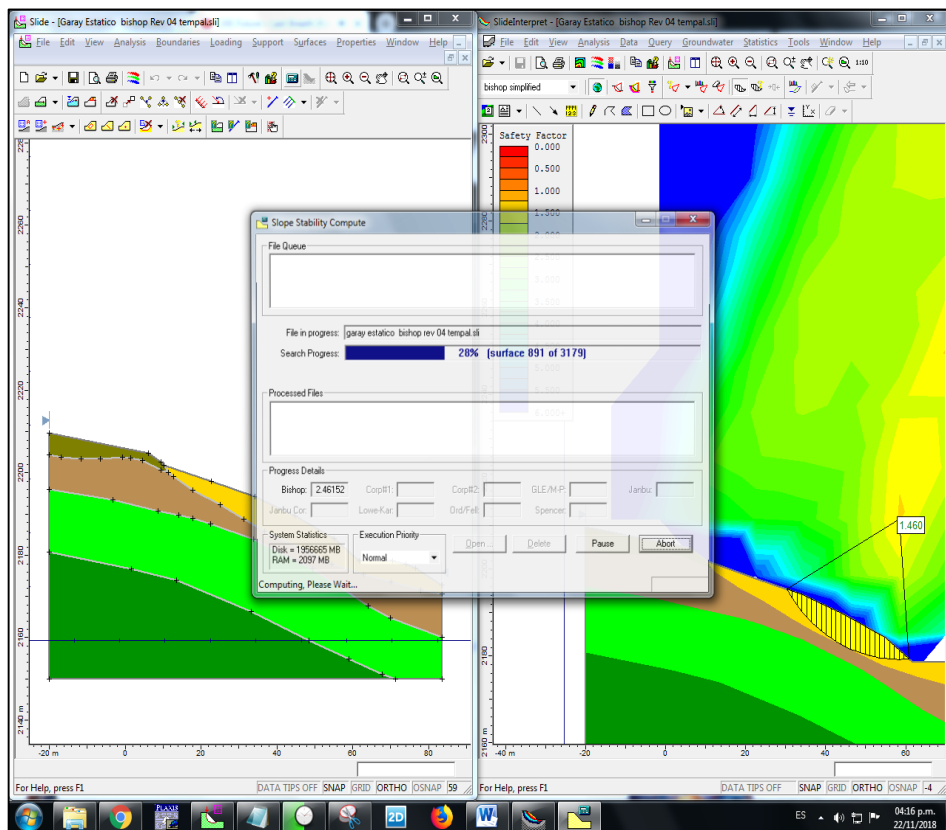


Figura 3.29: calculo por el método de las dovelas
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

3.5.1.3.1. Método de Bishop simplificado

El método de análisis de estabilidad de taludes propuesta por Bishop es la misma que todas las metodologías de equilibrio límite. Esta se basa en el análisis de equilibrio de fuerzas estáticas y/o momentos en las dovelas. Las dovelas se eligen de acuerdo a la geometría del problema. Particularmente en el método de Bishop se analiza la estabilidad de un talud con superficie de falla tipo circular, tomando en consideración el efecto de las fuerzas entre dovelas. Debido a que el método de las dovelas no tiene mucha precisión para suelos predominantemente friccionantes, el investigador Bishop (1955) sugirió otra metodología originalmente desarrollado para superficies circulares, el cual considera la condición de equilibrio entre las fuerzas de interacción verticales actuantes entre las dovelas, como en los suelos que presentan fricción, el mecanismo de resistencia al corte depende de los esfuerzos confinantes, al considerar la condición de equilibrio de fuerzas en sentido vertical la determinación de las fuerzas normales se hace más precisa.

El método de Bishop nos brinda un Factor de seguridad de 1.460 (ver figura 3.30)

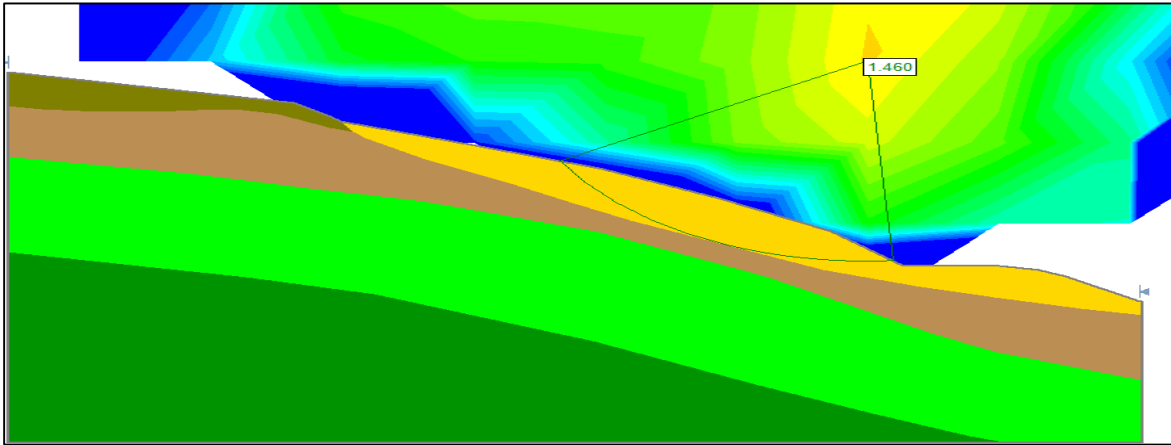


Figura 3.30: Análisis Estático por equilibrio límite, Bishop.
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

3.5.1.3.2. Método de Spencer

El método de Spencer es uno de los procedimientos del MEL más rigurosos debido a que este cumple todas las condiciones de equilibrio, además de que su uso es aplicable tanto para superficies de falla circulares o no. Esta asume que la interacción entre dovelas actúa como fuerza de empuje con un ángulo (θ) de inclinación constante, por lo que a través de iteraciones, se analiza tanto el equilibrio de momentos como de fuerzas en función a ese ángulo (θ), hasta alcanzar la convergencia hacia un único valor, calculando de esta manera el FS. Es aplicable tanto a superficies de desplazamientos circulares como no circulares.

El método de Spencer proporciona un Factor de seguridad de 1.475 (ver figura 3.31).

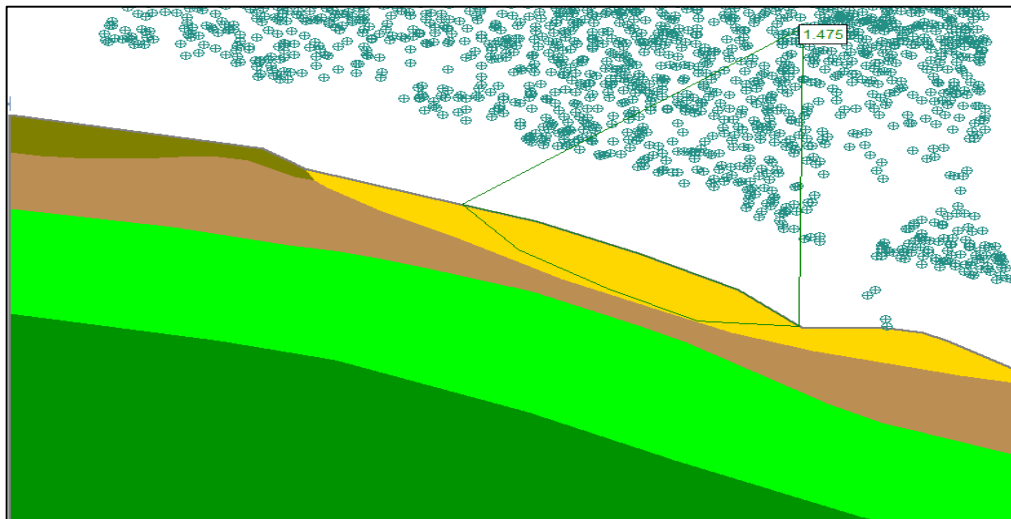


Figura 3.31: Análisis Estático por equilibrio límite, Spencer.
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

3.5.1.4. Análisis pseudo- estático

3.5.1.4.1. Método de Bishop Simplificado

Las cargas Pseudo estáticas en todos los métodos de las dovelas se aplican como una carga proporcional a las fuerzas normales multiplicadas por el coeficiente pseudo-estático. Por ejemplo si el peso de una dovela sumado con la suma de las otras componentes verticales de la interacción entre dovelas resulta 200 kN/m² y el coeficiente pseudo-estático es 0.18, entonces la fuerza horizontal hacia el talud que va a representar la carga del sismo es 36 kN/m². Este criterio se cumple para tanto el método Bishop como Spencer.

El método de Bishop proporciona un Factor de seguridad de 1.060 (ver figura 3.32)

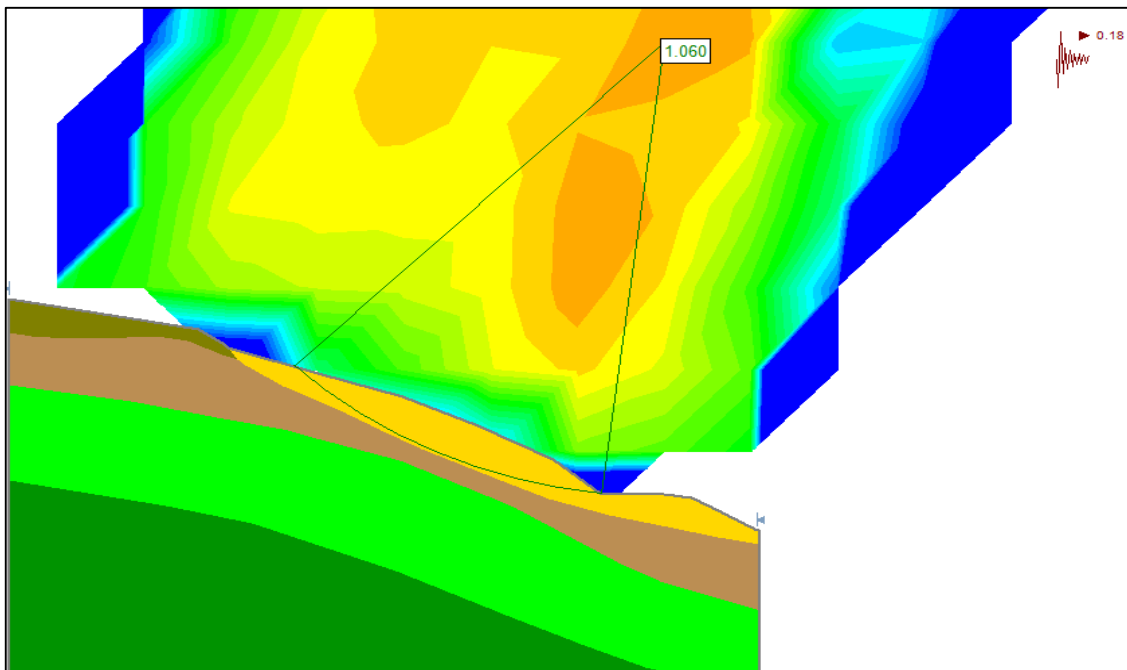


Figura 3.32: Análisis pseudo-estático por equilibrio límite. Bishop simplificado
Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

3.5.1.4.2. Método de Spencer

Las cargas Pseudo estáticas en todos los métodos de las dovelas se aplican como una carga proporcional a las fuerzas normales multiplicadas por el coeficiente pseudo-estático. Por ejemplo si el peso de una dovela sumado con la suma de las otras componentes verticales de la interacción entre dovelas resulta 200 kN/m² y el coeficiente pseudo-estático es 0.18, entonces la fuerza horizontal hacia el talud que va a representar la carga del sismo es 36 kN/m². Este criterio se cumple para tanto el método Bishop como Spencer

El método de Spencer proporciona un Factor de seguridad de 1.077 (ver figura 3.33).

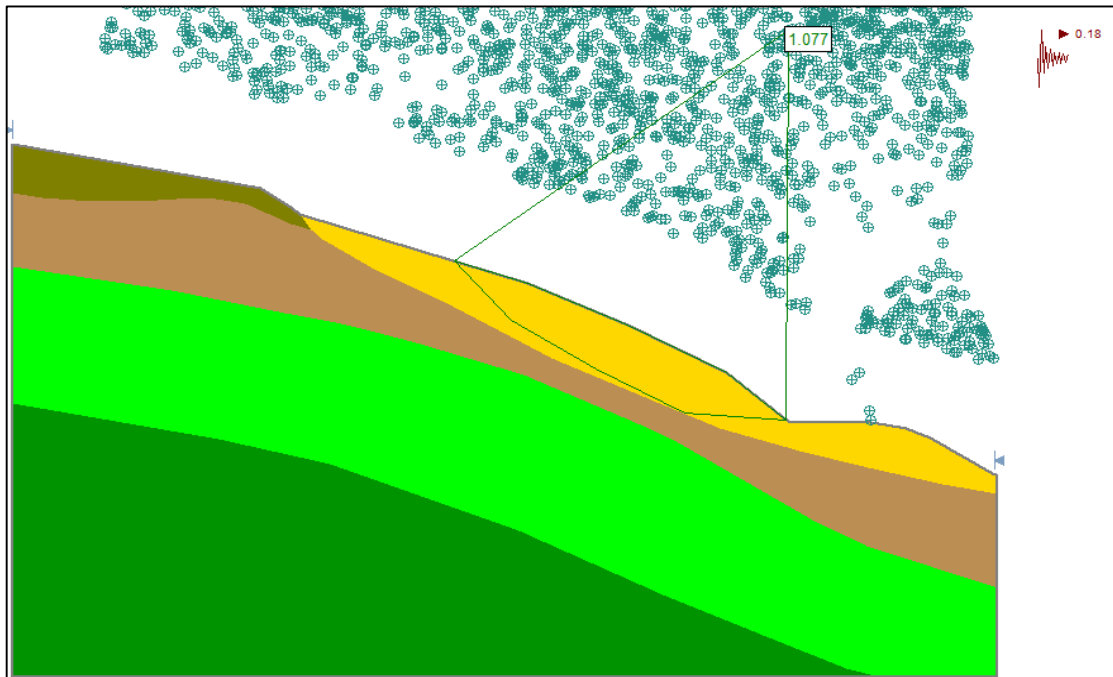


Figura 3.33: Análisis Pseudo-Estático por equilibrio límite, Spencer.

Fuente: elaboración propia adaptado del software SLIDE.

3.5.2. Método de elementos finitos

3.5.2.1. Proceso del método de elementos finitos

- Discretizar el medio continuo (1D, 2D, 3D) en elementos finitos de la geometría elegida que puede ser linear, triangular, cuadrangular, etc.
- Enunciar las propiedades de cada elemento. En problemas de esfuerzos, esto significa determinar cargas nodales asociadas a todos los estados de deformación permitidos de cada elemento. En problemas de flujo, esto es determinar cargas hidráulicas asociadas con todos los campos de velocidad permitidos en el elemento.
- Ensamblaje o montaje de los elementos para obtener el modelo discretizado (en elementos finitos) del continuo.
- Aplicar las cargas conocidas (en problemas de esfuerzo, fuerzas, o momentos nodales, en problemas de flujo, flujo prescrito).
- Especificar como el modelo está sustentado (apoyos externos). En problemas de esfuerzo esto necesita conocer los valores de desplazamientos en ciertos puntos nodales (en general iguales a cero). En problemas de flujo, esto implica conocer los valores de carga hidráulica en determinados puntos nodales.

- f) Solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas resultante para calcular todos los grados de libertad, (desplazamientos o cargas hidráulicas) desconocidas.
- g) Hallar las cantidades secundarias. En problemas de esfuerzos, determinar valores de esfuerzo y deformación con auxilio de los desplazamientos nodales obtenidos en el paso (f). En el caso de flujo, determinar el campo de velocidades en el elemento con auxilio de los resultados encontrados en el paso anterior.

3.5.2.2. Idealización de un medio continuo

El inicio de la idealización consiste en la subdivisión del medio continuo en un número finito de elementos. El elemento triangular de 15 nudos fue escogido para trabajar en la presente investigación. Dicho sea de paso en esta investigación se usará el MEF basado en la formulación variacional; es decir la minimización de la energía potencial. Para ello se utilizó el auxilio de un programa computacional llamado PLAXIS V8.5. (Ver figura 3.34).

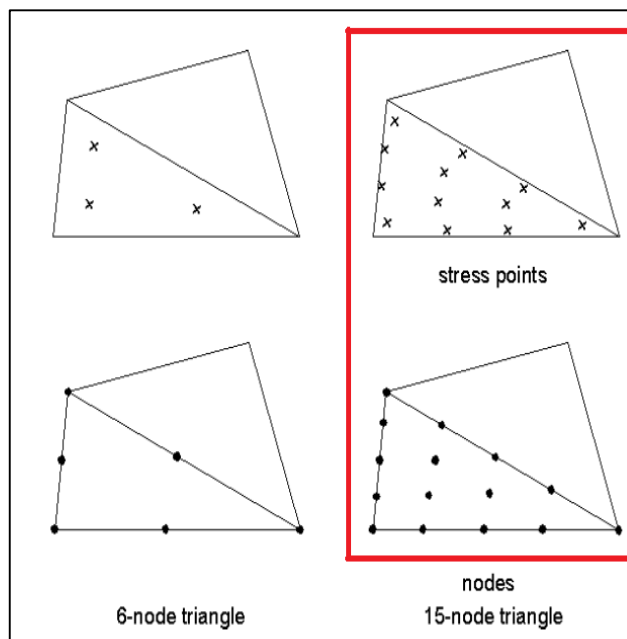


Figura 3.34: Elemento triangular con 15 nodos y 12 puntos de gauss
Fuente: (Plaxis Manual)

3.5.2.3. Consideraciones teóricas del método de elementos finitos: requerimientos para la solución

Generalmente la solución teórica deberá satisfacer: el equilibrio, la compatibilidad, el comportamiento constitutivo del material, y condiciones de borde (fuerzas y desplazamiento). Cada una de estas consideraciones será ampliada a continuación.

✓ Equilibrio

Para cuantificar cómo las fuerzas son transmitidas mediante el medio continuo se utiliza el concepto de esfuerzo (fuerza por unidad de área). La magnitud y la dirección del esfuerzo y la forma del que este varía espacialmente indican como las fuerzas son transmitidas. Sin embargo estos esfuerzos no pueden variar azarosamente, existen algunas reglas.

Previamente a la consideración del concepto de esfuerzo, un ejemplo análogo del ejercicio puede ser el flujo de agua a través de una cisterna llena de arena como se aprecia en la siguiente figura. La cisterna llena de arena tiene una entrada y dos salidas. La figura muestra vectores de velocidad del agua en puntos discretos dentro del tanque. El tamaño de las flechas representa la magnitud de la velocidad, tanto que su orientación muestra la dirección del flujo. Debido a la cercanía de la salida de agua del lado izquierdo, mayor cantidad de agua fluye en esa dirección que en la salida del lado derecho. Como era de esperarse el flujo es mucho menor en las regiones A, B y C. (ver figura 3.35)

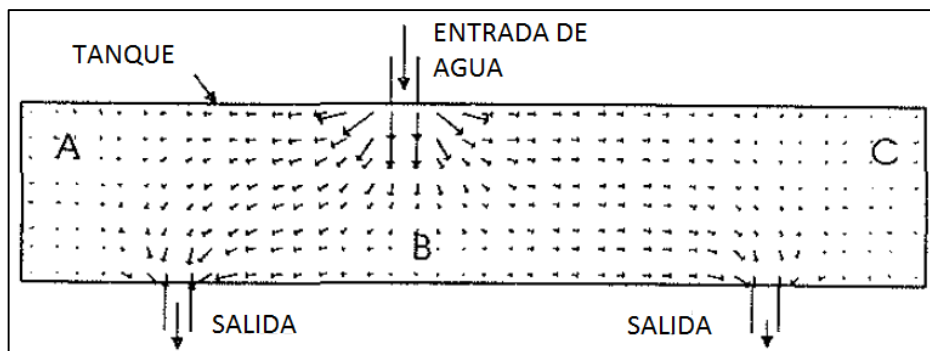


Figura 3.35: Trayectoria de flujo de agua en una cisterna llena de arena.

Fuente:(Potts, Zdravkovic, 1999)

Parecido al ejemplo anterior, en el caso de una viga simplemente apoyada en dos extremos (dos reacciones) y cargada mediante una fuerza de magnitud “L” y sentido como se muestra en la siguiente figura. Cuando se resuelve el sistema de equilibrio las reacciones deben ser: $L/3$ y $2L/3$. No obstante, no es claro cómo el esfuerzo es transmitido a través de la viga, del mismo modo no es posible ver esa transferencia de carga de “L” hacia los apoyos. Los esfuerzos son esencialmente cantidades ficticias. De este mismo ejemplo, la forma mediante el esfuerzo principal mayor es transmitido a través de la viga es mostrada en la figura siguiente, donde la magnitud de la flecha representa la magnitud del esfuerzo y la orientación la dirección de la transmisión. (Ver figura 3.36)

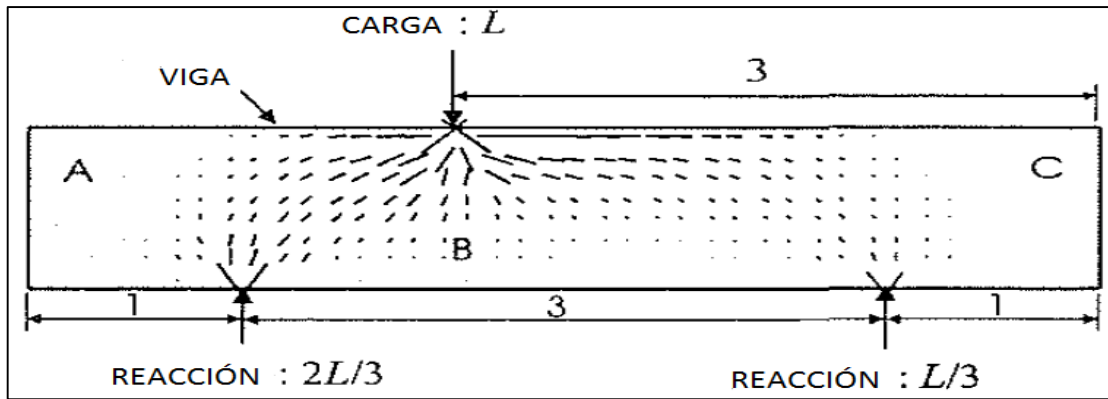


Figura 3.36: Trayectoria de esfuerzos transmitidos a través de una viga.

Fuente: (Potts, Zdravkovic, 1999)

Mientras que la velocidad del flujo es un vector con tres componentes cada uno de ellos en una dirección de cada eje de coordenadas cartesianas, el esfuerzo es un tensor que consiste en seis componentes. Así como hay reglas que gobiernan el comportamiento del flujo a través de la cisterna, hay reglas que gobiernan la forma en el cual los componentes de esfuerzo varían a través de la viga de concreto. Todos los esfuerzos que se transmiten (excepto el peso propio) deben seguir las siguientes ecuaciones (Timoshenko y Goodier (1951): (ver figura 3.37)

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \gamma = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \gamma = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \gamma = 0$$

(Ecuaciones de equilibrio)

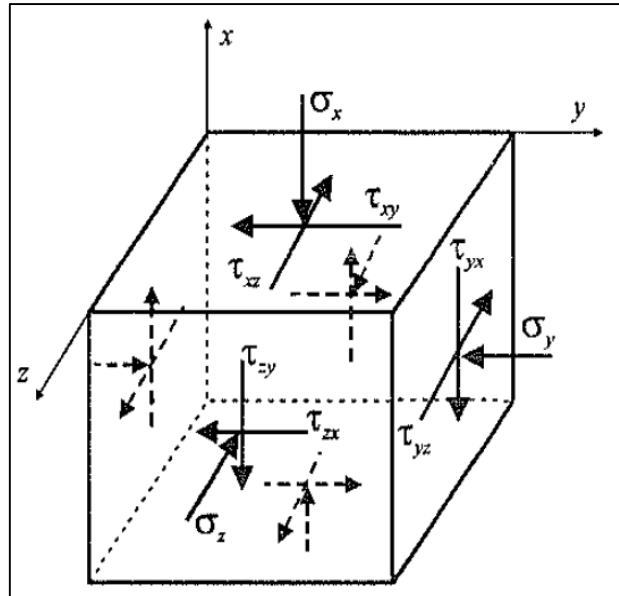


Figura 3.37: Esfuerzos en un elemento típico.
Fuente: (Potts, Zdravkovic, 1999)

Se debe considerar lo siguiente:

- ✓ El peso propio γ , actúa en la dirección X.
- ✓ Los esfuerzos de compresión son positivos.
- ✓ El equilibrio de las ecuaciones anteriores (ecuaciones de equilibrio) están se encuentran en términos de esfuerzos totales.
- ✓ Los esfuerzos deben satisfacer las condiciones de borde.

- **Compatibilidad**

La compatibilidad física está relacionada con la conexión entre elementos finitos y que no se traslapen unos con otros ni existan orificios. El razón de la compatibilidad puede ser explicada si se considera un elemento tipo losa compuesto a su vez por elementos discretos como se aprecia en la figura 3.28. Luego de la aplicación de una deformación los elementos losa pueden quedar como se muestra en la figura central, con espacios entre ellas. Entonces esta configuración puede representar falla o ruptura. Alternativamente la deformación total de la geometría podría ser como la figura de la derecha, con todos los elementos losa unidos (no agujeros ni traslapes). Esta situación representa una deformación compatible, por tanto la compatibilidad física está garantizada.

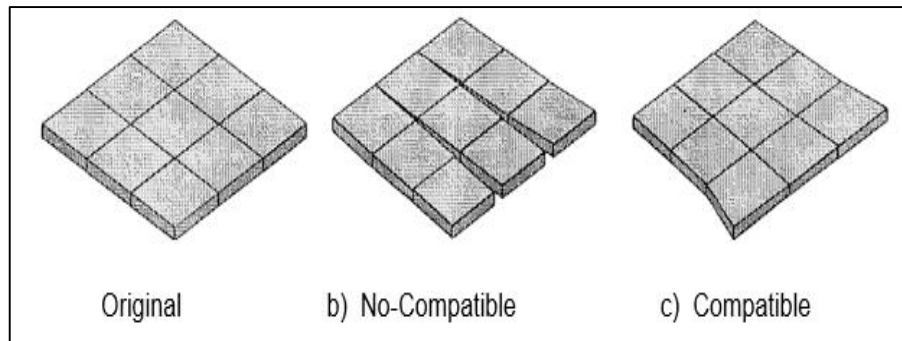


Figura 3.38: Modos de deformación.

Fuente: (Potts, Zdravkovic, 1999)

La interpretación física descrita de compatibilidad puede ser expresada matemáticamente, si se considera la definición de las deformaciones. Si los desplazamientos son definidos mediante funciones u , v , w en los ejes x , y , z respectivamente, las deformaciones (considerando la teoría de pequeñas deformaciones y convencionalmente positivo el signo cuando hay compresión) son definidas como (Timoshenko y Goodier (1951)):

$$\epsilon_x = -\frac{\partial u}{\partial x}; \quad \epsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y}; \quad \epsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = -\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}$$

(Ecuaciones de compatibilidad)

- **Equilibrio y condiciones de compatibilidad**

Si se realiza una combinación de las ecuaciones equilibrio y las ecuaciones de compatibilidad se concluye:

Desconocidos: 6 esfuerzos + 6 deformaciones + 3 desplazamientos = 15

Ecuaciones: 3 equilibrio + 6 compatibilidad = 9

De esta forma para alcanzar la solución se necesita seis ecuaciones adicionales. Estos se tomarán de las relaciones constitutivas. (Potts, Zdravkovic, 1999)

- **Comportamiento constitutivo**

Un modelo constitutivo es una forma matemática intenta describir el “comportamiento real” de un material. También es conocida como ley constitutiva, este reproduce matemáticamente el comportamiento físico. Su capacidad de simulación depende de la extensión en que el

fenómeno haya sido comprendido. Usualmente toma la forma de una relación esfuerzos – deformaciones, de manera tal que proporciona una relación entre equilibrio y compatibilidad.

En esta investigación se está considerando la calibración al modelo constitutivo elasto – plástico de Mohr Coulomb debido a que la forma del cálculo de la estabilidad mediante el MEF es a través de la reducción de parámetros de resistencia.

La evaluación de la estabilidad de cualquier talud o grupo de pendientes se empieza por seleccionar secciones bidimensionales, entre ellas las más críticas considerando las pendientes y las alturas, definiendo una probable superficie de falla para cada una de ellas y calculando el FS a lo largo de esta superficie de desplazamiento. Lo anteriormente descrito corresponde a un análisis mediante la metodología de equilibrio límite porque se dice que se define una probable superficie de falla. Sin embargo el análisis de estabilidad en esta tesis será por equilibrio límite y MEF, en esta sección solo se describe lo segundo. Un detallado análisis de estabilidad de taludes necesita de una minuciosa selección de una superficie de falla cuando se analiza mediante el método de equilibrio límite, en relación con un método más estricto de análisis (MEF), la superficie de falla se busca de “forma natural” usando el método de reducción de parámetros de resistencia. De esta forma el FS de una pendiente es definida como el factor por el cual los parámetros de resistencia del suelo deben ser reducidos con el objeto de llegar a las condiciones de falla (parámetros de falla); es decir los parámetros $c'f$ y $\phi'f$.

$$c'_f = \frac{c'}{FS}$$

$$\phi'_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi'}{FS} \right)$$

En la relación con la teoría sobre elementos finitos mencionados anteriormente se hizo el análisis de estabilidad de taludes tanto en condiciones de carga estática y pseudoestática. La formulación que se utilizó de elementos finitos fue la formulación variacional basado en los principios de minimización de energía potencial. El programa computacional utilizado empleado fue el programa PLAXIS v8.5. A continuación se describe los pasos para el modelamiento por elementos finitos en el software usado.

- Primero se modela el talud en las condiciones actuales considerando las mismas cotas indicadas en el problema real; es decir desde 2140 msnm. Por otro lado pudo haberse simplificado dicho proceso llevando a las coordenadas cero, ello no traería como consecuencia variación en el resultado. (ver figura 3.39)

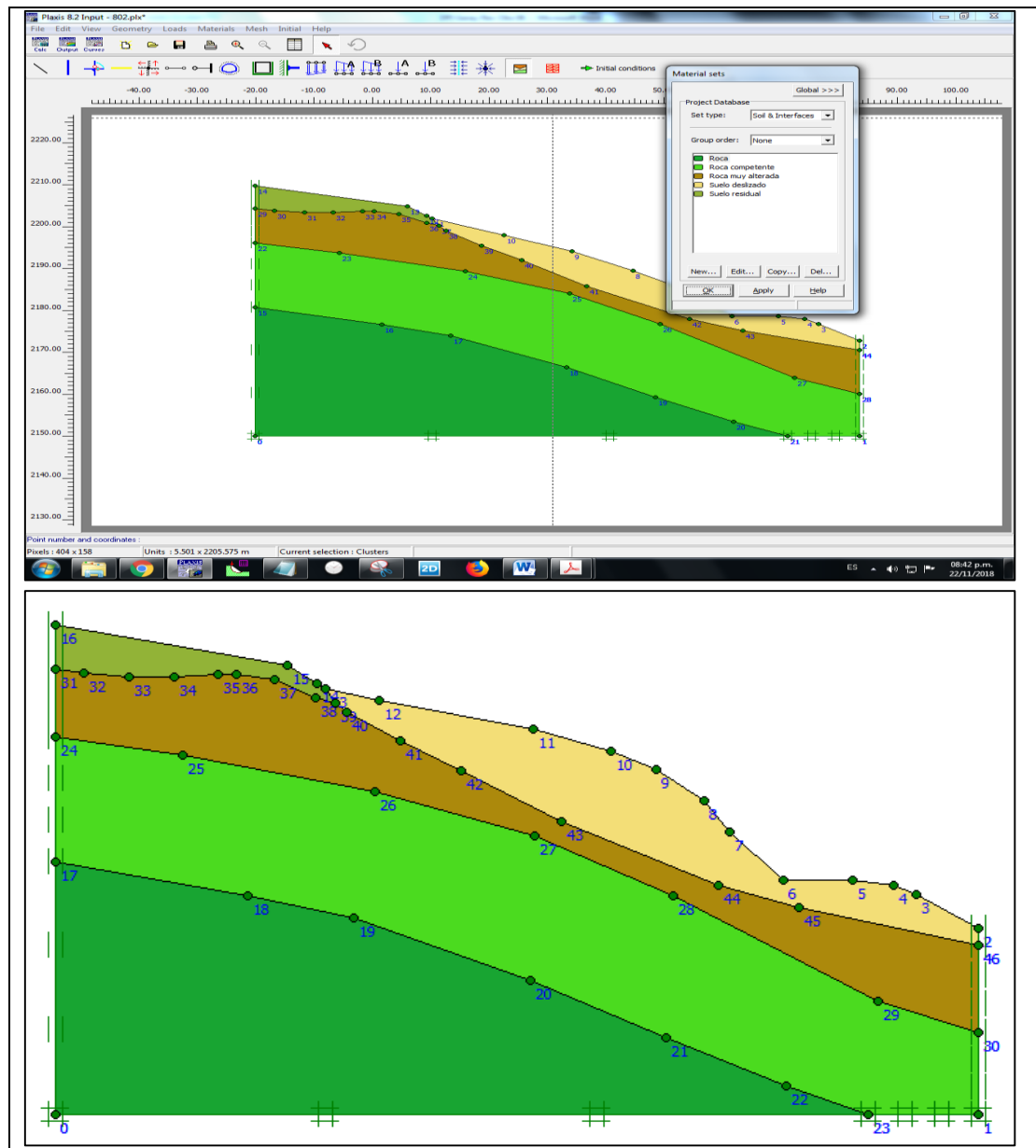


Figura 3.39: Modelo en elementos finitos.

Fuente: (Programa PLAXIS)

- El modelo constitutivo usado para el modelamiento de los materiales fue el modelo Mohr Coulomb. A través del método de reducción de parámetros de resistencia los factores más importantes en el modelamiento son los parámetros de resistencia del

criterio de ruptura de Mohr-Coulomb; es de decir la rigidez no interviene en el cálculo. Dicho esto se procede a discretizar el medio continuo. (ver figura 3.40)

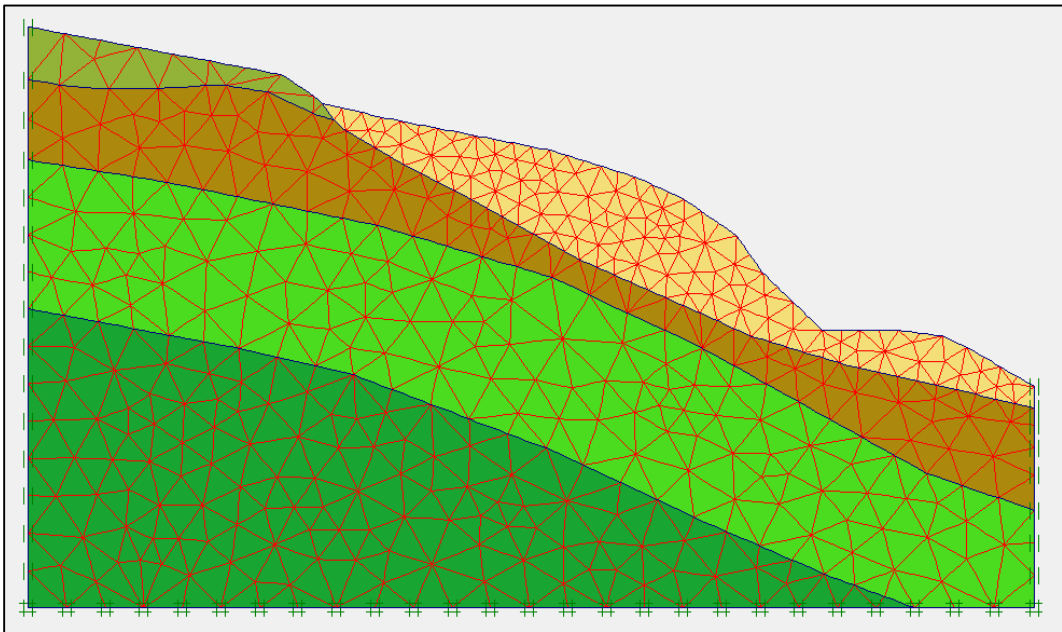


Figura 3.40: Medio continuo discretizado en elementos triangulares
Fuente: (Programa PLAXIS)

- Luego del proceso de discretización (como en todo método numérico, ya sea elementos finitos o diferencias finitas u otro) se procede a generar las condiciones iniciales de presión hidrostática y condiciones iniciales de esfuerzo. Estas condiciones en este caso son cero. Debido a que no se encontró nivel freático y que a que el problema no es horizontal, sino presenta inclinaciones. Las condiciones iniciales de esfuerzo (peso propio serán generadas en una etapa posterior llamada aplicación de carga por gravedad).
- El modelo está listo para poder calcular: el primer cálculo consiste en la generación de las condiciones iniciales de esfuerzo (peso propio) y la segunda fase consiste en el análisis de estabilidad de taludes a través de la reducción de parámetros de resistencia. . La tercera fase es la aplicación de la carga pseudo-estática, que es una fuerza proporcional a las fuerzas verticales horizontal considerando el coeficiente pseudo-estático 0.18. Finalmente en la cuarta etapa de cálculo se reducen los parámetros de resistencia para obtener el factor de seguridad y la superficie de falla. (ver figura 3.41)

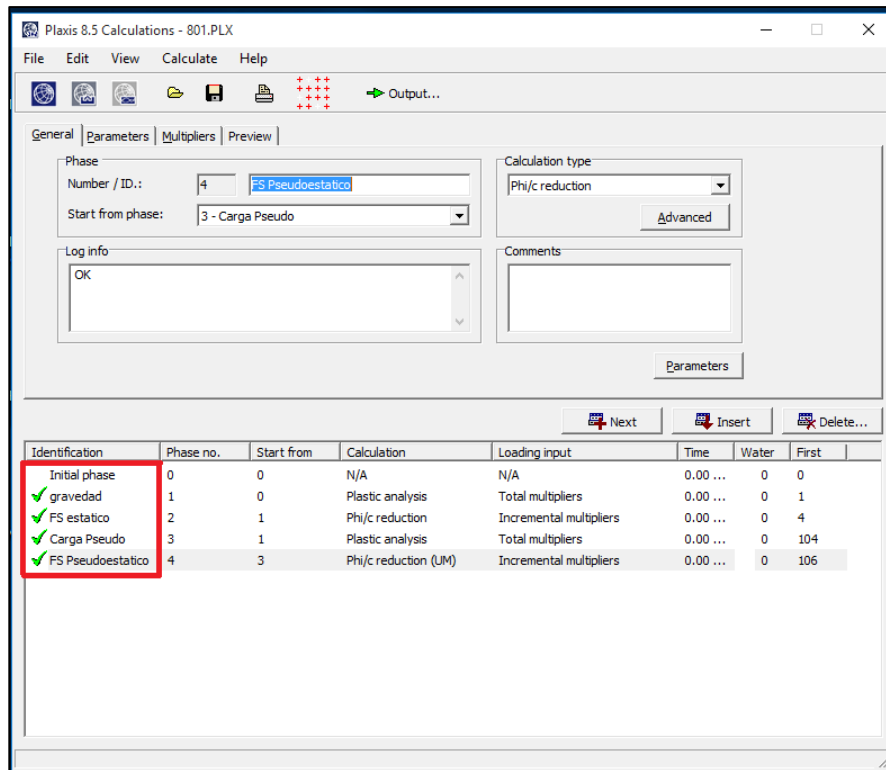


Figura 3.41: Etapas de cálculo
Fuente: elaboración propia (PLAXIS)

- Luego de finalizar el cálculo de estabilidad minimizando los parámetros de resistencia se obtiene en escala de colores la superficie de falla. Esta superficie de falla indica únicamente la forma de la misma. (ver figura 3.42, 3.43 y 3.44)

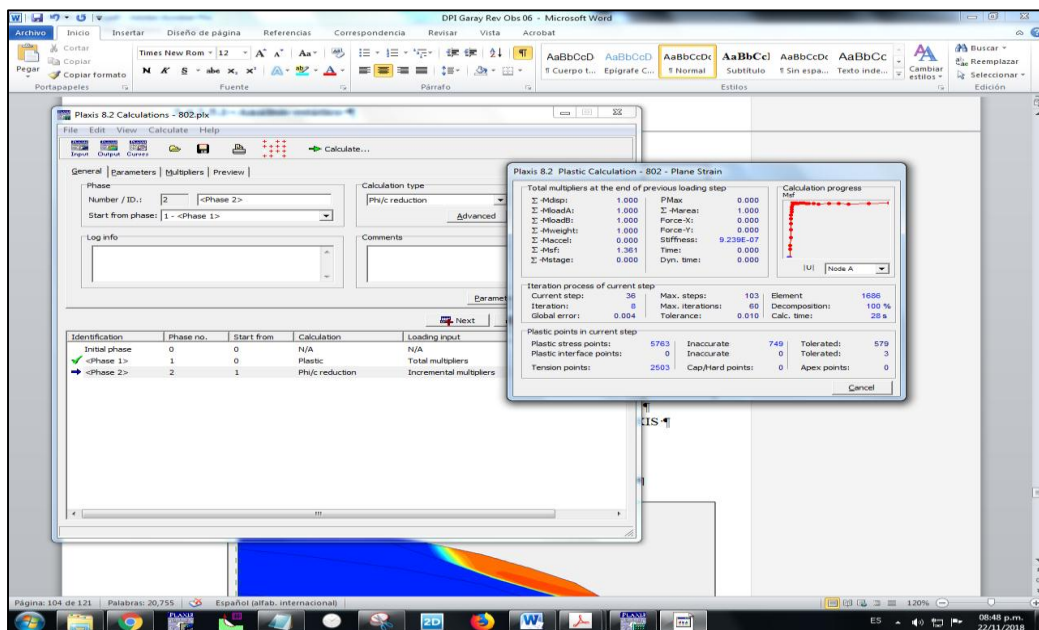


Figura 3.42: Proceso de análisis del factor de seguridad
Fuente: elaboración propia adaptado del software PLAXIS

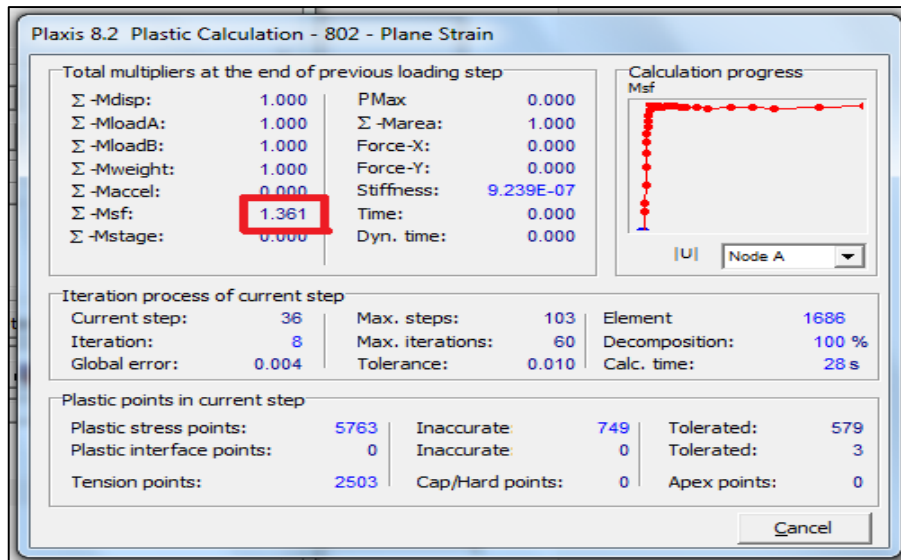


Figura 3.43: Proceso de análisis del factor de seguridad
Fuente: elaboración propia adaptado del software PLAXIS

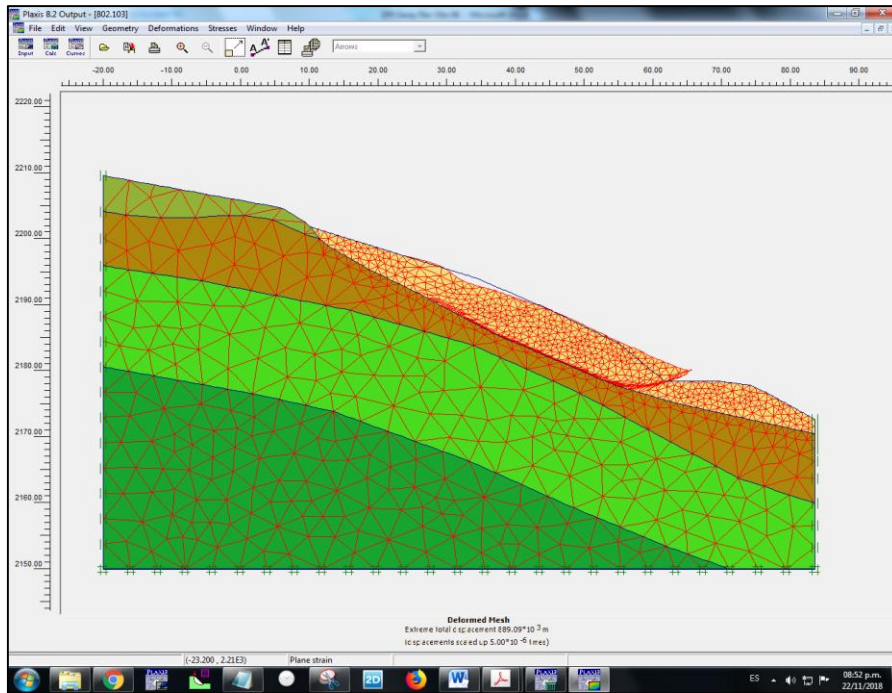


Figura 3.44: Malla deformada al final del análisis de estabilidad estática.
Fuente: elaboración propia adaptado del software PLAXIS

3.5.2.4. Análisis estático

El problema estático del MEF se resuelve con el análisis de la formulación variacional del MEF, cuyo principio es la suma de las energías potenciales involucradas en el sistema. Estas son minimizadas al ser derivadas e igualadas a cero. La fuerza estática es únicamente proveniente del peso propio del suelo. La aplicación del peso propio es a través de la metodología llamada “carga de gravedad”; es decir cada elemento se aplica su peso y luego

se realiza el equilibrio. Después de realizar el equilibrio se minimizan los parámetros de resistencia de tal manera que se vaya formando una superficie de falla conforme los puntos al interior del modelo vayan alcanzando su falla o el comportamiento plástico y por tanto grandes deformaciones hipotéticas.

El factor de seguridad obtenido por la condición estática fue 1.364 (ver figura 3.45)

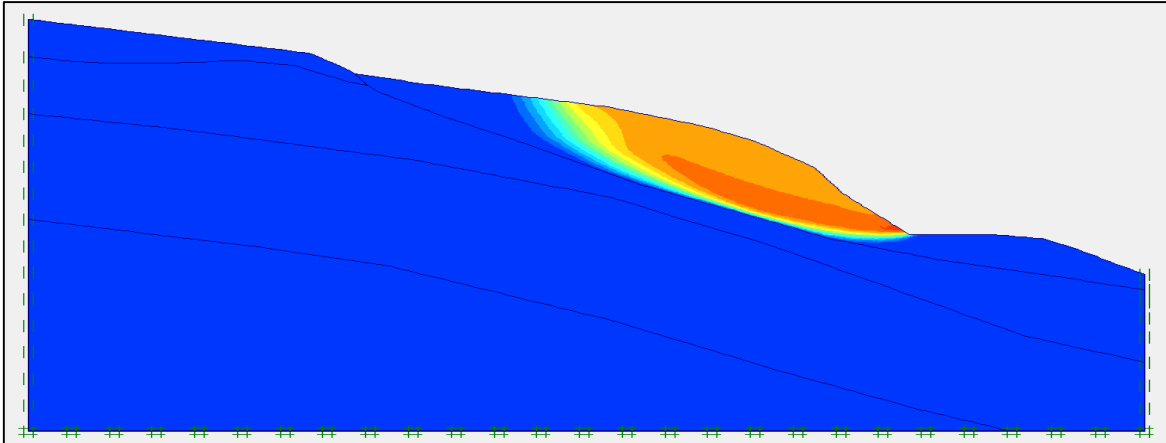


Figura 3.45: Análisis Estático por elementos finitos.

Fuente: elaboración propia (PLAXIS)

3.5.2.5. Análisis Pseudo-estático

Las condiciones Pseudo-estáticas de carga para el análisis vía MEF son similares que las condiciones estáticas. La principal diferencia es que la carga del sismo es aplicada proporcionalmente a las fuerzas verticales de forma similar al caso del MEL. Aquí se diferencia que no existen dovelas sino las cargas son aplicadas en cada elemento finito en favor del talud; es decir hacia el talud.

El factor de seguridad obtenido por la condición pseudo-estática fue 0.953

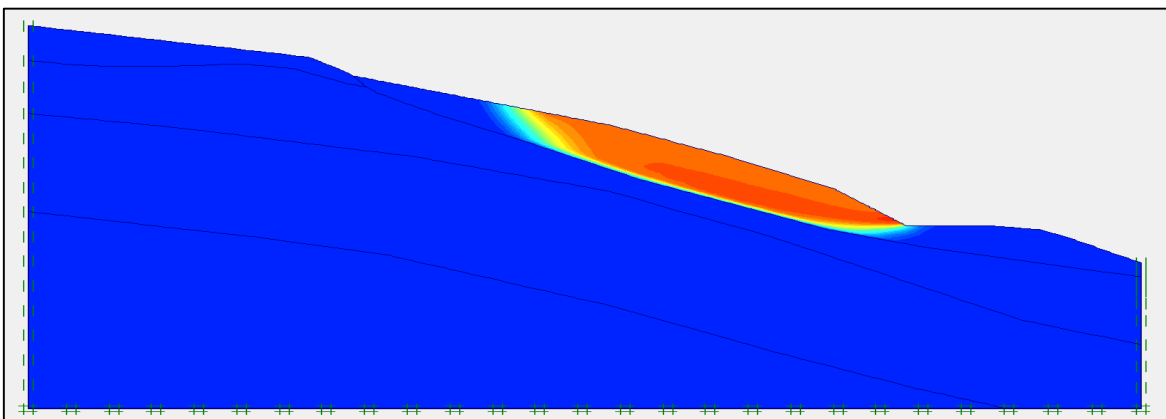


Figura 3.46: Análisis Pseudo-Estático por elementos finitos

Fuente: elaboración propia (PLAXIS)

En relación con la comparación de las superficies de falla se puede notar que las superficies de deslizamiento en los resultados del método de elementos finitos es prácticamente la misma. Obviamente esta superficie que se desarrolla de forma natural no se ajusta a las superficies de falla de los métodos de equilibrio límite: método de Bishop y método de Spencer.

Las superficies de falla se muestran en las gráficas anteriores. Los valores de factor de seguridad se van desarrollando conforme el método de elementos finitos opera mediante el programa computacional; es decir es un proceso iterativo. En la siguiente grafica se muestra el desarrollo de los factores de seguridad conforme se van disminuyendo los parámetros de resistencia, comenzando con un Factor de seguridad de 1.00. (Ver figura 3.47)

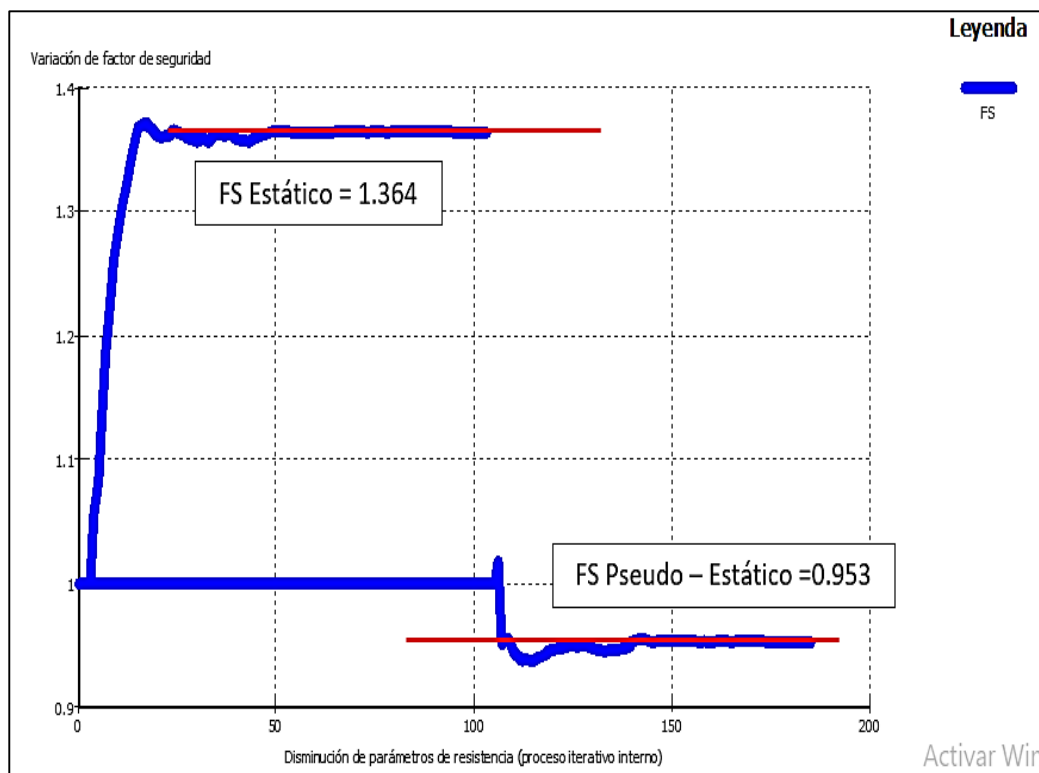


Figura 3.47: Desarrollo de los factores de seguridad en condiciones de carga estática y pseudo-estática

Fuente: elaboración propia adaptado del software PLAXIS

3.6. RESULTADOS DE FACTOR SEGURIDAD

3.6.1. Método de equilibrio limite

En la tabla siguiente se muestra el resumen de los resultados adquiridos mediante la metodología de equilibrio límite con los procedimientos de Bishop y Spencer. (Ver tabla 3.16)

Tabla 3.16: Resumen de F.S estático y Pseudo-estático por Bishop y Spencer

Método de equilibrio limite	Factor de seguridad	
	Estático	Pseudo-estático
Bishop	1.460	1.060
Spencer	1.475	1.077

Fuente: elaboración propia

3.6.2. Método numérico

Los resultados obtenidos se mostraran en la siguiente tabla. (Ver tabla 3.17)

Tabla 3.17: Resumen de F.S estático y Pseudo-estático por Elementos finitos

Factor de seguridad	
Estático	Pseudo - Estático
1.364	0.953

Fuente: elaboración propia

IV. DISCUSIÓN

Discusión 1:

De los valores de seguridad obtenidos en condición estática por equilibrio límite, el menor fue de 1.460 (Bishop simplificado) y el mayor fue de 1.475 (Spencer), teniendo una variación de 1.02%

(Mendoza Loayza, 2016, pag.57) de sus estudios de análisis de estabilidad de taludes en condición estática, obtuvo como resultado por el método de Bishop un valor de FS de 1.758 y por el método de Morgenstern-Price un factor de seguridad de 1.749, en los cuales hay una variación de 0.51%. Lo que corrobora de lo que concluyó Mendoza, que al tratar de analizar el factor de seguridad por diversos métodos, si bien es cierto obtendremos distintos factores, pero estos serán cercanos. No existe variaciones mayores del 5% entre el FS mas alto y más bajos obtenidos, excepcionalmente se pueden presentar variaciones de 7%.

Los resultados presentados comparten similitud, ya que la variación de mayor y menor valor es casi similar, lo cual brinda la fiabilidad a los resultados obtenidos en la presente tesis.

Discusión 2:

El suelo residual presenta menores parámetros de resistencia, esta es estable debido a que su pendiente es mucho más suave que la que presenta el suelo deslizado. Por tanto la representación más importante para el modelamiento es la del suelo deslizado. Este tiene un peso específico de 18 kN/m³, parámetros de resistencia de Mohr Coulomb cohesión 0 kPa y ángulo de fricción interna 0.25° (debido a la trabazón que podría representar los materiales subangulosos encontrados) y parámetros elásticos, módulo de elasticidad 14000 kPa y relación de Poisson 0.3.

(Mendez Bohorquez, 2016). Analizó la correlación entre los ensayos de corte directo y los ensayos triaxiales en suelos cohesivos. Sin embargo lo que concierne a esta investigación es comparar los resultados de los parámetros de resistencia según el criterio de ruptura de Mohr Coulomb en suelos cohesivos. Los resultados tanto del corte directo como de los triaxiales están en el orden de cohesión 42.5 kPa y ángulo de fricción 15°. Luego tiene mucha similitud con los resultados obtenidos en esta tesis; no obstante cabe resaltar que aquí se utilizó un criterio mucho más conservador al asumir ángulo de fricción mínimo.

(Flor Arroyo, 2014). De la comparación de los parámetros de resistencia según el criterio de ruptura de Mohr Coulomb y las propiedades elásticas de suelos cohesivos se realizaron múltiples ensayos en este tipo de suelo. Como resultado del ensayo de corte directo las

arcillas y limos presentaron parámetros del orden de 80 kPa y ángulo de fricción 20°. Inmediatamente la predominancia de la cohesión frente al ángulo de fricción lo que ratifican los parámetros de resistencia del suelo deslizado que es el material de mayor importancia en esta investigación.

Discusión 3:

Luego del análisis de estabilidad de taludes mediante método numérico, se llegaron a valores de FS cercanos; sin embargo siempre los números encontrados por el MEL fueron mayores que por MEF. Mediante el MEL en condiciones de carga estáticas (Bishop y Spencer respectivamente) se obtuvieron valores de 1.460 y 1.475. Mientras que en condiciones pseudo-estáticas de carga (Bishop y Spencer respectivamente) valores de 1.060 y 1.077. Por otro lado mediante el MEF en condiciones estáticas y pseudo-estática de carga valores de 1.364 y 0.953 respectivamente. (Ver tabla 4.1)

Tabla 4.1: resultados de factor seguridad

Condición de carga	Método de equilibrio limite		Método numérico
	Bishop	Spencer	Elementos finitos
Estática	1.460	1.475	1.364
Pseudo estática	1.060	1.077	0.953

Fuente: elaboración propia

(Ludeña Gutiérrez, 2014). En el análisis de la estabilización de pilas de lixiviación, concluyó que los resultados basados en el MEL siempre tendieron a ser mayores que los hallados mediante el MEF. (Ver figura 4.1)

Tabla 5.9: valores de FS con ambos métodos y en las diferentes condiciones (estática y pseudoestática)

Condición analizada	Métodos de análisis	Sin canal	Con canal
Estático	Equilibrio límite	1,674	1,740
	Elementos finitos	1,697	1,740
Pseudoestática	Equilibrio límite	1,085	1,148
	Elementos finitos	1,058	1,103

Figura 4.1: resultados de FS por MEL y MEF

Fuente: tesis, Ludeña, 2014.

Estos resultados comparten mucha similitud con los mostrados en esta investigación, debido a que casi siempre los valores de FS en MEF tienden a ser menores que MEL.

V. CONCLUSIONES

Conclusión 1:

De acuerdo a los resultados en la condición estática, los valores obtenidos que más se aproximan al Factor de seguridad mínimo (FS min = 1.50), fueron los obtenidos por Spencer (FS = 1.475) y Bishop (FS = 1.460), ambos con una variación de 1.67% y 2.67% respectivamente; mientras que el factor de seguridad más crítico fue obtenido por el método de elementos finitos con un FS=1.364, lo que significa que tiene una variación de 9.07% respecto al FS mínimo. (Ver tabla 5.1).

Tabla 5.1: variación porcentual de los FS obtenidos en condición estática

-	-	Factor de seguridad	
-	-	Estático	Variación respecto al FS mínimo (1.50)
Método de equilibrio limite	Bishop	1.460	2.67%
	Spencer	1.475	1.67%
Método numéricos	Elementos finitos	1.364	9.07%

Fuente: elaboración propia

Conclusión 2:

De acuerdo a los resultados obtenidos en la condición Pseudo-estática (FS=1.0), la metodología de MEL cumple con los parámetros mínimos de seguridad, Bishop con FS 1.060 lo que es una variación de 6.0% respecto al FS mínimo, mientras Spencer obtuvo 1.077 de FS, lo significa que difiere en 7.70% en relación al FS mínimo. El MEF alcanzó un FS de 0.953 lo que denota que es un FS seguridad crítico ya que es menor que el FS mínimo establecido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers). (Ver tabla 5.2).

Tabla 5.2: variación porcentual de los FS obtenidos en condición pseudo-estática

-	-	Factor de seguridad	
-	-	Pseudo-estático	Variación respecto al FS mínimo (1.00)
Método de equilibrio limite	Bishop	1.060	6.00%
	Spencer	1.077	7.70%
Método numéricos	Elementos finitos	0.953	4.70%

Fuente: elaboración propia

Conclusión 3:

Los factores de seguridad obtenidos por MEL (Bishop: 1.460 y Spencer: 1.475) en condición estática se pueden redondear típicamente a 1.50 por lo cual estarían cumpliendo los requerimientos mínimos de seguridad en condiciones de carga estática. De igual forma los valores de los FS en la condición pseudo estático (Bishop: 1.060 y Spencer: 1.077) son ligeramente mayores a la unidad. Debido a ello este talud en condiciones de carga estática y pseudo estática serían estables porque cumplen los requisitos mínimos de seguridad. No obstante al ser analizado por el método numérico, los FS obtenidos en condición estática (1.364) y pseudo-estática (0.953) no cumplen los requerimientos mínimos establecidos por la norma descrita. Lo que demuestra que pueden existir taludes aparentemente estables si son analizados por equilibrio límite, siendo en realidad inestables si son analizados por métodos numéricos.

La razón por la cual se utiliza una norma internacional es porque en la legislación peruana no se indica mínimos factores de seguridad para el análisis de estabilidad de taludes ni en los manuales del Ministerio de transportes y comunicaciones ni los emitidos por el Ministerio de vivienda construcción y saneamiento.

Conclusión 4:

Del análisis comparativo la conclusión es que se recomienda el análisis mediante métodos numéricos por el método de elementos finitos, ya que es una herramienta que en la actualidad ya ha sido probada por medio de investigaciones similares a esta, existen numerosos programas comerciales que ofrecen la simplicidad del análisis a través de una interface amigable en métodos numéricos. Además la obtención de factores de seguridad críticos, harán que los cálculos y análisis geotécnicos sean más conservadores. Por tanto se puede considerar a los métodos numéricos como una mejor alternativa de análisis.

Conclusión 5:

El aporte de la presente tesis es brindar una serie de alternativas viables y fiables, las cuales pueden ser aplicadas como procedimiento de análisis de estabilidad de taludes de forma rápida y segura.

VI. RECOMENDACIONES

Recomendación 1:

Se recomienda realizar ensayos de corte directo in situ para estimar los parámetros de resistencia del suelo en condiciones de campo. De esta manera serían más cercanos a “la realidad” en campo y se obtendrá un factor de seguridad más confiable.

Recomendación 2:

Se recomienda el uso de otros métodos del MEL, en esta investigación solo se utilizó uno de los métodos más básicos que es el método de Bishop y uno de los más rigurosos y exactos como el método de Spencer; sin embargo existe una amplia bibliografía en relación a las metodologías que se pueden utilizar como el Morgenstern-Price, Fellenius, Janbu. Con la finalidad de hacer comparaciones y verificar cual es el método más riguroso dentro del método de MEL.

Recomendación 3:

Se recomienda para investigaciones posteriores el análisis con otro tipo de métodos numéricos como el método de diferencias finitas. Análogamente a la recomendación anterior se sugiere utilizar diferentes formulaciones del MEF, como la formulación de cantidad de movimiento o la formulación de residuos ponderados para resolver este problema geotécnico. Con la finalidad de adoptar nuevas técnicas y metodologías para la estabilización de taludes

VII. REFERENCIAS

AGUILAR Goenaga, Oscar y ZUÑIGA Romero, Camilo. Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas adenañas al Cerro de la Popa, casco urbano de Cartagena. Tesis (ingeniero civil). Cartagena: Universidad de Cartagena, 2015.

Disponible en <http://repositorio.unicartagena.edu.co:8080/jspui/handle/11227/2089>

ATALA, César. Estudio experimental sobre correlaciones en suelos granulares finos (arenas) compactados, usando equipos de penetración. Maestría (ingeniería civil). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. 2011.

Disponible en <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/848>

ARGÜELLO, Diana y CALDERÓN, Leidy. Estado del arte del uso del ensayo SPT-T y las correlaciones obtenidas para los parámetros del modelo Mohr-Coulomb. Colombia: Universidad Católica de Colombia, 2014.

Disponible en <http://hdl.handle.net/10983/1600>

ARIAS, Fidias. (Serie informes sociales). El proyecto de investigación. s.l. : Episteme, Caracas, Venezuela, 1999, 53 pp.

CARRASCO, Sergio. Metodología de la investigación científica. Lima: Editorial San Marcos. 2006. 580 pp.

ISBN: 9972-34-242-5

COLIENTE Tlaxcalteca, Alfredo. Inestabilidad de laderas y taludes. Maestría (ingeniería civil). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.

Disponible en <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3903>

DAS, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. 4ta. edic. México: Cengage Learning Editores, 2013. 636 pp.

ISBN: 978-1-111-57675-2

HERNANDEZ, Roberto, FERNANDEZ, Carlos y BAPTISTA, María. Metodología de la investigación: 5° Ed. México: 2010, 656 pp.

MENDOZA Loayza, Joel. Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay. Tesis (ingeniero civil). Lima: PUCP. 2016

Disponible en <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/7614>

LAMBE, William y WHITMAN, Robert. Mecánica de suelos. 2da. edic..México: Editorial Limusa S.A. 2001. 582 pp.

ISBN: 968-18-1894-6

LUDEÑA Gutiérrez, Lucas. Influencia de bermas y canales en la estabilidad de pilas de lixiviación. Tesis (ingeniero civil). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.

Disponible en <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4468>

METODOLOGÍA de la investigación por Humberto Ñaupas [et al]. Bogotá: Express studio gráfico y digital S.A., 2014. 536 pp.

ISBN: 978-958-762-188-4

PEREZ de Agreda, Eduardo. Estabilidad de taludes. España: Universidad Politecnica de Catalunya, 2005. 57 pp.

PINO, Raúl. Metodología de la investigación. Lima: Editorial San Marcos E.I.R.L.2007. 250 pp.

ISBN: 978-9972-38-281-9

PLAXIS 2D software, **Reference manual**, 2016

ROCHEL, Roberto. Análisis y diseño sísmico de edificios. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2012. 388 pp.

ISBN: 978-958-720-117-8

SABINO, Carlos. El proceso de la información. Caracas: Editorial Panapo, 216 pp.

SEVERINO Rivera, Betsy. Riesgos de taludes y terraplenes en obras lineales de la Republica Dominicana. Master (ingeniería de estructuras, cimentaciones y materiales).Madrid: Universidad Politécnica de España.2015.

Disponible en http://oa.upm.es/38455/1/Tesis_master_Betsy_Severino.pdf

SUAREZ, Jaime. Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda., 1998. 548 pp.

ISBN: 958-33-0800-5

TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. México D.F.: Limusa, 2004, 440 pp.

ISBN: 968-18-5872-7

VALARINO, Elizabeth, YABER, Guillermo y CEMBORAIN, María. Metodología de la investigación: paso a paso. México: Trillas, 2015. 309 pp.

ISBN: 978-607-17-0511-2

VALDERRAMA, Santiago. Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación científica. Lima: Editorial San Marcos E.I.R.L., 2007. 310 pp.

ISBN: 978-9972-38-041-9

YALÁN León, Neil. Análisis comparativo de los métodos de estabilidad de taludes aplicados en la presa de tierra del depósito de relaves Bateas. Informe de suficiencia (ingeniero civil). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2015.

Disponible en <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5557>

ANEXOS


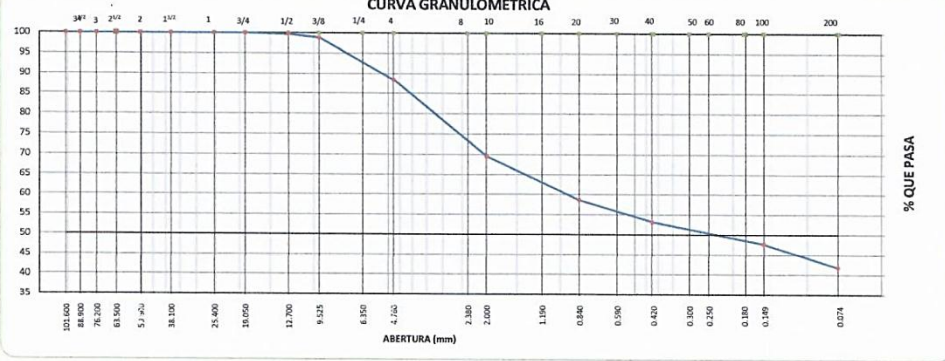
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

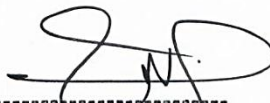
Título: Comparación de método de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos en condiciones de carga estática y pseudo-estática						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA/ ITEMS
<u>Problema general</u>	<u>Objetivo general</u>	<u>Hipótesis general</u>	<u>Variable independiente</u>			
¿Cuál será la correlación entre los parámetros de estabilidad de los taludes en la carretera Cochabamba – Cutervo – Santo Domingo de la Capilla – Chiple, cuando este análisis se realiza mediante el proceso de equilibrio límite y a vía métodos numéricos?	Comparar los valores de factor de seguridad hallados mediante la formulación de equilibrio límite y métodos numéricos en condiciones de carga estática y pseudo-estática	Los parámetros de estabilidad de las metodologías de equilibrio límite (método de las dovelas) y métodos numéricos (elementos finitos) son aproximadas tanto en condiciones de carga estática como pseudo-estática.	Estabilidad de taludes	Trabajos previos de ingeniería	Ensayos de campo Ensayos de laboratorio	Ordinal
				Método de equilibrio límite	Bishop Spencer Software Slide	
				Método numéricos	elementos finitos Modelo constitutivo Software Plaxis	
<u>Problemas específicos</u>	<u>Objetivos específicos</u>	<u>Hipótesis específicas</u>	<u>Variable dependiente</u>			
¿Cómo influyen los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb de los suelos involucrados con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo?	Determinar los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb de los suelos involucrados con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo.	Es posible determinar los parámetros de resistencia del criterio de ruptura de Mohr Coulomb de los suelos involucrados con ayuda de los resultados de ensayos de laboratorio y ensayo de campo.	Condiciones de carga	Zonificación	Característica de suelo Característica del terreno	Ordinal
¿Cómo influye modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos?	Modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos.	Se puede modelar el comportamiento de los materiales participantes con ayuda de los ensayos de laboratorio y ensayos de campo; a través de modelos constitutivos.		Superficie de falla	Geometría de la falla Coeficiente pseudo-estático Falla circular o por bloques	
¿Cómo influyen en la validez los resultados del factor de seguridad y la superficie de falla al analizar el talud en condiciones de carga estática y pseudo-estática a través del método de equilibrio límite y método numérico si se modela el problema en los software de ingeniería?	Validar el procedimiento de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite analizándolo por el método más riguroso como lo es el método numérico	Es viable Validar el procedimiento de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite analizándolo por el método más riguroso de elementos finitos		Factor de seguridad	Equilibrio de fuerzas en dovelas (MEL) Reducción de parámetros de resistencia Factor de seguridad permisible	

ANEXO 2: CUADRO DE OPERALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
Estabilidad de taludes	<p>Para Braja (2013,p.335):</p> <p>“el estudio de estabilidad de un talud es una labor compleja, la evaluación de variables tales como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia al corte en el lugar puede llegar a ser una trabajo enorme. [...]”.</p>	<p>La estabilidad de taludes abarca muchos métodos como el método Spencer, Morgenstern-Price, Bishop simplificado.</p>	trabajos previos de ingeniería	Ensayos de campo	Método: científico
				Ensayos de laboratorio	
			Método de equilibrio limite	Bishop	Enfoque: cuantitativo
				Spencer	
				Software Slide	
			Método numérico	Elementos finitos	Tipo: aplicada
Modelo constitutivo					
Software Plaxis					
Condición de carga	<p>Suarez (1998) afirma: “los acontecimientos sísmicos son suficientes para generar fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden generar la falla apresurada en taludes y laderas” (p.148).</p>	<p>Las condiciones de carga pueden ser estáticas o pseudo-estáticas, eso depende de las fuerzas a la cual están sometidas en el momento de su análisis de estabilidad</p>	zonificación	Características geológicas	Nivel: explicativo
				Características geotécnicas	
			Superficie de falla	Geometría de la falla	Diseño: cuasi experimental
				Falla circular o por bloques	
				Coefficiente pseudo-estático	
			Factor de seguridad	Equilibrio de fuerzas en dovelas (MEL)	Instrumento: . Ensayo de laboratorio .ensayo de campo
				Reducción de parámetros de resistencia	
				Factor de seguridad permisible	

ANEXO 3: ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO

	LABORATORIO MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS	CC/RG-06 Versión: 01					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (MTC E 107, E 204 - ASTM D 422 - AASHTO T-11, T-27 Y T-88)							
LABORATORIO MECANICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS							
OBRA :	Comparación de método de estabilidad de taludes	INFORME N° : -----					
TRAMO :	Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chiple	TEC. LABORATORIO : S. Rojas R.					
PARTIDA :	Estabilidad de Taludes	ING. RESPONSABLE : L. Ludeña					
SECTOR :	Km 56+160.00 al Km 56+220.00	FECHA : Agosto 2018					
		SOLICITA : J. Garay					
CAUCATA :	001	Tamaño máximo : 3/4"					
UBICACIÓN :	Km 56+180 L/ Izquierdo - Parte Sup. del Talud.	P. Inicial (g.): 2,551.3					
PROFUNDIDA :	2.50 m.	Fracc. de finos (g.) :					
Tamices	Abertura	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Especificaciones Técnica Gradación	Datos de la Muestra
ASTM	en mm.						
4	101.60						
3 1/2"	88.900						
3"	76.200						OBSERVACIONES
2 1/2"	63.500						Método de Compact.
2"	50.800						A
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.050				100.0		Humedad Natural
1/2"	12.700	7.0	0.3	0.3	99.7		Sh + Tara 1337.90
3/8"	9.525	22.2	0.9	1.1	98.9		Ss + Tara 1143.60
1/4"	6.350						Tara
4	4.750	266.3	10.44	11.58	88.4		Peso Agua 194.3
8	2.360						Peso Suelo Seco 1143.6
10	2.000	482.4	18.91	30.49	69.5		Humedad(%) 17.0
16	1.180						
20	0.840	277.5	10.9	41.4	58.6		Descripción (SUCS) :
30	0.600						Arenas limosas mezcla de arena-limo
40	0.425	139.3	5.5	46.8	53.2		
50	0.300						
60	0.250						
80	0.177						Bolonería < 28" :
100	0.150	141.2	5.5	52.4	47.6		Grava 3" - Nº 4 : 11.6
200	0.075	149.3	5.9	58.2	41.8		Arena Nº4 - Nº 200 : 46.6
pasa		1066.1	41.8	100.0			Finos < Nº 200 : 41.8
CARACTERÍSTICA FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MUESTRA							
Limite líquido (%)	55.57	Máx. Dens. Seca (gr/cc)		Abrasión (%)			
Limite Plástico (%)	30.00	Humedad óptima (%)		Durabilidad Grava			
Índice plástico (%)	25.57	CBR.: al 100%		Durabilidad Arena			
Clasificación:	SUCS. SM	CBR.: al 95%		Sales			
	AASHTO A-7-6 (4)	Expansión (%)		Peso Especifico (g./cc.)			
Cu	Ce	Equivalente de arena (%)		% de Absorción (%)			
CURVA GRANULOMETRICA							
							
OBSERVACIONES: _____							


LUCAS LUDEÑA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330



**LABORATORIO MECANICA DE SUELOS,
CONCRETOS Y PAVIMENTOS**

CC/RG-07
Version: 01

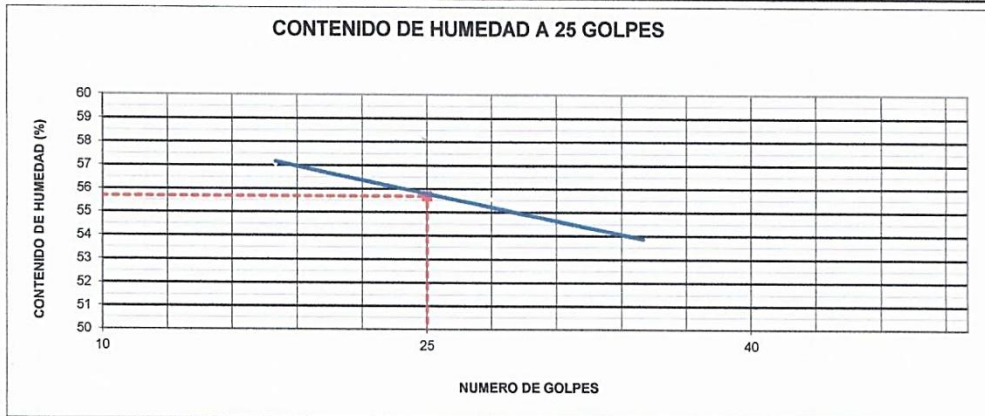
LIMITES DE CONSISTENCIA-PASA LA MALLA N°40
(NORMA MTC E-110, E111, AASHTO T-89, T-90, ASTM D 4318)

OBRA	:Comparación de método de estabilidad de taludes		INFORME N°	: -----
TRAMO	Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chiple		TEC. LABORATORIO	: S. Rojas R.
PARTIDA	: Estabilidad de Taludes		ING. RESPONSABLE	: L. Ludeña
SECTOR	: Km 56+160.00	al	Km 56+220.00	FECHA : Agosto 2018
				SOLICITA : J. Garay

DATOS DE LA MUESTRA		
CALICATA	: M-001	TAMAÑO MAXIMO : N° 40
UBICACIÓN	: KM 56+180	L/ Izquierdo - Parte Sup. del Talud.
PROFUNDIDA	: 2.50 m.	

LIMITE LIQUIDO				
Nº TARRO		22	25	24
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	(g)	41.13	41.23	37.61
PESO TARRO + SUELO SECO	(g)	33.98	33.90	30.66
PESO DE AGUA	(g)	7.15	7.33	6.95
PESO DEL TARRO		20.66	20.70	18.47
PESO DEL SUELO SECO	(g)	13.3	13.2	12.2
CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	53.7	55.5	57.0
NUMERO DE GOLPES		35	28	18

LIMITE PLASTICO				
Nº TARRO		31	35	
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	(g)	19.89	19.79	
PESO TARRO + SUELO SECO	(g)	17.24	17.16	
PESO DE AGUA	(g)	2.7	2.6	
PESO DEL TARRO	(g)	9.68	9.60	
PESO DEL SUELO SECO	(g)	7.6	7.6	
CONTENIDO DE DE HUMEDAD	(%)	35.1	34.8	34.92



CONSTANTES FISICAS DE LA MUESTRA	
LIMITE LIQUIDO	55.57
LIMITE PLASTICO	34.92
INDICE DE PLASTICIDAD	20.65

Observaciones : _____


 LUCAS LUDEÑA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200330



LABORATORIO MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS

CC/RG-44
Version: 01

REGISTRO DE EXCAVACION

OBRA	Comparación de método de estabilidad de taludes	INFORME N° : _____
TRAMO	Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chipile	TEC. LABORATORIO : S. Rojas R.
PARTIDA	Estabilidad de Taludes	ING. RESPONSABLE : L. Ludeña
SECTOR	Km 56+160.00 al Km 56+220.00	FECHA : Julio 2018
		SOLICITA : J. Garay


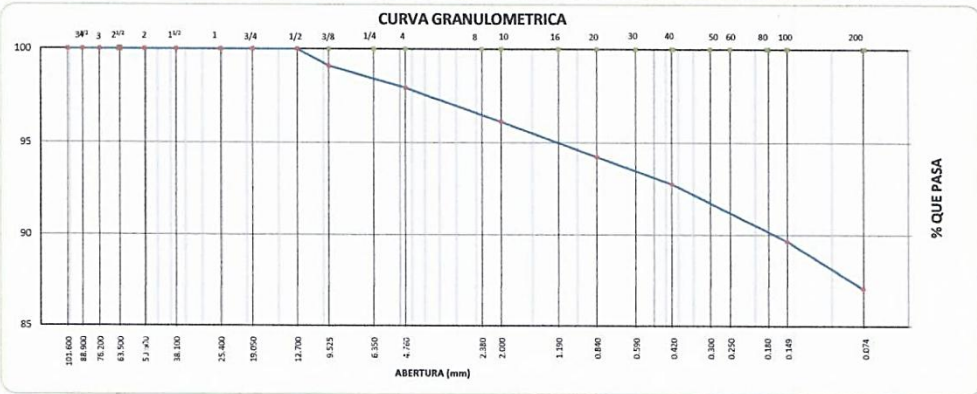
DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA	: M-001	
UBICACIÓN	: KM 56+180 l/ Izquierdo - Parte Sup. del Talud.	
PROFUNDIDA	: 2.50 m.	NIVEL FREATICO (m) : _____

PROF. (m)	N° DE MUESTRA	DESCRIPCION DEL SUELO Clasificación técnica, forma del material granular ; color, contenido de humedad índice de plasticidad ; grado de compactación Otros presencia de Oxidaciones y material orgánico porcentaje estimado de boleros/cantos, etc.	S I M B O L O G I A	SUCS	AASHTO	GRANULOMETRIA				L.L. %	I.P. %	H.N. %
						<	0.075	4.750	>			
						mm	mm	mm	mm			
0.20												
0.38												
0.55												
0.73												
0.91												
1.09	M-00	Arenas limosas mezcla de arena-limo, de color, marrón, de plasticidad media, friable y medianamente húmedo, con presencia de gravas semiangulosas en 11.6%. En los primeros 0.50m presencia de raíces y en la superficie cobertura vegetal. Datos obtenidos del fondo de la calicata : Natural : 1641 gr./cm ³ Densidad Humedad Natural : 19 %		SM	A-7-6 (4)	41.8	46.6	11.6	0	55.6	20.6	17.0
1.26												
1.44												
1.62												
1.79												
1.97												
2.15												
2.32												
2.50		Roca										

OBSERVACIONES : _____


LUCAS LUDEÑA GUTIERREZ
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 200330

	LABORATORIO MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS	CC/RG-06 Versión: 01					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (MTC E 107, E 204 - ASTM D 422 - AASHTO T-11, T-27 Y T-88)							
LABORATORIO MECANICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS							
OBRA :	Comparación de método de estabilidad de taludes	INFORME Nº :					
TRAMO :	Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chiple	TEC. LABORATORIO :					
PARTIDA :	Estabilidad de Taludes	ING. RESPONSABLE :					
SECTOR :	Km 56+160.00 al Km 56+220.00	FECHA :					
		SOLICITA :					
CALICATA :	002	MUESTRA :					
UBICACIÓN :	Km 56+180 Lado Derecho de la Vía	Tamaño máximo :					
PROFUNDIDA :	3.00 m.	P. Inicial (g.) :					
		Fracc. de finos (g.) :					
Tamices	Abertura	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Especificaciones Técnica Gradación	Datos de la Muestra
ASTM	en mm.						
4	101.60						
3 1/2"	88.900						OBSERVACIONES
3"	76.200						Método de Compact.
2 1/2"	63.500						A
2"	50.800						Humedad Natural
1 1/2"	38.100						Sh + Tara
1"	25.400						Ss + Tara
3/4"	19.050						Tara
1/2"	12.700				100.0		Peso Agua
3/8"	9.525	11.5	0.9	0.9	99.1		Peso Suelo Seco
1/4"	6.350						Humedad(%)
4	4.750	14.3	1.14	2.06	97.9		Descripción (SUCS) :
8	2.360						Arcillas inorganicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.
10	2.000	22.6	1.80	3.86	96.1		Bolonería < 28" :
16	1.180						Grava 3" - Nº 4 :
20	0.840	23.8	1.9	5.8	94.2		Arena Nº4 - Nº 200 :
30	0.600						Finos < Nº 200 :
40	0.425	18.8	1.5	7.3	92.7		
50	0.300						
60	0.250						
80	0.177						
100	0.150	38.8	3.1	10.3	89.7		
200	0.075	32.6	2.6	12.9	87.1		
pasa		1091.8	87.1	100.0			
CARACTERÍSTICA FÍSICA Y QUÍMICA DE LA MUESTRA							
Limite líquido (%)	34.34	Máx. Dens. Seca (gr/cc)		Abrasión (%)			
Limite Plástico (%)	19.41	Humedad óptima (%)		Durabilidad Grava			
Índice plástico (%)	14.93	CBR.: al 100%		Durabilidad Arena			
Clasificación:	SUCS.	CL	Expansion (%)	Sales			
	AASHTO	A-6 (2)	Equivalente de arena (%)	Peso Especifico (g./cc.)			
Cu	Cc			% de Absorción (%)			
CURVA GRANULOMETRICA							
							
OBSERVACIONES: _____							


LUCAS LUDENA GUTIERREZ
INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330



**LABORATORIO MECANICA DE SUELOS,
CONCRETOS Y PAVIMENTOS**

CC/RG-07
Version: 01

LIMITES DE CONSISTENCIA-PASA LA MALLA N°40
(NORMA MTC E-110, E111, AASHTO T-89, T-90, ASTM D 4318)

OBRA	: Comparación de método de estabilidad de taludes	INFORME N°	: -----
TRAMO	: Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chipile	TEC. LABORATORIO	: S. Rojas R.
PARTIDA	: Estabilidad de Taludes	ING. RESPONSABLE	: L. Ludeña
SECTOR	: Km 56+160.00 al Km 56+220.00	FECHA	: Agosto 2018
		SOLICITA	: J. Garay

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA	: M-002	MUESTRA	001	TAMAÑO MAXIMO	: N° 40
UBICACIÓN	: KM 56+180	Lado Derecho de la Via			
PROFUNDIDA	: 3.00 m.				

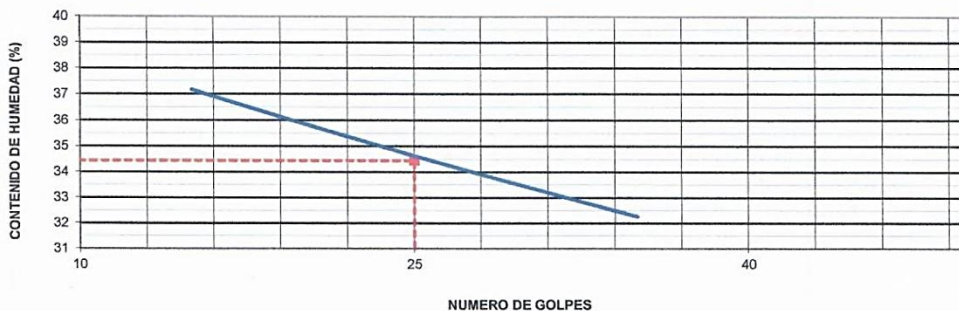
LIMITE LIQUIDO

N° TARRO		40	37	22
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	(g)	48.87	40.59	43.78
PESO TARRO + SUELO SECO	(g)	42.63	34.95	37.50
PESO DE AGUA	(g)	6.24	5.64	6.28
PESO DEL TARRO		23.39	18.29	20.66
PESO DEL SUELO SECO	(g)	19.2	16.7	16.8
CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	32.4	33.9	37.3
NUMERO DE GOLPES		35	27	15

LIMITE PLASTICO

N° TARRO		16	14	
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	(g)	20.67	20.74	
PESO TARRO + SUELO SECO	(g)	19.25	19.39	
PESO DE AGUA	(g)	1.4	1.4	
PESO DEL TARRO	(g)	12.00	12.37	
PESO DEL SUELO SECO	(g)	7.3	7.0	
CONTENIDO DE DE HUMEDAD	(%)	19.6	19.2	19.41

CONTENIDO DE HUMEDAD A 25 GOLPES



CONSTANTES FISICAS DE LA MUESTRA

LIMITE LIQUIDO	34.34
LIMITE PLASTICO	19.41
INDICE DE PLASTICIDAD	14.93

Observaciones :



LUCAS LUDEÑA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200330



LABORATORIO MECANICA DE SUELOS, CONCRETOS Y PAVIMENTOS

CC/RG-44
Versión: 01

REGISTRO DE EXCAVACION

OBRA	Comparación de método de estabilidad de taludes	INFORME N°	: _____
TRAMO	Cochabamba - Cutervo - Santo Domingo de la Capilla - Chiple	TEC. LABORATORIO	: S. Rojas R.
PARTIDA	Estabilidad de Taludes	ING. RESPONSABLE	: L. Ludueña
SECTOR	Km 56+160.00 al Km 56+220.00	FECHA	: Julio 2018
		SOLICITA	: J. Garay

DATOS DE LA MUESTRA

CALICATA	: M-002	NIVEL FREÁTICO (m)	: _____
UBICACIÓN	: KM 56+180 Lado Derecho de la Vía		
PROFUNDIDA	: 3.00 m.		

PRCF. (m)	N° DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	S I M B O L O L O G I A	SUCS	AASHTO	GRANULOMETRIA				L.L. %	I.P. %	H.N. %
						<	0.075 mm	4.750 mm	>			
0.50		Arcillas inorgánicas, arcillas magras., de color marrón (0.00m - 1.90m) y de color gris verdoso (1.90m - 3.0m), medianamente plástica, de resistencia blanda, de consistencia friable y en estado húmedo. En los primeros 0.50m presencia de abundante raíces y en la superficie cobertura vegetal. Datos obtenidos del fondo de la calicata : Densidad natural : 1729 gr./cm ³ Humedad natural : 50.6%	[Hatched pattern]	CL	A-6 (2)	87.1	10.9	2.1	0	34.3	14.9	48.3
0.69												
0.88												
1.08												
1.27												
1.46												
1.65												
1.84												
2.04												
2.23												
2.42												
2.61												
2.80												
3.00												

OBSERVACIONES : _____

LUCAS LUDUEÑA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200330

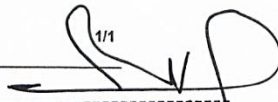


REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL

PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
N° DE EXPLORACION : DPL-01
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES		N _{DPL} = N° de golpes 10 cm
			N SPT	c (K/1cm ²) suelo friccionante	
	Arcillas limosas				
1.00			1	0,04	
			1	0,04	
2.00			15	0,56	
			9	0,34	
3.00			10	0,38	
			35	1,31	
4.00					
	Arenas limosas con gravas				
5.00					
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					


 LUCAS LUENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200330



REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL

PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
Nº DE EXPLORACION : DPL-02
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES		ENSAYOS DE PENETRACION DINAMICA LIGERA
			N SPT	ϕ (°) suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo
1.00	Arcillas limosas		1	-	0,04
			1	-	0,04
			1	-	0,04
2.00			6	-	0,23
	Arenas limosas con gravas		16	-	0,60
3.00			10	-	0,38
			14	-	0,53
4.00			19	-	0,71
5.00			36	-	1,35
6.00					
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					

Observación:

1/1


LUCAS LUDEFA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330



REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL

PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
Nº DE EXPLORACION : DPL-03
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES		ENSAYOS DE PENETRACION DINAMICA LIGERA N _{DPL} = Nº de golpes / 10 cm
			N SPT	φ (°) suelo friccionante / c (Kg/cm ²) suelo cohesivo	
1.00	Arcillas limosas		3	-	0,11
			7	-	0,26
			6	-	0,23
2.00			6	-	0,23
			3	-	0,11
3.00			3	-	0,11
			4	-	0,15
4.00			4	-	0,15
			9	-	0,34
5.00			8	-	0,30
	Arenas limosas con gravas		12	-	0,45
6.00			12	-	0,45
			23	-	0,86
7.00					
8.00					
9.00					
10.00					

Observación: No se continuo con el ensayo por falta de varillas.

1/1



LUCAS LUDENA GUTIERREZ
INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330



REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL


PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
Nº DE EXPLORACION : DPL-04
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES			ENSAYOS DE PENETRACION DINAMICA LIGERA	
			N SPT	ϕ (°) suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo	N _{DPL}	Nº de golpes 10 cm
0.00	Arcillas limosas		7	-	0,26		
1.00			6	-	0,23		
2.00			12	-	0,45		
3.00			9	-	0,34		
4.00	Arenas limosas con gravas		12	-	0,45		
5.00			12	-	0,45		
6.00			6	-	0,23		
7.00			15	-	0,56		
8.00			10	-	0,38		
9.00			3	-	0,11		
10.00			35	-	1,31		

Observación:

1/1


LUCAS LUENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200380



REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL

PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
Nº DE EXPLORACION : DPL-05
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES		ENSAYOS DE PENETRACION DINAMICA LIGERA
			N SPT	φ (°) suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo

1.00	Arcillas limosas		8	-	0,30	
2.00			3	-	0,11	
3.00			3	-	0,11	
4.00			3	-	0,11	
5.00			11	-	0,41	
6.00	Arenas limosas con gravas		13	-	0,49	
7.00			19	-	0,71	
8.00			16	-	0,60	
9.00			25	-	0,94	
10.00			32	-	1,20	

Observación:

1/1



LUCAS LIDENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330



REGISTRO DEL ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA - DPL

PROYECTO : Comparación de método de estabilidad de taludes
SOLICITANTE : Jair Garay Vásquez
UBICACIÓN : Tramo Km 56+160 -56+220
Nº DE EXPLORACION : DPL-06
COORDENADAS UTM : 737768 E, 9306622 N
NIVEL FREÁTICO (m) : N.A.
PROF. DE EXPLORACION (m) : 3,20
FECHA DE EXPLORACIÓN : Setiembre 2018



PROF. (m)	DESCRIPCION DEL SUELO	S U C S	CORRELACIONES			ENSAYOS DE PENETRACION DINAMICA LIGERA
			N SPT	φ (°) suelo friccionante	c (Kg/cm ²) suelo cohesivo	N _{DPL} = Nº de golpes 10 cm
1.00	Arcillas limosas		2	-	0,08	
2.00			5	-	0,19	
3.00		Arenas limosas con gravas		6	-	
4.00			8	-	0,30	
5.00			7	-	0,26	
6.00			13	-	0,49	
7.00			31	-	1,16	
8.00						
9.00						
10.00						

Observación:

1/1

LUCAS LUDENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330

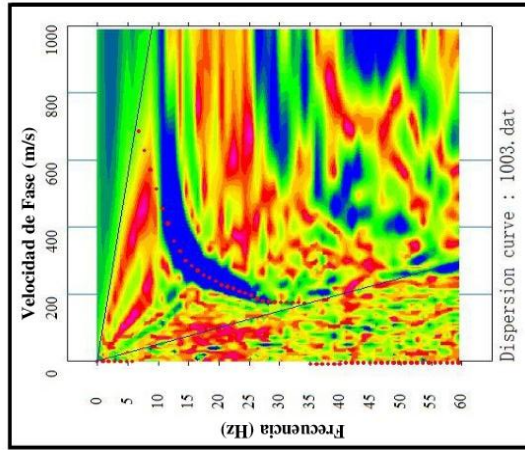
ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES

MASW-01

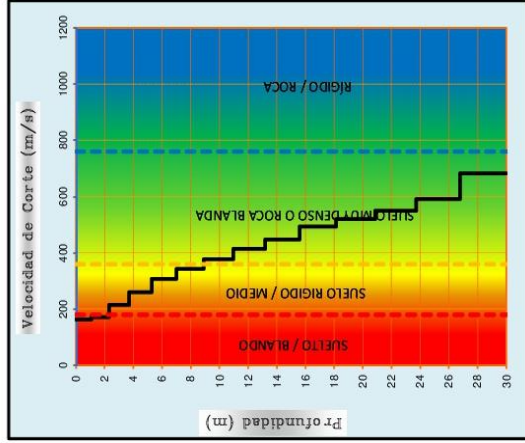
Proyecto: Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
 Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Talud Superior)
 Coordenadas: 737772 E - 9306630 N
 Fecha: Julio_2018

Realizado: D.I.E.G.M.
 Revisado: L.L.G.
 Longitud de la línea: 62.5 m

Curva de Dispersión



Perfil Unidimensional



Cuadro Resumen

D(m)	Vs(m/s)	D/Vs
1.07	162.00	0.00662
2.31	170.75	0.00724
3.71	213.75	0.00656
5.28	259.50	0.00604
7.01	306.50	0.00565
8.90	342.75	0.00553
10.96	376.50	0.00547
13.19	413.75	0.00539
15.58	447.25	0.00537
18.13	492.75	0.00521
20.85	519.25	0.00526
23.74	549.00	0.00529
26.79	590.50	0.00519
30.00	682.00	0.00473
Σ		0.07955

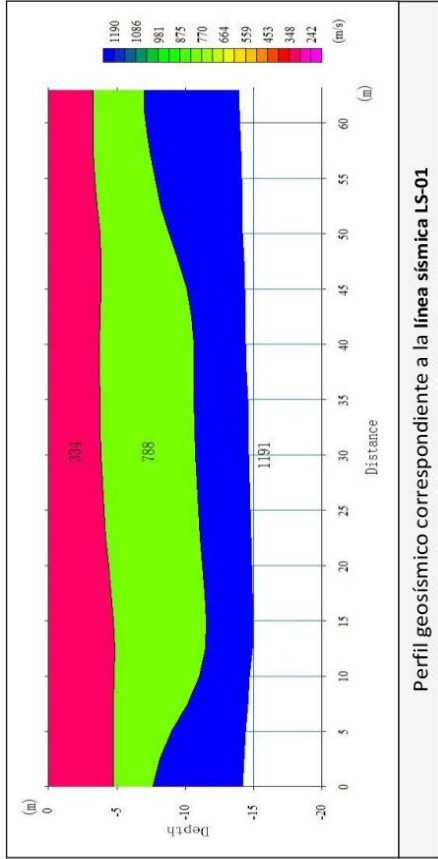
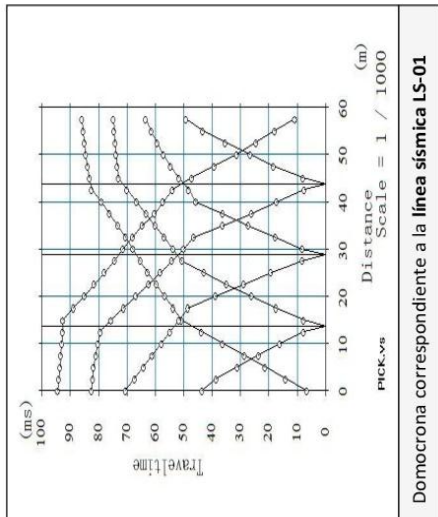
Vs 30 (m/s)	377
Tipo de Suelo	C

Período fundamental (Ts)	0.32	S1
Roca o suelo muy rígido		

LUCAS LIDIANA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330

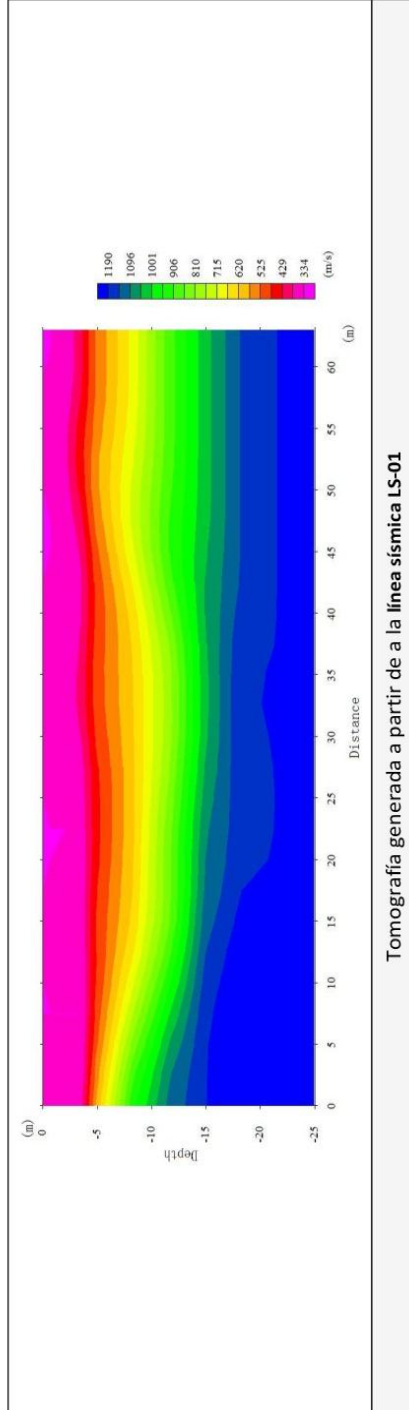

 LUCÍA LUBENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200330

ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA – LS – 01 - Km 56+160 - 56+220 (Talud Superior)



Domocrona correspondiente a la línea sísmica LS-01

Perfil geosísmico correspondiente a la línea sísmica LS-01



Tomografía generada a partir de la línea sísmica LS-01

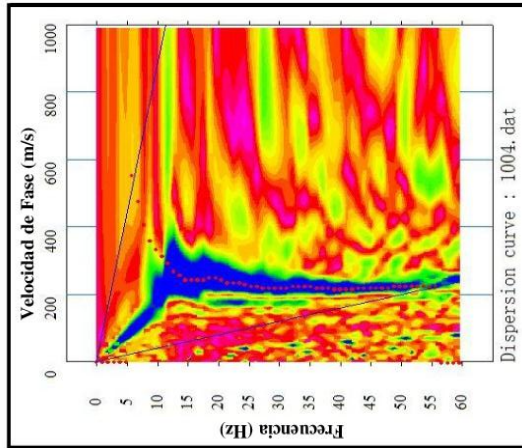
ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES

MASW-02

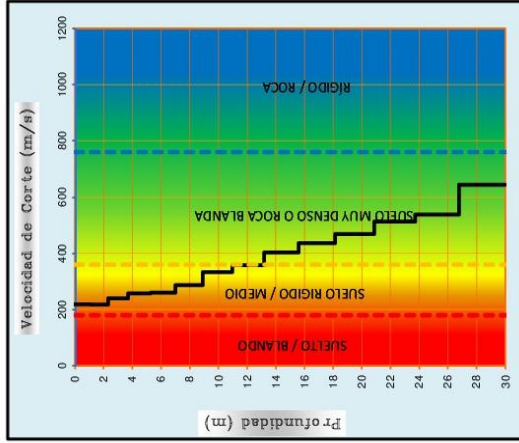
Proyecto: Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)
Coordenadas: 737823 E - 9306670 N
Fecha: Julio_2018

Realizado: D.I.E.G.M.
Revisado: L.L.G.
Longitud de la línea: 50 m

Curva de Dispersión



Perfil Unidimensional



Cuadro Resumen

D(m)	Vs(m/s)	D/Vs
1.07	218.75	0.00504
2.31	217.25	0.00573
3.71	239.25	0.00588
5.28	257.25	0.00610
7.01	259.50	0.00668
8.90	286.50	0.00662
10.96	333.00	0.00620
13.19	357.25	0.00624
15.58	403.75	0.00594
18.13	435.75	0.00589
20.85	468.75	0.00582
23.74	513.00	0.00565
26.79	538.00	0.00568
30.00	643.50	0.00500
Σ		0.08248

Vs 30 (m/s)	364
Tipo de Suelo	C

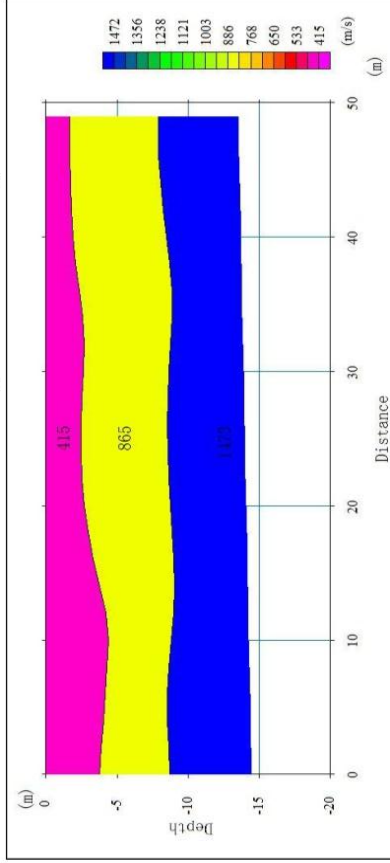
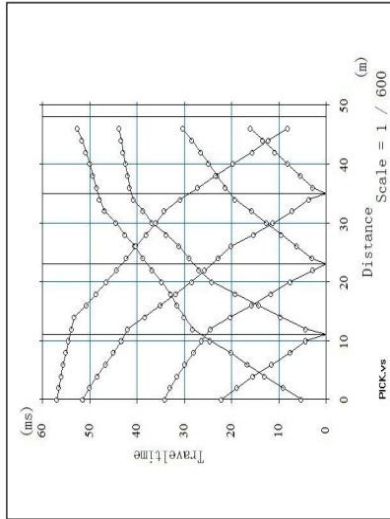
Periodo fundamental (Ts)	0.33	S1
Roca o suelo muy rígido		


LUCCAS LUDEÑA GUTIÉRREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200330


 LUCAS LUDENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP Nº 200950

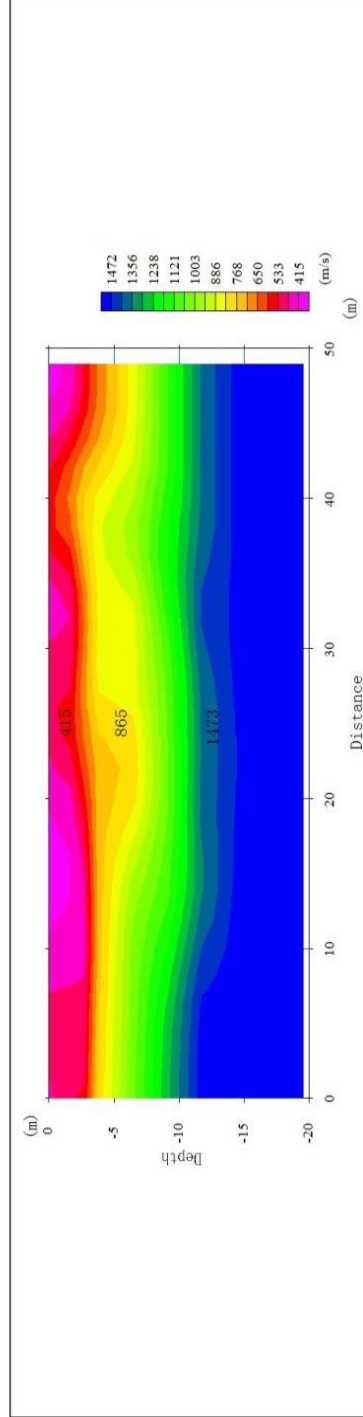
Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos

ENSAYO DE REFRACCIÓN SÍSMICA – LS – 02 - Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)



Domocrona correspondiente a la línea sísmica LS-02

Perfil geosísmico correspondiente a la línea sísmica LS-02



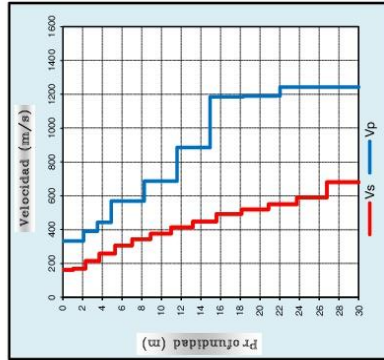
Tomografía generada a partir de a la línea sísmica LS-02

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-01 & LS-01

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.

Proyecto: Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Talud Superior)
Coordenadas: 737772 E - 9306630 N
Fecha: Julio_2018



Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m3)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm2)	Módulo de Young Ed (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm2)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm2)	Módulo de Young Ee (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm2)
1	334	162	1.8	0.35	482.0	1297.8	1406.3	24.1	64.9	70.3
2	335	171	1.8	0.32	535.5	1417.9	1341.9	26.8	70.9	67.1
3	392	214	1.8	0.29	839.2	2161.7	1699.4	42.0	108.1	85.0
4	442	260	1.8	0.24	1236.9	3060.3	1940.2	82.5	153.0	129.3
6	570	307	1.8	0.30	1725.5	4473.4	3659.9	115.0	223.7	244.0
8	687	343	1.8	0.33	2157.8	5759.2	5800.8	143.9	288.0	386.7
10	884	377	1.9	0.39	2748.3	7636.6	11503.2	183.2	381.8	766.9
12	1186	447	1.9	0.42	3878.2	10991.4	22091.0	258.5	549.6	1472.7
15	1191	493	1.9	0.40	4707.4	13151.0	21247.3	313.8	657.5	1416.5
18	1191	519	1.9	0.38	5227.3	14456.5	20554.0	435.6	1204.7	1712.8
24	1242	591	1.9	0.35	6760.3	18307.2	20901.0	563.4	1525.6	1741.7
30	1242	682	2.0	0.28	9492.3	24380.7	18832.7	791.0	2031.7	1569.4

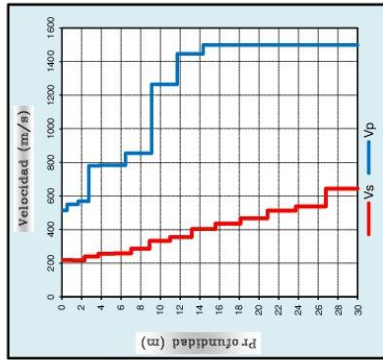

LUCAS LUDENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 20030

MÓDULOS DE DEFORMACIÓN

MASW-02 & LS-02

Proyecto: Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos
Ubicación: Km 56+160 - 56+220 (Carretera Exterior)
Coordenadas: 737823 E - 9306670 N
Fecha: Julio_2018

Realizado: D.E.G.M.
Revisado: L.L.G.



Profundidad (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (Tn/m3)	Relación de poisson μ	Módulo de Corte Gd (Kg/cm2)	Módulo de Young Ed (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Kd (Kg/cm2)	Módulo de Corte Ge (Kg/cm2)	Módulo de Young Ee (Kg/cm2)	Módulo Volumétrico Ke (Kg/cm2)
1	516	219	1.8	0.39	878.9	2443.9	3712.7	43.9	122.2	185.6
2	551	217	1.8	0.41	866.9	2441.1	4421.3	43.3	122.1	221.1
3	570	239	1.8	0.39	1051.4	2929.4	4568.9	52.6	146.5	228.4
4	781	257	1.8	0.44	1215.5	3498.6	9583.1	81.0	174.9	638.9
6	782	260	1.8	0.44	1236.9	3557.7	9592.8	82.5	177.9	639.5
8	855	287	1.8	0.44	1507.6	4332.3	11425.6	100.5	216.6	761.7
10	1264	333	1.8	0.46	2036.7	5958.4	26643.6	135.8	297.9	1776.2
12	1446	404	1.9	0.46	3160.5	9214.3	36336.6	210.7	460.7	2422.4
15	1500	436	1.9	0.45	3681.3	10704.6	38714.0	245.4	535.2	2580.9
18	1500	469	1.9	0.45	4260.0	12319.0	37942.4	355.0	1026.6	3161.9
24	1500	538	1.9	0.43	5611.7	16006.5	36140.2	467.6	1333.9	3011.7
30	1500	644	1.9	0.39	8028.3	22274.2	32916.0	669.0	1856.2	2743.2


 LUCAS LUDENA GUTIERREZ
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 200350



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

AUTORIZACIÓN DE LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTE POR EL PRESENTE EL VISTO BUENO QUE OTORGA EL ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN DE
La Escuela de Ingeniería Civil

A LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN QUE PRESENTA:

GARY VÁSQUEZ, JAIR ALFREDO

INFORME TITULADO:

*COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR
EQUILIBRIO LÍMITE Y POR MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDICIONES DE
CARGA ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA.*

PARA OBTENER EL TÍTULO O GRADO DE:

Ingeniero Civil

SUSTENTADO EN FECHA: *04/12/2018*

NOTA O MENCIÓN : *15 (Quince)*

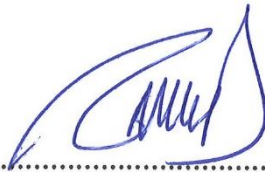

[Signature]
Firma del *[Signature]* coordinador de Investigación de
Ingeniería Civil

Yo, Villegas Martínez Carlos Alberto, Docente de la Facultad de Ingeniería y Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad César Vallejo, sede Lima Norte), revisor(a) de la tesis titulada:

“COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EQUILIBRIO LIMITE Y POR MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDICIONES DE CARGA ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA” del estudiante Jair Alfredo Garay Vásquez, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 17 % verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

Lima, 14 de diciembre del 2018



.....
Firma

Carlos Alberto Villegas Martínez

DNI: 08864295.....

Elaboró	Dirección de Investigación	Revisó	Responsable de SGC	Aprobó	Vicerrectorado de Investigación
---------	----------------------------	--------	--------------------	--------	---------------------------------

Yo, GARAY VASQUEZ JAIR ALFREDO, identificado con DNI N° 73976838 Egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad César Vallejo, autorizo la divulgación y comunicación pública de mi trabajo de investigación titulado:

"COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR EQUILIBRIO LIMITE Y POR MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDICIONES DE CARGA ESTÁTICA Y PSEUDO-ESTÁTICA"

en el Repositorio Institucional de la UCV (<http://repositorio.ucv.edu.pe/>), según lo estipulado en el Decreto Legislativo 822, Ley sobre Derechos de Autor, Art. 23 y Art. 33



FIRMA

DNI: 73976838

FECHA: 14 de diciembre del 2018

Elaboró	Dirección de Investigación	Revisó	Responsable de SGC	Aprobó	Vicerrectorado de Investigación
---------	----------------------------	--------	--------------------	--------	---------------------------------

The screenshot displays a document viewer interface. At the top, a red banner indicates a coincidence rate of 17%. Below this, the document content is shown, including the logo of Universidad César Vallejo, the faculty name 'FACULTAD DE INGENIERIA', and the title 'ESCTELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL'. The main text of the document is partially visible, mentioning 'Comparación de métodos de estabilidad de taludes por equilibrio límite y por métodos numéricos en condiciones de carga estática y pseudo-estática'. A list of sources is provided at the bottom of the document, including 'Entregado a Universidad...', 'es.scribd.com', 'repositorio.unc.edu.pe', 'repositorio.ucv.edu.pe', and 'www.scribd.com'. The interface also features a toolbar with various icons and a sidebar with navigation options like 'Resumen de coincidencias' and 'Activar Windows'.

Resumen de coincidencias

17%

Se están viendo fuentes estándar

Ver fuentes en inglés (Beta)

Coincidencias

- 1 Entregado a Universidad... Trabajo del estudiante 3%
- 2 es.scribd.com Fuente de Internet 2%
- 3 repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet 1%
- 4 repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet 1%
- 5 www.scribd.com Fuente de Internet 1%

Activar Windows

Ver 6 coincidencias por Activar Windows 1%

Página: 1 de 96 Número de palabras: 18688

Text-only Report High Resolution Activado