



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA DEL TALUD EN  
EL FRENTE MINADO DEL PROYECTO MINERO FADE I –  
ANANEA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. GERMAN QUISPE CATUNTA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO - PERÚ**

**2021**



## DEDICATORIA

*Al ser supremo por las oportunidades, a mis padres: Martin Quispe Mullisaca a mi madre Dominga Catunta Lopez por su apoyo incondicional en mi formación académica en esta primera casa de estudios vuestra Universidad Nacional del Altiplano – Puno.*

*A mi hermano Nicasio Quispe Catunta por esos apoyos y alientos perseverantes para así poder culminar con éxito el presente trabajo de investigación a todos ellos los dedico con gran cariño.*

*German*



## AGRADECIMIENTOS

*Agradecimiento infinito a Dios por su gracia y bendiciones en mi vida diaria, a la Universidad Nacional del Altiplano, en especial a los docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas por haberme formado y brindado sus valiosas enseñanzas. Agradezco también a mis jurados y director de tesis, por sus consejos y por haberme guiado de una manera eficiente durante el desarrollo de la tesis*

***German***



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**ÍNDICE DE ANEXOS**

**RESUMEN ..... 14**

**ABSTRACT..... 15**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

**1.1 Descripción de la realidad problemática ..... 16**

**1.2 Formulación del problema ..... 17**

1.2.1 Pregunta general ..... 17

1.2.2 Preguntas específicas ..... 17

**1.3 Hipótesis de la investigación ..... 17**

1.3.1 Hipótesis general..... 17

1.3.2 Hipótesis específicas..... 18

**1.4 Justificación de la investigación..... 18**

**1.5 Objetivos de la investigación..... 18**

1.5.1 Objetivo general..... 18

1.5.2 Objetivos específicos ..... 18

**1.6 Relevancia de la investigación ..... 19**

**1.7 Limitaciones del estudio ..... 19**

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

**2.1 Antecedentes..... 20**

**2.2 Marco teórico ..... 23**

2.2.1 Generalidades del suelo ..... 23

2.2.2 Resistencia al corte ..... 24

2.2.3 Taludes en suelos ..... 25

2.2.4 Estabilidad de taludes ..... 28



2.2.5	El problema de la estabilidad de taludes.....	29
2.2.6	Método de análisis de estabilidad de taludes .....	29
2.2.7	Análisis sísmico .....	39
2.2.8	Análisis pseudoestático en taludes.....	40
2.2.9	Programa computacional Slide v.6.0 (versión estudiantil).....	42
<b>2.3</b>	<b>Marco conceptual.....</b>	<b>43</b>

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1</b>	<b>Diseño metodológico .....</b>	<b>45</b>
3.1.1	Tipo de investigación.....	45
3.1.2	Diseño de investigación .....	45
<b>3.2</b>	<b>Población y muestra.....</b>	<b>45</b>
3.2.1	Población .....	46
3.2.2	Muestra .....	46
<b>3.3</b>	<b>Definición de variables .....</b>	<b>46</b>
3.3.1	Variable independiente .....	46
3.3.2	Variable dependiente .....	46
3.3.3	Operacionalización de variables .....	47
<b>3.4</b>	<b>Técnicas.....</b>	<b>47</b>
3.4.1	Trabajo en campo.....	47
3.4.2	Trabajo de laboratorio.....	47
3.4.3	Trabajo en gabinete.....	49
<b>3.5</b>	<b>Instrumentos.....</b>	<b>49</b>
3.5.1	Ubicación .....	50
3.5.2	Accesibilidad a la zona de estudio .....	51
3.5.3	Clima.....	51
3.5.4	Precipitación .....	52
3.5.5	Vegetación .....	52
3.5.6	Fauna.....	52
<b>3.6</b>	<b>Geología .....</b>	<b>53</b>
3.6.1	Geología regional.....	53
3.6.2	Geología local .....	54
3.6.3	Control estructural .....	56
3.6.4	Control litoestratigráfico.....	56



3.6.5	Yacimiento mineral.....	57
3.6.6	Sismicidad.....	58
3.6.7	Hidrología .....	58
3.6.8	Aguas superficiales .....	59
3.6.9	Laguna artificial Sillacunca .....	60
3.6.10	Espejos de agua.....	60
3.6.11	Hidrogeología .....	61

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>63</b>
4.1.1	Geometría del talud.....	63
4.1.2	Factor por intensidad sísmica .....	64
4.1.3	Factor por intensidad de lluvias .....	67
<b>4.2</b>	<b>Resultados de laboratorio .....</b>	<b>68</b>
4.2.1	Ensayo de determinación de las propiedades físicas .....	68
1.2.1.4	Ensayo de determinación los límites de consistencia .....	71
1.2.1.5	Análisis granulométrico .....	74
<b>4.3</b>	<b>Análisis de estabilidad .....</b>	<b>76</b>
4.3.1	Análisis de estabilidad de las condiciones actuales del talud de explotación. 76	
4.3.2	Determinación de los parámetros geométricos óptimos del talud .....	80
4.3.3	Resultados de análisis de simulaciones en el talud de explotación .....	82
<b>4.4</b>	<b>Métodos de estabilización.....</b>	<b>85</b>
<b>4.5</b>	<b>Discusiones.....</b>	<b>85</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>.....</b>	<b>92</b>

**Área** : Ingeniería de Minas

**Tema** : Mecánica de rocas, geomecánica y geotecnia

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 27 de agosto del 2021



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Criterio de rotura en suelos. ....	25
<b>Figura 2.</b> Mecanismos de falla en suelos. ....	26
<b>Figura 3.</b> Clasificación de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes. ....	30
<b>Figura 4.</b> Fuerzas que actúan sobre superficie de rotura curva.....	33
<b>Figura 5.</b> División de rebanadas para aplicar el equilibrio límite.....	34
<b>Figura 6.</b> Fuerzas que actúa en una rebanada-método de Fellenius. ....	36
<b>Figura 7.</b> Fuerzas actuantes en cada rebanada, método de Bishop.....	37
<b>Figura 8.</b> Diagrama para determinar el factor seguridad. ....	39
<b>Figura 9.</b> Análisis pseudoestático de una falla curva.....	41
<b>Figura 10.</b> Columna estratigráfica de los cuadrángulos de Putina y la Rinconada.....	55
<b>Figura 11.</b> Sección del talud a analizar. ....	63
<b>Figura 12.</b> Zonificación sísmica Perú. ....	65
<b>Figura 13.</b> Gráfico de esfuerzo vs deformación.....	71
<b>Figura 14.</b> Esfuerzo de corte máximo vs esfuerzo normal. ....	71
<b>Figura 15.</b> Diagrama de fluidez. ....	73
<b>Figura 16.</b> Carta de plasticidad. ....	74
<b>Figura 17.</b> Clasificación AASTHO.....	74
<b>Figura 18.</b> Curva granulométrica. ....	75
<b>Figura 19.</b> Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas, estado actual del talud de explotación.....	77
<b>Figura 20.</b> Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones pseudoestáticas.....	78
<b>Figura 21.</b> Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 75 grados de inclinación.....	79



<b>Figura 22.</b> Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.....	79
<b>Figura 23.</b> Resultados de la simulación método Bishop Simplified.....	83
<b>Figura 24.</b> Resultados de la simulación método GLE/Morgenstern-Price. ....	84



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Factor de seguridad y distribución de fuerzas al aplicar el equilibrio limite... 34	34
<b>Tabla 2.</b> Ecuación del equilibrio limite según el tipo de ecuación. .... 35	35
<b>Tabla 3.</b> Valores de K recomendados para el análisis pseudoestático. .... 41	41
<b>Tabla 4.</b> Operacionalización de variables de presente investigación..... 47	47
<b>Tabla 5.</b> Ubicación geográfica el proyecto minero Fade I. .... 51	51
<b>Tabla 6.</b> Ruta de acceso al proyecto minero Fade I. .... 51	51
<b>Tabla 7.</b> Factor de zona Perú (E.030) ..... 65	65
<b>Tabla 8.</b> Factor de suelo Perú (E.030)..... 66	66
<b>Tabla 9.</b> Valores asignados a la precipitación de lluvia (Mora, R. et al., 1992). .... 67	67
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la generación de valores para diferentes tiempos de retorno.. 68	68
<b>Tabla 11.</b> Determinación de peso unitario. .... 69	69
<b>Tabla 12.</b> Contenido de humedad. .... 69	69
<b>Tabla 13.</b> Parámetros de resistencia del suelo. .... 70	70
<b>Tabla 14.</b> Ensayo de corte directo. .... 70	70
<b>Tabla 15.</b> Resultados de ensayo limite líquido. .... 72	72
<b>Tabla 16.</b> Resultados de ensayo limite plástico. .... 72	72
<b>Tabla 17.</b> Resultados límites de consistencia..... 73	73
<b>Tabla 18.</b> Tipo de suelo según SUCS y AASTHO. .... 73	73
<b>Tabla 19.</b> Análisis granulométrico de la muestra de suelo. .... 75	75
<b>Tabla 20.</b> Criterios de aceptabilidad típicos para F.S estático y pseudoestático..... 77	77
<b>Tabla 21.</b> Resumen de resultados de análisis de estabilidad por cada método. .... 80	80
<b>Tabla 22.</b> Resultado de simulación con el método de Bishop Simplified. .... 82	82
<b>Tabla 23.</b> Resultado de simulación con el método GLE/Morgenstern-Price..... 84	84



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- SUCS** : Sistema unificado de clasificación de suelos
- ASTM** : American society for testing and materials
- AASTHO** : American association of state highway and transportation
- F. S** : Factor de seguridad



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b>	Información de SENAMHI, precipitaciones máximas de 1964 al 2009....	92
<b>Anexo 2.</b>	Especificaciones técnicas de la excavadora CAT 325DL.....	93
<b>Anexo 3.</b>	Resultados de ensayos de clasificación de muestras de suelo, SUCS y AASHTO. ....	94
<b>Anexo 4.</b>	Resultados de ensayos de límites de consistencia en muestras de suelo. ..	95
<b>Anexo 5.</b>	Resultados de ensayo de corte directo en suelo CD.....	96
<b>Anexo 6.</b>	Resultados de ensayos de corte directo, gráficos de esfuerzo, deformación y corte máximo.....	97
<b>Anexo 7.</b>	Recolección de muestras en el proyecto minero FADE I. ....	98
<b>Anexo 8.</b>	Preparación de la muestra y realización de ensayos de laboratorio en el proyecto minero FADE I, parte I. ....	98
<b>Anexo 9.</b>	Preparación de la muestra y realización de ensayos de laboratorio en el proyecto minero FADE I, parte II.....	99
<b>Anexo 10.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 83 grados de inclinación. ....	99
<b>Anexo 11.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 77 grados de inclinación. ....	100
<b>Anexo 12.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 75 grados de inclinación. ....	100
<b>Anexo 13.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 73 grados de inclinación. ....	100
<b>Anexo 14.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 70 grados de inclinación .....	101



<b>Anexo 15.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 67 grados de inclinación. ....	101
<b>Anexo 16.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 65 grados de inclinación. ....	101
<b>Anexo 17.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 62 grados de inclinación. ....	102
<b>Anexo 18.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 60 grados de inclinación. ....	102
<b>Anexo 19.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 57 grados de inclinación. ....	102
<b>Anexo 20.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 62 grados de inclinación. ....	103
<b>Anexo 21.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 65 grados de inclinación .....	103
<b>Anexo 22.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 69 grados de inclinación. ....	103
<b>Anexo 23.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 72 grados de inclinación. ....	104
<b>Anexo 24.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 75 grados de inclinación. ....	104
<b>Anexo 25.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 82 grados de inclinación. ....	104
<b>Anexo 26.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 83 grados de inclinación. ....	105



<b>Anexo 27.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 85 grados de inclinación.....	105
<b>Anexo 28.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 86 grados de inclinación.....	105
<b>Anexo 29.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 87 grados de inclinación.....	106
<b>Anexo 30.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 88 grados de inclinación.....	106
<b>Anexo 31.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 89 grados de inclinación.....	106
<b>Anexo 32.</b>	Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 90 grados de inclinación.....	107
<b>Anexo 34.</b>	El talud que actualmente se tiene se observa la altura y talud .....	108
<b>Anexo 35.</b>	Matriz de consistencia de la investigación del proyecto minero FADE I. .....	109



## RESUMEN

La presente investigación fue desarrollada en el proyecto minero FADE I, ubicado en el sector Chaquiminas Pampilla, distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno. Durante el año 2020. La inestabilidad y fallamientos en los taludes tiene consecuencias como la interrupción en el proceso de explotación de la mina y accidentes, lo cual hace aumentar los costos operativos y crea condiciones subestándares de trabajo, esto por consecuencia de fallamiento impuesta por las condiciones naturales como el relieve, precipitaciones y la calidad del terreno para lo cual en esta investigación tuvo como **objetivo** determinar la estabilidad física del talud del frente de minado, para tener mayor seguridad en el Proyecto Minero FADE I. La metodología de investigación es de tipo cuasi-experimental y un diseño descriptivo. Los resultados obtenidos partieron de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, donde se determinó una arena mal graduada con gravas y un factor de seguridad de 1.23 en condiciones estáticas y 1.09 en condiciones pseudoestáticas, además se llegó a la conclusión de trabajar en condiciones seguras. con un talud de banco de 10 metros de altura y con una inclinación de 65 grados como máximo.

**Palabras Clave:** Estabilidad física, geotecnia, factor de seguridad.



## ABSTRACT

This research was developed in the FADE I mining project, located in the Chaquiminas Pampilla sector, Ananea district, San Antonio de Putina province, Puno department. During 2020. Instability and failures in the slopes have consequences such as interruption in the mine exploitation process and accidents, which increases operating costs and creates substandard working conditions, this as a consequence of failure imposed by the natural conditions such as relief, rainfall and the quality of the land for which in this investigation the objective was to determine the physical stability of the slope of the mining front, to have greater security in the FADE I Mining Project. The research methodology is of type quasi-experimental and a descriptive design. The results obtained came from the soil mechanics laboratory tests, where a poorly graded sand with gravel was determined and a safety factor of 1.23 in static conditions and 1.09 in pseudostatic conditions, in addition to the conclusion of working in safe conditions. with a bank slope of 10 meters high and with a maximum inclination of 65 degrees.

**Key Words:** Slope Stability, Geotecnic, Segurity Factor.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación fue desarrollada en el proyecto minero FADE I, ubicado en el sector Chaquiminas Pampilla, del departamento de Puno. El método de explotación es tipo cielo abierto convencional y se tiene como mineral valioso al oro. La investigación es relevante porque ayuda a conocer el comportamiento del talud de explotación ya que anteriormente cuando se realizan los trabajos no se conocía ni se consideraba el tipo de suelo, la resistencia al corte y su factor de seguridad. Así también es importante porque se han realizado ensayos de laboratorio de mecánica de suelos que han ayudado a conocer el comportamiento del talud de explotación. La investigación presentada en la siguiente tesis titulada “Determinación de estabilidad física del talud en el frente de minado del proyecto minero FADE I – ANANEA”, donde se aplica una metodología tipo cuasi-experimental y diseño descriptivo.

La investigación realizada se ha dividido en cuatro capítulos, donde en el capítulo I, se considera el planteamiento del problema, objetivos, hipótesis y la justificación del problema presentado. Para el capítulo II, se tiene una descripción de los antecedentes de investigación y el marco teórico. En el capítulo III, se fundamenta los materiales y el método de investigación también se presenta la geología local y los trabajos de campo y laboratorio realizados. Para el capítulo IV, se presenta los resultados obtenidos usando el programa computacional de geomecánica.

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

Los problemas fundamentales son los desprendimientos y deslizamientos de los bancos del talud, que ha venido sucediendo en el proyecto minero FADE-I. Esto por consecuencia de las erróneas formas operativas que no se consideran como la altura del talud, ángulo del talud adecuado y procedimientos de trabajo con las maquinarias



que genera cortes y excavaciones, ya que no se considerara estos factores cuando se trabaja en el frente de minado así como también por factores naturales como la calidad del terreno, su relieve, la presencia de precipitaciones que podrían generar peligros y riesgos para los trabajadores, maquinarias y al proceso de minado, por lo que se optó en la realización de un estudio geotécnico a fin de proponer estándares operativos y tener mayor conocimiento en el tipo de terreno donde se trabaja.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Pregunta general**

¿Cómo determinar la estabilidad física del talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I?

### **1.2.2 Preguntas específicas**

- ¿Cómo determinar las propiedades físicas, mecánicas de los suelos que nos indique el tipo de suelo y determinar su resistencia del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.
- ¿Cuál es el factor de seguridad adecuado para el talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I?

## **1.3 Hipótesis de la investigación**

### **1.3.1 Hipótesis general**

- Con el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo se determinó la estabilidad física del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.



### **1.3.2 Hipótesis específicas**

- La determinación de las propiedades físicas del suelo nos permitió conocer el tipo de suelo y su resistencia del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.
- La determinación del factor de seguridad nos permitió conocer el nivel de estabilidad física del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.

### **1.4 Justificación de la investigación**

La presente investigación se realiza con el fin de mejorar las condiciones de trabajo y seguridad en el proceso de explotación en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I y así mismo dejar un precedente para las futuras investigaciones en las zonas de trabajo. Realizando un análisis de estabilidad física del talud, obtendremos las propiedades físicas, mecánicas del comportamiento del suelo y poder hacer mejoras en los procesos de extracción del mineral aurífero. También es importante saber que la realización de estos análisis de estabilidad de los taludes evitaremos accidentes que puedan afectar la integridad de los trabajadores y de los equipos. Así mismo realizar estos análisis de estabilidad ayudan a evitar posibles retrasos y paralizaciones en la producción del mineral y la obtención de beneficios.

### **1.5 Objetivos de la investigación**

#### **1.5.1 Objetivo general**

- Determinar la estabilidad física del talud del frente de minado para tener mayor seguridad en el Proyecto Minero FADE I.

#### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos del talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I.



- Calcular el factor de seguridad adecuado del talud en frente de minado del Proyecto Minero FADE I.

### **1.6 Relevancia de la investigación**

La presente investigación se realiza con el fin dejar un precedente para las futuras investigaciones en las zonas de trabajo del Proyecto Minero FADE I. y las zonas que cuenten con la misma característica litológicas.

### **1.7 Limitaciones del estudio**

La presente investigación tiene limitaciones cuando los trabajos se realizan en mayores profundidades y en temporadas de lluvia fuertes ya que influirán en las simulaciones realizadas en el software.

Así mismo durante la realización de la investigación se han tenido limitantes como la falta de recursos propios para realizar ensayos más completos como el ensayo triaxial en suelos que son más caros.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Antecedentes

##### Antecedente internacional

Guillen (2004), las características de una ladera o talud son las que determinan las condiciones geológicas propicias para la generación de deslizamientos. Pero hay que tomar en cuenta que estos deslizamientos pueden ocurrir por otros factores, los cuales pueden ser naturales como la lluvia, las heladas, sismos etc. Existen causas artificiales como producto de la actividad humana que de una u otra modifica la estabilidad de las laderas.

Orosco (2013), Basados en las modelaciones realizadas por el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos se observa que las diferencias del factor de seguridad calculado no son significativas y se evidencia la importancia de una correcta determinación de los parámetros de resistencia para poder obtener resultados razonables.

Valiente & Sobrecases y Díaz (2015), En el estudio de la estabilidad de taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo, siendo el agente externo responsable de la inestabilidad una fuerza de masa como el peso y los efectos de filtración, a los cuales se añaden otros factores como las sobrecargas. Para poder abordar los mecanismos de rotura, es de especial importancia conocer la cinemática de los movimientos. En el estudio de estabilidad, precisamos conocer con la máxima precisión los parámetros resistentes ( $c'-\phi\phi'$ ) de cada uno de los niveles afectados, los cuales dependerán de los movimientos experimentados por el subsuelo.



## Antecedente nacional

Lugo (2018), los métodos de análisis o de cálculo son determinantes en el sentido de definir la estabilidad de terreno y se rige por la determinación de la resistencia al corte de los suelos que ya tuvieron antecedentes de deslizamiento y determinar el coeficiente o factor de seguridad que define la estabilidad del talud. Uno de los factores más importantes en el análisis de la estabilidad de pendientes es el efecto de la infiltración del agua. Este proceso genera un cambio en el estado tensorial en la pendiente que debe equilibrarse, al mismo tiempo, este nuevo estado tensorial modifica las propiedades del suelo.

Ochoa (2016), los factores internos determinantes que tienen más ponderancia para la inestabilidad de taludes en nuestra área de estudio son la pendiente por presentar pendientes de 30 a 40% y la litología, de los dos factores externos analizados se pudo observar que las precipitaciones no tienen gran implicancia para la inestabilidad de taludes, cabe recalcar en estos ítems que no se realizó análisis de acumulación de lluvias. Y se tiene como factor de seguridad de 1.25 en condiciones estáticas.

Mendoza (2016), En el análisis de factores de seguridad para las condiciones pseudoestáticas se evidenció que el cambio de este valor, para distintas secciones, no sigue la misma proporción de cambio que para las condiciones estáticas, siendo esta última mayor. Por lo tanto, se puede concluir que en el caso pseudoestático la geometría del talud no influye considerablemente a la estabilidad del mismo. Es decir, que la estabilidad será proporcionada por las características geotécnicas de los materiales presentes. Asimismo, en este trabajo podría existir riesgo de licuefacción, ya que se tiene estratos de arena y además hay presencia de agua



Mostajo (2016), los análisis de campo y estudio de laboratorio realizados se observa que los suelos en estudio son GC (Gravas Limo - Arcillosa), con alto contenido de humedad y un grado alto de saturación, con ensayos de resistencia dentro de los parámetros establecidos y un peso específico estándar. Además, se tendría falla rotacional ocasionado por la alta presencia de aguas y aumento del nivel freático, pero adecuo estructuras de apoyo a fin de mejorar los parámetros de resistencia del suelo.

Tardeo y Zanabria (2016), Los factores internos determinantes que tienen más ponderación para la inestabilidad de taludes en nuestra área de estudio son: la pendiente y la litología. Y de los dos factores externos analizados, se pudo observar que las precipitaciones no tienen gran implicancia para la inestabilidad de taludes

Ordaya (2017), analizados las diferentes geometrías de superficie de falla presentes en el talud del sector la esperanza, se llega a la conclusión de que la condición más desfavorable y crítica es la Seudoestática – Saturada, ya que presentan los Factores de Seguridad más bajos, así mismo, el F.S. depende del relieve del terreno y de los parámetros del suelo.

Das (2001), La resistencia interna por área unitaria es igual a la resistencia cortante de la masa del suelo que ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Entonces cuando se realiza trabajos es primordial entender la resistencia cortante para analizar los problemas de estabilidad del suelo.

### **Antecedente local**

Quea (2017), los fallamientos de los taludes del proyecto San Antonio – María, ubicado en la zona de Vizcachani del distrito de Ananea. Es debido a la inestabilidad año tras año que viene causando interrupciones en el proceso de explotación como consecuencia de las precipitaciones que implica costos operativos, donde concluyó que



algunos parámetros físicos del talud serán de  $75^\circ$  y con altura de 10 metros donde se tendrá factor de seguridad de 1.1.

INGEMMET (2020), En el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa, el peso de los factores condicionantes considerados es el siguiente: geomorfología (28 %), litología (27 %), pendiente (20 %), hidrogeología (15 %). La distribución porcentual de los peligros geológicos por procesos de movimientos en masa es como sigue: están los flujos de detritos (38.3 %), seguidos por caída de rocas (32.8 %), deslizamientos (11.8 %).

CCori (2015), La estabilidad global de un determinado talud se pierde cuando la tensión de corte necesaria para mantenerla es superior a la resistencia al corte del terreno y eso ocurre, además, en una superficie de rotura, que divide al talud en dos partes: la parte englobada y la superficie de rotura deslizaría sobre el resto.

## **2.2 Marco teórico**

### **2.2.1 Generalidades del suelo**

Son aquellos materiales naturales disgregables fácilmente, bien mediante agitación, o bien por agentes químicos «suaves» (por efecto del agua, o de dispersante), existen múltiples posibilidades de clasificación de distintos tipos de suelos (clasificación de Casagrande, ASSHO, ...) están basadas únicamente en su composición granulométrica y en su plasticidad. Es el primer paso que deben dar para dar conocimiento del comportamiento resistente de los suelos. (IGME, 1986)

- Suelos cohesivos y suelos no cohesivos
- Suelos normalmente consolidados y pre consolidados
- Suelos finos y suelos con partículas gruesas

### 2.2.2 Resistencia al corte

Cuando se trata de analizar la estabilidad de un determinado talud constituido por suelos naturales o artificiales es necesario valorar la resistencia al esfuerzo cortante de éstos, y el estado tensional en el interior terreno, ya que inevitablemente se producen esfuerzos cortantes.(IGME, 1986)

Los procedimientos más habituales para determinar la resistencia al corte de los suelos consisten en efectuar ensayos en laboratorios con muestras, remoldeadas o inalteradas, que reproduzcan el estado en que el material se encuentra en el terreno.(IGME, 1986)

#### Ángulo de fricción y cohesión

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento ( $\phi$ ), el cual es concepto básico de la física. La cohesión ( $c$ ) es la medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación.(Suarez D., 1998)

#### Mohr Coulomb

El criterio de rotura postula que la resistencia al corte en las rocas tiene dos componentes: cohesión y fricción, siendo esta última dependiente de la tensión efectiva normal sobre el plano de rotura.(Ramírez O. & Alejano M., 2004)

Según la teoría de Mohr los materiales se rompen debido a una combinación entre esfuerzo cortante y normal. Aprovechando esta teoría, Coulomb propuso un criterio de rotura para los suelos que relaciona tensiones efectivas y normales actuando en cualquier plano del suelo. (González, 2002). Esta relación se describe como:

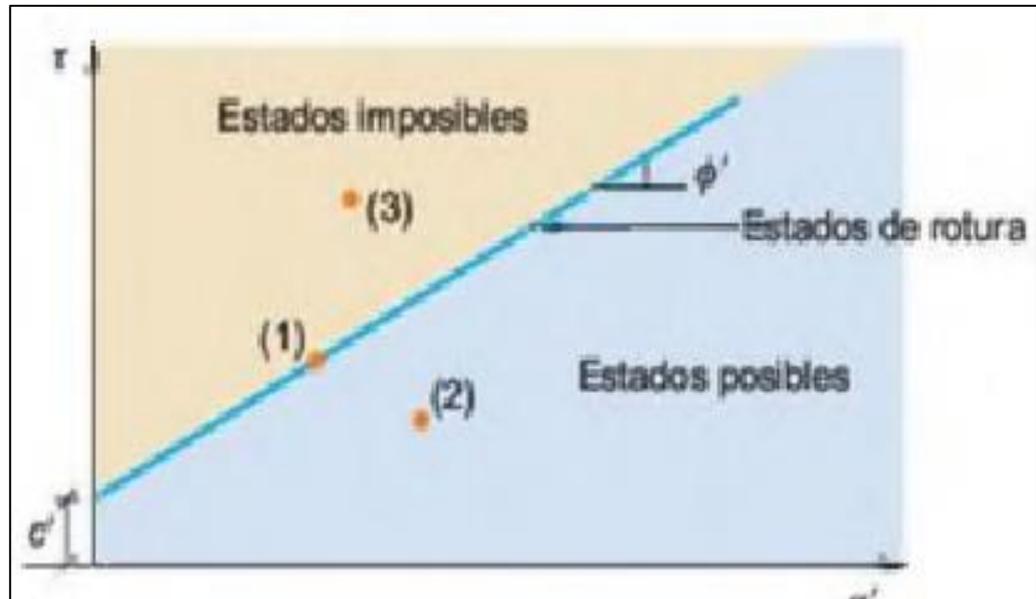
$$\tau = c' + (\sigma_n - u)tg\phi$$

Donde:

$\tau$  = es la resistencia al corte,

$c'$  = la cohesión efectiva,

$\sigma_n$  = la tensión normal, u presión intersticial.



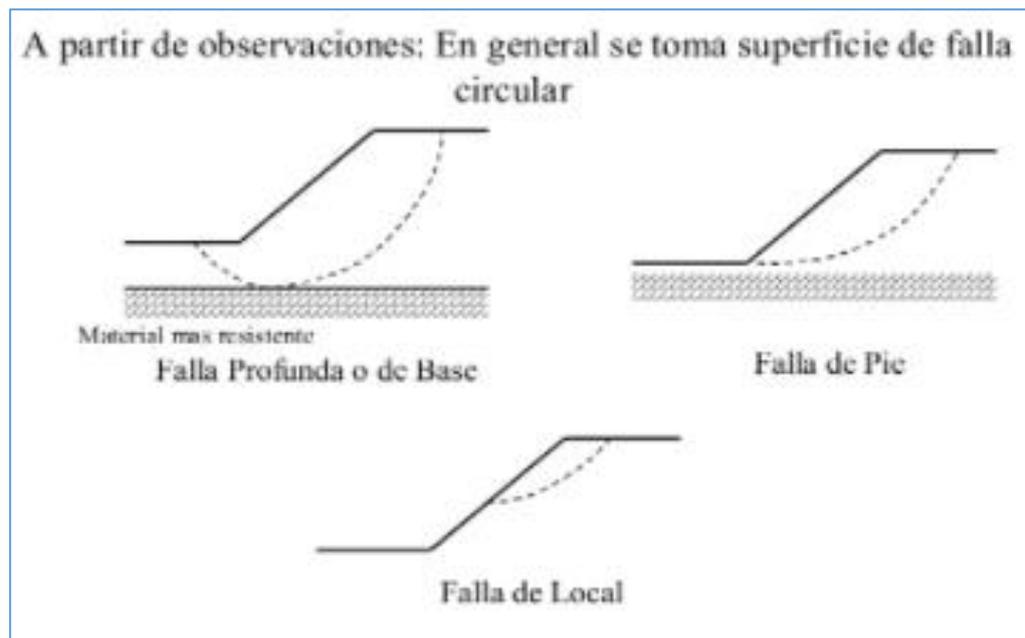
**Figura 1.** Criterio de rotura en suelos.

Fuente: González, (2002)

La ecuación anterior representa una recta que normalmente es conocida como envolvente de falla o de rotura. En la siguiente imagen se pueden apreciar algunos aspectos muy importantes.

### 2.2.3 Taludes en suelos

Los taludes en suelo rompen a favor de superficies curvas, con forma diversa condicionada por la morfología y estratigrafía del talud. Las roturas de taludes en suelos a favor de un único plano paralelo al talud son prácticamente inexistentes, aunque este modelo puede ser válido en el caso de laderas naturales con recubrimiento de suelos.



**Figura 2.** Mecanismos de falla en suelos.

Fuente: González, (2002)

### **Efectos del agua en los materiales y en su estabilidad**

La presencia de agua en los materiales que constituyen los taludes da lugar a efectos negativos en la estabilidad de los mismos por las siguientes razones:

- La presión de agua reduce la estabilidad del talud, disminuyendo la resistencia a la rotura de determinadas superficies; la presencia de agua en las grietas de tracción reduce la estabilidad incrementando las fuerzas que tienden al deslizamiento.
- Los contenidos altos de humedad dan lugar a un incremento en el peso del terreno; los cambios del contenido de humedad de algunos materiales pueden dar lugar a procesos rápidos de meteorización, con el consiguiente efecto en la estabilidad del talud.
- El agua congelada durante el invierno puede dar lugar a aperturas de discontinuidades, como consecuencia de los cambios de volumen que experimenta, y



a bloquear los canales o conductos de drenaje incrementando, con todo ello, la inestabilidad.

- La escorrentía superficial y la lluvia producen la erosión externa de los materiales, sobre todo de los blandos.
- El flujo del agua bajo la superficie del talud puede ocasionar la erosión del terreno y del relleno de las fisuras y grietas, afectando también a las condiciones de estabilidad.
- En el caso de las presiones intersticiales del agua presenta en los materiales alcancen el valor de las presiones totales pueden tener lugar la licuefacción en materiales no cohesivos, al anularse las presiones efectivas. Esto se produce bajo determinadas circunstancias son sollicitaciones dinámicas.
- La presencia de agua en los materiales que forman los taludes puede inducir cambios en la composición mineralógica de los mismos.

El suelo podrá tener el máximo peso cuando esté totalmente saturado, y el mínimo en el caso de que este seco; entre ambos límites, lo que regula el peso del suelo es el grado de saturación, considerándose constante la porosidad. El peso específico del suelo en función del grado de saturación viene dado por:

$$\gamma = \gamma_d + \frac{S}{100} n \gamma_w$$

Donde:

$\gamma_d$  = peso específico del material seco.

$S$  = grado de saturación (%)

$n$  = porosidad en tanto por uno

$\gamma_w$  = densidad del agua



### **Determinación de la posición del nivel freático**

Los lodos de perforación deben ser usados solo en caso de que no den a cambios significativos en las condiciones estructurales de consistencia de materiales. En el momento en que aparezca en nivel de agua continuo en el sondeo, debe ser tomada su profundidad, así como la profundidad del fondo de sondeo; la observación deberá ser continuada hasta que el nivel de agua se estabilice, es decir, alcance el equilibrio limite. Es conveniente repetir las medidas cada 12, 24 o 48 horas para observar la evolución del nivel freático en el subsuelo.(IGME, 1986).

Otro método son los métodos indirectos, con la obtención de información acerca de las características hidrogeológicas de una formación a partir de relaciones físicas, biológicas y de otro tipo entre el material y el agua. Dentro de estos métodos están las técnicas geofísicas, los métodos eléctricos, métodos magnéticos y métodos radioactivos.(IGME, 1986)

#### **2.2.4 Estabilidad de taludes**

En ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obteniendo de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc., no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.(Suarez D., 1998)



### **2.2.5 El problema de la estabilidad de taludes**

La mayoría de los trabajos de estabilidad de taludes, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. (Suarez D., 1998)

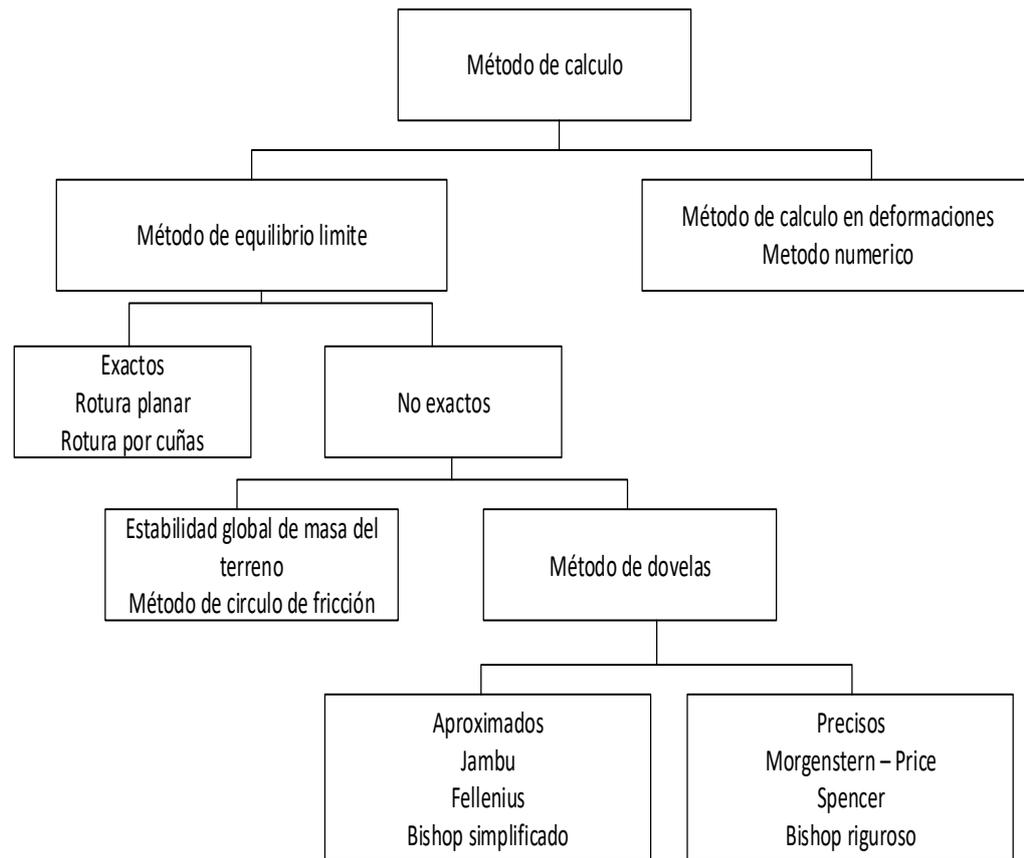
Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes. (Suarez D., 1998)

### **2.2.6 Método de análisis de estabilidad de taludes**

Desde el punto de vista determinístico existen dos métodos para abordar el análisis de estabilidad de un talud: el de equilibrio límite y el de análisis de tensiones.

Métodos de equilibrio límite: se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Método de cálculo en las deformaciones: consideran en el cálculo las deformaciones del terreno además de las leyes de la estática. Su aplicación práctica es de gran complejidad y el problema debe estudiarse aplicando el método de los elementos finitos. U otros métodos numéricos. (IGME, 1986)



**Figura 3.** Clasificación de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes.  
Fuente: IGME, (1986)

### **Método de equilibrio límite**

El método consiste en determinar el equilibrio de una masa activa de suelo, requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.(Suarez D., 1998).

### **Obtención del factor de seguridad**

El factor de seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de



corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla: F.S. = Resistencia al corte Esfuerzo al cortante. (Suarez D., 1998)

$$FS_S = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

$$FS_S = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

$FS_S$  = Factor de seguridad con respecto a la resistencia

$\tau_f$  = Resistencia cortante promedio del suelo

$\tau_d$  = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

$$\tau_f = c + \sigma' x \tan \phi$$

Donde:

$c$  = Cohesión

$\phi$  = Ángulo de fricción

$\sigma'$  = Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla

De manera similar:

$$\tau_d = c_d + \sigma' x \tan \phi_d$$

Donde  $c_d$  y  $\phi_d$  son, respectivamente, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción que se desarrolla a lo largo de la superficie potencial de falla. se obtiene.

### **Métodos para determinar el factor de seguridad**

Los métodos más empleados para el análisis de fallas de taludes con geometría curva son el método de la masa total y el método de las rebanadas.



### **Método de talud infinito**

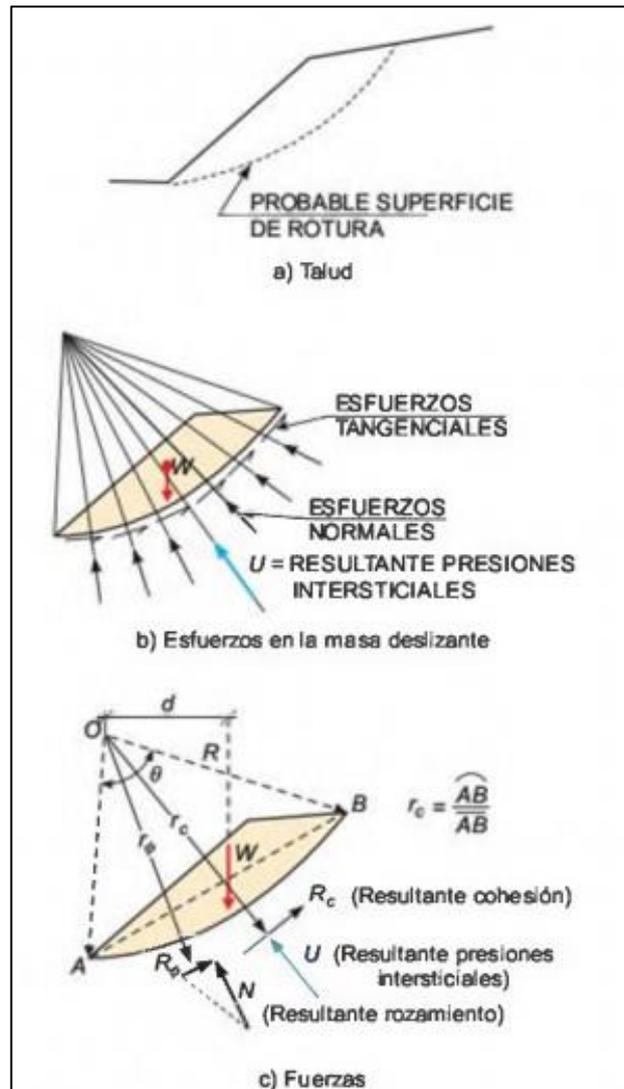
El método se basa en la hipótesis de que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud puede considerarse infinita con respecto al espesor deslizado. Este método se utiliza generalmente para el análisis de estabilidad de laderas naturales. (González , 2002)

$$F = A \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + B \frac{c'}{\gamma H}$$

### **Métodos de la masa total**

La hipótesis de rotura circular en 2 dimensiones es muy utilizada en el caso de taludes de altura finita en donde no existe una zona que pueda definir la superficie de rotura.

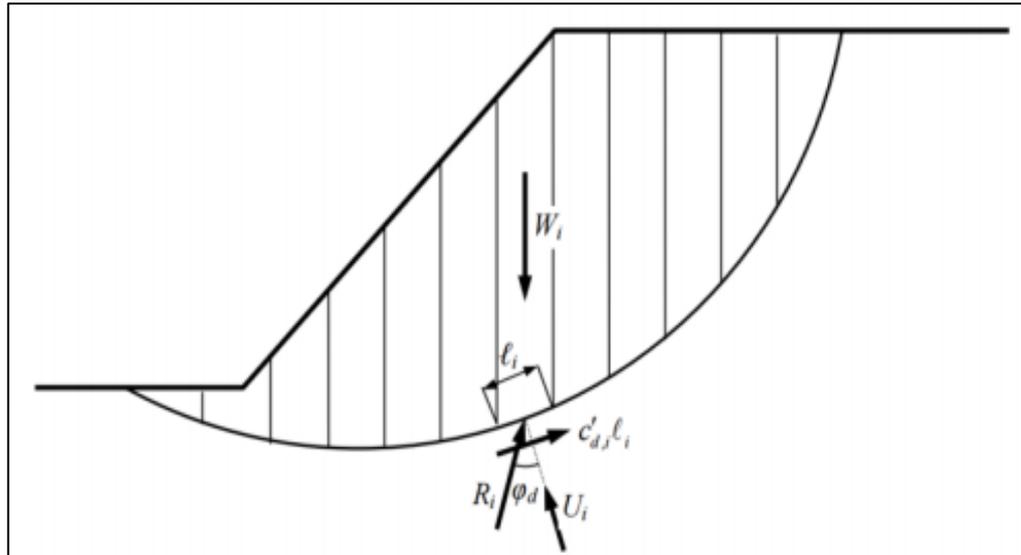
Este método considera que la masa se mueve como un todo uniformemente. Las fuerzas que actúan sobre la superficie de equilibrio son el peso propio, W; presión intersticial, U; tensión tangencial, T; y el esfuerzo normal, N. (González, 2002)



**Figura 4.** Fuerzas que actúan sobre superficie de rotura curva.  
Fuente: González,(2002)

### Método de las rebanadas

Este método nace debido a la inexactitud y dificultad de aplicación de los métodos anteriores y para estimar el coeficiente de seguridad en un terreno tipo Mohr-Coulomb se debe conocer las tensiones efectivas normales sobre la línea de deslizamiento. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad es necesario dividir la masa susceptible de deslizamiento en un conjunto de rebanadas. (Ramírez O. & Alejano M., 2004). Ver Figura 5. Y estudiar el equilibrio de cada una de ellas aisladamente.



**Figura 5.** División de rebanadas para aplicar el equilibrio límite.  
Fuente: Ramírez O. & Alejano M., (2004)

Entre las incógnitas se tiene, siendo n el número de rebanadas.

**Tabla 1.** Factor de seguridad y distribución de fuerzas al aplicar el equilibrio límite.

Descripción	N° de incógnitas
Factor de seguridad (F)	1
Fuerzas efectivas normales en la base( $AN'$ ), (la presión de agua, U, es conocida)	n
Posición de la fuerza normal efectiva en cada rebanada (a)	n
Fuerza resistente disponible en la base de cada rebanada ( $S = S_r/F$ )	n
Fuerzas normales en los bordes laterales (E)	n-1
Fuerzas tangenciales en los bordes laterales (X)	n-1
Localización de los puntos de aplicación de las fuerzas normales en los bordes laterales (y)	n-1
Total	6n-1

Fuente: Ramírez O. & Alejano M., (2004)

Mientras que las ecuaciones son las siguientes



**Tabla 2.** Ecuación del equilibrio limite según el tipo de ecuación.

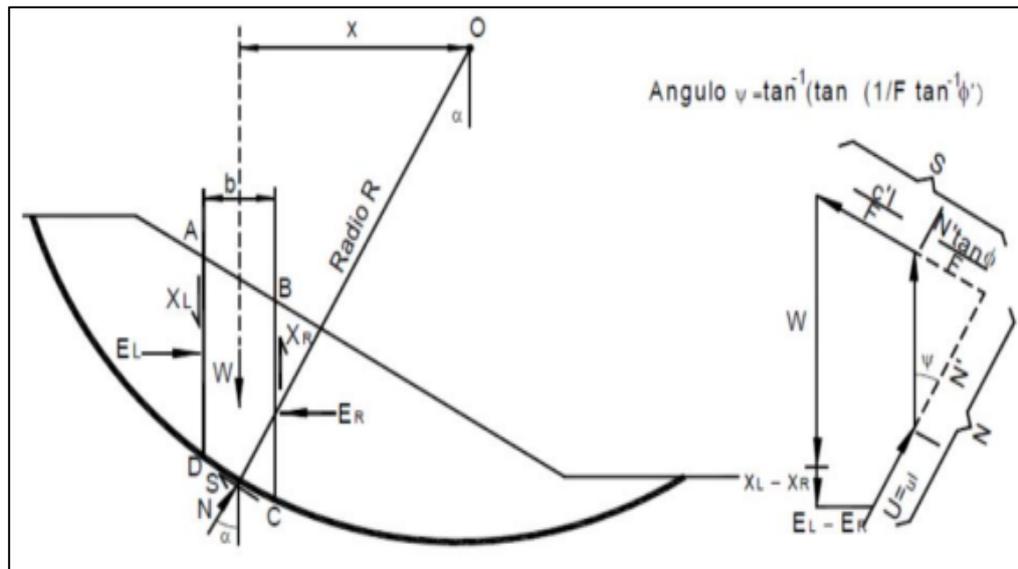
Descripción	N° de ecuaciones
Ecuaciones de equilibrio de fuerzas según dos direcciones independientes	2n
Ecuaciones de equilibrio de momentos	n
Relaciones de rotura antes las tensiones normales y tangenciales en la línea de rotura	n
Total	4n

Fuente: Ramírez O. & Alejano M., (2004)

Por lo tanto, queda  $2n-2$  incógnitas y para resolverlas se tendrá que realizar algunas suposiciones. La primera es suponer que la presión intersticial actúa exactamente en el centro de la rebanada, por lo tanto las incógnitas se reducen a  $n-2$ . La segunda suposición tiene que ver con las fuerzas que actúan en los bordes de las rebanadas y éstas varían según el método: Fellenius, Janbu, Morgenstern y Price, Spencer y Bishop, siendo este último el más empleado.

#### **Método Ordinario de Fellenius**

El método ordinario de Fellenius asume una falla circular, divide el bloque de falla en rebanadas y obtiene el equilibrio de momentos producido por las fuerzas actuantes, sobre cada rebanada, respecto el círculo de falla. Las fuerzas que actúan sobre cada división son el peso y las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en la superficie de falla. Este método desprecia las fuerzas de presión y cortante en las paredes de las rebanadas. (Suarez D., 1998)



**Figura 6.** Fuerzas que actúa en una rebanada-método de Fellenius.  
Fuente: Suarez D., (1998)|

Por lo tanto, al realizar el equilibrio se obtiene:

$$F = \frac{\sum(c' \Delta l + (W \cos \alpha - u \Delta l \cos^2 \alpha) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha}$$

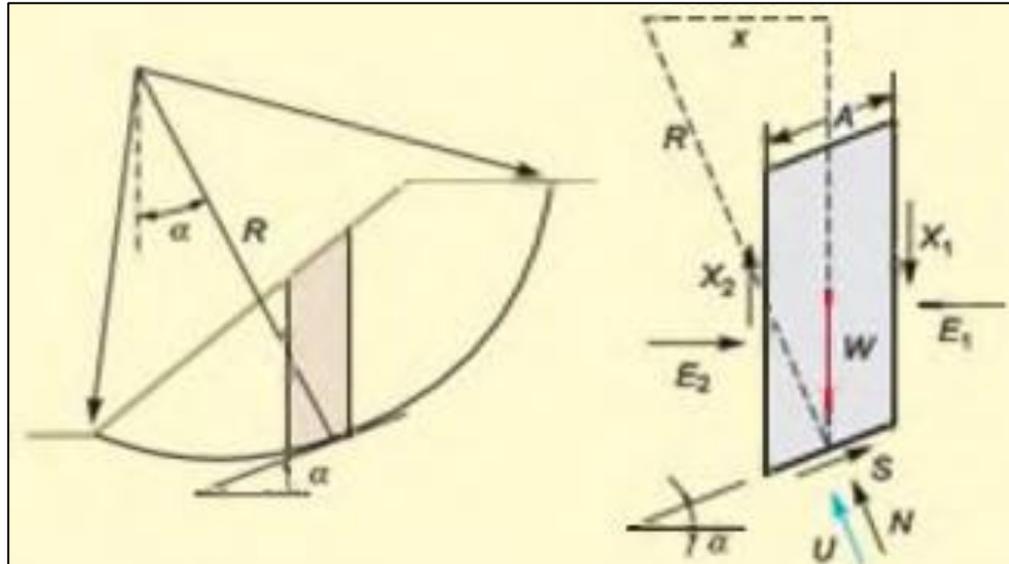
Donde  $\alpha$  es el ángulo entre la vertical y radio del círculo bajo el centro de cada rebanada,  $W$  el peso total de la rebanada,  $u$  la presión de poros ( $= \gamma_w h_w$ ),  $L$  longitud de arco del círculo de la base de cada rebanada,  $c'$  y  $\phi'$  parámetros de resistencia del suelo.

### Método de Bishop

La simplificación que haces en este procedimiento de cálculo consiste en suponer que las fuerzas que las demás fajas ejercen sobre los laterales de la rebanada considerada, tienen nula la componente vertical resultante. (Ramírez O. & Alejano M., 2004). Bishop en 1955 desarrolló este método con las siguientes hipótesis:

- Superficie de rotura circular.
- Masa deslizante se divide en rebanadas.
- Se establece equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto del centro del círculo de rotura.

- Del equilibrio de fuerzas verticales se obtiene las fuerzas normales a la superficie de rotura, N. Está se reemplaza en la de equilibrio de momentos.
- Este método desprecia las fuerzas tangenciales entre rebanadas.



**Figura 7.** Fuerzas actuantes en cada rebanada, método de Bishop.

Fuente: Alonso, 2005.

Equilibrio de momentos:

$$\sum S * R = \sum W * x = \sum W * R * \text{sen} \alpha$$

Pero el esfuerzo total de corte, S, está relacionado con el factor de seguridad, F, mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{c A + N' * \tan \phi}{F}$$

Sustituyendo:

$$F = \frac{\sum (cA + N * \tan \phi)}{\sum (W \text{ sen } \alpha)}$$

Para despejar la incógnita N se establece el equilibrio vertical en la rebanada:

$$W + \Delta X = N \cos \alpha + U \cos \alpha + S \text{ sen} \alpha$$

Sustituyendo S y despejando N se obtiene:



$$N = \frac{W + \Delta X - \left( \frac{cA * \text{sen } \alpha}{F} + U \cos \alpha \right)}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi}{F}}$$

De la hipótesis de que las fuerzas tangenciales en los bordes de las rebanadas son nulas:

$$F = \frac{\sum (cA \cos \alpha + (W - U \cos \alpha) \tan \phi) \left( \frac{1}{M(\alpha)} \right)}{\sum W \text{sen } \alpha}$$

Con:

$$M(\alpha) = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{F} \right)$$

Se inicia el cálculo con un F hipotético e iterando hasta la convergencia, la cual se alcanza rápidamente.

### Método de Janbu Simplificado

El método de Janbu se adopta de la hipótesis de fijar la altura de punto de la aplicación de la reacción normal de una rebanada sobre la siguiente. Con la simplificación se introducen n-1 hipótesis y por consiguiente este método es, como los anteriores, inexacto. Con el método de Janbu se pueden analizar superficies de manera cualquiera. El método Janbu satisface el equilibrio vertical de fuerzas en cada faja, así como el equilibrio de fuerzas horizontales general de toda la masa.

$$F = \frac{f_0 \sum (c'b + (W - ub) \tan \phi) \frac{1}{\cos \alpha m_a}}{\sum W \tan \alpha}$$

Donde:

$$m_a = \cos \alpha \left[ 1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right]$$

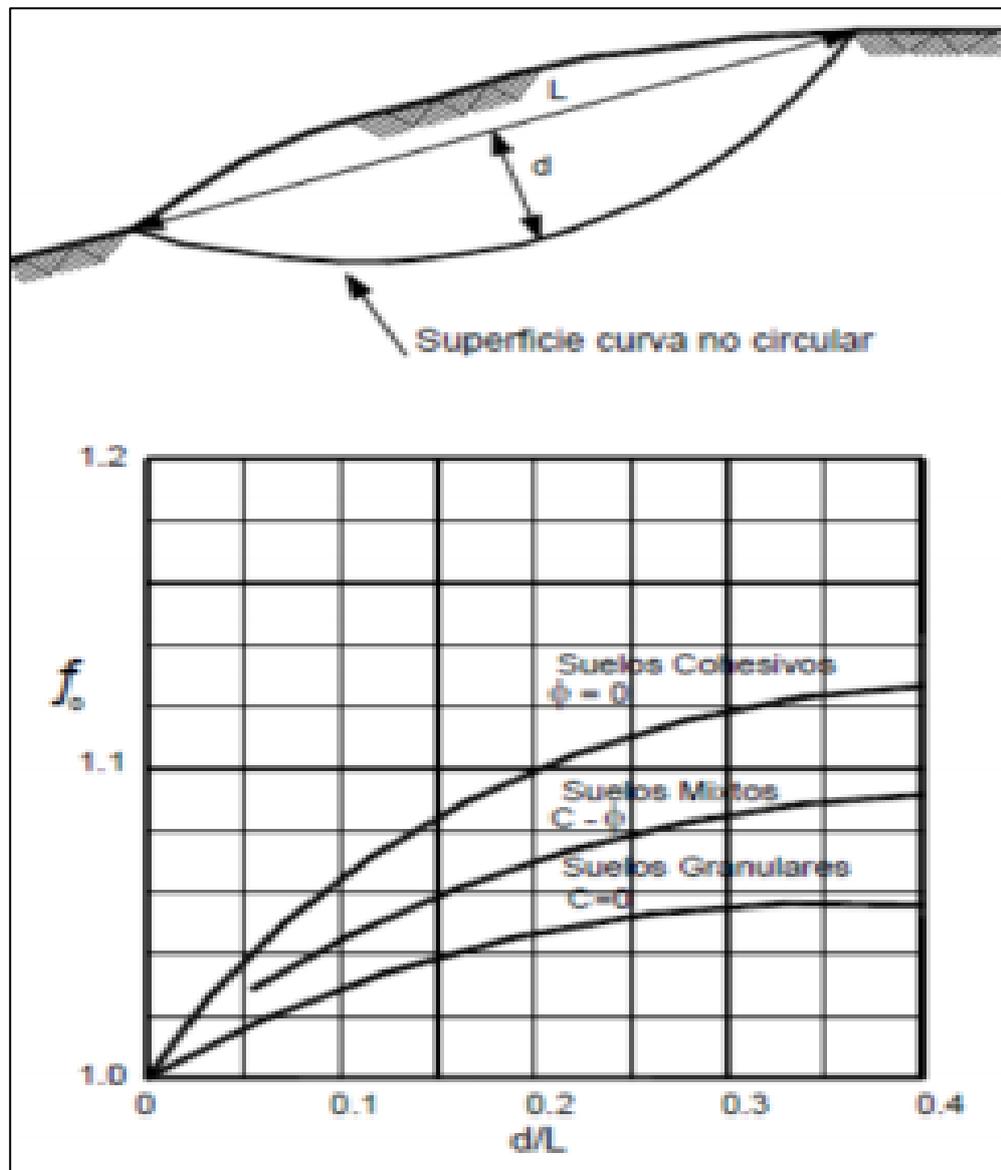
$f_0$  = Factor modificado, depende de la curvatura de la superficie de falla.

$b$  = Ancho de la dovela

$c', \phi$  = parámetros de resistencia del suelo

$u$  = presión de poros en la base de cada dovela

$\alpha$  = ángulo de radio y la vertical en cada dovela



**Figura 8.** Diagrama para determinar el factor seguridad.

Fuente: Suarez D., (1998)

### 2.2.7 Análisis sísmico

Los eventos sísmicos son capaces de inducir fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden producir la falla rápida de taludes y laderas. Además, la resistencia al corte de un suelo puede reducirse a causa de cargas oscilatorias que generan deformaciones cíclicas, o debido a la generación de presiones



altas de poros. La combinación entre la acción de las cargas sísmicas y la disminución de la resistencia pueden producir una disminución general de la estabilidad, (Aguilar, 2005). Método pseudoestático es para la evaluación de la estabilidad de taludes en el cual las cargas del sismo son simuladas como cargas estáticas horizontales y verticales.

### **2.2.8 Análisis pseudoestático en taludes**

El método utiliza el mismo procedimiento general de cualesquiera de los métodos de equilibrio límite, con la diferencia de que se incluyen fuerzas pseudoestáticas horizontales y verticales, debidas al evento sísmico. Estas fuerzas sísmicas se asumen, que son proporcionales al peso de la masa de deslizamiento potencial y de los coeficientes sísmicos  $k_h$  y  $k_v$  expresada en términos de veces la aceleración  $g$ , producida por el sismo, (Aguilar, 2005).

Generalmente, se recomienda analizar con carga sísmica pseudoestática solamente la superficie más crítica identificada en el análisis estático. La mayoría de los análisis solamente tienen en cuenta la fuerza sísmica horizontal y  $k_v$  se asume igual a cero. La magnitud del coeficiente sísmico debe simular la naturaleza de la fuerza del evento que depende de la intensidad o aceleración del sismo, duración del movimiento y frecuencia. Para un análisis muy conservador se puede asumir que el coeficiente sísmico  $k_h$  es igual a la máxima aceleración pico esperada de un evento sísmico en el sitio. Sin embargo, este análisis conservador puede producir dificultades numéricas para  $k_h$  mayor que 0.4.

**Tabla 3.** Valores de K recomendados para el análisis pseudoestático.

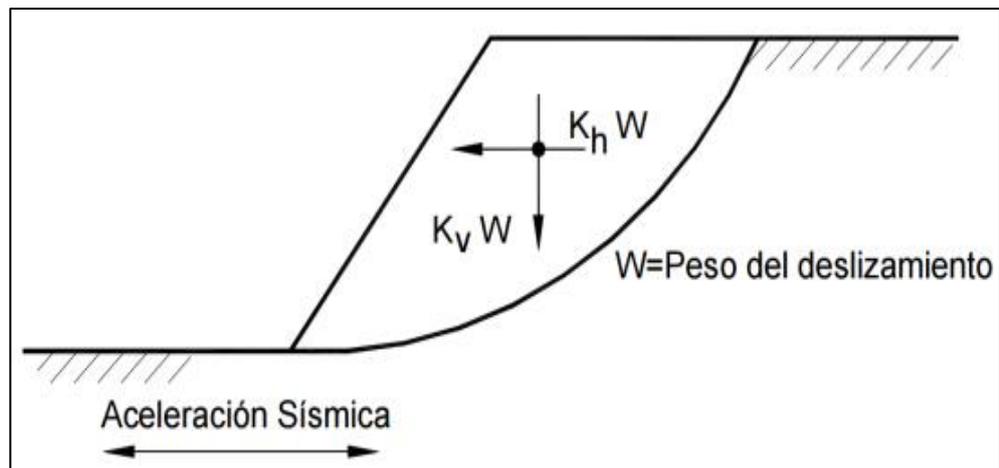
Coeficiente sísmico k	F. S.	Observaciones
0.10	> 1.0	Sismo importante
0.15	> 1.0	Sismo de gran magnitud
0.15 a 0.25	> 1.0	Japón
0.05 a 0.15	> 1.0	Estado de California
0.10 para $\mu = 6.5$	> 1.15	(Seed, 1979)
0.15 para $\mu = 8.5$	> 1.15	(Seed, 1979)
1/3 a 1/2 de la aceleración pico superficial	> 1.0	(Mercuson y Franklin, 1983)
1/2 de la aceleración pico superficial	> 1.0	(Hynes, Griffin y Franklin, 1984) y un 20% de reducción de resistencia.

Fuente: Suarez D., (1998)

En el caso de una falla curva, el cálculo de seguridad es calculado para diferentes valores de la aceleración máxima, de acuerdo a una fórmula modificada utilizando el procedimiento original de Janbú, (Alonso, 2005).

$$F_{sd} = \frac{\text{Fuerza resistente}}{\text{fuerza actuante}}$$

$$F_{sd} = \frac{\sum (w \tan \phi + c_d l \cos \alpha) / \cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha * \tan \phi / F_d)}{\sum \left[ w \tan \alpha + \frac{a_{max}}{g} w \right]}$$



**Figura 9.** Análisis pseudoestático de una falla curva.

Fuente: (Alonso, 2005).

La determinación del valor de  $a_{max}$  para el análisis se debe tener los siguientes criterios empíricos:



- Si la masa considerada para deslizamiento es rígida la aceleración inducida sobre la masa debe ser igual a la aceleración máxima esperada con sus respectivas amplificaciones por sitio y topografía.

- Si la masa de suelo no es rígida, como es el caso de la mayoría de situaciones y si se tiene en cuenta que la aceleración pico solo se presenta en períodos de tiempo muy pequeños no suficientes para producir una falla; se pueden utilizar valores entre 0.1 y 0.2g, dependiendo de la intensidad del sismo esperado. Marcuson(1981) recomienda utilizar valores entre  $1/3$  y  $1/2$  de la aceleración máxima esperada con las respectivas amplificaciones.

### **2.2.9 Programa computacional Slide v.6.0 (versión estudiantil)**

Al día de hoy, existe una infinidad de herramientas computacionales para el análisis de estabilidad de taludes. En esta ocasión se eligió el software Slide versión 6.0 distribuido por la empresa Rocscience.

Slide analiza la estabilidad de las superficies de deslizamiento utilizando métodos de equilibrio de límite de corte vertical. Deslizamiento individual las superficies pueden analizarse, o los métodos de búsqueda pueden ser aplicado para localizar la superficie de deslizamiento crítica para una pendiente determinada.(Rocscience, 2003)

Las características incluyen:

- Métodos de búsqueda de superficies críticas para superficies de deslizamiento circulares o no circulares.
- Bishop, Janbu, Spencer, GLE / Morgenstern-Price, y otros métodos de análisis.
- Múltiples materiales. Materiales Mohr Coulomb anisotrópicos, no lineales y otros modelos de resistencia.



- Agua subterránea: superficies piezoeléctricas, factores Ru, poros rejillas de presión o análisis de filtración de elementos finitos.
- Análisis probabilístico de estabilidad de taludes
- Carga externa: lineal, distribuida o sísmica
- Soporte: clavos de suelo, amarres, geotextiles, pilotes. Atrás análisis de la fuerza de apoyo requerida.
- Ver alguna o todas las superficies generadas por la búsqueda. Los resultados detallados del análisis se pueden trazar para superficies de deslizamiento individuales.

### 2.3 Marco conceptual

**Suelo:** según su acepción en ingeniería geológica, son agregados naturales de granos minerales unidos por fuerzas de contacto normales y tangenciales a las superficies de las partículas adyacentes, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua.(González , 2002)

**Caído:** en los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través dela aire por caída libre, a saltos o rodando.(Suarez D., 1998)

**Deslizamiento:** este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. Los deslizamientos pueden obedecer a



procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc. (Das, 2001).

**Estabilidad física:** Comportamiento estable en el corto, mediano y largo plazo de los componentes o residuos mineros frente a factores exógenos y endógenos, que evita el desplazamiento de materiales, con el propósito de no generar riesgos de accidentes o contingencias para el ambiente y para la integridad física de personas y poblaciones y de las actividades que éstas desarrollan.(MINEM, 2005).



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Diseño metodológico

La metodología a usar para el cumplimiento de los objetivos, consistió en realizar trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete.

##### 3.1.1 Tipo de investigación

Es una investigación cuasi- experimental porque es un tipo de estudio que se caracteriza porque el sujeto de estudio no se selecciona de forma aleatoria, sino que se encuentra o establece previamente, esto porque para determinar los parámetros físicos del suelo del talud se escogerán en el frente de minado y serán analizados en el laboratorio de mecánica de suelos donde se desconocerá los resultados.

##### 3.1.2 Diseño de investigación

Se aplicó un diseño investigación descriptivo porque luego se describirá cada aspecto del frente de minado de acuerdo a los resultados de ensayos de laboratorio realizados y se establecerán nuevos diseños del talud

#### 3.2 Población y muestra

Al ejecutar el presente trabajo de investigación para la población y muestra es necesario considerar el universo de la investigación y una parte representativa de ese universo que constituye la muestra. Para cual se realizó el tipo de muestreo no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador. (Johnson, 2014), Aquí el procedimiento no es mecánico ni se basa en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o



de un grupo de investigadores y, desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación. (Hernández-Sampieri et al., 2013 y Battaglia, 2008b).

### **3.2.1 Población**

La población del presente estudio está conformada los frentes de del proyecto minero FADE I.

### **3.2.2 Muestra**

La muestra es la parte de la población, para nuestro estudio se tomó el frente de minado FA\_1 del proyecto minero FADE I. Donde se tomaron muestras de suelo, a fin de realizar ensayos de laboratorio y poder obtener los parámetros físicos del frente de minado.

## **3.3 Definición de variables**

### **3.3.1 Variable independiente**

- Comprende el Nivel de resistencia al corte en el frente de minado del proyecto FADE I - Ananea.

### **3.3.2 Variable dependiente**

- Comprende la estabilidad de talud en el frente de minado del proyecto FADE I – Ananea.

### 3.3.3 Operacionalización de variables

**Tabla 4.** Operacionalización de variables de presente investigación.

Variables	Dimensión	Indicadores	Índice	Herramientas
<b>Variable Independiente</b>	Resistencia al corte	- Cohesión - Angulo de fricción	$\text{Kg/cm}^2$ °	Trabajos en campo Trabajos en laboratorio Trabajo en gabinete
Variable dependiente	Estabilidad del talud	Factor de seguridad	Resistencia al corte	Software Rocsciencie

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Técnicas

La técnica y metodología utilizada es una investigación descriptiva y cuasi-experimental. Es de tipo descriptivo, porque describe la resistencia de corte del material dentro del frente minado con el cual se utilizó el cálculo de factor de seguridad para estimar su resistencia.

#### 3.4.1 Trabajo en campo

Para obtener la representación de la muestra se realizó la recolección de las muestras de suelo y tomar observaciones del estado del talud (in-situ), se tomó cumpliendo los estándares ASTM a fin de llevar al laboratorio y comenzar con los trabajos de gabinete, ver anexo 07.

#### 3.4.2 Trabajo de laboratorio

Trabajos de laboratorio, se realizó ensayos de laboratorio, para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, análisis



granulométrico, clasificación de una muestra de suelo – SUCS y AASHTO, ensayo de corte directo en suelos – CD. Ensayos requeridos para un análisis de estabilidad de taludes. Los medios utilizados fueron muestra recolectada durante los trabajos de campo. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de geotecnia y geomecánica de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Cada ensayo que se realizó siguió los procedimientos establecidos por la sociedad norteamericana de ensayos y materiales (ASTM), ver anexo 03, 04 y 05.

### **Ensayo de determinación de las propiedades físicas**

- Determinación de la densidad natural: Se realizó el ensayo de densidad natural o peso unitario, siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D7830/D7830M.
- Determinación de contenido de humedad: Se realizó el ensayo de contenido de humedad siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 2216.

### **Análisis granulométrico**

- Se realizó el ensayo de análisis granulométrico siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 2487, y serán con fines de identificación y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

### **Ensayo de determinación los límites de consistencia**

Limite Liquido: Se realizó el ensayo de límite líquido siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 423.

Limite plástico: Se realizará el ensayo de límite líquido siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 423.



### **Ensayo de corte directo en suelo**

De acuerdo a las muestras tomas en campo se realizará este ensayo siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 3080, quien dará como resultado el ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo analizado.

#### **3.4.3 Trabajo en gabinete**

Trabajos en gabinete, se consideró tesis bibliográficas, artículos y libros, mapa geológico, análisis computacional con la utilización de software: AutoCAD, Rocsiense (Slide), cálculos detallados de estabilidad, se utilizó en esta etapa, la información recopilada durante las etapas anteriores. Elaboración del plan de trabajo; recolección, estructuración, diseño, análisis y procesamiento de la información. El cual consiste en procesamiento de los datos obtenidos mediante los ensayos de laboratorio y la realizar del análisis de estabilidad de talud, aquí se usará softwares como es Slide v.6.0 que permitirá determinar si es talud es estable o inestable, además de cuantificar el factor de seguridad.

Para realizar las simulaciones del frente de minado y determinar las condiciones de suelo se usó el software Rocscience:

Software Rocscience Slide 6.0: es un programa de estabilidad de taludes de equilibrio de límite 2D para evaluar el factor de seguridad o probabilidad de falla, de superficies de falla circulares o no circulares en pendientes de suelo o rocas. Slide analiza la estabilidad de las superficies de deslizamiento utilizando métodos de equilibrio de límite de corte vertical o corte no vertical. (Rocscience, 2018)

### **3.5 Instrumentos**

Los instrumentos que se han utilizado en el presente estudio son:



Para la toma de muestra se usarán los siguientes materiales, equipos y/o maquinarias.:

- Estándar de toma de muestras
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un equipo a batería separada que servirá para ubicar los puntos de muestreo
- Franela: es una tela de algodón servirá para envolver la muestra
- Parafina: servirá para cubrir la muestra
- Cocina pequeña: hornilla a gas que servirá para calentar la parafina.
- Etiquetas servirá para etiquetar las muestras
- Pico y pala servirá para preparar la muestra
- Excavadora servirá para realizar calicatas de muestreo

### **Análisis estadístico**

Para realizar los análisis estadísticos se usó la media aritmética siendo el resultado de sumar todos los elementos del conjunto y dividir por el número de ellos.

Esto se ve reflejado en el análisis de resultados de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos a fin de tener un resultado que represente al tipo de ensayo utilizado.

Ver anexo 03, Resultados de ensayos de clasificación de muestras de suelo, SUCS y AASHTO.

Ver anexo 04, Resultados de ensayos de límites de consistencia en muestras de suelo.

Ver anexo 05, Resultados de ensayo de corte directo en suelo CD.

Así como también en la determinación del ángulo de talud y altura que se determinó a partir de varias simulaciones.

#### **3.5.1 Ubicación**

El proyecto minero Fade I se ubica en:

Región : Puno



Provincia : San Antonio de Putina  
Distrito : Ananea  
Paraje : Chuquiminas - Pampilla

Ver Tabla N° 5 para poder tener referencia de las coordenadas absolutas del Proyecto Minero Fade I.

**Tabla 5.** Ubicación geográfica el proyecto minero Fade I.

Coordenadas UTM WGS84 – 19L		
Vértice	Este	Norte
V-1	439 458	8 378 283
V-2	439 889	8 378 541
V-3	439 600	8 378 728
V-4	439 328	8 378 514

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 Accesibilidad a la zona de estudio

Se accede al proyecto Fade I, desde la ciudad de Puno en un aproximado de 3 horas y 15 minutos; por carretera asfaltada, pasando por Juliaca, hasta el desvío Huancané, Huatasani, Putina, Quilca Punco y Ananea, llegando a las operaciones mineras. Ver Tabla 6

**Tabla 6.** Ruta de acceso al proyecto minero Fade I.

Tramo (Puno-mina)	Distancia (Km)	Vía (terrestre)	Tiempo	Condición
Puno-Juliaca	45	Asfaltada	00h 45min	Buena
Juliaca-Desvío Huancané	50	Asfaltada	00h 45min	Buena
Desvío Huancane-Putina	40	Asfaltada	00h 45min	Buena
Putina-Ananea	60	Afirmado	00h 45min	Buena
Ananea-operación mina	2.5	Tratable	00h 45min	Regular
Total	197.5		03h 45min	

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.3 Clima

La temperatura en esta zona resulta muy desfavorable, en los meses de otoño e invierno descienden a niveles por debajo de 0°C. De acuerdo a los datos de estación Ananea, durante el periodo 2007 – 2011, la temperatura



media anual es 4.3 °C, y las temperaturas, máxima media mensual se presenta en los meses de abril y mayo con 10.9°C y mínima media mensual se presenta en el mes de julio con -3.7°C.

#### 3.5.4 Precipitación

En la estación meteorológica Ananea la precipitación total mensual promedio varía desde 12.5 mm (agosto) hasta 630.4 mm (enero), siendo el promedio de 245.9 mm.

La precipitación total anual en la estación Ananea oscila entre 528.7 mm (2010) a 637.7 mm (2011), el promedio es de 590.2 mm.

#### 3.5.5 Vegetación

De acuerdo al estudio de campo y confrontación del mapa forestal del Perú, la cobertura vegetal corresponde a una Tundra y Nival.

- **Tundra:** en este tipo cobertura vegetal se tiene un potencial agropecuario forestal muy limitado, en el ecosistema dominan los pajonales alto andinos, donde la formación vegetal es muy dispersa.
- **Nival:** entre las inmediaciones de la tundra se ubican los ecosistemas del piso Nival, donde el potencial forestal es enteramente desprovisto de valor actual y sin potencial para el aprovechamiento agropecuario forestal.

#### 3.5.6 Fauna

La disminución local de las aves está fuertemente relacionada con su hábitat degradado debido a las excavaciones, deforestación, aguas contaminadas, asentamientos humanos y otros.

A pesar de que la distribución de los mamíferos a lo largo de una gradiente altitudinal en la vertiente oriental y occidental sur del país aún no



está documentada, se cuanta con referencias aisladas sobre la presencia de especies indicadoras de ecosistemas.

### 3.6 Geología

#### 3.6.1 Geología regional

Regionalmente las estructuras más sobresalientes corresponden a rocas pelíticas - pizarrosas más antiguas constituidas por pizarras y cuarcitas de coloraciones gris blanquecinas, del paleozoico inferior (formación Sandia), suprayaciendo a esta y en contacto fallado inversamente, se encuentran creniscas cuarzosas muy subordinadas y pizarras de textura criptocristalina con coloraciones gris azuladas (formación. Ananea) marcadas por un metamorfismo epizonal, en general forman aureolas de contacto con cuerpos intrusivos Pérmico- Triásicos. (Laubacher, G. 1978).

Más al sur se encuentran suprayaciendo en continuidad, afloramientos del paleozoico superior, caracterizados por una secuencia clástica, samítica – pelítica de areniscas cuarzosas con coloraciones gris rosáceas e intercalaciones de limoarcillitas de origen continental (grupo Ambo). A su vez y en concordancia, se encuentran expuestas secuencias Pelíticas – Samíticas - Calcáreas, con coloraciones verde- grisáceos de morfología suave y abrupta (grupo Tarma) (Newell, N.1946). Ya al oeste y al sur se presentan algunos afloramientos escarpados de secuencias Calcáreo- Pelíticas de superficie Kárstica. Esta dada por calizas con coloraciones gris a gris oscuras. Calizas silicificadas y dolomitizadas, limoarcillitas calcáreas de color gris correspondientes al grupo copacabana del Pérmico Inferior. (Dumbar, G. Newell, N. 1946). El paleozoico superior está caracterizado por una secuencia sedimentaria- vulcanoclástica continental que ha dado lugar a morfologías



muy abruptas y originando dos litofacies una conglomerádica a brecha sedimentaria y otra volcánica de carácter ígneo rfusivo de coloraciones rojizas, violáceas que tipifican las capas rojas correspondiente al grupo Mitu.

El mesozoico está representado por secuencias continentales y marinas cuyos afloramientos se caracterizan mayormente por areniscas de grano medio a fino de coloración blanquecina con algunos niveles rosáceos en capas rojas bien estratificados además de la presencia de calizas bituminosas de coloración gris blanquecinas del grupo moho. Durante el mioceno y plioceno se presentaron eventos volcánicos efusivos de carácter acido correspondientes a la formación Quenamari y relacionados a la formación Picotani, de periodos relativamente cortos. Mientras que en el plioceno- pleistoceno se formaron depósitos poco consolidados polimícticos sub angulosos a sub redondeados mal clasificados con presencia de matriz limosa, y caracterizados por Lodolitas y Areniscas gruesas de rasgos heterogéneos denominado como formación Arcoaja. Además de depósitos fluvioglaciares que ocupan en gran parte la depresión longitudinal de Ananea-Crucero, ver figura 10.

### 3.6.2 Geología local

Localmente el área de influencia comprende las siguientes unidades litoestratigráficas.

**Formación Ananea (SD-a):** Esta unidad corresponde al basamento paleozoico, está caracterizada por la presencia de pizarras y filitas producto de una esquistosidad de flujo son de coloración negra con presencia de FeO<sub>3</sub> y cuarcitas de coloración gris blanquecina caracterizada por una abundante sedimentación con presencia de sílice. La estructura más sobresaliente es el

cerro chosicanipata cuya superficie expuesta que se encuentra escarpada y emplazada en el distrito de Ananea. Esta formación constituye el límite de mineralización glaciofluvial.

Columna Estratigrafica de los cuadrangulos de Putina y La Rinconada

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigrafica	Grosor (M.)	Litologia	Descripcion
	Cuaternario		Morrenas	50		Morrenas
				120		Lutitas siltitas conglomeradas
				30		Morrenas
CENOZOICA	Paleogeno	Paleogeno Eoceno	Fm. Muñani	500		Areniscas finas gruesas Conglomerados (Lutitas rojas)
			MESOZOICA	CRETACEO		Superior
Medio	Fm. Cotacucho	500	Areniscas cuarzosas rojas Conglomerados			
PERMIANO	Inferior	Gpo. Moho	90		Lutitas rojas y calizas	
		Fm. Huancane	190		Areniscas cuarzosas y subarcosas	
		Congl. Chupa	100		Conglomerados	
Inferior	Gpo. Copacabana	700	Calizas bioclasticas Areniscas Calizas finas (Mudstones)			
PALEOZOICA	CARBONIFERO	Pensilvanico	Gpo. Tarma	700	Areniscas cuarzosas y subarcosas Subarcosas finas	
		Missipiano	Gpo. Ambo	2000	Slumpings olistolitos Lutitas negras Areniscas subarcosas masivas y gradadas Areniscas esytratificacion oblicua Conglomerados	
	SILURO DEVONICO		Fm. Ananea	500	Pizarras negras	
ODORVICIANO	Caradociano		Fm. Sandia	2000	Areniscas finas con dunas Pizarras negras	 Ignimbrita Picotani Intrusiva del cretaceo sup. Intrusivas Echercinicos

Figura 10. Columna estratigráfica de los cuadrángulos de Putina y la Rinconada. Fuente: Plan de Minado del proyecto minero FADE I.



**Grupo Tarma. (P-ta):** Se encuentra en la parte sur este del yacimiento San Antonio de Poto, en el sector del cerro Santa Rosa, emplazándose por el margen izquierdo de la carretera Ananea Trapiche, específicamente aflora en el cerro Quebrada estructuralmente está caracterizada por la presencia fallas normales y de rumbo; no se ha evidenciado presencia de algún tipo de mineralización en sus afloramientos.

**Formación Arco-Aja. (Q- aj):** Constituida por un miembro inferior de sedimentos palustres finos y un miembro superior aluvial y conglomeradico. Localmente se encuentra suprayaciendo a la formación Ananea bajo una discordancia angular Cuaternaria.

Esta formación en gran mayoría se encuentra emplazada en la parte este de la cuenca Ananea Ancocala comprendida entre el macizo de Ananea 5800 m.s.n.m. y una superficie levemente plana producto de la abrasión glacial.

### 3.6.3 Control estructural

El principal tren de estructural es la presencia de la cordillera oriental (Carabaya), su superficie está controlada por una morfología abrupta y variada (levantamientos, hundimientos, plegamientos y fallamientos). Que dieron como resultado su relieve actual el cual forma una divisoria entre la cuenca altiplánica y la llanura amazónica. Además de la presencia de una gran provincia metalogénica (yacimientos primarios orogénicos emplazados en filones, vetas y mantos) y yacimientos de origen secundario (Placeres uríferos).

### 3.6.4 Control litoestratigráfico

Las fuentes primarias de oro detrítico son mineralizaciones pre carboníferas emplazadas en pizarras, esquistos y cuarcitas del paleozoico inferior.



Solo el material glacial y derivado antiguo y /o reciente presentan contenidos auríferos de acuerdo al volumen y potencia de los estratos se puede determinar mejor las leyes de oro.

Localmente el área de mayor interés es el riachuelo Ananea, cuyo cause representa interés económico debido al transporte de material con contenido aurífero hacia las partes más bajas y profundas.

### **3.6.5 Yacimiento mineral**

Los depósitos morrénicos con contenido aurífero son de origen glaciofluvial y se emplazan íntegramente en la formación arco Aja cuyos materiales se componen de clastos dispersos que son de distinto tamaño en una matriz limo-arcillosa-arenosa. Estos depósitos presentan variaciones en la composición litológica de sus clastos, dependiendo de su lugar de origen; Los depósitos morrénicos tienen importancia económica debido a su contenido aurífero ya sea en forma de charpas (3mm- 1.5mm) o de grano fino (<1mm).

Además, se han determinado tres horizontes de deposición aurífera:

- Un conjunto de clastos de coloración gris con matriz arcillosa de característica sub angulosos con contenidos auríferos de hasta 0.14gr Au/m<sup>3</sup>.
- Supra yaciendo a los sedimentos anteriores se encuentra un horizonte de sedimentos gris amarillento con tenores de 0.30 gr Au/m<sup>3</sup> como valores máximos, cuya potencia es variable de acuerdo a la dirección de flujo.
- Finalmente, como límite superior se encuentra un aglomerado de sedimentos sub redondeados intercalados con drumlins (barro glacial) cuya potencia varía entre 2m hasta 11m de altura y su contenido de oro es <0.1gr Au/m<sup>3</sup>.

### 3.6.6 Sismicidad

Dentro del territorio peruano se han establecido diversas zonas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo a la mayor o menor presencia de los sismos. Esta sismicidad es principalmente producto de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Continental a lo largo de la costa peruana. De acuerdo a Bolaños y Monroy (2004), En el mapa de la Figura 12, se puede observar que, para el área en estudio, los autores proponen una aceleración máxima de 0.33g.

La región Puno está ubicado dentro de una cadena sísmica provenientes de la ciudad de Cuzco pasando por las Provincias de Melgar, Carabaya, Sandía y desembocando en la provincia de San Antonio de Putina, la otra proveniente de la hermana república de Bolivia la que desemboca en el cerro Kapia de la provincia de Yunguyo y por último proveniente del departamento de Moquegua ubicado en los centros poblados de Titiri y Loripongo en el distrito de Pichacani - Laraqueri.

Marcuson (1981) recomienda que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis en la condición pseudoestática de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre  $1/2$  a  $1/3$  de la máxima aceleración esperada.

Por lo tanto, para los análisis pseudoestático en la presente investigación, y para estabilidas de talud usaremos un coeficiente sísmico de  $1/2$  de la aceleración máxima que corresponde a  $C = 0.165$ .

### 3.6.7 Hidrología

La zona está comprendida dentro de la cuenca del río Carabaya, afluente del Río Ramis. En dicha zona toma el nombre de río Grande, que



recibe los deshielos del nevado de Ananea y los reboses de las lagunas Rinconada, Sillacunca, Huicha y Chullpacocha. Pertenece a las provincias de Sandia y Carabaya. El río Ramis es el principal afluente del Lago Titicaca, aportando cerca del 40% de la escorrentida que ingresa al Lago.

### **3.6.8 Aguas superficiales**

El uso del agua, es imprescindible en toda actividad humana, entre ellas para el desarrollo minero, (operaciones de explotación, que incluye a los usos domésticos e industriales), merece especial atención el ojo de agua Qoñi uno ubicado a 0.5 Km del distrito de Ananea.

El proyecto minero es caracterizado tomando en cuenta la hidrografía, precipitaciones, descargas y las fuentes de agua de mayor interés. La ubicación del área de estudio, compromete a partes de las zonas de escurrimiento de ríos Río Grande, Río Ananea y sus quebradas. Forma parte de la cuenca alta del río Ramis, cuyas aguas tienen como destino final el lago Titicaca.

La ubicación altitudinal de estos ríos y quebradas da una connotación especial a los ecosistemas que se forman en dicho espacio, ya que, si bien los usos actuales en dichos espacios no son muy significativos, éstos, a través de las formaciones hidromórficas existentes denominados "bofedales" (adyacentes al área), almacenan el agua de precipitación y luego regulan su escurrimiento, dando cierta regularidad a los caudales de estiaje, así como también minimizando los valores extremos de las descargas en las épocas de avenida.



Estos ríos reciben aportes de afloramientos u ojos de agua que brotan en cantidades muy pequeñas en las laderas de los cerros.

### **3.6.9 Laguna artificial Sillacunca**

Fue construido con fines mineros y para poder regular las descargas de agua por efectos de precipitaciones pluviales; ubicado a una altitud de 4950m.s.n.m., por el norte limita con los cerros de San Francisco y Callansani sus elevaciones están sobre los 5000 m.s.n.m., por el Sur limita con los cerros Sanchani y de la Cruz, sus elevaciones están sobre los 5150 m.s.n.m., por el este limita con los llanos de las estribaciones de los cerros de San Antonio, el área que ocupa la laguna es de 276 Ha, con una capacidad de almacenamiento aproximado de 7'000,000 m<sup>3</sup>; Las aguas almacenadas en la represa de Sillacunca es un volumen total de 4.43 mmc.

La capacidad total de la Represa de Sillacunca, tomando en consideración el vertedero demasías es 5.55 mmc, sin considerar los volúmenes muertos existentes.

### **3.6.10 Espejos de agua**

Laguna Rinconada: está ubicada al NE de Ananea a una altitud de 4627 m.s.n.m. y es la fuente principal para la explotación de las áreas mineras de: Arequipa-Pampa, Chaquiminas y Otros. Es la más importante por su área y por la presencia del glaciar Ananea que constituyen una de las fuentes más viables para el aprovechamiento hídrico, la laguna tiene una extensión aproximada de 54,80 Km<sup>2</sup> ocupando un área de 547,7 Ha. con una capacidad de reservorio de 54'200,000 m<sup>3</sup>. Las aportaciones provienen de las precipitaciones pluviales y deshielo del glaciar Ananea, con un caudal de 200



- 420 l/s en épocas de lluvias y 120 l/s aproximadamente en tiempo de sequía; la calidad de agua no se ha determinado por encontrarse fuera del área de interés minero.

### **3.6.11 Hidrogeología**

Los factores que controlan las condiciones hidrogeológicas de un medio geológico son: las unidades de suelo y roca donde se acumula el agua y el recurso hídrico que lo recarga.

Acuíferos: es el medio en donde se almacena el agua subterránea. En forma general se puede diferenciar dos acuíferos, relacionados con el basamento rocoso y los depósitos de superficie.

Basamento rocoso: el basamento rocoso formado por pizarras y cuarcitas es prácticamente impermeable por porosidad intersticial, por lo tanto, sus condiciones hidrogeológicas para almacenar son malas. Esta roca ha sufrido un intenso tectonismo, es de esperar zonas locales muy fracturadas en donde se podría almacenar el agua y a su vez circular, es decir, es posible la presencia de acuíferos locales, muy en especial en la corteza superficial de meteorización.

Depresion Ananea: la depresión Crucero – Ananea, rellena por sedimentos cuaternarios, puede constituir un buen acuífero. Esta depresión, aguas abajo del desvío a Sandia, ha sido rellena por los tufos Picotani; dividiéndola en dos sub – depresiones superiores que está en el área de estudio, para fines de evaluación hidrogeológica, se está identificando como sub – depresión Abanea.



Recarga: los factores para recarga de un acuífero son: precipitaciones pluviales, escorrentía superficial, morfología del terreno, presencia de vegetación, porosidad y permeabilidad del terreno.

## CAPÍTULO IV

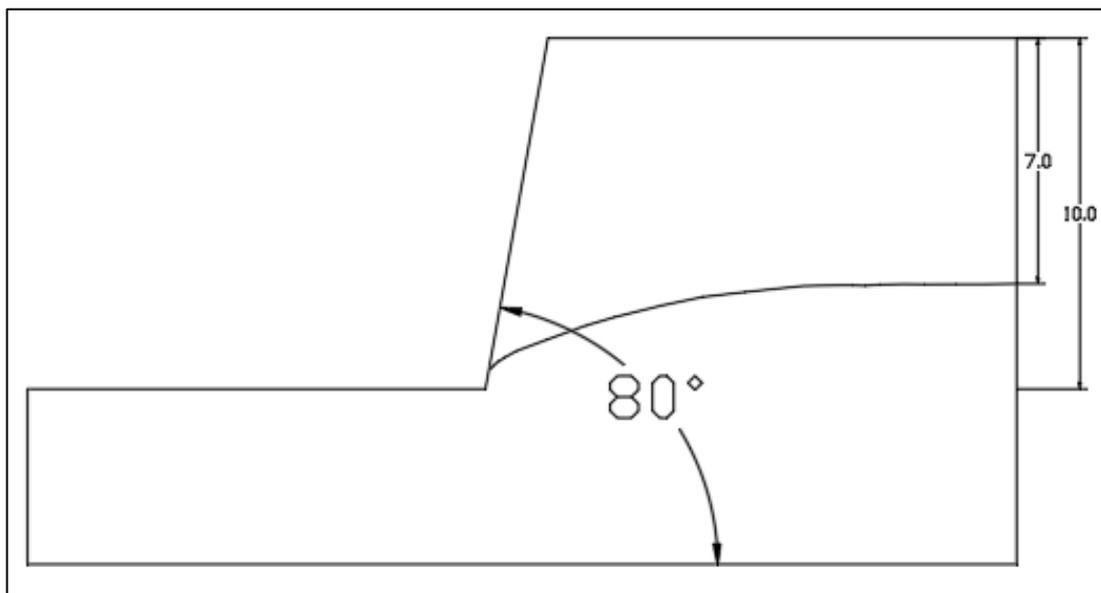
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Introducción

Se muestra el análisis de estabilidad de taludes de suelos, donde se tiene presente suelos que forman taludes de hasta 10 metros de altura, para lo cual se tiene que realizar el análisis de determinación de su estabilidad a fin que cumpla con un factor de seguridad mayor a 1.2 y se considere seguro y poder desarrollar los trabajos del ciclo de minado con seguridad para el personal que labora. Para realizar el análisis se consideró la intensidad de lluvias, intensidad sísmica y los parámetros geométricos del talud. Se usó del software Slide 6.0. que fue utilizado para realizar simulaciones del talud de explotación para determinar a qué condiciones se tendrá un talud óptimo de explotación.

##### 4.1.1 Geometría del talud

Se realizó el levantamiento in situ de la geometría del talud, ver figura siguiente:



**Figura 11.** Sección del talud a analizar.



Donde la altura actual del talud es de 10 metros y el ángulo de inclinación es de  $80^\circ$ , así mismo el nivel freático se encuentra ubicado aproximadamente a 7 metros.

#### **4.1.2 Factor por intensidad sísmica**

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra por lo tanto está expuesto a este riesgo, que trae consigo la pérdida de vidas humanas y pérdidas materiales. Una forma de saber el comportamiento sísmico de una zona determinada es a través de la evaluación de riesgo sísmico a nivel de predecir las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un área de interés. En nuestro país la actividad sísmica es ocasionado por la subducción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, generando considerables índices de sismos que ocurren en toda la costa peruana. Según estudios, la placa de Nazca en el sur del Perú buza en  $30^\circ$  y alcanza profundidades de hasta 300 km.

##### **1.1.2.1 Zonificación sísmica**

El área de estudio del Proyecto Minero FADE I está considerada como una zona de media sismicidad (Zona 2) de acuerdo a la zonificación sísmica actualizada por la norma E.030 Diseño sismo resistente (2016) del Reglamento Nacional de Edificaciones, la zona 2 registra una aceleración sísmica de 0.25 g tal como se muestra en la Figura.



**Figura 12.** Zonificación sísmica Perú.

Fuente: Norma E.30, 2016.

### 1.1.2.1 Aceleración máxima de diseño

El esquema asigna a cada zona un factor Z o PGA (Peak Ground Acceleration) según se indica en la Tabla 7. El factor Z se entiende como la aceleración máxima horizontal en el terreno para un período de retorno  $T=500$  años (Valiente, R., Sobrecases, S., & Díaz, A., 2015) y se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad.

**Tabla 7.** Factor de zona Perú (E.030)

	Factor de zona			
Zona	4	3	2	1
PGA	0.45	0.35	0.25	0.1

Fuente: Valiente et al., (2015)

La presente Norma clasifica a los suelos considerando las propiedades mecánicas del suelo, el espesor del estrato, el período fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte, en ese sentido la Norma clasifica en cuatro tipos a los perfiles de suelos en el Perú.

**Tabla 8.** Factor de suelo Perú (E.030)

<b>Clasificación de suelos de acuerdo a la amplificación sísmica (E.030)</b>				
Zonas Sismicas	S0	S1	S2	S3
	Roca Dura	Roca o suelos muy rigidos	Suelos Intermedios	Suelos Blandos
Zona 4	0.8	1	1.05	1.1
Zona 3	0.8	1	1.15	1.2
Zona 2	0.8	1	1.2	1.4
Zona 1	0.8	1	1.6	2

Fuente: Valiente et al., (2015)

$$k_{(h)} = A_{(max-d)} = PGA * S$$

Donde:

- $A_{(max-d)}$ , Aceleración máxima de diseño de taludes.
- $PGA$  sus siglas en Ingles (Peak Ground Aceleration, Aceleración Máxima del Suelo).
- $S$  factor de amplificación sísmica.

Para un análisis pseudoestático en el diseño de los taludes, la Norma AASHTO y la FHWA (Administración Federal de Carreteras) recomienda reducir el anterior valor a la mitad (Valiente et al., 2015). Por otro lado, Marcuson (1981) sugiere utilizar valores entre 1/3 y 1/2 de la aceleración máxima esperada con la respectiva amplificación (Suarez, 2009).

Generalmente, el coeficiente sísmico pseudoestático corresponde a una aceleración horizontal y usualmente no se tienen en cuenta las aceleraciones verticales, sin embargo, de incluirse en un estudio las aceleraciones verticales, la Norma E.030 indica que; para el análisis

en la dirección vertical podrá usarse valores iguales a los 2/3 de la aceleración máxima empleado para las direcciones horizontales.

$$k_{(h)} = A_{(max-d)} = PGA * S$$

Por tener el suelo características de resistencia intermedia (ver Tabla 8) y pertenecer a la zona sísmica 2, se considera la amplificación.  $S = 1.2$

$$k_{(h)} = \frac{0.25 * 1.2}{2}$$

$$k_{(h)} = 0.15$$

Considerado los movimientos verticales, por lo tanto, se ha tomado las dos terceras partes del coeficiente sísmico horizontal tal como sugiere la Norma E.030.

$$k_{(v)} = \frac{2}{3} * k_{(h)}$$

$$k_{(v)} = \frac{2}{3} * 0.15$$

$$k_{(v)} = 0.1$$

#### 4.1.3 Factor por intensidad de lluvias

Para cuantificar el factor de intensidad de lluvia y ver la humedad del suelo, se consultó la información de SENAMHI, en su estación meteorología Ananea, donde se ha obtenido las precipitaciones máximas, ver anexo 01.

Para ver el parámetro de humedad se trabajó con una evotranspiración máxima de 125 mm, por lo tanto, precipitaciones mayores a 125 mm se interpreta que el terreno estará alto o muy alto de humedad, y valores menores a 125 mm no conducen al aumento de la humedad (Mora, R. et al., 1992).

**Tabla 9.** Valores asignados a la precipitación de lluvia (Mora, R. et al., 1992).

Promedio de precipitación (mm)	Valor Asignado
<125	0
125-250	1
>250	2

Fuente: Parizaca, 2012.

Además, para calcular la precipitación máxima para lugares específicos y por periodos de tiempo se utiliza las siguiente formula, que fue elaborada mediante el análisis de datos históricos SENAMHI del año 1964 al 2009, (Parizaca, 2012).

$$P = 5110.894 * \left( \frac{L^{2.838} * M^{0.329} * T^{0.177}}{W^{3.659}} \right)$$

Dónde:

P = Precipitación máxima

L = Latitud

H = Altitud

T = Tiempo

W= Longitud

**Tabla 10.** Resultados de la generación de valores para diferentes tiempos de retorno

Estación	T (años)	P <sub>máx</sub> (mm)	Latitud	Longitud	Altitud
Ananea	2	19.03	14.678444	69.53425	4660
	5	28.83	14.678444	69.53425	4660
	10	37.96	14.678444	69.53425	4660
	25	52.86	14.678444	69.53425	4660
	50	66.58	14.678444	69.53425	4660
	100	82.7	14.678444	69.53425	4660
	200	101.5	14.678444	69.53425	4660

Fuente: Parizaca, 2012.

Para nuestro caso y según (Mora, R. *et al.*, 1992), al no pasar una precipitación máxima de 125 mm, se verá afectado en el aumento del nivel freático en el proyecto minero FADE

I.

## 4.2 Resultados de laboratorio

### 4.2.1 Ensayo de determinación de las propiedades físicas

#### 1.2.1.1. Determinación de la densidad natural

Se realizó el ensayo de densidad natural o peso unitario, siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D7830/D7830M. Los resultados se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Determinación de peso unitario.

	<b>Peso específico</b>		
Tara	M-01	M-02	M-03
Peso húmedo seco(g)	67.50	63.50	79.10
Peso suelo húmedo + parafina(g)	76.50	71.90	86.60
Peso parafina(g)	9.00	8.40	7.50
Densidad parafina(g/cm <sup>3</sup> )	0.87	0.87	0.87
Volumen de agua desplazado(ml)	42.00	40.00	51.00
Densidad relativa(g/cm <sup>3</sup> )	2.13	2.09	1.87
<b>Promedio</b>		<b>2.03</b>	

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

### 1.2.1.2. Determinación de contenido de humedad

Se realizó el ensayo de contenido de humedad siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 3080-98. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Contenido de humedad.

	<b>Contenido de humedad</b>		
Muestra	M-01	M-02	M-03
Peso tara (g)	66.09	65.50	66.22
Peso muestra húmedo + tara(g)	290.62	295.50	289.77
Peso muestra seca + tara(g)	186.02	190.14	185.66
Peso agua(g)	29.50	15.90	32.20
Peso muestra húmeda (g)	133.35	138.23	132.50
Peso muestra seca(g)	119.93	124.64	119.44
$\omega$ (%)	10.12	5.50	10.93
<b>Promedio</b>		<b>8.85</b>	

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

### 1.2.1.3. Ensayo de corte directo en suelo

En las muestras obtenidas en la exploración de campo, se llevaron a cabo ensayos estándar de laboratorio con fines de identificación y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 3080, para lo cual se muestra un remen de la obtención de los parámetros de resistencia del suelo (Ver Tabla 13).

**Tabla 13.** Parámetros de resistencia del suelo.

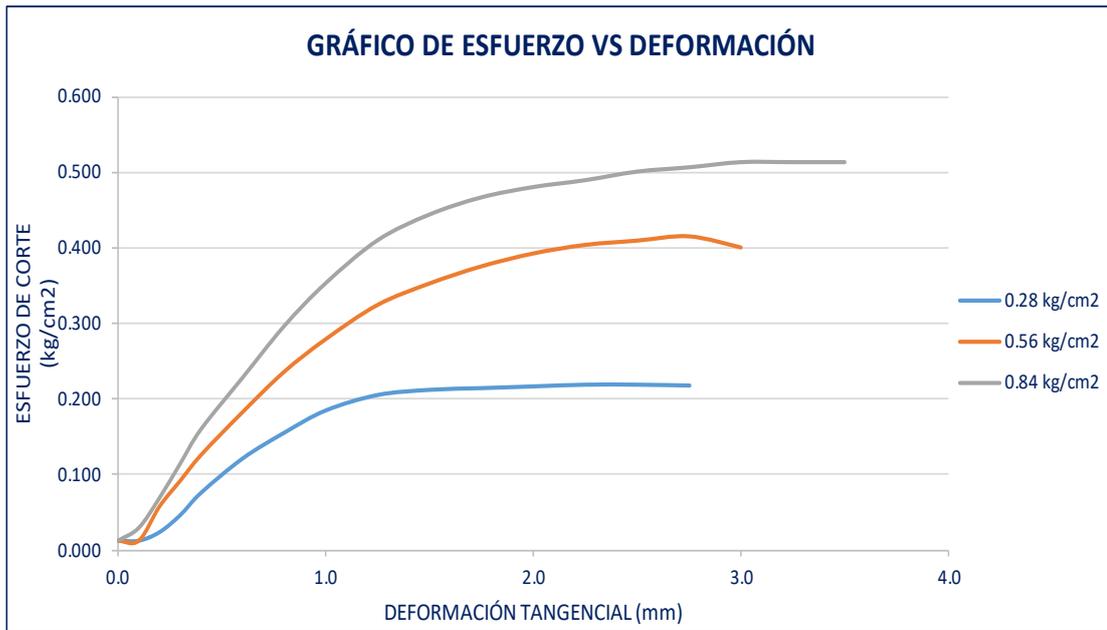
<b>Parámetros de resistencia del suelo</b>	
Angulo de fricción (°)	28.52
Cohesión (Kg/cm <sup>2</sup> )	0.0890

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

**Tabla 14.** Ensayo de corte directo.

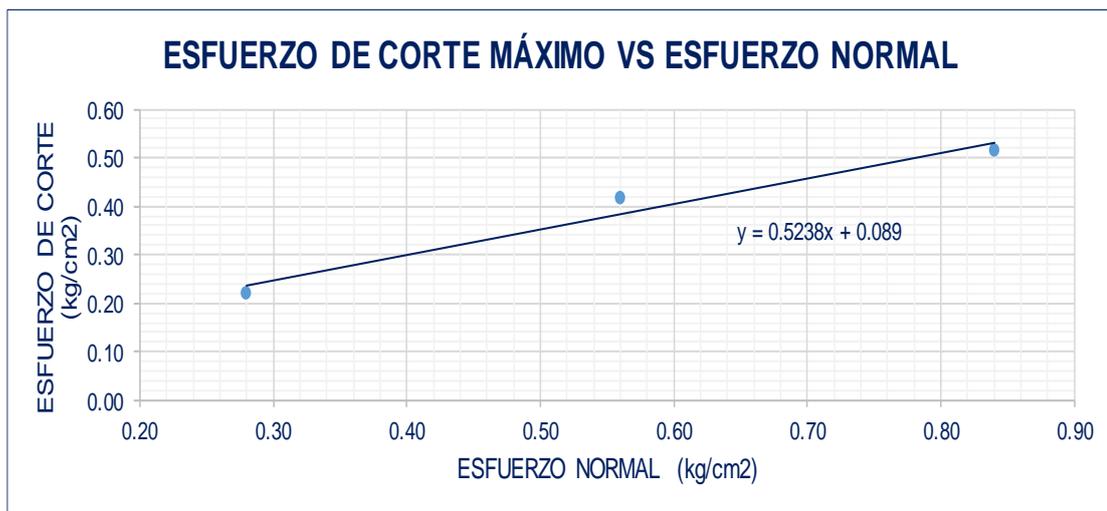
Especimen	Densidad seca		Esfuerzo normal $\sigma$	Proporción de esfuerzos	Humedad natural	Esfuerzo de corte $\tau$	Humedad saturada	Densidad húmeda	
	Peso volumétrico seco gr/cm <sup>3</sup>							Peso volumétrico natural gr/cm <sup>3</sup>	Peso volumétrico saturado gr/cm <sup>3</sup>
1	1.69		0.28	0.88	11.19	0.25	20.92	1.88	2.04
2	1.75		0.56	0.80	10.90	0.45	20.43	1.95	2.11
3	1.68		0.84	0.64	10.93	0.54	21.51	1.87	2.04

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.



**Figura 13.** Gráfico de esfuerzo vs deformación.

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.



**Figura 14.** Esfuerzo de corte máximo vs esfuerzo normal.

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

#### 1.2.1.4 Ensayo de determinación los límites de consistencia

##### Límite líquido

Se realizó el ensayo de límite líquido siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 423. Los resultados se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Resultados de ensayo limite líquido.

<b>Limite liquido (ASTM-D43 18 00)</b>				
N° de tara	M-1	M-3	M-6	M-10
Peso suelo húmedo + tara (g)	34.50	31.70	35.20	43.10
Peso de suelo seco + tara (g)	29.50	27.50	30.28	35.70
Peso tara (g)	18.20	17.80	18.20	17.80
Peso de suelo seco (g)	11.30	9.70	12.08	17.90
Peso de agua (g)	5.00	4.20	4.92	7.40
Contenido de humedad (g)	44.25	43.30	40.73	41.34
Numero de golpes	16	22	26	35

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

### Limite plástico

Se realizó el ensayo de límite líquido siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 423. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Resultados de ensayo limite plástico.

<b>Limite plástico (ASTM-D4318 00)</b>			
N° de tara	M-3	M-7	M-12
Peso suelo húmedo + tara (g)	7.70	7.80	7.80
Peso de suelo seco + tara (g)	7.60	7.60	7.70
Peso tara (g)	7.10	7.10	7.10
Peso de suelo seco (g)	0.50	0.50	0.60
Peso de agua (g)	0.10	0.20	0.10
Contenido de humedad (g)	20.00	40.00	16.67

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

### Límites de consistencia

Con los ensayos de límite líquido y límite plástico se procede a calcular los límites de consistencia, el cual se ilustra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Resultados límites de consistencia.

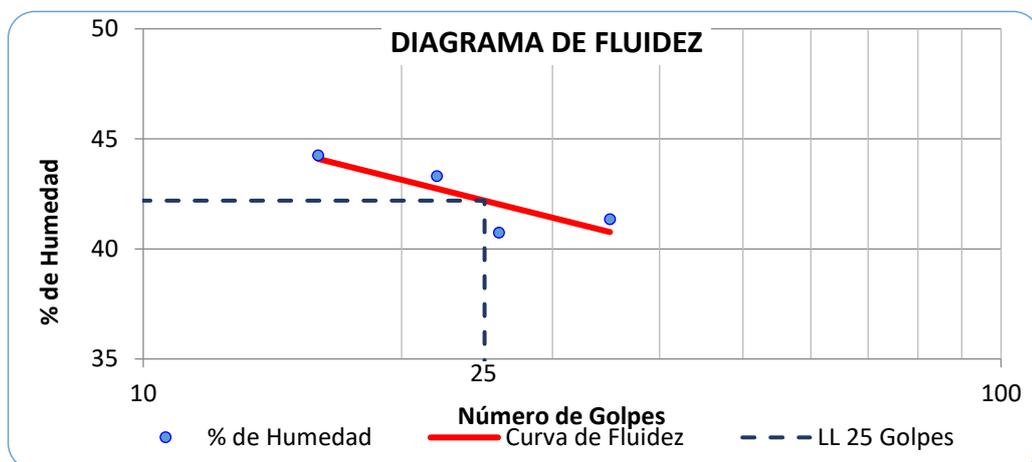
Descripción	Unidades
L.L. (%)	42.19
L.P. (%)	25.56
I.P. (%)	16.64
Pasa tamiz N°4 (5mm)%	63.59%
Pasa tamiz N° 200(0.080 mm)%	0.05%
D60	4.47 mm
D30	2.15 mm
D10	1.06 mm
Coefficiente de uniformidad (Cu)	4.23
Grado de curvatura (Cc)	19.58

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

**Tabla 18.** Tipo de suelo según SUCS y AASTHO.

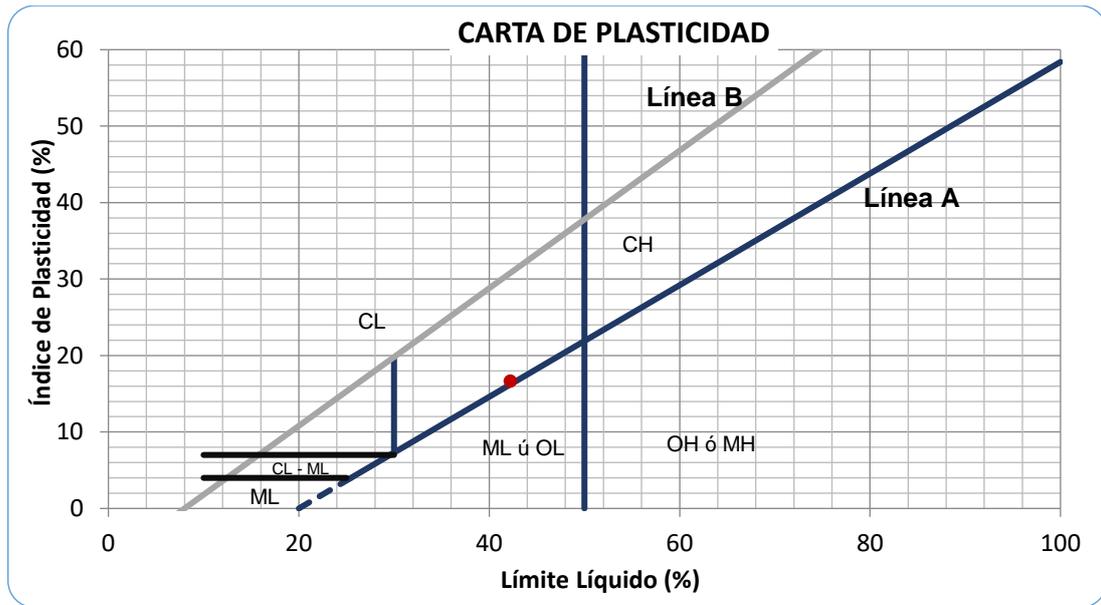
Clasificación SUCS	
Suelo de partículas gruesas. Suelo limpio. Grava mal graduada con arena SP	
Clasificación AASTHO	
Material granular	
Excelente a bueno como subgrado	
A-2-7 Grava y arena arcillosa o limosa	
Índice de grupo	0

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

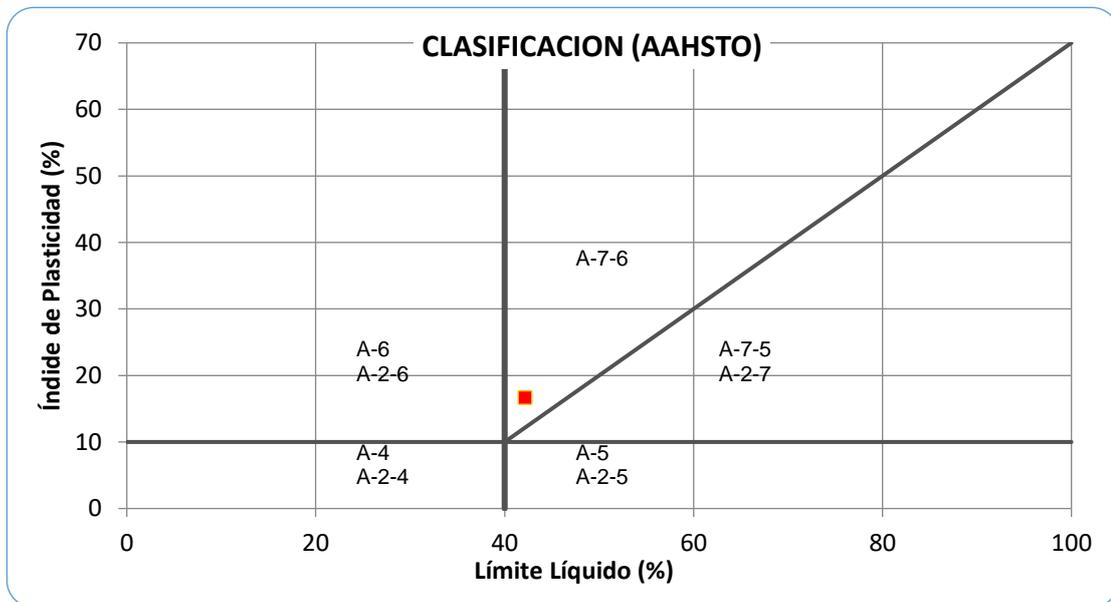


**Figura 15.** Diagrama de fluidez.

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.



**Figura 16.** Carta de plasticidad.  
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.



**Figura 17.** Clasificación AASTHO.  
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

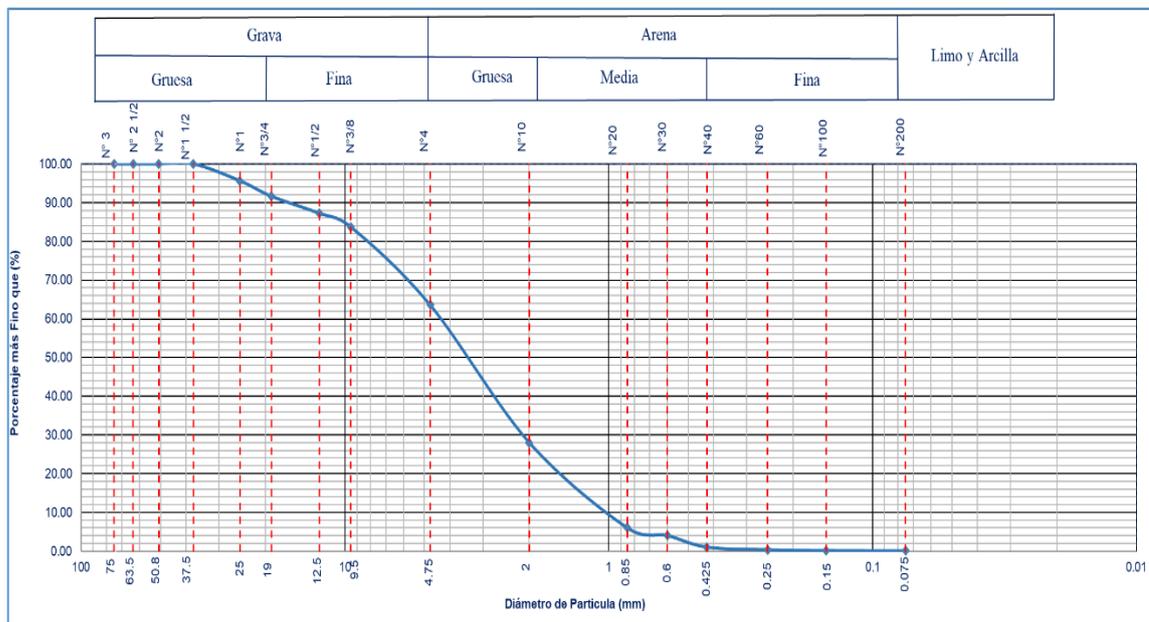
### 1.2.1.5 Análisis granulométrico

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico siguiéndose los procedimientos de la norma ASTM D 423. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Análisis granulométrico de la muestra de suelo.

Tamiz	Tamiz	Pesos de muestra retenida	Pasa	Pasante	Retenido parcial	Retenido acumulado
Pulg	Mm	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)
3	75	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2 ½	63.5	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
2	50.8	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1 ½	37.50	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00
1	25	87.20	95.64	95.64	4.36	4.36
¾	19	80.00	91.65	91.65	4.00	8.35
½	12.5	88.30	87.24	87.24	4.41	12.76
3/8	9.5	70.10	83.74	83.74	3.50	16.26
4	4.75	403.40	63.59	63.59	20.15	36.41
10	2	711.70	28.04	28.04	35.55	71.96
20	0.85	440.80	6.05	6.05	22.02	93.98
30	0.6	39.60	4.04	4.04	1.98	95.96
40	0.425	60.10	1.04	1.04	3.00	98.96
60	0.25	13.90	0.34	0.34	0.69	99.66
100	0.15	3.80	0.15	0.15	0.19	99.85
200	0075	2.10	0.05	0.05	0.10	99.95
Base		1.00	0.00	0.00	0.05	100.00
Total		2002.00			100.00	

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.



**Figura 18.** Curva granulométrica.

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos F.I.M. – UNA Puno.

### **4.3 Análisis de estabilidad**

Para garantizar la estabilidad del talud del frente de minado, se cumple con los estándares nacionales y internacionales, se realizaron varios análisis de estabilidad, tomándose para ello las secciones consideradas como las más desfavorables, desde el punto de vista topográfico (sección crítica), habiéndose determinado factores de seguridad (FS) iguales o mayores a 1.2 para condiciones estáticas y 1.0 para condiciones pseudoestáticas, (Read & Stacey, 2009).

El análisis de estabilidad está basado en los resultados obtenidos de la investigación geotécnica realizados en campo y de ensayos de laboratorio de suelos practicados a muestras extraídas del frente de minado del proyecto.

#### **4.3.1 Análisis de estabilidad de las condiciones actuales del talud de explotación**

Para realizar el análisis de estabilidad se basará en el método de equilibrio limite que se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

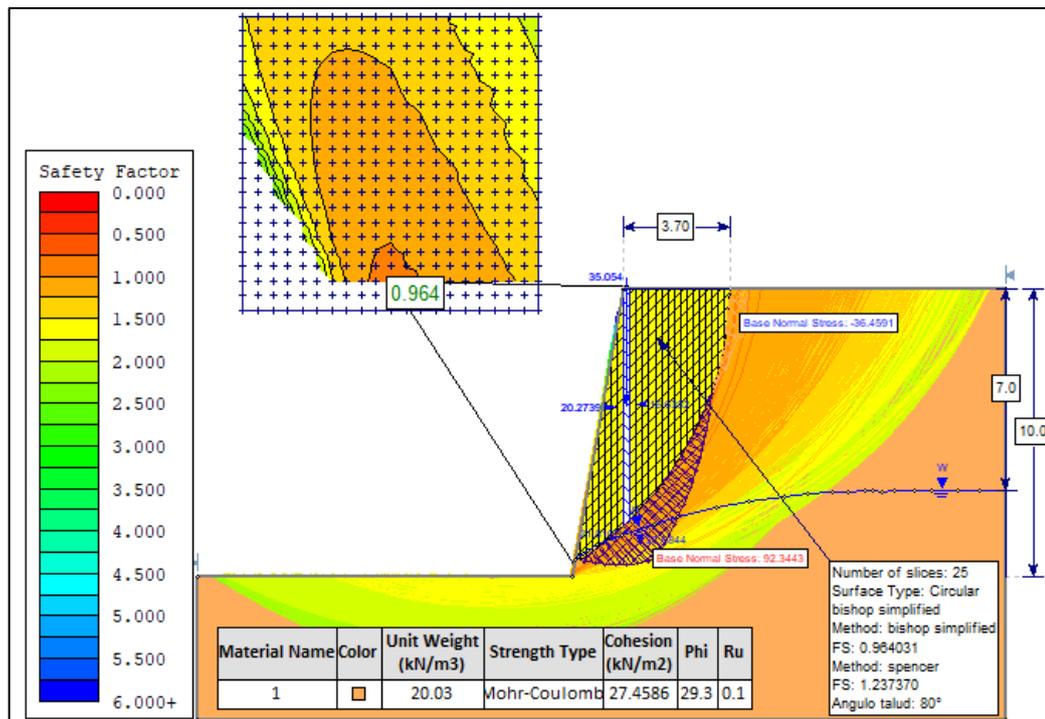
En la casi generalidad de los métodos de equilibrio limite la seguridad de un determinado talud se cuantifica por medio del factor o coeficiente de seguridad (F.S). El factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla.

**Tabla 20.** Criterios de aceptabilidad típicos para F.S estático y pseudoestático

Escala de talud	Consecuencias de falla	Criterio de Aceptabilidad	
		F.S. Estático (min)	F.S. Pseudoestático (min)
Banco	Alta-Baja	1.1	NA
	Baja	1.15 - 1.2	1
Inter-Rampa	Media	1.2	1
	Alta	1.2 - 1.3	1.1
	Baja	1.2 - 1.3	1
General	Media	1.3	1.05
	Alta	1.3 - 1.5	1.1

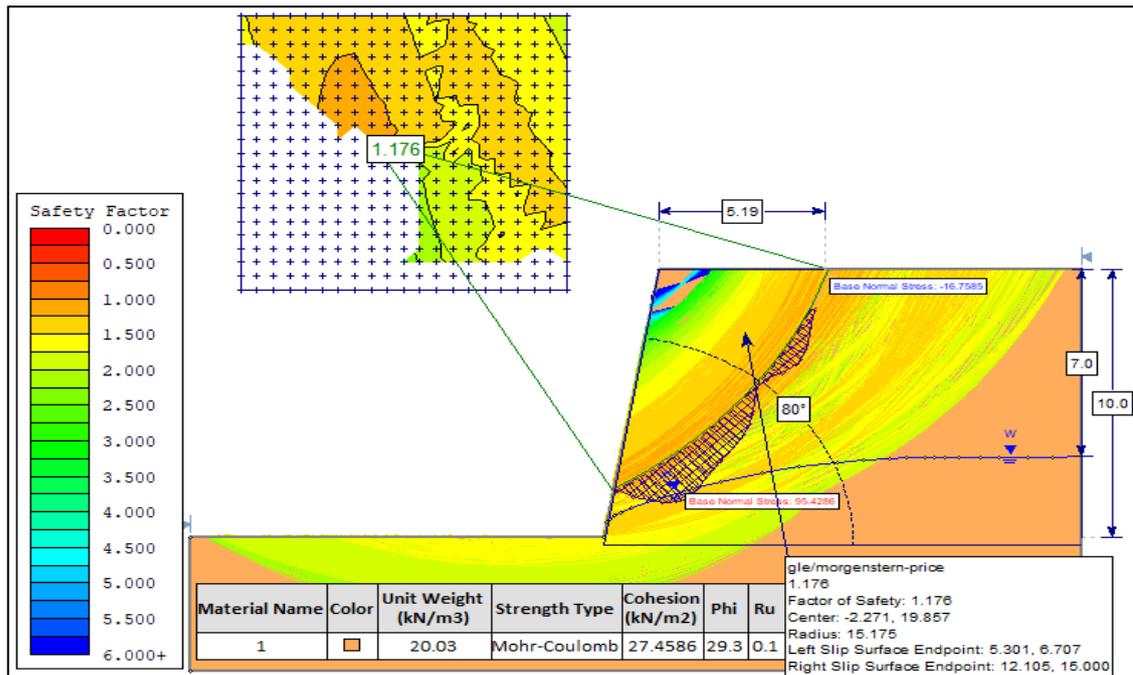
Fuente: Read & Stacey, (2009).

En los siguiente grafico se presenta el análisis del talud usando el método simplificado de Bishop Simplified (1955), que supone que las fuerzas de las caras laterales son horizontales y solo satisface el equilibrio de momentos y no el de fuerzas horizontales, es un método de aplicación a líneas de rotura circulares.

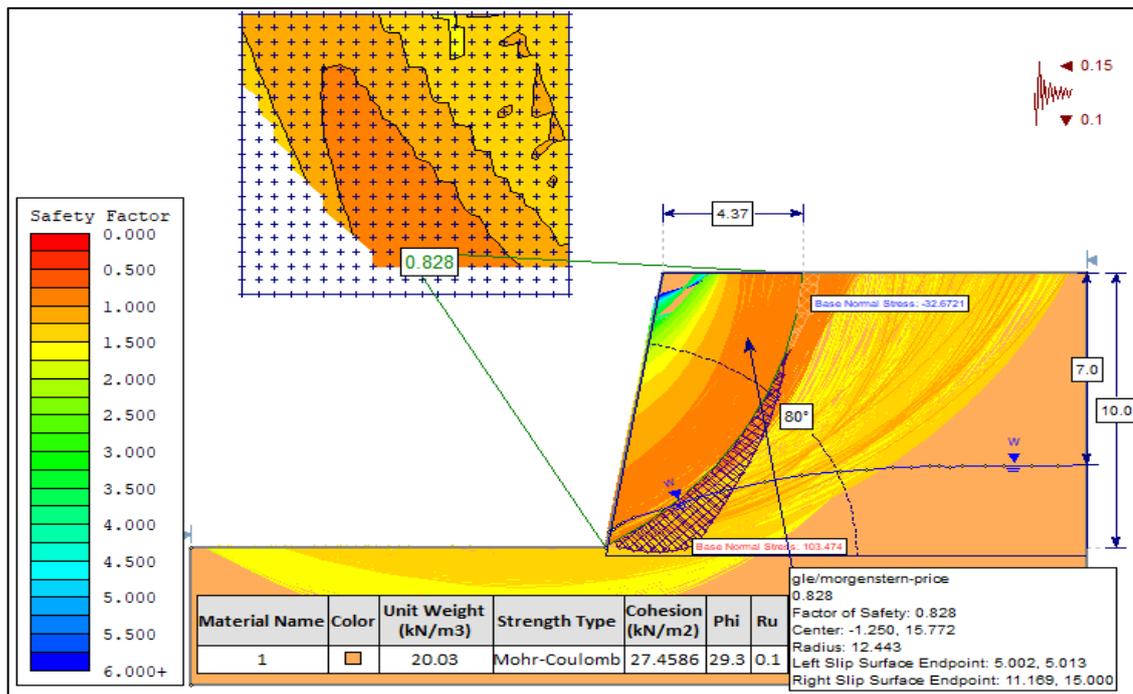


**Figura 19.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas, estado actual del talud de explotación.





**Figura 21.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 75 grados de inclinación.



**Figura 22.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price en condiciones pseudoestáticas.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad realizados por cada método para la condición actual del talud.

**Tabla 21.** Resumen de resultados de análisis de estabilidad por cada método.

Método de Cálculo	Factor de seguridad		Condición
	Estático	Pseudoestático $kh=0.15; kv=0.1$	
Bishop Simplified	0.964	0.821	Inestable
GLE/Morgenstern-Price	1.176	0.828	Inestable

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 21, con el método Bishop Simplified y GLE/Morgenstern-Price se tiene que para la condición estática son menores de 1.2 por lo que se considera inestable, para las condiciones actuales del talud.

Asi mismo para la condición pseudoestático también se consideran inestables ya que el factor de seguridad es menor a 1 esto considerando una aceleración máxima de  $kh=0.15$ ,  $kv=0.1$ , para las condiciones actuales del talud.

Por lo que se requiere realizar un diagnóstico de la situación actual a fin de determinar una geometría optima del talud a fin de realizar trabajos en forma segura y que no afecte tanto a los trabajadores, así como a la continuidad del ciclo de minado.

#### **4.3.2 Determinación de los parámetros geométricos óptimos del talud**

Para determinar los parámetros es necesario realizar un diagnóstico a la altura y el ángulo del talud a fin de poder realizar cambios que conlleven a mejores factores de seguridad que resulten en condiciones seguras de trabajo.

##### **1.3.2.1. Determinación de la altura del talud**

Para determinar la altura del talud es necesario evaluar los criterios operativos como es realizar un análisis a las especificaciones técnicas de la excavadora hidráulica CAT 325DL, quien realiza el corte en el talud y hace el carguío hacia los volquetes. De acuerdo al anexo 2, se tiene que la altura máxima de corte debería considerarse menores a 10. metros. Por lo que la



altura de excavación es menor a 10 metros, a fin de aprovechar la máxima eficiencia, operatividad del equipo y brindar máxima seguridad en el trabajo.

### 1.3.2.2. Determinación del ancho de berma del talud

Para el cálculo del ancho de berma del talud, se usó la ecuación de Ritchie (1963) y modificado por Evan y Call (1992), donde como condición se tiene la altura del talud si es mayor o menor a 9 metros. Para nuestro caso tenemos un talud de altura de 10 metros y para el diseño se usará la siguiente formula.

$$\begin{aligned} B &= 0.2 h_b + 4.5; \text{ para } h_b > 9.0 \text{ m} \\ B &= 0.2 (10) + 4.5 \\ B &= 6.5 \text{ m} \end{aligned}$$

En nuestro caso tenemos al tren de rodaje de la excavadora 325DL apoyada directamente en suelo firme, así que no tenemos una berma y por consiguiente no existirá un banco y tampoco el ángulo interrampa.

### 1.3.2.3. Determinación del ángulo del talud

Este parámetro es el más importante y para la determinación es necesario hacer ensayos de laboratorio y poder determinar el ángulo de fricción interna, la cohesión y la densidad del suelo, los cuales son indispensables para su cálculo.

Luego de la realización de los ensayos es necesario el uso del Software de Rocscience Slide 6.0 versión estudiantil, donde se realiza la simulación el tipo de material a fin de determinar un talud optimo analizando en condiciones estáticas y pseudoestáticas, para la siguiente investigación se han desarrollado un total de 46 simulaciones en total donde se tuvo 20 simulaciones con el método de Bishop Simplified y 26 simulaciones con el método GLE/Morgenstern-Price.

### 4.3.3 Resultados de análisis de simulaciones en el talud de explotación

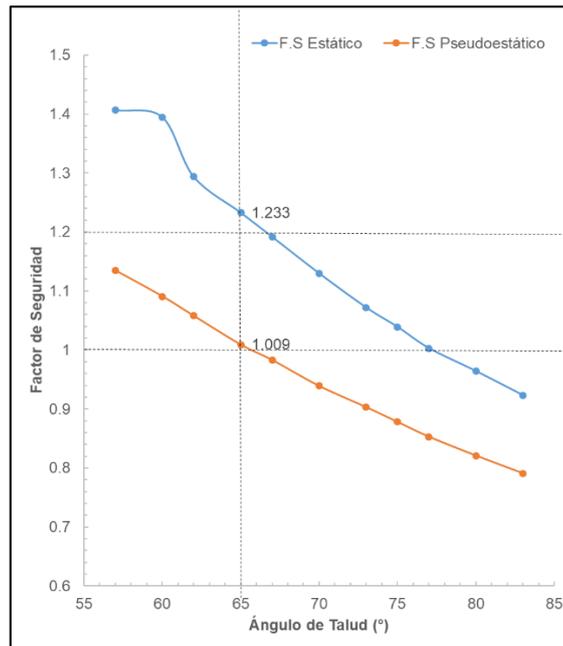
#### 1.3.3.1. Resultados por el método de Bishop Simplified

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos de las 20 simulaciones realizadas en el Software de Rocscience Slide 6.0 versión estudiantil, para cada ángulo de talud.

**Tabla 22.** Resultado de simulación con el método de Bishop Simplified.

Ángulo del talud (°)	F.S Estático	F.S Pseudoestático
57	1.407	1.135
60	1.395	1.091
62	1.294	1.058
65	1.233	1.009
67	1.192	0.983
70	1.13	0.939
73	1.072	0.903
75	1.039	0.878
77	1.003	0.853
80	0.964	0.821
83	0.923	0.791

De acuerdo a la tabla 22, se tiene que para trabajar en condiciones seguras se ha identificado un ángulo talud óptimo de 65°. Para condiciones estáticas se tiene un factor de seguridad de 1.233 y para condiciones pseudoestáticas un factor de seguridad de 1.009, resultando en factores de seguridad mínimos requeridos mayores a 1.2 para condiciones estáticas y 1.0 para condiciones pseudoestáticas, ver anexos del 10 al 19.



**Figura 23.** Resultados de la simulación método Bishop Simplified.

En la figura 23, se tiene el ángulo de talud seleccionado para una explotación de condiciones seguras para el trabajador.

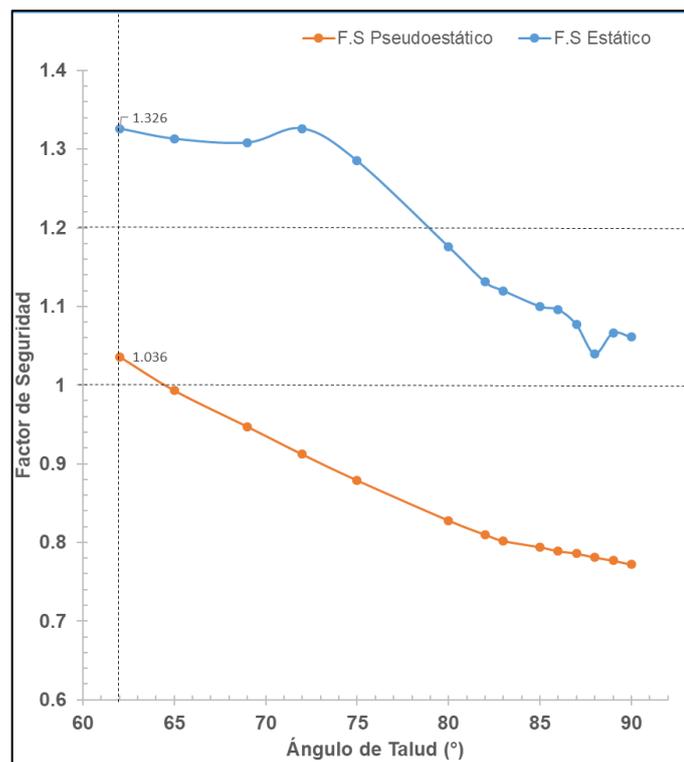
### 1.3.3.2. Resultados por el método GLE/Morgenstern-Price

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos de las varias simulaciones realizadas en el Software de Rocscience Slide 6.0, para cada ángulo de talud.

De acuerdo a la tabla 23, para trabajar en condiciones seguras se ha identificado un ángulo talud óptimo de  $62^\circ$ . Para condiciones estáticas se tiene un factor de seguridad de 1.326 y para condiciones pseudoestáticas un factor de seguridad de 1.036, resultando en factores de seguridad mínimos requeridos mayores a 1.2 para condiciones estáticas y 1.0 para condiciones pseudoestáticas, ver anexos del 20 al 32.

**Tabla 23.** Resultado de simulación con el método GLE/Morgenstern-Price.

Ángulo del talud (°)	F.S Estático	F.S Pseudoestático
62	1.326	1.036
65	1.313	0.993
69	1.308	0.947
72	1.326	0.912
75	1.285	0.879
80	1.176	0.828
82	1.131	0.81
83	1.12	0.802
85	1.1	0.794
86	1.096	0.789
87	1.077	0.786
88	1.04	0.781
89	1.066	0.777
90	1.061	0.772



**Figura 24.** Resultados de la simulación método GLE/Morgenstern-Price.

En la figura 24, se tiene el ángulo de talud seleccionado para una explotación de condiciones seguras para el trabajador.

#### **4.4 Métodos de estabilización**

El talud analizado es el frente de explotación por lo que constantemente es rebajado usando la maquinaria excavadora, entonces el análisis realizado servirá para conocer el estado del comportamiento del talud a fin de trabajar en frentes de trabajo que brinden condiciones seguras.

Se plantea la realización de monitoreo de la estabilidad del talud mediante la supervisión diaria de los parámetros geométricos planteados. Si en caso se tenga aumento de la precipitación, presencia de agua de escorrentía u otros factores que puedan afectar la estabilidad del talud de explotación se plantearía la modificación de los parámetros geométricos.

#### **4.5 Discusiones**

##### **Discusión 01**

Para Guillen M., 2004, los parámetros geométricos son importantes para evitar deslizamientos, pero también son necesarios considerar a los factores naturales como la lluvia, heladas y sismos.

En la investigación se ha considera los factores naturales como las precipitaciones máximas y el factor de intensidad sísmica para la región Puno así como también los parámetros geométricos a fin de determinar el factor de seguridad optimo tanto para condiciones estáticas y pseudoestáticas.

##### **Discusión 02**

Para Quea, 2017, los fallamientos de los taludes son a consecuencia de las precipitaciones y es necesario un control estricto de la geometría de los taludes de explotación.

En la instigación tenemos que las ubicaciones de los taludes de explotación del proyecto minero FADE I no son afectadas por las precipitaciones máximas porque la



coordenada de la concesión se ubica en lugar planicie y el curso del río está a una distancia de 800 metros aproximadamente.

### **Discusión 03**

Para Ochoa, 2016, los factores internos que causan la inestabilidad de taludes son la pendiente y la litología.

Para el caso de la investigación también la variación de la pendiente causa la inestabilidad en los taludes. la litología del terreno se realizó con los ensayos de laboratorio de mecánica de suelo ver anexos 03, 04 y 05.



## V. CONCLUSIONES

Se concluye que es de suma importancia el estudio del comportamiento físico y mecánico de los suelos para la obtención de la estabilidad física del talud frente de minado del Proyecto Minero FADE I.

Se llegó a determinar las propiedades física y mecánicas de los suelos con análisis en laboratorio, donde Angulo de fricción es ( $28.52^\circ$ ) y su Cohesión es ( $0.0890 \text{ Kg/cm}^2$ ). Y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). el tipo de suelos es Arena mal graduada.

Se concluye que el factor de seguridad, aplicando el método de Bishop Simplified nos da un factor de seguridad de 1.233 par altura de talud de 10 metros con ángulo de talud de  $65^\circ$ . En condiciones estáticas. Y en condiciones pseudoestáticas nos da un factor de seguridad de 1.009. con el método GLE/Morgenstern-Price con un diseño de ángulo de talud de  $62^\circ$  y altura de talud de 10 metros obteniéndose con un factor de seguridad de 1.326 en condiciones estáticas y 1.036 para condiciones pseudoestáticas. Por lo tanto, el talud de explotación es estable en condiciones estáticas



## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar con mucha frecuencia los análisis de estabilidad de los taludes para prevenir deslizamientos y accidentes e incidentes peligrosos, por lo que se recomienda seguir la metodología aplicada para el adecuado control geotécnico en la explotación y replicarlo en otras unidades de producción con similares métodos de explotación.

Se recomienda realizar más estudios en los diferentes proyectos mineros de las zonas aledañas, para obtener una mayor descripción de los suelos y sus comportamientos físicos, mecánicos de los suelos para la obtención de la estabilidad física del talud en las diferentes áreas de trabajo y así poder zonificar el área.

Se recomienda realizar varios estudios geotécnicos con sus respectivas pruebas de laboratorios y con las simulaciones correspondientes con los diferentes métodos de análisis estático y pseudoestático, para seleccionar el método más óptimo. Y así poder brindar mayor seguridad en la actividad minera con mayor eficiencia en la producción.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, Z. (2005). Análisis de peligro sísmico y estimado del movimiento sísmico de diseño. Lima: CISMID.
- Alonso, E. (2005). Estabilidad de taludes. Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.
- CCori Q., S. (2015). *Explotación mecanizada y producción de grava aurífera en la mina Ancocala – Ananea*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Das, B. (2001). Resistencia cortante del suelo. En B. Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (págs. 207-247). México: Thomson Learning.
- González de Vallejo, L. (2002). Ingeniería Geológica. In *Editorial Pearson Education, Madrid*.
- Guillen M., C. E. (2004). *Estabilidad de taludes en los departamentos de Guatemala y Alta Verapaz, casos reales*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- IGME. (1986). *Manual de taludes*. España.
- INGEMMET (2020). Peligro geológico en la region Puno - boletin serie C N° 77. (págs. 105 - 138). Lima -Perú.
- Lugo, E. D. (2018). *Combinación de los métodos janbú – spencer en el análisis de estabilidad de taludes para el empleo de sistemas flexibles de alta resistencia en la construcción de carreteras*. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Marcuson, W. (1981). *Moderator's report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads*. Proceedings, International conference on recent advances in Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics.
- Mora, R., Mora, S. & VAHRSON, W., (1992). Macronizacion de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica – Escala 1:286000. San Jose de Costa Rica.
- Mendoza L., J. A. (2016). *Analisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- MINEM. (2005). *Decreto Supremo N°033-2005-EM*. 26.
- Mostajo C., J. A. (2016). *Estudio de probabilidad de falla e implementación de alternativas de solución al deslizamiento de taludes andinos*. Universidad Ricardo Palma.
- Normas Legales. (24 de enero de 2016). DS-N°003-2016-VIVENDA. Decreto Supremo que modifica la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento



- Nacional de Edificaciones. Diario oficial de El Peruano, Lima, Perú.
- Ochoa Q., L. Y. (2016). *Inestabilidad De Taludes En El Sector De Santa Bárbara De La Ciudad De Huancavelica*. Universidad Peruana los Andes.
- Ordaya M., I. H. (2017). *Análisis de las propiedades físicas del suelo en la estabilidad de talud en el Km 0+807 del sector la Esperanza del distrito de Pozuzo* (Universidad Peruana Los Andes).
- Orosco O., K. M. (2013). *Estabilidad de taludes en suelos residuales evaluado en el corto y largo plazo*. Universidad Eafit.
- Parizaca Perez, Y. M. (2012). *Regionalización de precipitaciones máximas en la cuenca del río Ramis*. Universidad Nacional del Altiplano
- Proyecto Minero FADE I. (2019). *Plan de Minado*. Puno, Perú.
- Quea G., L. (2017). *Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistencia al corte en el frente de minado del proyecto San Antonio y María – Ananea presentada*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Ramírez O., P., & Alejano M., L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CSIRO, Collingwood, Australia, (pp. 223, 235).
- Rocscience. (2018). Introducción - Slide. Retrieved from Rocscience website: [https://www.rocscience.com/help/slide2/#t=getting\\_started%2FGetting\\_Started.htm](https://www.rocscience.com/help/slide2/#t=getting_started%2FGetting_Started.htm)
- Suarez D., J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (Ingeniería). Colombia.
- Suarez, J. (2009). Análisis de estabilidad. En *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*, (pp. 127-172).
- Tardeo D., C. & Zanabria P., E. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de cuenca - Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Valiente, R., Sobrecases, S., & Díaz, A., (2015). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Basicos, Parametros de Diseno y Metodos de Calculo*. España, (pp. 1-23).
- Welling, L., Marchal, J. P., van Hasselt, P., van der Ploeg, A. T., Wijburg, F. A., & Boelens, J. J. (2015). Early umbilical cord blood-derived stem cell transplantation does not prevent neurological deterioration in mucopolysaccharidosis type III. In *JIMD Reports* (Vol. 18, pp. 63–68).



Johnson, (2014), la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador

Hernández-Sampieri et al., (2013) tamaño de la muestra, representatividad de la muestra y procedimiento de selección.



## ANEXOS

**Anexo 1.** Información de SENAMHI, precipitaciones máximas de 1964 al 2009

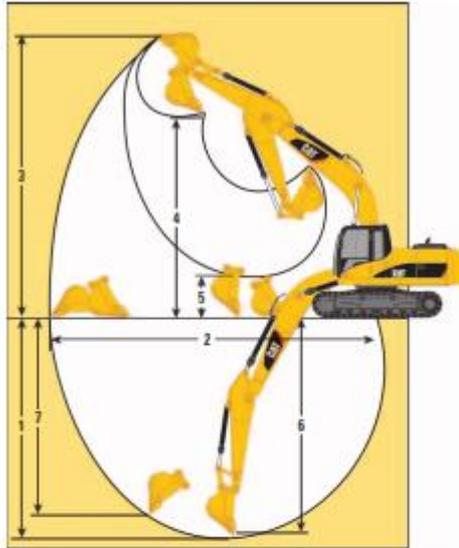
<b>Año</b>	<b>Precipitación Máxima - Real</b>	<b>Año</b>	<b>Precipitación Máxima - Real</b>
1964	23	1987	14
1965	14.8	1988	11.6
1966	18	1989	16
1967	26.8	1990	15.2
1968	70	1991	17.3
1969	63.7	1992	13.5
1970	91.5	1993	12.1
1971	15.6	1994	18.6
1972	16.2	1995	18.2
1973	22.6	1996	22.4
1974	14	1997	16.2
1975	15.4	1998	36
1976	14.6	1999	19.2
1977	18.3	2000	25.2
1978	15.6	2001	23.6
1979	14.3	2002	23.8
1980	16.5	2003	36.9
1981	14.6	2004	31
1982	24.5	2005	21.4
1983	12.2	2006	31.5
1984	26.7	2007	33.1
1985	19.1	2008	22.4
1986	19.3	2009	23

## Anexo 2. Especificaciones técnicas de la excavadora CAT 325DL

### Excavadora Hidráulica 325D L

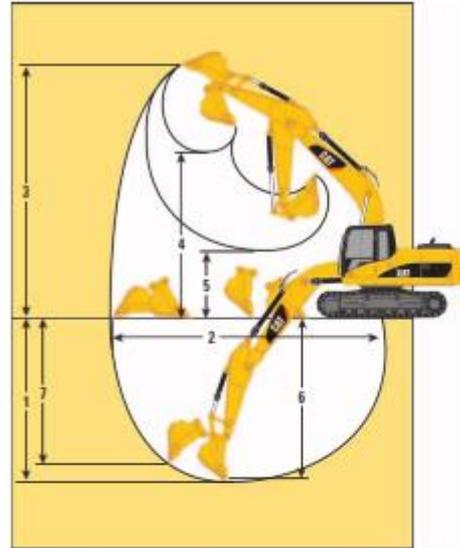
#### Gamas de trabajo de la excavadora de alcance

Configuración de la pluma de alcance (R)



#### Gamas de trabajo de la excavadora en gran volumen

Configuración de la pluma para excavación en gran volumen (M)



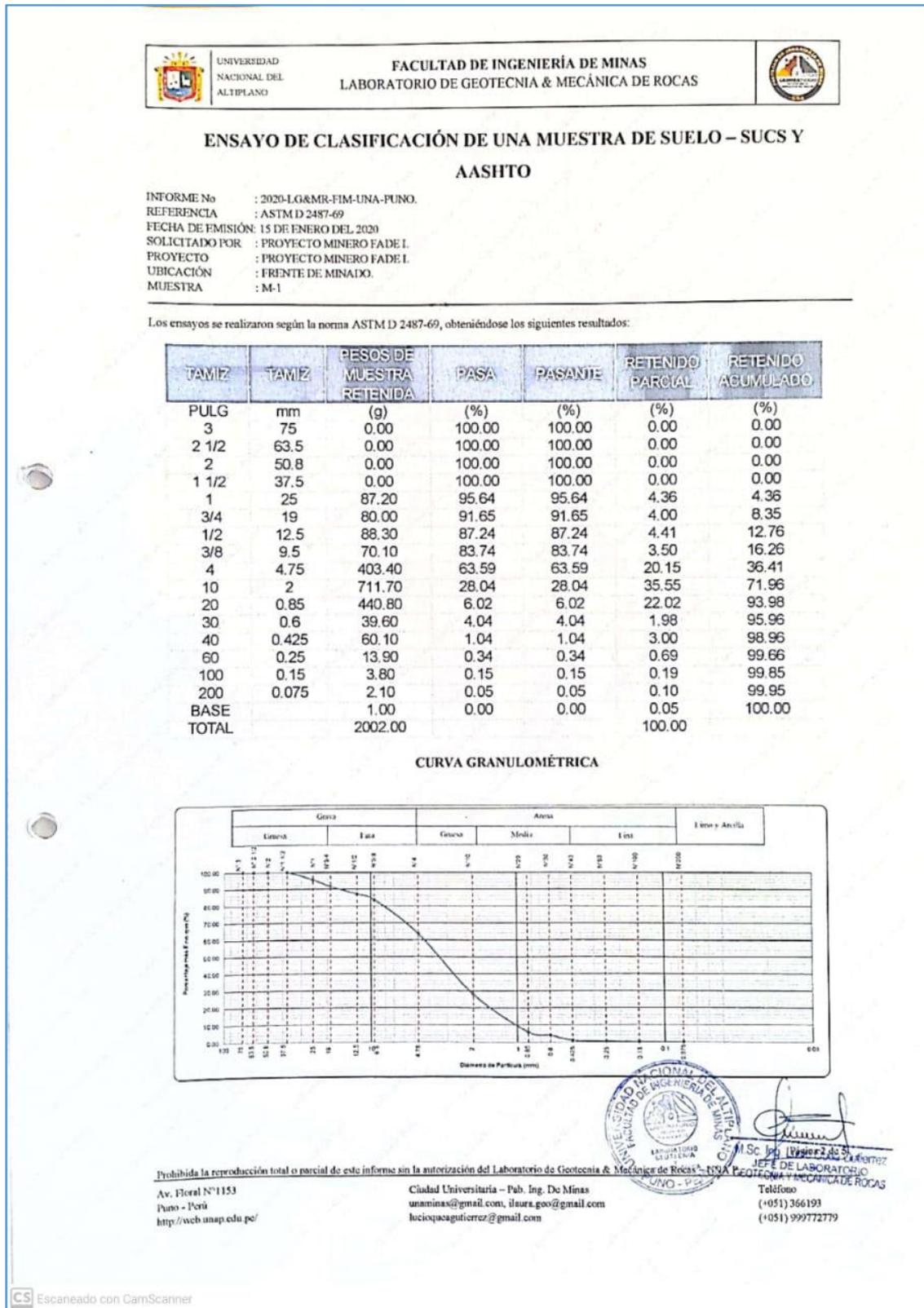
#### Opciones de pluma

Pluma de alcance  
6,15 m (20'2")

Pluma para excavación  
en gran volumen  
5,55 m (18'2")

Opciones de brazo	R3.75CB2 (12'4")	R3.2CB2 (10'6")	R2.65CB2 (8'8")	R3.2CB2 (10'6")	R2.65CB2 (8'8")	M3.2CB2 (10'6")	M2.5DB (8'2")
Opciones de cucharón	Servicio pesado de 1,35 m <sup>3</sup> (1,77 yd <sup>3</sup> )	Servicio pesado de 1,35 m <sup>3</sup> (1,77 yd <sup>3</sup> )	Servicio pesado de 1,35 m <sup>3</sup> (1,77 yd <sup>3</sup> )	Servicio pesado de 1,35 m <sup>3</sup> (1,77 yd <sup>3</sup> ) con acoplador tipo sujetapasaadores	Servicio pesado de 1,35 m <sup>3</sup> (1,77 yd <sup>3</sup> ) con acoplador tipo sujetapasaadores	Servicio pesado de 1,57 m <sup>3</sup> (2,05 yd <sup>3</sup> )	Servicio pesado de 1,87 m <sup>3</sup> (2,45 yd <sup>3</sup> )
1 Máxima profundidad de excavación	7.833 mm (25'8")	7.283 mm (23'11")	6.733 mm (22'1")	7.571 mm (24'10")	7.020 mm (23'0")	6.738 mm (22'1")	6.130 mm (20'1")
2 Alcance máximo a nivel del suelo	11.153 mm (36'7")	10.656 mm (35'0")	10.176 mm (33'5")	10.986 mm (36'1")	10.507 mm (34'6")	10.023 mm (32'11")	9.453 mm (31'0")
3 Altura máxima de corte	10.297 mm (33'9")	10.115 mm (33'2")	10.000 mm (32'10")	10.256 mm (33'8")	10.156 mm (33'4")	9.686 mm (31'9")	9.227 mm (30'3")
4 Altura máxima de carga	7.102 mm (23'4")	6.908 mm (22'8")	6.762 mm (22'2")	6.620 mm (21'9")	6.475 mm (21'3")	6.480 mm (21'3")	5.968 mm (19'7")
5 Altura mínima de carga	1.707 mm (5'7")	2.257 mm (7'5")	2.807 mm (9'3")	1.969 mm (6'6")	2.519 mm (8'3")	1.833 mm (6'0")	2.441 mm (8'0")
6 Profundidad máxima de excavación de 2,440 mm (8') con fondo horizontal	7.694 mm (25'3")	7.128 mm (23'5")	6.558 mm (21'6")	7.425 mm (24'4")	6.857 mm (22'6")	6.583 mm (21'7")	5.942 mm (19'6")
7 Profundidad máxima de excavación vertical	6.590 mm (21'7")	6.143 mm (20'2")	5.811 mm (19'1")	4.553 mm (14'11")	4.325 mm (14'2")	5.611 mm (18'5")	5.051 mm (16'7")

**Anexo 3. Resultados de ensayos de clasificación de muestras de suelo, SUCS y AASHTO.**



### Anexo 4. Resultados de ensayos de límites de consistencia en muestras de suelo.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL  
ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**LABORATORIO DE GEOTECNIA & MECÁNICA DE ROCAS**



#### ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA EN MUESTRA DE SUELO

INFORME No : 2020-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.  
REFERENCIA : ASTM D 423-98.  
FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2020  
SOLICITADO POR : PROYECTO MINERO FADE I.  
PROYECTO : PROYECTO MINERO FADE I.  
UBICACIÓN : FRENTE DE MINADO.  
MUESTRA : M-1.

**Determinación de Límites de Consistencia**

LÍMITE LÍQUIDO (ASTM-D4318 00)				
Nº de Taza	M-1	M-3	M-6	M-10
Peso Suelo Húmedo + Taza (g)	34.50	31.70	35.20	43.10
Peso de Suelo Seco + Taza (g)	29.50	27.50	30.28	35.70
Peso de Taza (g)	18.20	17.80	18.20	17.80
Peso de Suelo Seco (g)	11.30	9.70	12.08	17.90
Peso de Agua (g)	5.00	4.20	4.92	7.40
Contenido de Humedad (%)	44.25	43.30	40.73	41.34
Número de Golpes	16	22	26	35

LÍMITE PLÁSTICO (ASTM-D4318 00)			
Nº de Taza	M-3	M7	M12
Peso Suelo Húmedo + Taza (g)	7.70	7.80	7.80
Peso de Suelo Seco + Taza (g)	7.60	7.60	7.70
Peso de Taza (g)	7.10	7.10	7.10
Peso de Suelo Seco (g)	0.50	0.50	0.60
Peso de Agua (g)	0.10	0.20	0.10
Contenido de Humedad (%)	20.00	40.00	16.67

Límite Líquido (L.L.%)	42.19
Límite Plástico (L.P.%)	25.56
Índice de Plasticidad (I.P.%)	16.64
Pasa tamiz Nº 4 (Cm) %	63.50
Pasa tamiz Nº 200 (0.075 mm) %	0.05
D60 (mm)	4.47
D30 (mm)	2.15
D10 (diámetro efectivo) (mm)	1.06
Coefficiente de uniformidad (Cu)	4.23
Grado de curvatura (Cc)	19.58

**Calificación SUCS**

Suelo de partículas gruesas. Suelo limpio.  
Arena mal graduada con grava SP

**Calificación AASTHO**

Material granular  
Excelente a bueno como subgrado  
A-2-7 Grava y arena arcillosa o limosa

**ÍNDICE DE GRUPO** 0

**Gráficos**

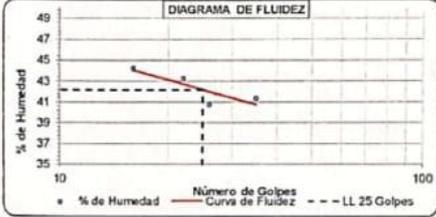
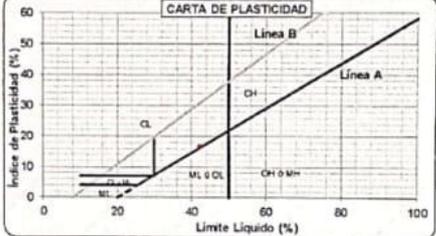
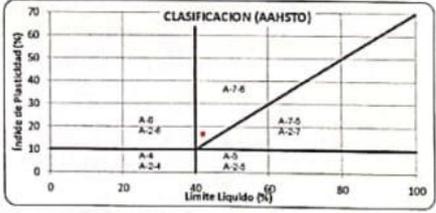


DIAGRAMA DE FLUIDEZ



CARTA DE PLASTICIDAD



CLASIFICACION (AAHSTO)



M. Sc. **Primo Lora**  
JEFE DE LABORATORIO  
GEOTECNIA Y MECÁNICA DE ROCAS  
PUNO - PERÚ  
Teléfono  
(+051) 366193  
(+051) 999772779

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Laboratorio de Geotecnia & Mecánica de Rocas - UNA P.

Av. Floral N° 1153 Ciudad Universitaria - Pab. Ing. De Minas  
unaminas@gmail.com, llaura.geo@gmail.com  
lucioqueagutierrez@gmail.com





Anexo 5. Resultados de ensayo de corte directo en suelo CD.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**LABORATORIO DE GEOTECNIA & MECÁNICA DE ROCAS**



**ENSAYO DE CORTE DIRECTO CD EN MUESTRA DE SUELO**

INFORME No : 2020-LG&MR-FIM-UNA-PUNO.  
REFERENCIA : ASTM D 3080-98.  
FECHA DE EMISIÓN: 15 DE ENERO DEL 2020  
SOLICITADO POR : PROYECTO MINERO FADE I.  
PROYECTO : PROYECTO MINERO FADE I.  
UBICACIÓN : FRENTE DE MINADO.  
MUESTRA : M-1.

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 3080-98, obteniéndose los siguientes resultados:

DATOS	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
ANCHO (cm)	5.98		5.98		5.98	
LARGO (cm)	5.97		5.97		5.97	
ALTURA (cm)	1.99		1.99		1.99	
ÁREA (cm <sup>2</sup> )	35.70		35.70		35.70	
VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	71.04		71.04		71.04	
Peso del Molde (g)	157.27		157.27		157.27	
Peso Tara (g)	66.09		65.50		66.22	
Peso colocada (Kg)	1.00		2.00		3.00	
Esfuerzo Norma aplicado (Kg)	10.00		20.00		30.00	
Peso Muestra Humeda Natural (g)	290.62		295.50		289.77	
Peso Muestra Saturada Natural (g)	211.11		215.60		211.35	
Peso muestra Jecta tan (g)	186.02		190.14		185.66	
Peso Muestra Humeda Natural (g)	133.35		138.23		132.50	
Peso Muestra Saturada (g)	145.02		150.10		145.13	
Peso Muestra Seca (g)	119.93		124.64		119.44	
Contenido de Humedad (%)	W% natural	11.19	W% natural	10.90	W% natural	10.93
	W% saturada	20.92	W% saturada	20.43	W% saturada	21.51
Densidad Humeda (gr/cm <sup>3</sup> )	Natural	1.88	Natural	1.95	Natural	1.87
	Saturada	2.04	Saturada	2.11	Saturada	2.04
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.69		1.75		1.68	
Esfuerzo Normal (kg/cm <sup>2</sup> )	0.780		0.560		0.840	

ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS											
Def. Tangencial (mm)	Día de carga	ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03		Def. Tangencial (mm)	Día de carga	ESPECIMEN 03	
		Fuerza cortante (Kg)	Esfuerzo de corte (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza cortante (Kg)	Esfuerzo de corte (kg/cm <sup>2</sup> )	Fuerza cortante (Kg)	Esfuerzo de corte (kg/cm <sup>2</sup> )				
0.00	0.00	0.467	0.013	0.00	0.00	0.467	0.013	0.00	0.00	0.467	0.013
0.10	0.00	0.467	0.013	0.10	0.00	0.467	0.013	0.10	1.50	1.074	0.030
0.20	1.00	0.872	0.024	0.20	4.00	2.085	0.058	0.20	5.00	2.490	0.070
0.30	3.00	1.681	0.047	0.30	7.00	3.798	0.092	0.30	9.00	4.107	0.115
0.40	5.00	2.732	0.077	0.40	10.00	4.512	0.126	0.40	11.00	5.725	0.160
0.60	9.00	4.350	0.122	0.60	15.00	6.534	0.183	0.60	19.00	8.152	0.228
0.80	12.00	5.563	0.156	0.80	19.70	8.435	0.236	0.80	25.00	10.579	0.296
1.00	15.20	6.615	0.185	1.00	23.50	9.972	0.279	1.00	30.00	12.601	0.353
1.25	17.00	7.343	0.206	1.25	27.50	11.590	0.325	1.25	35.00	14.623	0.410
1.50	17.00	7.586	0.212	1.50	30.00	12.603	0.353	1.50	38.00	15.837	0.444
1.75	17.00	7.667	0.215	1.75	32.00	13.410	0.376	1.75	40.00	16.646	0.466
2.00	18.00	7.748	0.217	2.00	33.50	14.017	0.393	2.00	41.20	17.131	0.480
2.25	18.20	7.828	0.219	2.25	34.50	14.421	0.404	2.25	42.00	17.455	0.489
2.50	18.20	7.828	0.219	2.50	35.00	14.623	0.410	2.50	44.00	17.859	0.500
2.75	18.10	7.788	0.218	2.75	35.50	14.826	0.415	2.75	43.50	18.061	0.506
3.00				3.00	34.70	14.300	0.401	3.00	44.10	18.304	0.513
3.25				3.25				3.25	44.10	18.304	0.513
3.50				3.50				3.50	44.10	18.304	0.513
3.75				3.75				3.75			
4.00				4.00				4.00			
4.25				4.25				4.25			
4.50				4.50				4.50			
4.75				4.75				4.75			
5.00				5.00				5.00			
5.25				5.25				5.25			
5.50				5.50				5.50			
5.75				5.75				5.75			
6.00				6.00				6.00			
6.25				6.25				6.25			
6.50				6.50				6.50			
6.75				6.75				6.75			
7.00				7.00				7.00			
7.25				7.25				7.25			
7.50				7.50				7.50			
7.75				7.75				7.75			
8.00				8.00				8.00			
8.25				8.25				8.25			
8.50				8.50				8.50			
8.75				8.75				8.75			
9.00				9.00				9.00			
9.25				9.25				9.25			
9.50				9.50				9.50			
9.75				9.75				9.75			
10.00				10.00				10.00			
10.25				10.25				10.25			
10.50				10.50				10.50			



Lic. Ing. Luko Quiroa  
JEFE DE LABORATORIO  
GEOTECNIA Y MECÁNICA DE ROCAS  
PUNO - UNA-P.

Página 4 de 5

---

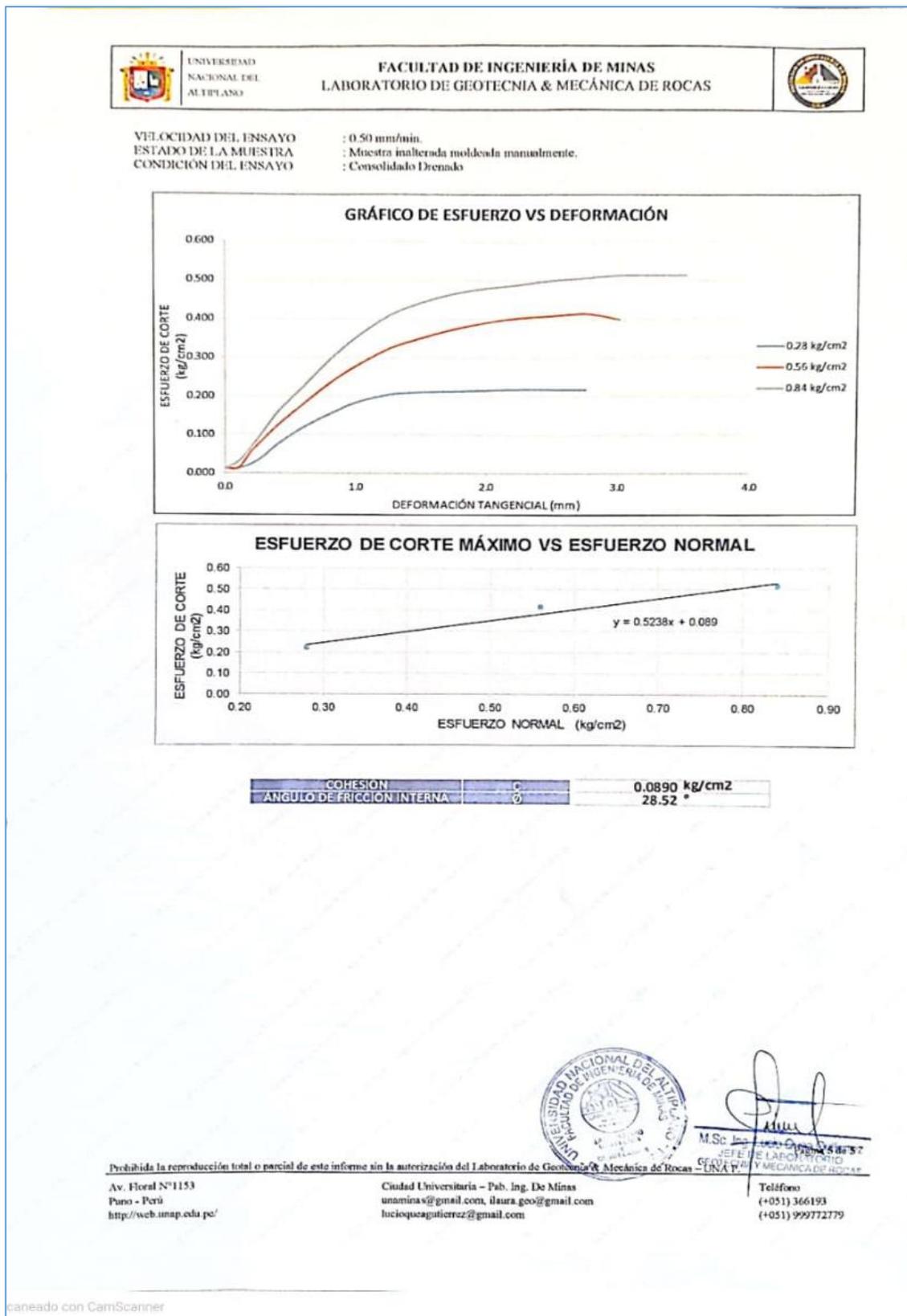
Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización del Laboratorio de Geotecnia y Mecánica de Rocas - UNA-P.

Av. Floral N°1153  
Puno - Perú  
http://web.unap.edu.pe/

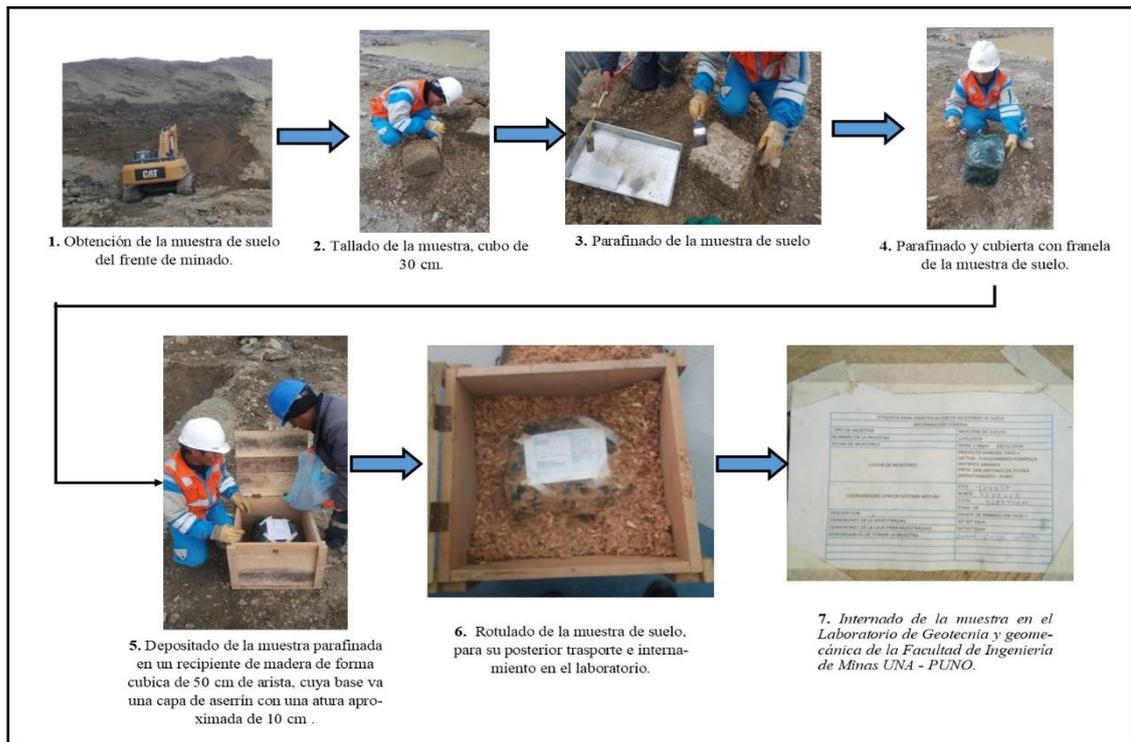
Ciudad Universitaria - Pab. Ing. De Minas  
unaminas@gmail.com, ilaura.ros@gmail.com  
luciojacagutierrez@gmail.com

Teléfono  
(+051) 366193  
(+051) 99972779

## Anexo 6. Resultados de ensayos de corte directo, gráficos de esfuerzo, deformación y corte máximo



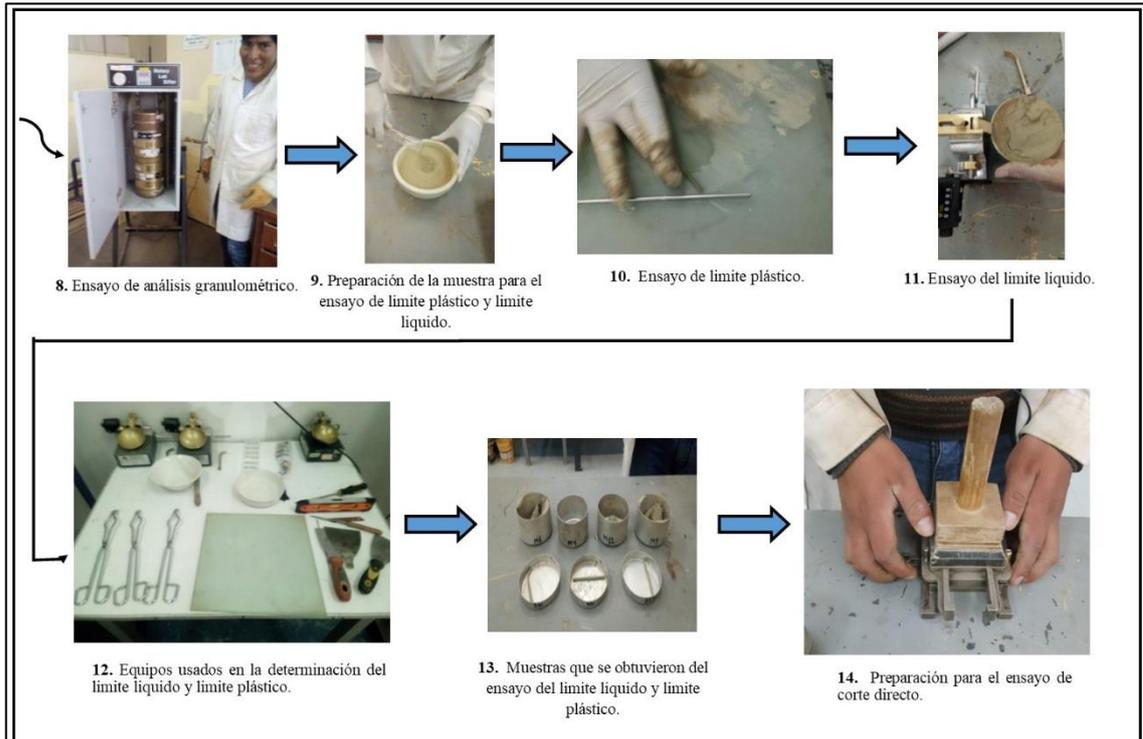
## Anexo 7. Recolección de muestras en el proyecto minero FADE I.



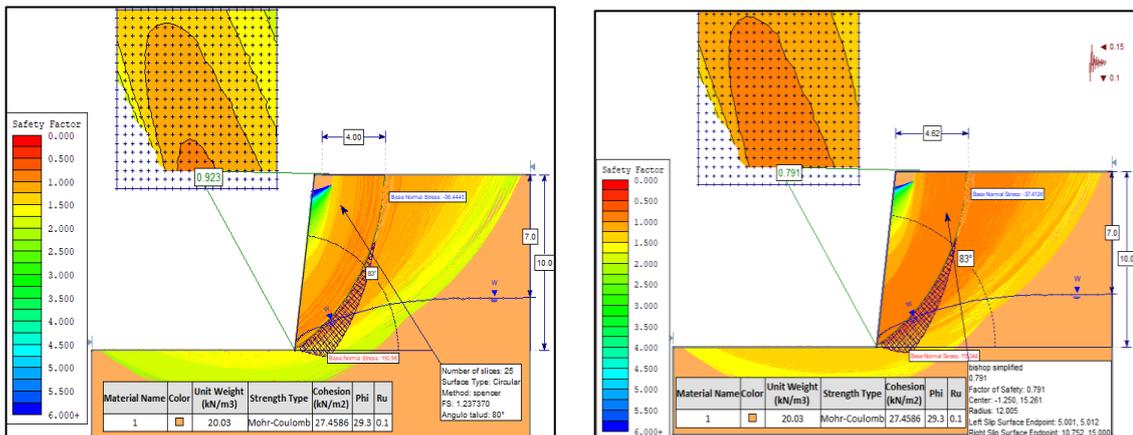
## Anexo 8. Preparación de la muestra y realización de ensayos de laboratorio en el proyecto minero FADE I, parte I.



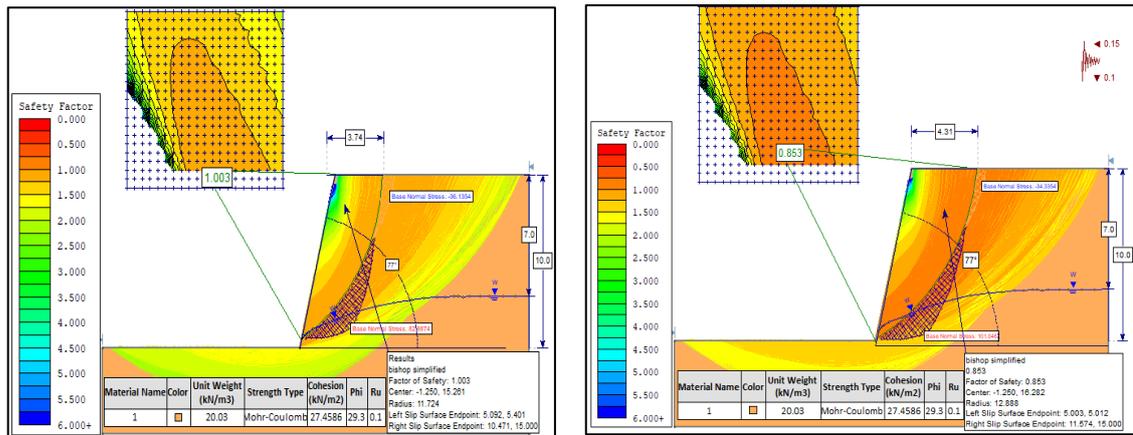
### Anexo 9. Preparación de la muestra y realización de ensayos de laboratorio en el proyecto minero FADE I, parte II



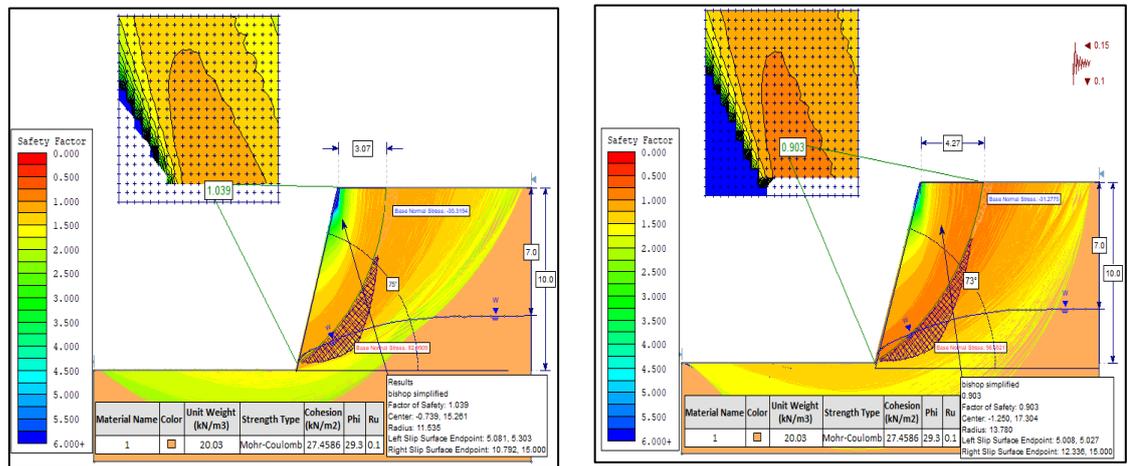
### Anexo 10. Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 83 grados de inclinación.



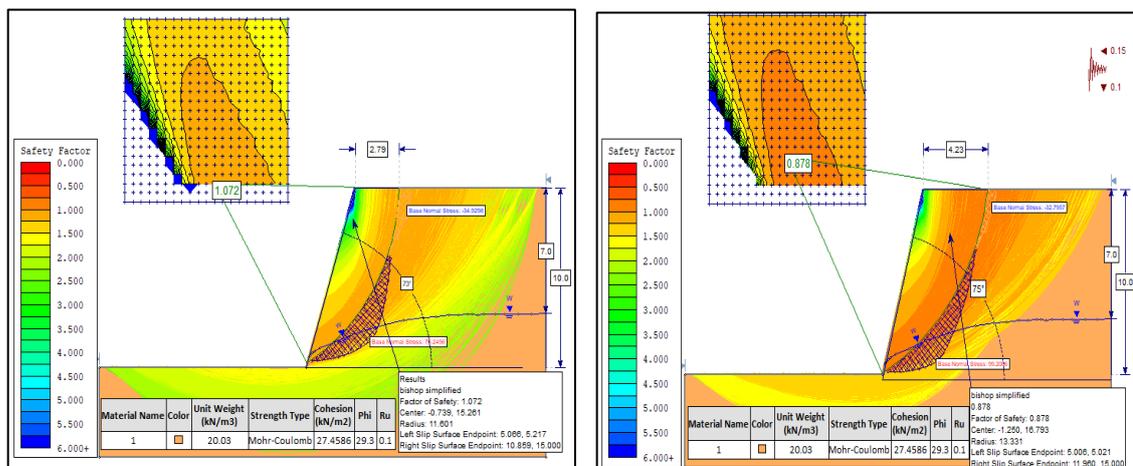
**Anexo 11.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 77 grados de inclinación.



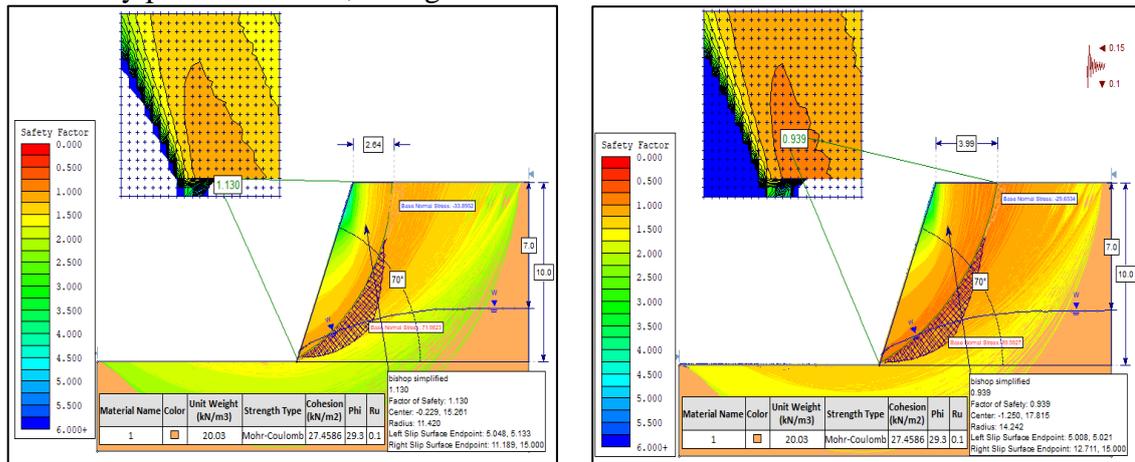
**Anexo 12.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 75 grados de inclinación.



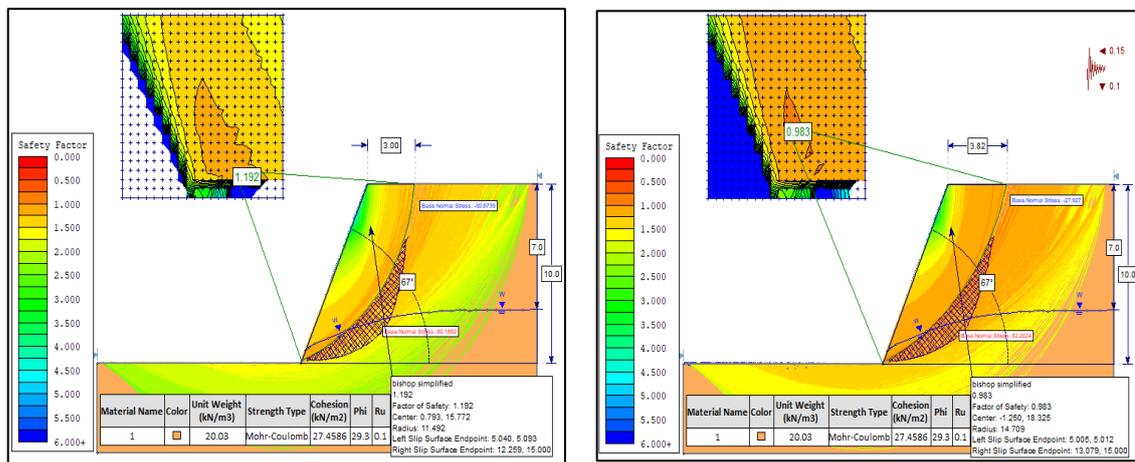
**Anexo 13.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 73 grados de inclinación.



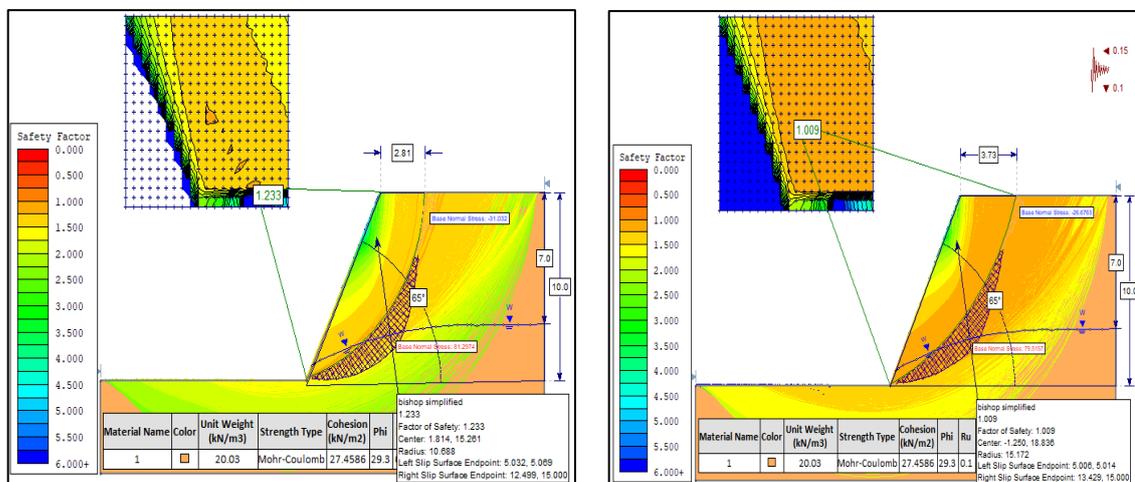
**Anexo 14.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 70 grados de inclinación



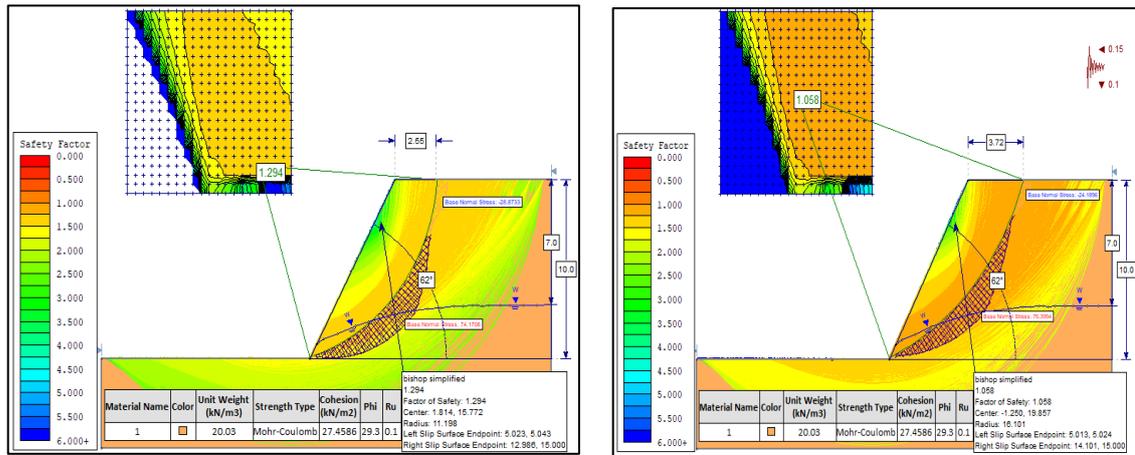
**Anexo 15.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 67 grados de inclinación.



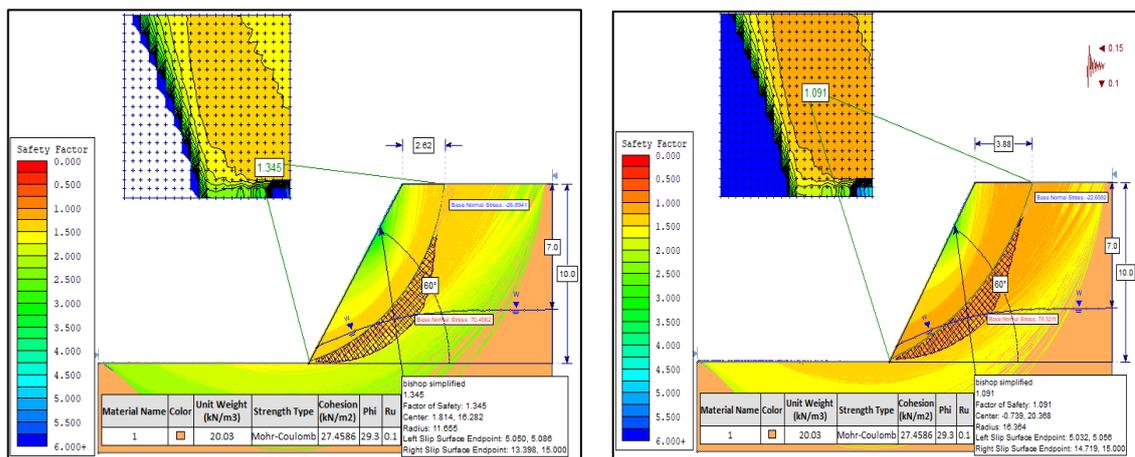
**Anexo 16.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 65 grados de inclinación.



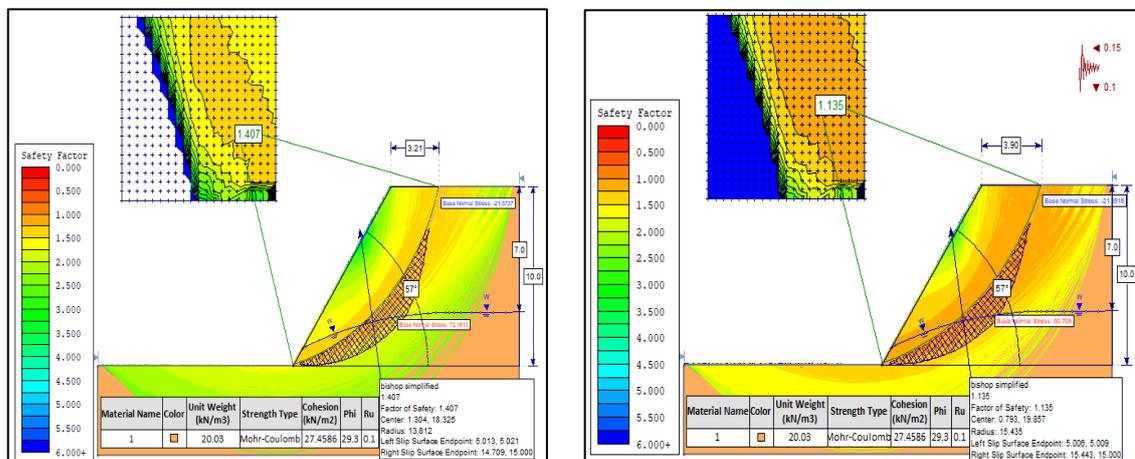
**Anexo 17.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 62 grados de inclinación.



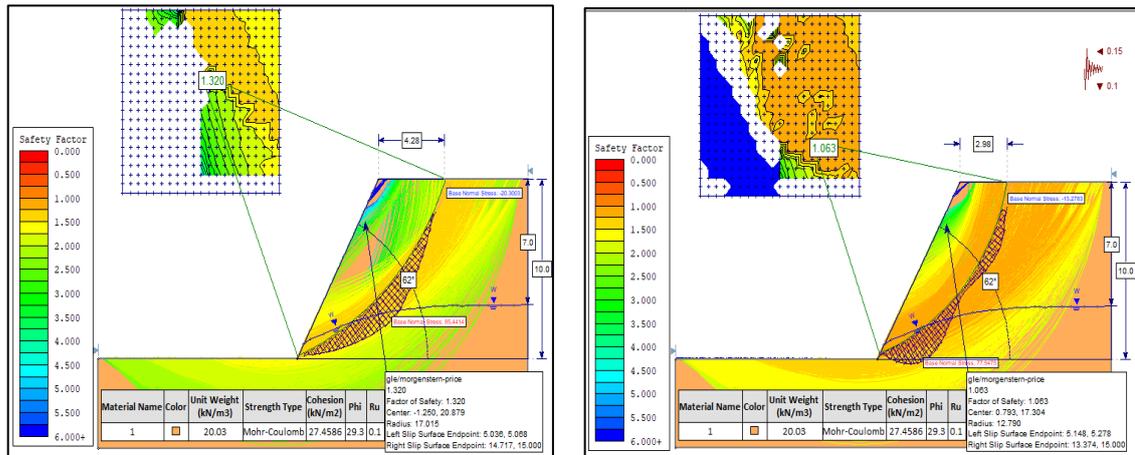
**Anexo 18.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 60 grados de inclinación.



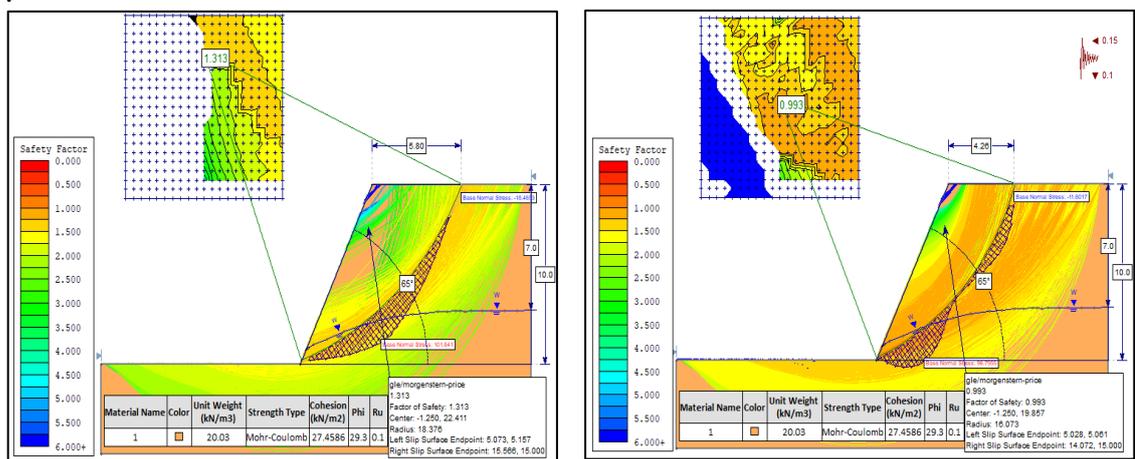
**Anexo 19.** Cálculo del factor de seguridad con el método de Bishop en condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 57 grados de inclinación.



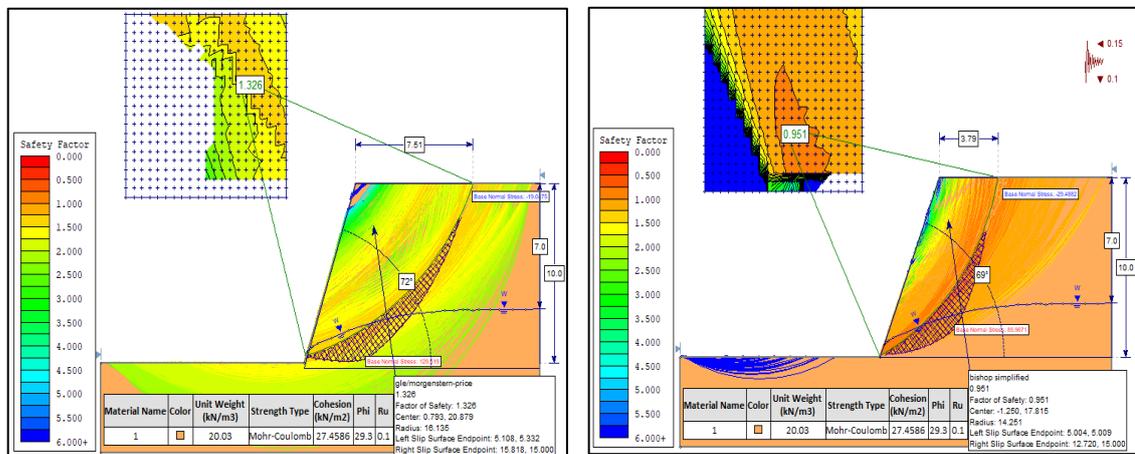
**Anexo 20.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 62 grados de inclinación.



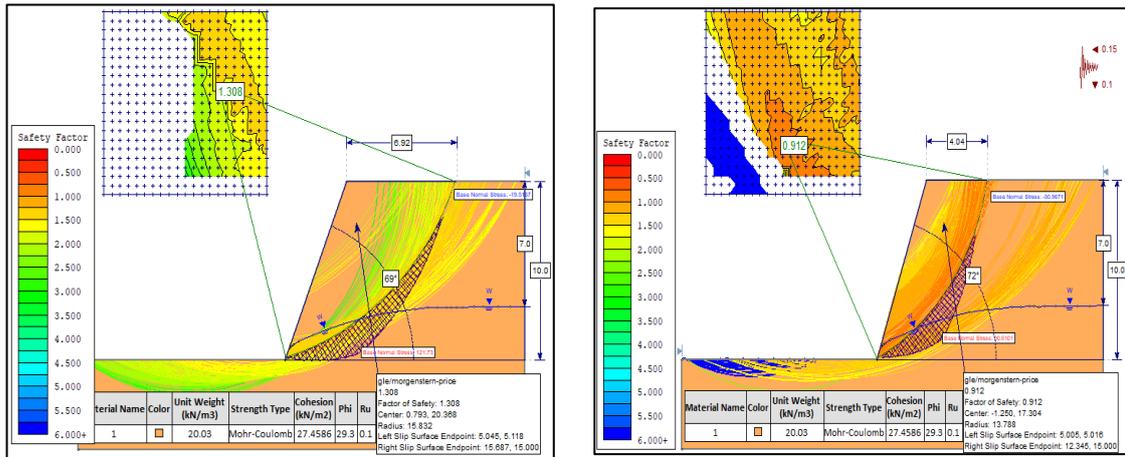
**Anexo 21.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 65 grados de inclinación



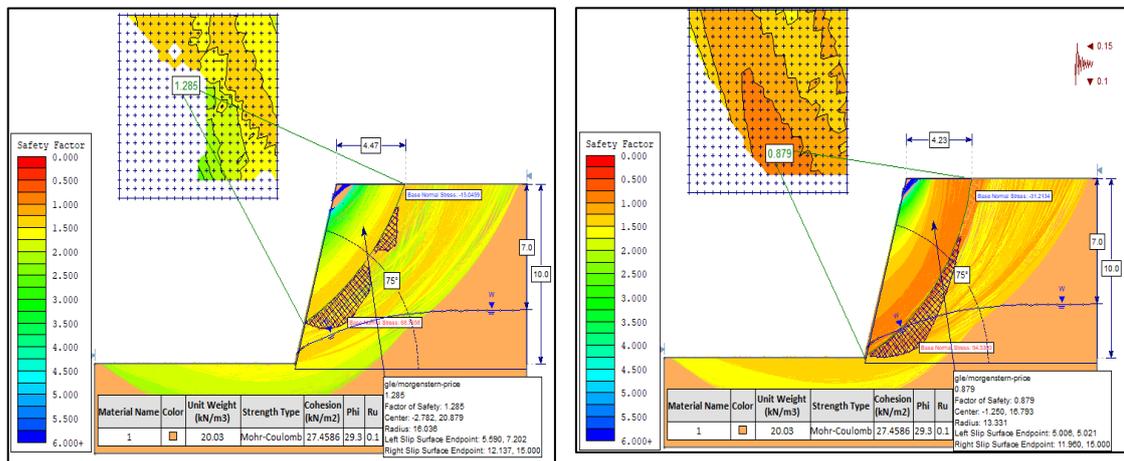
**Anexo 22.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 69 grados de inclinación.



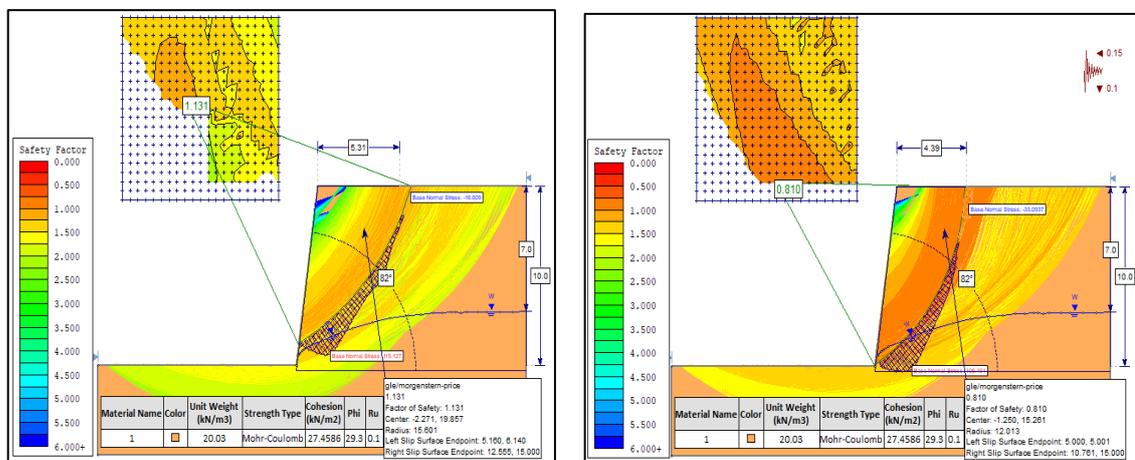
**Anexo 23.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas y pseudoestáticas, a 72 grados de inclinación.



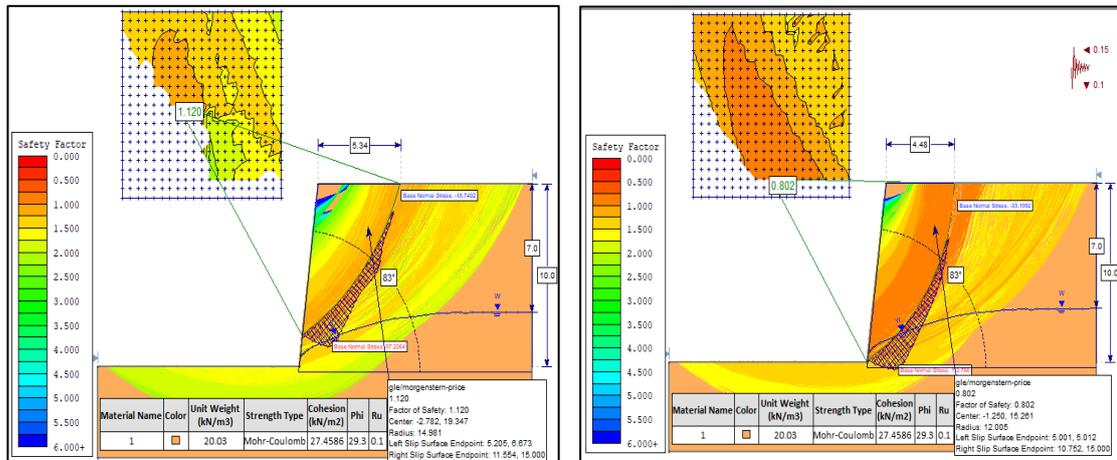
**Anexo 24.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 75 grados de inclinación.



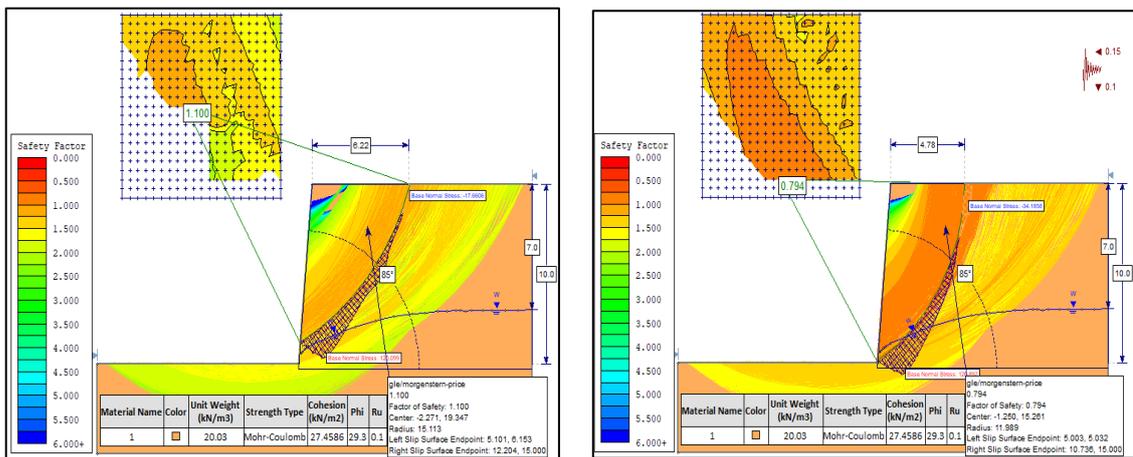
**Anexo 25.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 82 grados de inclinación.



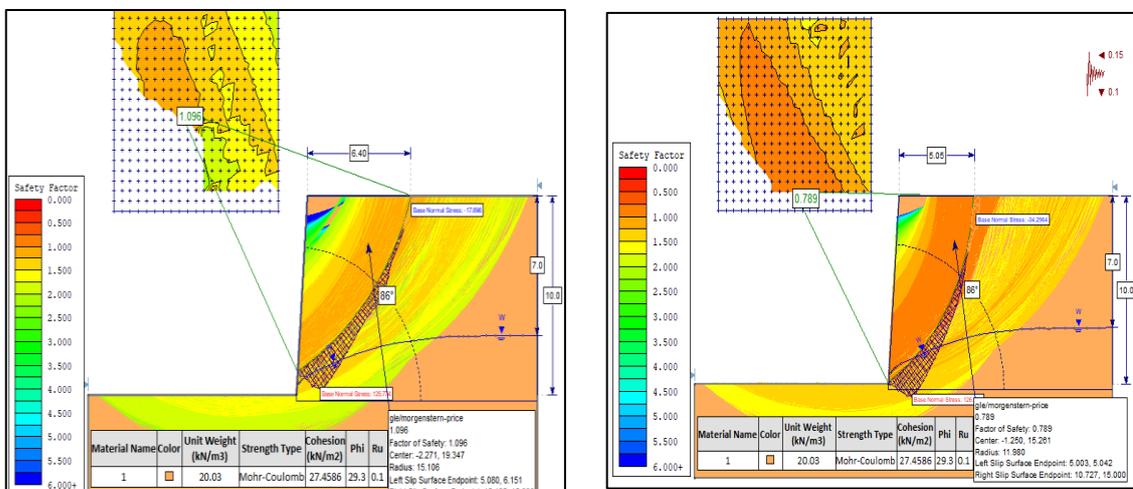
**Anexo 26.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 83 grados de inclinación.



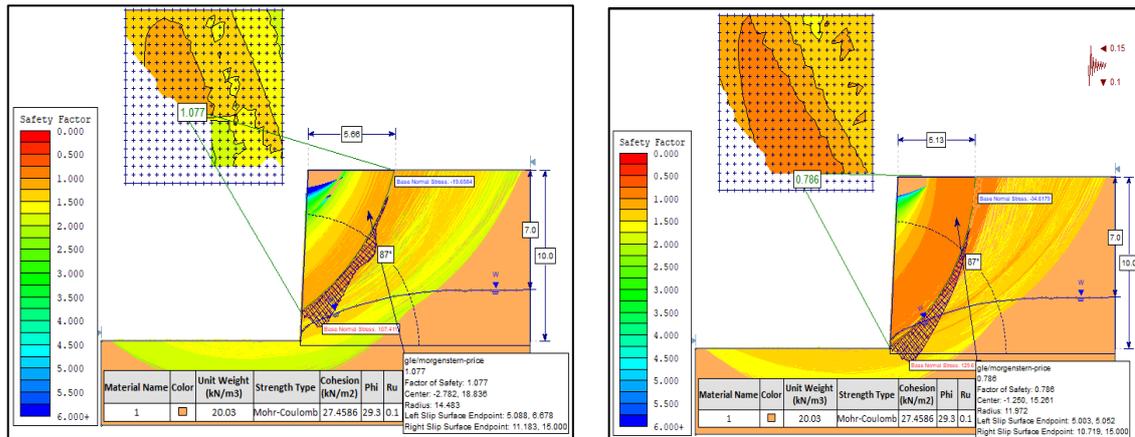
**Anexo 27.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 85 grados de inclinación.



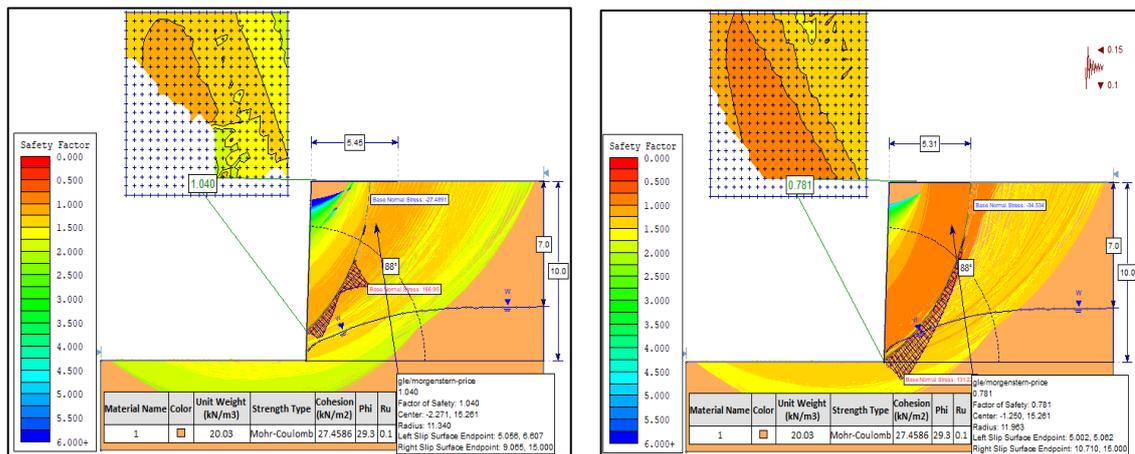
**Anexo 28.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 86 grados de inclinación.



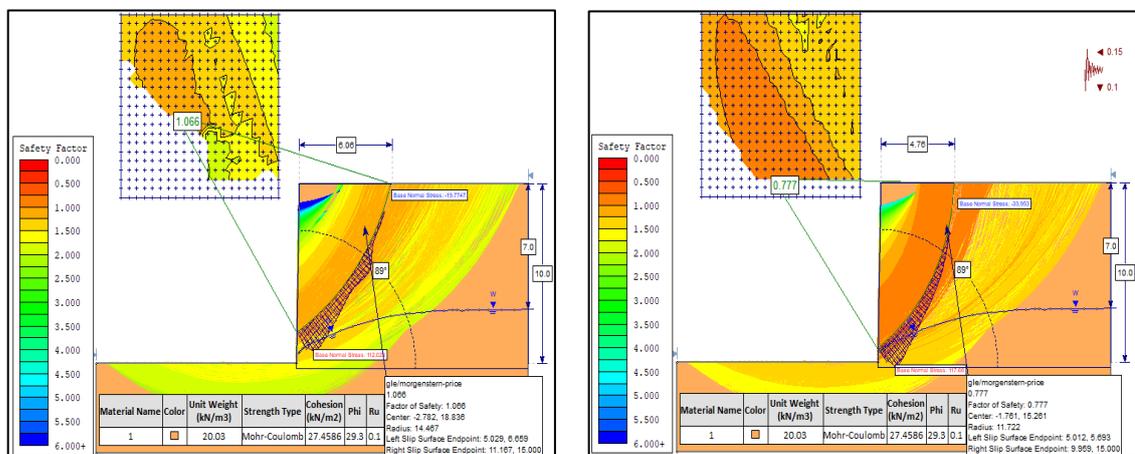
**Anexo 29.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 87 grados de inclinación.



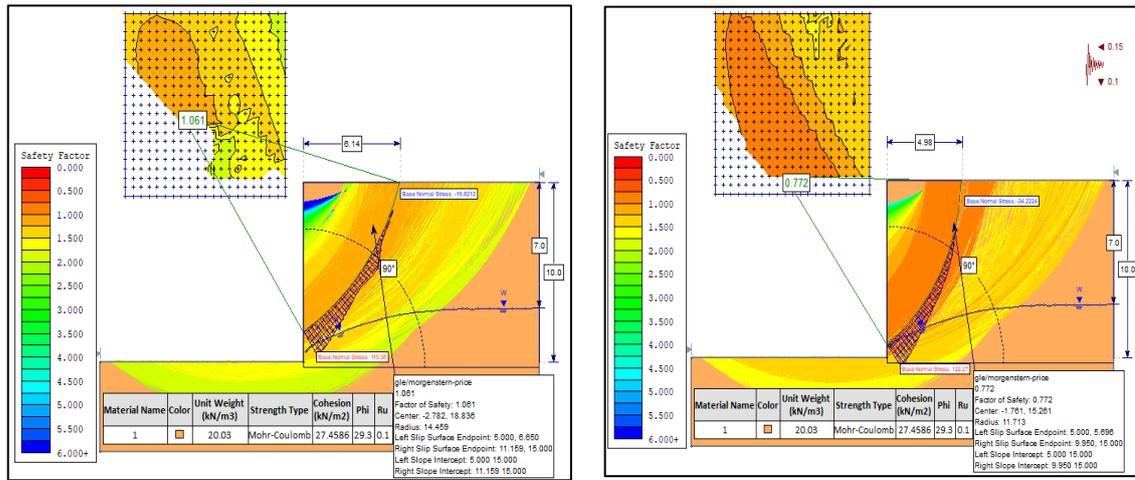
**Anexo 30.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 88 grados de inclinación.



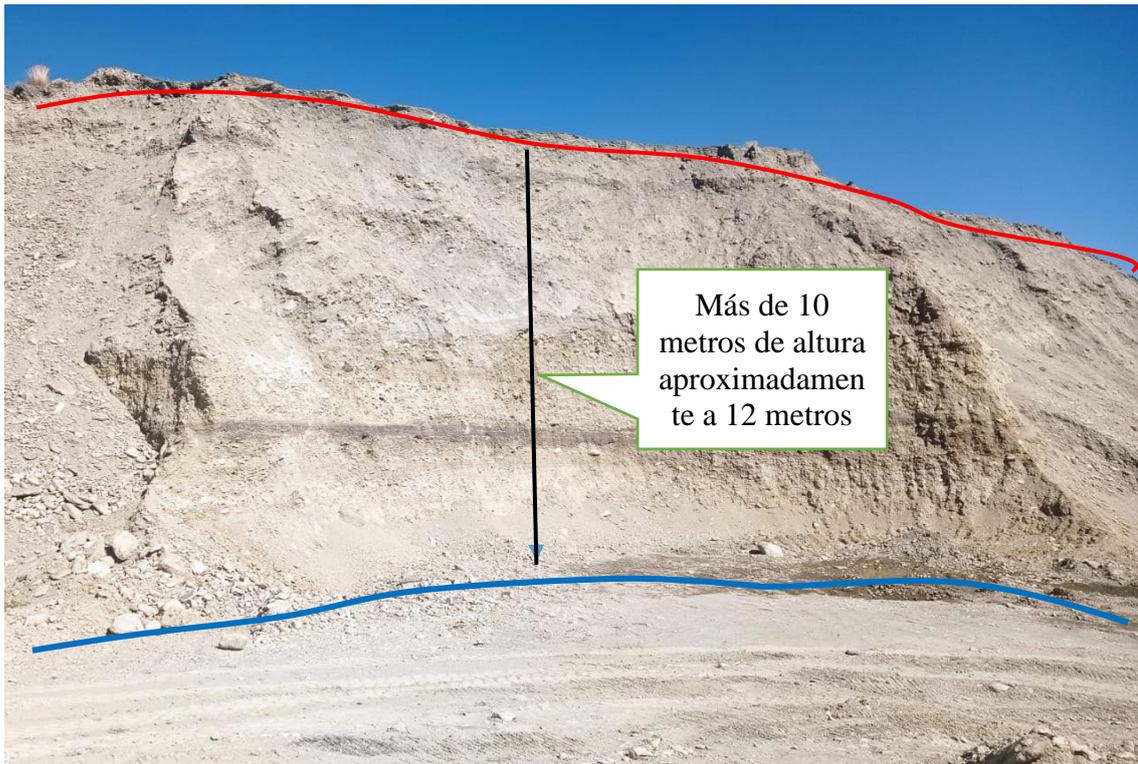
**Anexo 31.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 89 grados de inclinación.



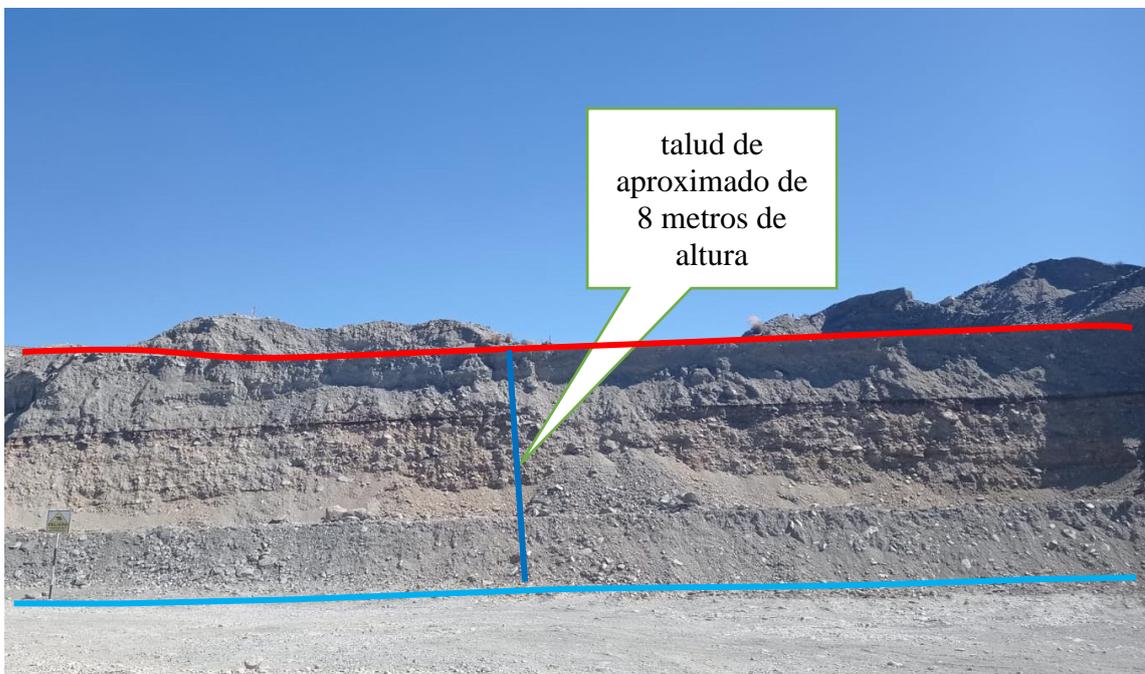
**Anexo 32.** Cálculo del factor de seguridad con el método GLE/Morgenstern-Price condiciones estáticas, a 90 grados de inclinación.



**Anexo 33.** El talud que se tenía antes del estudio geotécnico se observa la altura y talud



**Anexo 334.** El talud que actualmente se tiene se observa la altura y talud



Anexo 345. Matriz de consistencia de la investigación del proyecto minero FADE I.

DETERMINACIÓN DE ESTABILIDAD FÍSICA DEL TALUD EN EL FRENTE MINADO DEL PROYECTO MINERO FADE I - ANANEA					
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	HIPOTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES INDICADORES	METODOS	INSTRUMENTOS
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cómo determinar la estabilidad física del talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I?</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>Con el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo se determinó la estabilidad física del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar la estabilidad física del talud del frente de minado para tener mayor seguridad en el Proyecto Minero FADE I.</p>	<p><b>Variable Independiente</b></p> <p>Tipo de Material.</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <p>a) Cohesión b) ángulo de fricción c) Clasificación del suelo</p>	<p><b>Tipo de investigación</b></p> <p>cuasi-experimental porque es un tipo de estudio que se caracteriza porque el sujeto de estudio no se selecciona de forma aleatoria, sino que se encuentra o establece previamente,</p> <p><b>Nivel de investigación</b></p> <p>Se aplicará un diseño investigativo descriptivo porque luego se describirá cada aspecto del frente de minado de acuerdo a los resultados de ensayos de laboratorio realizados y se establecerán nuevos diseños del talud</p>	<p><b>Métodos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo de contenido de humedad</li> <li>• Ensayo de límites de consistencia</li> <li>• Ensayo de análisis granulométrico</li> <li>• Ensayo de corte directo</li> </ul> <p><b>Materiales y equipos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• GPS</li> <li>• Laptop</li> <li>• Impresora</li> <li>• Material de escritorio</li> <li>• Parafina</li> <li>• Franela</li> <li>• Cocina pequeña</li> <li>• pico y pala</li> <li>• Caja de madera</li> <li>• aserrín</li> <li>• Excavadora</li> <li>• Libreta de campo</li> <li>• Software Slide.</li> </ul>
<p><b>Problemas Específicas</b></p> <p>¿Cómo determinar las propiedades físicas, mecánicas de los suelos que nos indicará el tipo de suelo y determinar su resistencia del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p> <p>¿Cuál es el factor de seguridad adecuado para el talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I?</p>	<p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>La determinación de las propiedades físicas del suelo nos permitió conocer el tipo de suelo y su resistencia del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p> <p>La determinación del factor de seguridad nos permitió conocer el nivel de estabilidad física del talud del frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p>	<p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos del talud en el frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p> <p>Calcular el factor de seguridad adecuado del talud en frente de minado del Proyecto Minero FADE I.</p>	<p><b>Variable Dependiente</b></p> <p>Resistencia al corte</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <p>a) Factor de seguridad b) Angulo de talud c) Altura de talud</p>		