

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Escuela Profesional de Ingeniería Civil**



**Tesis**

“Análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio límite y método de elementos finitos, tramo: Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 Al Km 11+650”

Presentado por:

**Bach. Edwin Pablo ZAVALLA SOTELO**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**Abancay – Apurímac – Perú**

**2023**

## **Tesis**

“Análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio límite y método de elementos finitos, tramo:  
Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 Al Km 11+650”

### **Línea de investigación:**

Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible

### **Asesor:**

Ing. Ángel Maldonado Mendivil



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Escuela Profesional de Ingeniería Civil**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES CON GAVIONES A TRAVÉS DEL MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE Y MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, TRAMO: PUCALLPA – AGUAYTÍA KM 11+290 AL KM 11+650”**

Presentado por el Bach. **EDWIN PABLO ZAVALLA SOTELO**, para optar el título profesional de: **INGENIERO CIVIL**.

Sustentado y aprobado el 17 de noviembre del 2023 ante el jurado:

**Presidente** : PhD. Abbon Álex Vásquez Ramírez

**Primer miembro** : Ing. Rubén Gamarra Mota

**Segundo miembro** : Dr. Wilfredo Soto Palomino

**Asesor** : Ing. Ángel Maldonado Mendivil

# Análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio límite y método de elementos finitos, tramo: Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 Al Km 11+650

## INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

15%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1 Submitted to Universidad Ricardo Palma 8%  
Trabajo del estudiante

2 repositorio.unh.edu.pe 3%  
Fuente de Internet

3 hdl.handle.net 3%  
Fuente de Internet

4 Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes 2%  
Trabajo del estudiante

5 repositorio.urp.edu.pe 2%  
Fuente de Internet

6 repositorioacademico.upc.edu.pe 1%  
Fuente de Internet

7 bdigital.unal.edu.co 1%  
Fuente de Internet

repositorio.utea.edu.pe

## **DEDICATORIA**

En primera instancia, a Dios que se encargó de brindarme las fuerzas y la salud necesarias para concluir satisfactoriamente mi investigación. Segundo, a mis padres, Pablo Zavalla Gómez y Enma Sotelo Huyhua y a mi hermana, Mary Luz Zavalla Sotelo, quienes siempre han estado allí para que mi persona pueda seguir adelante. Tercero, a todos quienes fueron partícipes para la culminación de mi tesis.

Estando muy contento, dedico mi tesis a todos ustedes.

Edwin Pablo Zavalla Sotelo

## **AGRADECIMIENTO**

Primero, agradecer a mi asesor Ángel Maldonado Mendivil por la paciencia hacia mi persona, su excelente asesoramiento y dedicación y así culminar satisfactoriamente mi tesis.

Segundo, agradecer al Ing. Carlos Alberto Zambrano Orosco, quien me dio su apoyo con sus indicaciones y asesorías ya que sin estas tampoco hubiera sido posible culminar mi tesis.

Edwin Pablo Zavalla Sotelo

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>PORTADA</b> .....	<b>i</b>
<b>POSPORTADA</b> .....	<b>ii</b>
<b>PAGINA DE JURADOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>xviii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xx</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xxi</b>
<b>CAPÍTULO I:</b> .....	<b>1</b>
<b>PLAN DE INVESTIGACION</b> .....	<b>1</b>
1.1 Realidad problemática.....	1
1.2 Identificación y Formulación de problemas .....	2
1.2.1 Problema General.....	2
1.2.2 Problemas Específicos.....	2
1.3 Justificación de la investigación .....	3
1.4 Objetivos de la investigación.....	5
1.4.1 Objetivo General .....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Delimitación de la investigación .....	6
1.5.1 Espacial .....	6

1.5.2 Temporal.....	6
1.5.3 Social.....	6
1.5.4 Conceptual.....	6
1.6 Viabilidad de la investigación (económica, social y técnica) .....	6
1.6.1 Viabilidad económica .....	6
1.6.2 Viabilidad social .....	7
1.6.3 Viabilidad Técnica.....	7
1.7 Limitaciones .....	7
1.7.1 Científico.....	7
<b>CAPÍTULO II: .....</b>	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes de la Investigación.....	8
2.1.1 A nivel Internacional.....	8
2.1.2 A Nivel Nacional.....	11
2.2 Bases Teóricas .....	15
2.2.1 Estabilidad de Taludes.....	15
2.2.2 Clasificación de Taludes .....	19
2.2.3 Partes de un Talud.....	19
2.2.4 Resistencia al corte de un Suelo.....	21
2.2.4.1 Resistencia al corte en suelos arcillosos y granulares.....	22
2.2.5 Métodos de análisis de Estabilidad de Taludes .....	24
2.2.5.1 Método de Equilibrio Limite (MEL).....	28
2.2.6 Presión lateral de tierra en reposo .....	29
2.2.7 Mecanismos de Falla de taludes.....	33
2.2.8 Definición de deslizamientos.....	34
2.2.9 Clasificación de los deslizamientos.....	35
2.2.10 Partes de un deslizamiento.....	36
2.2.11 Factores que influyen en los deslizamientos .....	37
2.2.12 Estudios de Geotecnia para estabilidad de taludes .....	38



2.2.12.1.1 Tipos de Movimiento .....	39
2.2.12.1.2 Influencia del tipo de material .....	48
2.2.12.1.3 Factores condicionantes y desencadenantes .....	50
2.2.12.2 Parámetros de diseño de taludes .....	54
2.2.12.2.1 Parámetros Geotécnicos .....	55
2.2.12.2.2 Parámetros Geológicos .....	57
2.2.12.2.3 Parámetros Hidrogeológicos.....	58
2.2.12.2.4 Parámetros Geotécnicos .....	60
2.2.12.3 Análisis de estabilidad de taludes .....	64
2.2.12.3.1 Introducción .....	64
2.2.12.3.2 Superficie de falla .....	65
2.2.12.3.3 Método de Cálculo .....	66
2.2.12.4 Correccionamiento de taludes .....	73
2.2.12.4.1 Corrección por modificación de geometría .....	74
2.2.12.4.2 Corrección por drenaje .....	76
2.2.12.4.3 Corrección por drenaje .....	80
2.2.12.4.4 Corrección por superficial .....	85
2.2.12.4.5 Modelamiento Geotécnico .....	91
2.2.12.5 Ensayos de Campo y Laboratorio.....	93
2.2.12.5.1 Ensayos de Campo y Laboratorio.....	93
2.2.12.5.2 Ensayos de Laboratorio .....	94
2.2.13 Muros de suelo reforzado o mecánicamente estabilizados .....	95
2.2.13.1 Condición de estabilidad.....	97
2.3. Marco Conceptual .....	98
<b>CAPÍTULO III: .....</b>	<b>101</b>
<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>101</b>
3.1 Hipótesis .....	101
3.1.1 Hipótesis General .....	101
3.1.2 Hipótesis Específicas .....	101
3.2 Método .....	102

3.3	Tipo de investigación.....	102
3.4	Nivel o alcance de investigación .....	102
3.5	Diseño de investigación .....	102
3.6	Operacionalización de variables .....	103
3.7	Población, muestra y muestreo .....	104
3.7.1	Población .....	104
3.7.2	Muestra .....	104
3.7.3	Muestreo .....	104
3.8	Técnicas e instrumentación.....	104
3.8.1	Técnica .....	104
3.8.2	Instrumentos .....	105
3.9	Consideraciones éticas .....	106
3.10	Procesamiento de estadísticos .....	106
	<b>CAPÍTULO IV:.....</b>	<b>107</b>
	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>107</b>
4.1	Resultados .....	107
4.2	Discusión de Resultados.....	167
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>169</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>172</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>173</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Registro Problemas encontrados en Progresivas Km 11+290-Km 11+650 .....	3
Tabla N° 2. Registro de precipitaciones del 29 de enero al 09 de febrero del 20085 .....	
Tabla N° 3. Coeficientes de seguridad para estabilidad de taludes. ....	16
Tabla N° 4. Clasificación de Taludes.....	19
Tabla N° 5. Valores típicos de " $\phi$ " para algunos materiales .....	23
Tabla N° 6. Valores típicos del Angulo de fricción drenado para arenas.....	24
Tabla N° 7. Rango de valores de factor de seguridad.....	25
Tabla N° 8. Métodos de análisis de estabilidad de taludes. ....	29
Tabla N° 9. Tipo de deslizamiento.....	35
Tabla N° 10. Partes de un deslizamiento. ....	36
Tabla N° 11. Clasificación general de ingeniería de los diversos materiales litológicos.....	57
Tabla N° 12. Clasificación de suelos según criterios mecánicos.....	61
Tabla N° 13. Clasificación de las rocas. ....	62
Tabla N° 14. Métodos de análisis de estabilidad de taludes. ....	67
Tabla N° 15. Método de análisis de estabilidad de taludes con drenaje. ....	78
Tabla N° 16. Métodos de subdrenaje. ....	79
Tabla N° 17. Tipos de anclajes.....	80
Tabla N° 18. Métodos de estructuras de contención.....	83
Tabla N° 19. Métodos para mejorar la resistencia del suelo. ....	85
Tabla N° 20. Métodos de recubrimiento de la superficie del talud.....	86
Tabla N° 21. Factores de seguridad de análisis de estabilidad estático.....	97
Tabla N° 22. Factores de seguridad de análisis de estabilidad Pseudoestático. .	98
Tabla N° 23. Operacionalización de Variables. ....	103
Tabla N° 24. Principales características del Tramo N° 03.....	116
Tabla N° 25. Fecha de realización de ensayos .....	117
Tabla N° 26. Resultados de los Ensayos de Laboratorio .....	119
Tabla N° 27. Valores de Factor de Seguridad – Equilibrio Limite.....	169
Tabla N° 28. Valores de Factor de Seguridad – Elementos Finitos.....	170

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Área de estudio Km 11+290 – Km 11+650, Sector de Aguaytía-Pucallpa ....	4
Figura 2	Deslizamiento convencional de pendientes .....	17
Figura 3	Parte de taludes y laderas.....	21
Figura 4	Rotura lineal Mohr - Columb .....	22
Figura 5	Isoaceleraciones para el 10% de excedencia para 50 años .....	27
Figura 6	Empuje de tierra en muro vertical.....	30
Figura 7	Presión activa de Rankine.....	31
Figura 8	Falla de base o profunda de un talud .....	33
Figura 9	Falla al pie de talud. ....	34
Figura 10	Partes de un deslizamiento. ....	37
Figura 11	Caídas (desprendimiento) .....	39
Figura 12	Caídas (desprendimiento) .....	40
Figura 13	Vuelcos. ....	40
Figura 14	Volcamiento por flexión .....	41
Figura 15	Volcamiento en V invertida.....	41
Figura 16	Flexión de bloque .....	42
Figura 17	Reptación. ....	43
Figura 18	Deslizamiento rotacional .....	44
Figura 19	Demostración de Deslizamiento por traslación .....	44
Figura 20	Tipos de flujos. ....	45
Figura 21	Flujos de bloques de roca .....	45
Figura 22	Flujo de lodos y detritos .....	46
Figura 23	Flujo de lodos y detritos .....	46
Figura 24	Erosión .....	47
Figura 25	Macizos rocosos.....	48
Figura 26	Agregados como suelos.....	49
Figura 27	Presencia de agua. ....	50
Figura 28	Aguas subterráneas. ....	51
Figura 29	Lluvias. ....	52

Figura 30	Sismicidad.....	53
Figura 31	Parámetros geométricos. ....	55
Figura 32	Pendiente.....	56
Figura 33	Aguas subterráneas. ....	58
Figura 34	Niveles freáticos y piezométricos. ....	59
Figura 35	Análisis de estabilidad de taludes. ....	64
Figura 36	Superficie de falla.....	65
Figura 37	Clasificación de variedad de métodos de cálculo.....	66
Figura 38	Fuerzas que actúan sobre una bóveda.....	68
Figura 39	Muestra de las fuerzas que actúan en una dovela por método de Fellenius .....	69
Figura 40	Cálculo de F.S Método Fellenius.....	69
Figura 41	Fuerzas actuantes según el método de Bishop. ....	70
Figura 42	Cálculo FS Método Bishop.....	70
Figura 43	FS Método de Jambu.....	71
Figura 44	Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método Spencer.....	72
Figura 45	Paralelismo de fuerzas entre dovelas en el Método Spencer. ....	72
Figura 46	Esquema estático Morguenstern y Price.....	73
Figura 47	Eliminación de masa inestable.....	74
Figura 48	Efecto de un tacón sobre la resistencia del suelo. ....	75
Figura 49	Construcción de Bermas.....	76
Figura 50	Drenaje de Taludes.....	77
Figura 51	Subdren.....	79
Figura 52	Anclajes en taludes.....	81
Figura 53	Muros de gravedad rígidos.....	82
Figura 54	Muros de gravedad flexibles. ....	83
Figura 55	Muros de gravedad rígidos.....	84
Figura 56	Medidas de drenajes y protección en taludes. ....	87
Figura 57	Drenes transversales al talud.....	88
Figura 58	Drenes transversales al talud.....	89
Figura 59	Realización de drenes horizontales en un talud.....	90

Figura 60 Realización de pozos. ....	91
Figura 61 Modelamiento numérico 3D. ....	91
Figura 62 Límites de Atterberg. ....	94
Figura 63 Plano Topográfico de Zona de estudio.....	107
Figura 64 Sección Transversal N° 01.....	108
Figura 65 Sección Transversal N° 02.....	109
Figura 66 Mapa de ubicación de la zona de estudio. ....	110
Figura 67 Vista de la zona de toma de muestras M-01.....	111
Figura 68 Localización de la zona de estudio .....	112
Figura 69 Ubicación de las calicatas .....	112
Figura 70 Mapa de Isoaceleraciones del Perú .....	115
Figura 71 Excavación de calicata N° 01 .....	118
Figura 72 Excavación de calicata N° 01 .....	118
Figura 73 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático .....	120
Figura 74 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático .....	121
Figura 75 Parámetros de Resistencia para tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.) .....	121
Figura 76 Parámetros de Resistencia para tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.) .....	122
Figura 77 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones estática – No saturada.....	123
Figura 78 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis para condiciones estáticas no saturadas. ....	123
Figura 79 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático.....	124
Figura 80 Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático.....	124
Figura 81 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones estáticas saturadas.....	125

Figura 82 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis para condiciones estáticas saturadas. ....	125
Figura 83 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	126
Figura 84 Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	127
Figura 85 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas. ....	128
Figura 86 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones Pseudoestáticas No saturadas.....	128
Figura 87 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	129
Figura 88 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	130
Figura 89 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático. ....	130
Figura 90 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas. ....	131
Figura 91 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	132
Figura 92 Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	133
Figura 93 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático. ....	133
Figura 94 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas con presencia de cuerpo rígido sin Nivel Freático.....	134
Figura 95 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático .....	135
Figura 96 Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático .....	135

Figura 97 Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático. ....	136
Figura 98 Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas con presencia de cuerpo rígido y Nivel Freático. ....	136
Figura 99 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Estático.....	137
Figura 100 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m. ....	138
Figura 101 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	139
Figura 102 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”.....	140
Figura 103 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”.....	140
Figura 104 Perfil Estratigráfico + F.S.....	141
Figura 105 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	141
Figura 106 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Estático .....	142
Figura 107 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m. ....	143
Figura 108 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	144
Figura 109 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”.....	145
Figura 110 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”.....	145
Figura 111 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	146
Figura 112 Perfil Estratigráfico + F.S.....	147
Figura 113 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	148
Figura 114 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m. ....	149
Figura 115 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	150



Figura 116 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z” .....	150
Figura 117 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	151
Figura 118 Perfil Estratigráfico + F.S.....	152
Figura 119 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	152
Figura 120 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	153
Figura 121 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m. ....	154
Figura 122 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	155
Figura 123 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z” .....	156
Figura 124 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”.....	156
Figura 125 Perfil Estratigráfico + F.S.....	157
Figura 126 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	158
Figura 127 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático.....	158
Figura 128 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 0.50 m. ....	159
Figura 129 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	160
Figura 130 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z” .....	161
Figura 131 Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”.....	161
Figura 132 Perfil Estratigráfico + F.S.....	162
Figura 133 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	162
Figura 134 Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático .....	163
Figura 135 Generación de Mallas con una Longitud de borde de 0.50 m. ....	164

Figura 136 Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X” .....	165
Figura 137 Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z” .....	165
Figura 138 Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante” .....	166
Figura 139 Perfil Estratigráfico + F.S.....	166
Figura 140 Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos. ....	167

## ACRÓNIMOS

<b>MME</b>	: Muro Mecánicamente Estabilizado
<b>MEL</b>	: Método de Equilibrio Limite
<b>MEF</b>	: Método de Elementos Finitos
<b>FS</b>	: Factor de Seguridad
<b>T</b>	: Resistencia al corte del suelo
<b>C</b>	: Cohesión
<b><math>\phi</math></b>	: Ángulo de Fricción
<b>RNE</b>	: Reglamento Nacional de Edificación
<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials

## RESUMEN

La presente investigación plantea el análisis comparativo para estabilizar un talud a través de un muro mecánicamente Estabilizado (MME) mediante métodos de equilibrio limite (MEL) y método elementos finitos (MEF) que pueda tomarse de referencia para los distintos tramos de la carretera Huánuco-Tingo María-Pucallpa, las cuales tienen las mismas características, debido a su tipo de suelo, la geometría del talud, sus parámetros geológicos, las cargas por acción sísmica y los flujos de agua existentes. Todas las características mencionadas anteriormente, generan taludes inestables que, por presencia de agua pluviales en suelos arcillosos, vuelven al suelo de la zona con un comportamiento almente plástico con riesgo de existir deslizamientos de taludes, provocando daños humanos, materiales y medios de comunicación. Dicha investigación toma como sustento base del análisis geotécnico a los métodos de equilibrio limite (MEL) y método de elementos finitos (MEF) a través del software GEO5, el cual validará la propuesta de estabilización del talud, obteniendo los valores de los factores de seguridad (FS), el cual debe cumplir con el mínimo permisible, para el sector ubicado en el tramo: Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 AL Km 11+650 de la carretera Huánuco-Tingo María-Pucallpa. Desde la culminación de la construcción de dicha vía (2010), lo único que se ha considerado han sido mantenimientos rutinarios de la carretera, los cuales, claro está, no dan solución al problema de inestabilidad de taludes, prueba de ello, es la presencia de grietas, fisuras y hundimiento de la carpeta asfáltica de dicha vía.

**Palabras clave:** Estabilidad de talud, muro mecánicamente estabilizado (MME), método equilibrio limite (MEL), método de elementos finitos (MEF), factor de seguridad (FS).

## ABSTRACT

This research proposes the comparative analysis to stabilize a slope through a mechanically stabilized wall (MME) by the limit equilibrium methods (MEL) and finite elements method (FEM) that can be taken as a reference for the different sections of the Huánuco highway -Tingo María-Pucallpa, which have the same characteristics, due to their type of soil, the geometry of the slope, its geological parameters, the loads due to seismic action and the existing water flows. All the aforementioned characteristics generate unstable slopes that, due to the presence of rainwater in clay soils, return to the soil of the area with a very plastic behavior with the risk of slope landslides, causing damage to humans, materials and the media. Said research takes as the basis of the geotechnical analysis the limit equilibrium methods (MEL) and finite element method (FEM) through the GEO5 software, which will validate the slope stabilization proposal, obtaining the values of the safety factors (FS), which must comply with the minimum allowable, for the sector located in the section: Pucallpa - Aguaytía Km 11 + 290 AL Km 11 + 650 of the Huánuco-Tingo María-Pucallpa highways. Since the completion of the construction of this road (2010), the only thing that has been considered has been routine maintenance of the road, which, of course, does not provide a solution to the problem of slope instability, proof of this is the presence of cracks, fissures and subsidence of the asphalt layer of said road.

**Keywords:** Slope stability, mechanically stabilized wall (MME), limit equilibrium method (MEL), finite element method (FEF), safety factor (FS).

## INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de taludes es uno de los tantos procesos geológicos y geotécnicos que se dan por los cambios bruscos en la morfología de terreno, por lo que ocasionan daños estructurales, obras de arte, bloqueo de pavimentación y ríos. En el ámbito vial, la inestabilidad de un talud en carreteras hace que existe una baja transitabilidad del flujo vehicular, así como también, inseguridad por parte de las personas de la zona. Pero podría ser evitado en un gran porcentaje si se identifican con anticipación y se propusieran medidas correctivas de forma periódica y constante. Aunque en gran manera las carreteras del Perú presentan inestabilidad de taludes, hay regiones donde la susceptibilidad es menor ante estas amenazas, sin ir muy lejos, las zonas más propensas son las zonas tropicales, debido a que presenta las características más importantes para su incurrancia, las que son: las lluvias intensas, la meteorización, la sismicidad y el relieve.

En el análisis de estabilidad de taludes, en primer lugar, se tiene que identificar los factores que estén generando su inestabilidad para que posteriormente se identifique los factores de seguridad, los cuales verifican la condición de estabilidad del talud.

En la presente tesis, se propone una solución ante la inestabilidad de taludes con muros mecánicamente reforzados (Gaviones) en el tramo: Pucallpa – Aguaytía Km + 11+290 – Km 11+650, a partir de los métodos de equilibrio limite y elementos finitos, en donde se realizó un análisis comparativo de estabilidad de taludes y se determinó los parámetros geotécnicos, con la finalidad de obtener una comparación de ambos métodos con la implementación de muros mecánicamente estabilizados (MME) – gaviones.

En la presente tesis se hace el desarrollado de los siguientes 4 capítulos.

**Capítulo I.** Se planteó el problema que genera la investigación, los objetivos principales y específicos, la delimitación de la investigación y su justificación e importancia.

**Capítulo II.** Se presenta el marco teórico, los antecedentes de la investigación, tanto nacionales como internacionales, las bases teóricas vinculadas a las variables y la definición de los términos básicos.

**Capítulo III.** Toma en cuenta las hipótesis, tanto principal como las específicas, método, tipo, nivel, diseño y la operacionalización de las variables. También se presenta la población y muestra, los instrumentos para la recolección de datos, consideraciones éticas y las técnicas para el procesamiento de tesis en el desarrollo de la metodología de investigación.

**Capítulo IV.** Se menciona la situación actual de la muestra, el desarrollo de los objetivos específicos, el análisis de la tesis, la presentación de los resultados finales, se contrastan las hipótesis y se discuten los resultados, teniendo en cuenta ello se presentan las conclusiones y recomendaciones de la tesis.

## **CAPÍTULO I**

### **PLAN DE INVESTIGACION**

#### **1.1 Realidad problemática**

Las carreteras en el Perú presentan constantemente una gran cantidad de inestabilidad de taludes, debido a la fuerte presencia de lluvias intensas, geometría de su sección, su granulometría y la geodinámica externa existente en los taludes.

Ese es el caso de la carretera Pucallpa – Aguaytía, debido a que en el tramo Km 11+290 – Km 11+650, se encuentra la zona de estudio ubicado específicamente en los Km 11+300 y Km 11+600, que presenta inestabilidad de taludes. Dicha zona de intervención, se encuentra en la región central del país ya que forma parte de la red vial nacional, donde lo caracteriza por ser la principal ruta de acceso hacia la selva baja, como también a departamentos importantes como Huancayo, Tingo María, Pucallpa y Huancayo.

En la geología del área interpuesta se observan procesos erosivos, y en las llanuras procesos de acumulación. Su terreno está cubierto de suelos residuales como arcillas, limos y margas que recubren las rocas de la formación geológica Ipururo, cuya presencia en los cañones es aún más pronunciada por su consistencia.



Ubicado en la selva baja, la vegetación es rica y afecta el clima, la temperatura es de 23° y 24° respectivamente, la mínima y máxima son 16° y 31° respectivamente, la temperatura alcanza los 35°. Humedad relativa 84,5%, velocidad del viento 2,4 - 3,0 m/s, dirección principal del viento es noroeste.

Con base en lo anterior, esto sugiere que el clima aquí es cálido, húmedo, lluvioso y tropical, con una precipitación promedio anual de 1,601 mm en Pucallpa y 4,001 mm en Aguaytia.

Los meses de noviembre a marzo son los picos más altos, siendo el más alto en enero, esto hace que la inestabilidad de las laderas sea más común en la temporada de lluvias, el efecto de las capas saturadas de agua subterránea provoca la pérdida de estabilidad de las laderas, afectando la accesibilidad vial.

## **1.2 Identificación y Formulación de problemas**

### **1.2.1 Problema General**

¿Hasta qué punto realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones nos permitirá comprobar la variación de resultados utilizando los métodos de equilibrio límite y métodos de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

- a) ¿Hasta qué punto la determinación de los parámetros de diseño nos permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio límite y método de elemento finitos en el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650?
- b) ¿Hasta qué punto la identificación de los tipos de movimiento nos permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio límite y método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650?
- c) ¿Hasta qué punto ejecutar un modelo numérico permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del

método de equilibrio límite y el método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650?

### 1.3 Justificación de la Investigación

La presencia de las lluvias intensas, meteorización y sismicidad en el Sector de Aguaytía - Pucallpa, ocasionan que exista la presencia de inestabilidad de taludes y agrietamientos, siendo los Km 11+290 – Km 11+650 las afectadas por la presencia de dichos agentes externos.

A continuación se muestra el registro de los problemas encontrados en las progresivas Km 11+290 – Km 11+650, las cuales fueron sometidas a una investigación específica, para determinar los parámetros de diseño, dichos valores fueron introducidos en el modelo numérico (Ver Tabla 1).

**Tabla N° 1**

*Registro Problemas encontrados en Progresivas Km 11+290-Km 11+650*

Progresiva	Ubicación	Problema	Investigación a realizar
11+290-11-330	Margen Derecha	Inestabilidad de Talud	- Ensayo DPL - Instalación de piezómetros
11+630-11+650	Margen Derecha	Inestabilidad de Talud	- Ensayo DPL - Instalación de piezómetros

*Fuente: Cesel Ingenieros (2008)*

El propósito de la presente tesis fue realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones por el método de equilibrio límite y método de elementos finitos y así comprobar la variación de resultados, y de acuerdo a ello, se obtuvo un diseño de gaviones más óptimo y económico que beneficiará a los pobladores del Sector Aguaytía – Pucallpa.

Con ello se logrará que la transitabilidad vehicular mejore considerablemente, así también se reducirá las pérdidas económicas y materiales en los sectores de Aguaytía – Pucallpa.

La tesis trae beneficios directos a la población Aguaytía – Pucallpa, ya que la obtención de resultados analíticos, comparando la estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos permitió obtener un diseño más óptimo y económico, que asegurará que la integridad de los residentes está protegida.

La siguiente imagen muestra el área de búsqueda Km 11+290 – Km 11+650, ubicada en el barrio Padre de Abad, tramo Aguaytía–Pucallpa. (Ver Figura N°1)

### **Figura 1**

*Área de estudio Km 11+290 – Km 11+650, Sector de Aguaytía-Pucallpa*



*Fuente: Elaboración Propia*

En febrero del 2008, los sectores de Aguaytía – Pucallpa presentaron intensas lluvias e inundaciones que provocaron un súbito incremento del caudal del río Aguaytía (8.50 m). (Ver Tabla N° 2).

**Tabla N° 2***Registro de precipitaciones del 29 de enero al 09 de febrero del 2008*

<b>Día</b>	<b>Cantidad de precipitación (mm)</b>	<b>Observaciones</b>
29 de enero	40	
30 de enero	0	
31 de enero	40.5	
01 de febrero	36.8	
02 de febrero	No hay data	Problemas en el sistema de comunicación
03 de febrero	66	

*Fuente: Senamhi 2008*

Ello implica, que exista una gran probabilidad que las intensas lluvias ocurridas en los días mencionados en el cuadro N° 2 vuelvan a presentarse, por el cual, se propuso realizar la estabilidad de taludes mediante un análisis representado con gaviones por los métodos de elementos finitos y equilibrio límite para identificar la variación de sus resultados.

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo General**

Realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones para comprobar la variación de resultados existentes utilizando los métodos de elementos finitos y método de equilibrio límite para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- a) Determinar los parámetros de diseño para realizar el análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio límite y método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.
- b) Identificar los tipos de movimiento para realizar el análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio límite y método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.

- c) Ejecutar la simulación de un modelo numérico para realizar el análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio límite y método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.

## **1.5 Delimitación de la investigación**

### **1.5.1 Espacial**

El estudio en cuestión se desarrolló en el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.

### **1.5.2 Temporal**

La investigación se desarrolló desde marzo del 2021 y se finalizó el 17 de noviembre del 2023, con la sustentación de la investigación.

### **1.5.3 Social**

La estabilidad de taludes con gaviones no tiene fronteras sociales porque se realizó un análisis comparativo para obtener su mejor alternativa de solución.

### **1.5.4 Conceptual**

Como parte de la investigación se realizó el estudio de inestabilidad de taludes en los tramos mencionados en el título de la presente tesis, el propósito de este estudio fue realizar el análisis comparativo de los valores de factores de seguridad mediante elementos finitos y equilibrio límite con gaviones, para determinar su mejor alternativa de solución.

## **1.6 Viabilidad de la investigación (económica, social y técnica)**

### **1.6.1 Viabilidad económica**

El costo de la presente tesis fue cubierto en su totalidad por el investigador, pero a comparación del beneficio que se va a obtener es realmente rentable, debido a que la ejecución de gaviones tiene un costo no tan elevado y a la vez fue diseño por 2 métodos, los cuales garantizan un mejor

comportamiento ante una eventual presencia de cargas externas y/o cambios climáticos.

### **1.6.2 Viabilidad social**

Dicha investigación representa una gran ayuda en el aspecto social, debido a que la carretera que se encuentra involucrada en dicho tramo, se ve perjudicada ante la presencia de derrumbes y/o desprendimientos, donde, la comercialización a los distintos centros poblados se paraliza, lo cual hace que los pobladores de dichas zonas tengan inconvenientes en la compra de sus bienes esenciales, por lo que las alternativas que se propusieron en la presente investigación hacen que los desprendimientos y/o deslizamiento se reduzcan y no existan inconvenientes posteriores.

### **1.6.3 Viabilidad Técnica**

En este sentido, la investigación ha logrado que se mejore la calidad de diseño de gaviones, utilizando métodos sofisticados de análisis, los cuales garantizan que ante la presencia de agentes externos el comportamiento sea de lo más favorable.

## **1.7 Limitaciones**

### **1.7.1 Científico**

Debido a que existen pocas investigaciones que realicen un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones mediante métodos de equilibrio límite y elementos finitos, se tubo limitaciones en la recopilación de antecedentes bibliográficos sobre el tema. También ciertas limitaciones que presentó la investigación fue poder conseguir cierta información, como, por ejemplo, la data de aguas subterráneas, donde necesariamente se necesita de un estudio geofísico (Refracción Sísmica, SEVs, etc), que por un tema de costos no se consideró en dicha investigación.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

##### 2.1.1 A nivel Internacional

Espinoza, D. y Tapia, B. (2013), en su tesis: ***“Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto PACALORI”***, llegó a las siguientes conclusiones:

- La presencia de acuíferos desestabiliza el talud ya que humedecen el suelo y reducen parámetros de resistencia como la adherencia y el rozamiento. Por el contrario, también existe una gran diferencia entre el factor de seguridad (FS) del estado final de la estructura y la carga de servicio. En este primer caso, los tramos del terraplén son más estables si no aumenta la humedad en el cuerpo de presa, ya que no se perjudica la cohesión del cuerpo de presa.
- No existe un valor confiable para el factor de seguridad, por lo que se realizó el análisis de estabilidad utilizando diferentes métodos para obtener un rango de valores, siendo el método de Janbú el más conservador y el método de Bishop el más alto, los valores se encuentran dentro de este rango.
- Para la "condición de carga final de la estructura" el cálculo de estabilidad se realiza en la sección más inclinada (aguas abajo);

obteniendo un valor estable y seguro ( $F.S = 2.04$ ), del cual se concluye que la pendiente superior están aguas arriba porque tiene una sección más larga. En el caso de "explotación", por el contrario, sólo debe analizarse la pendiente descendente, ya que representa el peor caso debido a la filtración existente.

- Por lo tanto, podemos concluir que el método Janbú para la presa de investigación proporciona un factor de seguridad con un valor más conservador, que debe considerarse para un diseño óptimo durante la fase de estudio de viabilidad. Para trabajos posteriores, cuando se requiera una mayor precisión en los cálculos, se deberá realizar un análisis de estabilidad utilizando los métodos de Spencer y Morgenstern-Price, ya que la experiencia ha demostrado que son los más cercanos a la realidad.

Garzón, I.; Valencia, P. y Muñoz, C. (2012), en su tesis: ***“Evaluación de la vulnerabilidad y consecuencias por deslizamiento en la conexión vial Aburrá-Río Cauca entre las abscisas Km 04+000 y Km 39+000”*** se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los deslizamientos en laderas, además de la gravedad, se ven afectados por la cohesión, cuyo valor puede aumentar debido al sistema de raíces de la vegetación; por el ángulo de fricción en función de la mineralización del suelo; y su humedad.
- La saturación ocurre en las laderas durante la temporada de lluvias, pero la precipitación máxima no coincide necesariamente con la temporada de deslizamientos de tierra. Hay varias razones para esto. Una es que durante la época de lluvias los suelos se saturan con un alto grado de humedad, logrando una mayor densidad y saturación que es directamente proporcional al tiempo, disminuyendo paulatinamente la resistencia a los deslizamientos y fallas que se presentan más tarde en la época seca.



Sepúlveda, B. (2011), en su investigación: **“Comportamiento sísmico de taludes de roca”**, somete los taludes de roca a la acción sísmica (los movimientos de marea más importantes en Chile tienen magnitudes  $M_w > 8.0$ ) y utilizando el método de desplazamiento de Newmark, se pueden presentar desplazamientos permanentes totales en los tramos de pendiente, de lo cual se concluye lo siguiente:

- En primer lugar, cuando la destrucción se produce en la roca madre, los desplazamientos existentes son despreciables, mientras aumenta el ángulo de inclinación y disminuye la adherencia, disminuye la aceleración de destrucción; y en el segundo caso, cuando la rotura se produce en discontinuidades con cohesión igual a 0 y ángulos de buzamiento inferiores a  $20^\circ$ , las aceleraciones de discontinuidad se reducen notablemente de forma que se producen grandes desplazamientos.
- De los taludes estudiados, el parámetro de resistencia más decisivo en el comportamiento sísmico del talud es la cohesión, incluso en casos como taludes rocosos, sin discontinuidades y con pendientes superiores a  $70^\circ$ . En el caso de un macizo rocoso discontinuo es muy diferente, porque la relación entre inclinación y ángulo de fricción será más importante si no presenta cohesión o si su valor es muy bajo.
- Si el valor de la aceleración de ruptura es aproximadamente el 30% de la aceleración máxima, son posibles desplazamientos del orden de 20 cm, y si la aceleración de ruptura es del 40% al 45% de la aceleración máxima, los valores obtenidos del desplazamiento serán ser inferior a 5 cm.

Aguilar, G. y Zúñiga, R. (2015), en su tesis: **“Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de Equilibrio Limite aplicado a taludes o laderas al Cerro de la Popa, Casco Urbano de Cartagena”**, llega a las siguientes conclusiones:

- Los métodos de Spencer, Morgenstern-Price y Bishop Modificado son los que arrojan mayor factor de seguridad en los sectores estudiados, donde dichos valores son muy semejantes en cada uno de las secciones transversales típicas que posee la zona investigada.
- Los métodos de Janbú y Ordinario fueron los que dieron como resultado los menores valores de factor de seguridad en los sectores estudiados, donde dichos valores son muy similares en cada una de las secciones transversales típicas que representa la zona investigada, esto en vista que dichos métodos son muy sencillos donde no satisfacen por completo las condiciones de equilibrio ya que las fuerzas entre dovelas son igual a cero, produciendo así, factores de seguridad bajos y sobre determinados.

### 2.1.2 A Nivel Nacional

Ávila, P. (2017), en su tesis: “**Análisis Sísmico – Dinámico en taludes para aseguramiento de estructuras de irrigación Sangalia – Huarochirí – Región Lima 2017**”, llegó a las siguientes conclusiones:

- En el cálculo pseudoestático de estabilidad de taludes para tres escenarios sísmicos, se logró obtener una ecuación característica para la determinación del coeficiente sísmico crítico, la cual tuvo un valor de 0.199g en el cual el talud sería inestable (F.S = 1.00).
- Con la realización de un análisis sismodinámico para las condiciones de los terraplenes naturales (K.P = 1.426), terraplenes naturales con riesgo sísmico, terraplenes con acuífero y terraplenes con acuífero y sismo; Se determinaron zonas de inestabilidad para casos de talud con presencia de agua (F.S = 0.998), talud con nivel freático (F.S = 0.722) y talud con presencia de agua y empuje pseudoestático. (F.S = 0.437).

Granados, L (2006), en su investigación: “**Estabilización de talud de la Costa Verde en la zona del distrito de Barranco**”, tiene las siguientes conclusiones:

- El tipo de suelo que compone la sección transversal del levantamiento consiste principalmente en grava seca, mal graduada (GP) con lentes de

limo. Para un efecto pseudoestático se tienen valores de rozamiento (kg/cm<sup>2</sup>): grava: 0,86, limo: 0,40 y rozamiento: grava: 54, limo: 20. Estos parámetros de resistencia superan un sismo sin destrucción significativa (FS = 1).

- En el caso de secciones transversales de taludes sin edificaciones arriba y en condiciones dinámicas (terremotos), el SP tiende a aumentar entre 40° y 50°, ya que en este último caso ya no existe una cuña con posibilidad de deslizamiento. el evento de un terremoto.

Urrutia, V. (2008), en su investigación: “**Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores**”, concluye lo siguiente:

- Los taludes analizados se suponen estables en las condiciones alcanzadas, es decir, para los parámetros de resistencia asignados al material, la sección eficaz modelada y los parámetros sísmicos utilizados.
- Para la simulación estática inicial, el factor de seguridad se obtiene mediante el método de los elementos finitos y el método de Spencer, donde los valores son muy similares, sin embargo, el primer resultado es mejor que el segundo porque el segundo método construye su formulación de manera muy conservadora.
- En las simulaciones pseudoestáticas, las deformaciones obtenidas se encuentran dentro de lo esperado, ya que dicha simulación de taludes, en un comportamiento real, pasaron por los sismos utilizados sin la presencia de fallas considerables y deformaciones.

De la Cruz, Q. y Tunque, H. (2015), en su tesis: “**Inestabilidad de Taludes en el sector de Santa Barbara de la ciudad de Huancavelica**”, concluyeron en lo siguiente:

- Subsectores Asequia Alta, Yuraccrumi, Mazanayocc, Motoy Huaycco Puchccoc y Arbolitos con parámetros como: Pendiente, humedad y litología; Su sensibilidad es promedio, mientras que para los parámetros

lluvia + pasivos su sensibilidad es promedio, para los parámetros sismo + pasivos su sensibilidad es promedio y para los parámetros sismo activos (lluvia y terremoto) y pasivos números, la sensibilidad es promedio.

- De la simulación estática, los sub sectores Manzanayocc, Yuraccrumi, Puchccoc y Arbolitos, su factor de seguridad ( $FS > 1$ ), por lo que son estables, mientras que, los sub sectores de Asequia Alta y Motoy Huaycco dio un factor de seguridad ( $FS < 1$ ), lo cual se le considera inestables.
- Según la simulación cuasi estática, para un sismo de magnitud 6.7 se consideran estables los subsectores Manzanayocc, Yuraccrumi, Puchccoc y Arbolitos, por otro lado, se consideran estables los subsectores Motoy Huaycco y Asequia Alta es estable. debido al valor  $FS < 1.25$ .
- La pendiente oscila entre el 30 y el 140% y la litología tiene factores internos que determinan la inestabilidad del talud con mayor peso.
- De los agentes externos analizados, la presencia de aguas pluviales, tiene poca implicancia en la inestabilidad de taludes. Mientras que la carga sísmica, si posee una gran determinación, porque debido a su presencia, la probabilidad de falla de taludes es muy determinante.

Curasma, C. y Quinto, S. (2019), en su tesis: “***Estudio Comparativo entre el método de Equilibrio Limite y Elementos Finitos en el análisis de estabilidad de Ladera en el Sector Heramocco – Comunidad de Sacsamarca - 2019***”, llegaron a las siguientes conclusiones:

- De los métodos analizados en la presente tesis, el método de equilibrio límite (MEL) es más sencillo usarlo en la parte práctica, pero presenta algunas desventajas en el método de cálculo, ya que existe un equilibrio estático en cada tramo del talud, donde la aceleración sísmica es constante. El método de elementos finitos (FEM), por otro lado, se aproxima más a la realidad ya que discretiza las masas, da cuenta del

peso propio del talud, sus registros sísmicos son completos y se utilizan propiedades dinámicas.

- Para la simulación Spencer estática se obtuvieron 03 pendientes inestables (SLOPE 01 FS = 1.369, SLOPE 02 FS = 1.216 Y SLOPE 04 FS = 0.871) debido a que sus valores están por debajo de 1.5, y las otras dos pendientes son estables (TALUD 03FS = 2,72 y TALUD 05 FS = 1,512). Utilizando el método de elementos finitos en condiciones estáticas se obtuvieron 03 pendientes inestables (TALUD 01 FS = 1.399, TALUD 02 FS = 1.261 y TALUD 04 FS = 0.891), ya que los valores son menores a 1.5 por otro lado las pendientes 02 (TALUD 03 FS = 3,118 y TALUD 05 FS = 1,518) son estables, siendo el análisis de elementos finitos (FEM) el más conservador.

Llatas, Dahlberg y Capuñay, José. (2019), en su tesis: **“Análisis Comparativo Entre Los Métodos De Equilibrio Límite, Cuña Profunda Y Software Especializado En Elementos Finitos, Para El Diseño Geotécnico De Muros Anclados; Aplicado A Ejecución De Sótanos En Lima Metropolitana”**, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Pese a los planteamientos de los 3 metodos estudiados, son muy distintos, lo cual logro un analisis individual y comparacion entre ellos.
- El metodo mejor apropiado para el predimensionamiento de muros anclados es el de Método de Equilibrio Limite (MEL), debido a que brinda gran estabilidad en su analisis y es mas sencillo al momento de analizarlo. Sin embargo para el diseño definitivo, se recomienda analizar la seccion por los 3 metodos estudiados, esto con el proposito de poseer una mayor seguridad en el analisis del proyecto.
- El metodo de elementos finitos es muy distinto a los otros metodos estudiados, dicho metodo no brinda una superficie de falla, pero a pesar de ello se puede delimitar esta superficie por medio de los desplazamientos que nos da como resultado en este metodo, para la delimitacion de las longitudes libres al igual que en el metodo de la cuña profunda, no se ve en la necesidad de considerarla distinta a la superficie

de falla, ya que ello haría que el factor de seguridad se vea afectado lo que haría que exista un sobredimensionamiento.

- El factor de seguridad y la carga de trabajo en los anclajes están relacionados directamente en los 3 métodos que han sido estudiados.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Estabilidad de Taludes

Un talud es una superficie inclinada respecto de la horizontal donde se forma, permanente o temporalmente, por estructuras de tierra. Pueden ser de origen natural o artificial (estructuras artificiales en obras de ingeniería, por ejemplo, taludes o claros). La composición puede ser homogénea o muy compleja, por lo que la metodología para estudiarla varía. Valiente, Sobrecases & Díaz (2015).

Para determinar la masa de un piso se debe determinar su factor de resistencia al deslizamiento (FS). Esto se logra comparando las fuerzas que tienden a causar deslizamiento con las tensiones que tienden a no causar deslizamiento. (Ver Fórmula 1). El método de equilibrio límite (MEL) menciona que la falla del talud ocurre cuando las fuerzas aplicadas y resistentes son iguales en toda la longitud del plano de falla y  $F.S = 1$ . Entonces, para considerarlo estable, dice: El valor debe ser mayor a 1.

$$FS = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

Fórmula N° 1. Factor de Seguridad  
Fuente: Sobrecases y Díaz (2015)

En el Reglamento Nacional de Edificación (RNE) – CE.020 “Estabilidad del Suelo y Taludes” (2012), se menciona que la condición de estabilidad del talud debe analizarse para condiciones estáticas y cuasi estáticas, donde el factor mínimo de seguridad para estática condiciones es 1,5 y para la condición Pseudoestática es 1,25.

Para el cálculo de la estructura se realiza un análisis de seguridad mediante el método del factor de seguridad parcial con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir la resistencia. Al mismo tiempo, en Europa, código 7 utiliza el método del factor parcial para proyectos geotécnicos, al igual que LRFD (Load and Resistance Factor Design) en Estados Unidos. AASHTO utiliza cálculos de ingeniería desde esta perspectiva porque el factor de seguridad general incluye imprecisión, tanto en acción como en resistencia, simulación computacional e incertidumbre en términos de error humano.

El peso de la masa deslizante será la fuerza desestabilizadora más importante a la que se suman otras fuerzas, como la sobrecarga de estructuras o la fuerza similar del agua que empuja hacia las grietas.

La resistencia al corte del suelo será la principal fuerza estabilizadora sobre la superficie de deslizamiento. Valiente, Sobrecase y Díaz (2015).

Hoy en día existen muchas normativas nacionales e internacionales, plenamente adoptadas en el Perú, donde se puede ajustar el factor de seguridad utilizado. La elección del coeficiente dado se realiza teniendo en cuenta la temporalidad de la obra (definitiva o preliminar) y las condiciones de cálculo (estáticas o sísmicas). La composición de los factores se puede ver de acuerdo con diferentes reglas. Valiente et al. (2015). (Ver Tabla 3).

**Tabla N° 3**

*Coefficientes de seguridad para estabilidad de taludes.*

NORMATIVA	TALUD TEMPORAL		TALUD PERMANENTE	
	ESTÁTICA	PSEUDOESTÁTICA	ESTÁTICA	PSEUDOESTÁTICA
AASHTO LRFD	1.33-1.53	1.1	1.33-1.53	1.1
NAVFAC-DM7	1.25-1.30	1.15-1.20	1.5	1.15-1.20
FHWA-NHI-11-032	-	1.1	-	1.1
CE.020	-	-	1.5	1.25

*Fuente: Valiente (2015)*

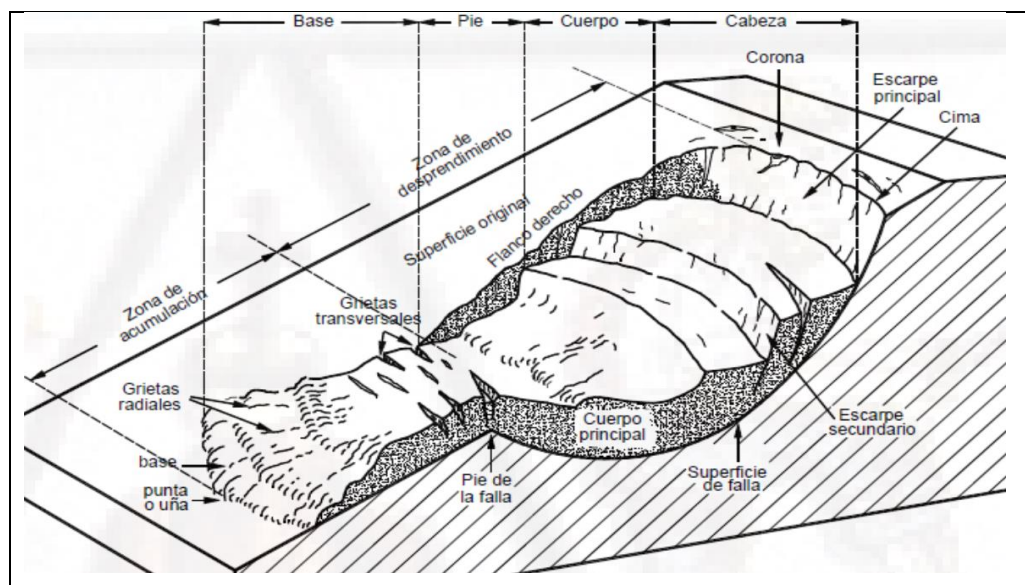
ASSHTO, en una simulación estática, menciona que, si no existen cargas estructurales cerca del talud o los valores geotécnicos obtenidos son confiables, se debe utilizar un factor de seguridad de 1.33, en caso contrario entonces el valor es 1.53.

La falla total de las pendientes ocurre cuando la tensión que se les aplica excede la resistencia del material del que están hechas. Este fenómeno puede deberse a la presión de los poros, los cambios en la topografía del suelo y el movimiento de las placas tectónicas, misma gravedad, etc.

Los procesos de inestabilidad de taludes son producto de las condiciones hidrológicas, geológicas y geomorfológicas locales, donde pueden ser modificados por la vegetación, el uso del suelo, los procesos geodinámicos y la actividad humana, así como por la existencia de fuertes precipitaciones y sismicidad en la zona. Soeters y Van Westen (2008, p. 13)

Los deslizamientos de pendientes vienen a ser “movimientos de masas de tierra o roca hacia debajo de una pendiente”. Cruden (1991). Una representación de deslizamiento convencional de pendientes es la siguiente. (Ver Figura 2).

**Figura 2**  
*Deslizamiento convencional de pendientes*



Fuente: Cruden (1991).



De esta manera las partes que integran un deslizamiento de ladera se definen de la siguiente manera: Suarez (1998):

**Cabeza:** Masa que se encuentra en la parte superior y que se mueve. Por encima de la cabeza se encuentra la corona.

**Cima:** Vendría a estar representado por el contacto entre el material alborotado y el escarpe principal. Es el punto más alto de la cabeza.

**Corona:** Material encontrado en su sitio, intacto, adyacente a la parte más alta del escarpe principal.

**Escarpe Principal:** Superficie con una pendiente muy considerada en todo lo largo de la cercanía posterior de la sección en movimiento, provocado por el desplazamiento del material. De esa forma la superficie de falla vendría a estar representado por la continuación de la superficie de escarpe dentro del material.

**Escarpe Secundario:** Superficie con una pendiente muy considerada provocada por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve.

**Superficie de Falla:** Área que se encuentra por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material que se está desplazando. El suelo que se encuentra por debajo de esta superficie no se mueve.

**Pie de la Superficie de Falla:** Línea de interceptación entre la superficie original del terreno y la parte inferior de la superficie de rotura.

**Base.** Área que se encuentra cubierta por el material perturbado, por debajo del pie de la superficie de falla.

**Punta o uña:** Punto de la base, encontrándose a mayor distancia de la cima.

**Cuerpo Principal del deslizamiento:** Vendría a estar representado por el material desplazado que se encuentra en la parte superior de la superficie de falla.

Costado o flanco: Lado del movimiento. Se tiene que diferenciar el flanco izquierdo con el flanco derecho.

### 2.2.2 Clasificación de Taludes

Generalmente los taludes se clasifican según una serie de factores que determinan su estabilidad. Estos factores pueden incluir: mecanismo de falla, forma, altura y pendiente. A continuación, se muestra la Tabla 4 clasificando los taludes según estos factores. Carranza y Hormazabal (2019).

**Tabla N° 4**  
*Clasificación de Taludes*

CLASIFICACIÓN DE TALUDES	
Descripción	Observación
<b>Por su altura</b>	Bajos (0 - 5m)
	Medianos (5 – 20m)
	Altos (>20m)
<b>Por su pendiente</b>	Suave (<5°)
	Regular (5° - 20°)
	Pronunciada (>20°)
<b>Por su forma de falla</b>	De base o profunda
	De pie de talud
	En la cara del talud
	Rápida
<b>Mecanismo de falla</b>	Desprendimiento
	Volcamiento
	Influencia de infiltraciones de flujo
	Deslizamiento

*Fuente:* Carranza y Hormazabal (2019)

### 2.2.3 Partes de un Talud

Suarez (1998), significa que un talud tiene una pendiente, un pico o una cicatriz empinada, curvada, donde ocurre la erosión. Además, tiene una parte recta y o inferior, que tiene forma cóncava, con una base, un pie o una pata donde se produce el apilamiento. Suárez (1998) analiza las siguientes etapas.

Base, pata o pie, esta parte tiene como característica principal tener forma cóncava, correspondiente a la parte inferior del terraplén o terraplén.

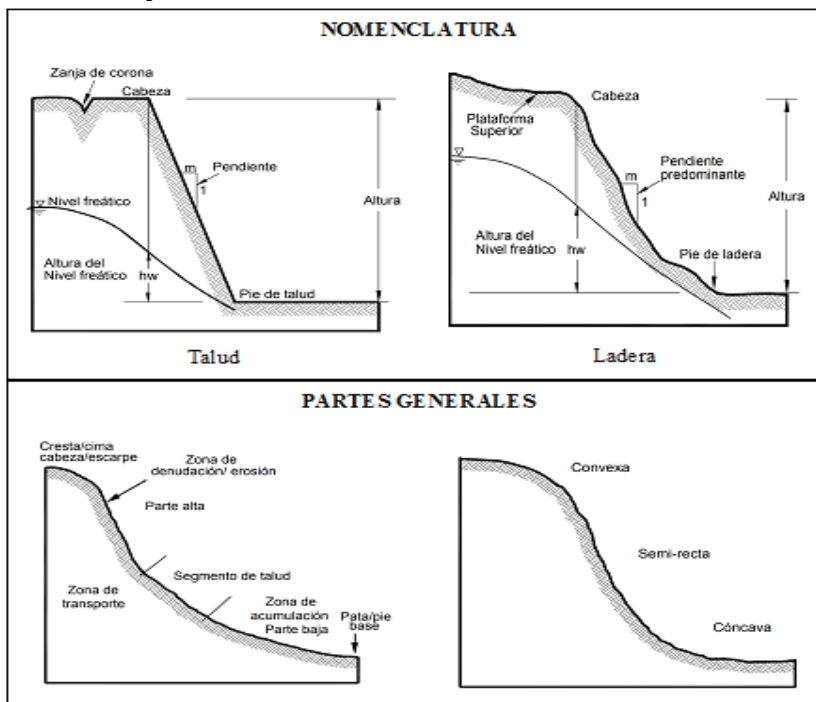
Cresta, cabecera, talud o cresta corresponde a la parte superior del talud o terraplén, con una característica forma convexa. Si es semi-vertical o empinado, se le llama acantilado, coincidiendo a veces con picos de deslizamientos de tierra. Altura, corresponde a la distancia existente desde la cabeza al pie, generalmente se percibe en los taludes artificiales, cuya cuantificación es difícil en las laderas debido a que el pie y la cabeza no siempre están bien definidos.

La altura total del nivel freático incluye la distancia vertical entre la base del talud y el nivel freático, teniendo en cuenta la similitud entre la presión atmosférica y la presión del agua.

Esta altura generalmente se mide desde la cima de la pendiente. La medida es igual al nivel mínimo de la pendiente o martillo. Las unidades pueden ser porcentajes, grados o  $m1$ , donde  $m$  es la distancia horizontal basada en unidades de área estándar.

Cuando el suelo o roca tiene más resistencia se crean pendientes pronunciadas, a diferencia de pendientes con menor resistencia, que crean pendientes poco profundas o poco profundas.

**Figura 3**  
*Parte de taludes y laderas*



Fuente: Deslizamiento – Análisis Geotécnico, por Suarez (2009, p.3)

#### 2.2.4 Resistencia al corte de un Suelo

González (2002), indica que la resistencia al corte de un suelo es un elemento determinante para los siguientes factores:

- Resistencia de un suelo con respecto a un muro de contención.
- Carga adecuada para cimentación
- Firmeza de una pendiente

La ley encargada de brindar la máxima resistencia al cortante del suelo, fue postulada por Morh-Coulomb, resaltó que el empuje de un suelo contra un muro de contención hace que el muro se deslice, formando un plano recto de deslizamiento en el suelo retenido.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

Donde:

$\tau$ : Resistencia a la cortante máxima

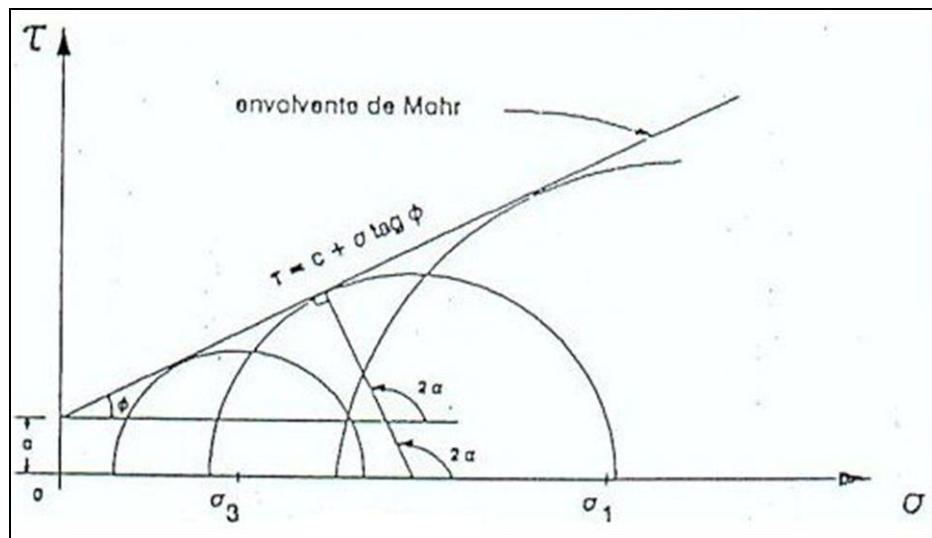
$\sigma_n$ : tensión en plano de rotura

$c$ : cohesión

$\varphi$ : Angulo de fricción

**Figura 4**

*Rotura lineal Mohr - Columb*



Fuente: (González, 2002)

#### 2.2.4.1 Resistencia al corte en suelos arcillosos y granulares

- **Resistencia al corte en suelos granulares**

Los suelos granulares, también siendo denominados como suelos no cohesivos, son arenosos o rocosos, según Maccaferri (2005). Su resistencia al corte suele ser resultado de la fricción entre las partículas que lo componen. Según Coulomb, la resistencia viene dada por la siguiente fórmula:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi$$

Donde:

La cohesión ( $c$ ) se considera cero.

El único parámetro de resistencia es el Angulo de fricción interna ( $\varphi$ )

Para el cálculo del ángulo de fricción se da por los factores Maccaferri (2005)

- Compacidad: una alta compacidad requiere más fuerza para romper la estructura de la partícula, lo que resulta en un mayor ángulo de fricción.
- Granulometría: Las partículas más pequeñas ocupan el espacio que dejan las partículas más grandes, proporcionando una mejor distribución con más resistencia. Si la arena es gruesa, el peso de las partículas las compactará. Este proceso conduce a un mayor ángulo de fricción en arenas y rocas más grandes
- Forma de las partículas: la forma de las partículas crea más resistencia, mientras que las partículas más redondas tienen menos resistencia y las formas irregulares tienen más resistencia.
- Contenido de humedad, La humedad afecta la resistencia de la arena ya que el agua sirve para lubricar las partículas, reduciendo el ángulo de fricción. Cuando la arena está saturada, se produce una tensión capilar entre las partículas, creando lo que se conoce como cohesión aparente, que desaparece cuando la arena está seca o saturada.

En las tablas siguientes se aprecian valores típicos de  $\phi$  para suelos granulares:

En las tablas N° 05 y N° 06 se muestra los valores promedios de "  $\phi$  " para suelos granulares.

**Tabla N° 5**

*Valores de "  $\phi$  " para distintos tipos de materiales*

Suelo	Ángulo de fricción efectivo (grados)	
	Suelto	Compacto
Grava	36 - 40	40 - 50
Pedrisco de cantera	34 - 38	38 - 42
Pedrisco (angular)	32 - 36	35 - 45
Arena de cantera (subangular)	30 - 34	34 - 40
Arena de playa (redondear)	28 - 32	32 - 36
Arena limosa	25 - 35	30 - 36
Limo	25 - 35	30 - 35

*Fuente: (Maccaferri, 2005)*

**Tabla N° 6**

*Valores del Angulo de fricción los cuales están drenados por arenas*

<b>Tipo de suelo</b>	<b><math>\phi</math> (grados)</b>
Arena: granos redondeados	
Suelta	27 - 30
Media	30 - 35
Densa	35 - 38
Arena: granos angulares	
Suelta	30 - 35
Media	35 - 40
Densa	40 - 45
Grava con algo de arena	34 - 48
Limos	26 - 35

*Fuente: Braja (2012)*

- **Resistencia a la cortante en suelos cohesivos**

Los suelos cohesivos son analizados acorde a la proporción del esfuerzo total del suelo (Braja, 2012). Cuando no existe nivel freático, dan a luz a la falla en arcillas por cortante. Para estos suelos, la resistencia a la cortante se expresa así:

$$T = C$$

Donde:

Como único parámetro de resistencia La cohesión (c).

Mientras que, el Angulo de fricción interna ( $\phi$ ) se considera nula.

El historial de compactación del suelo, las condiciones de drenaje, la sensibilidad estructural, la tasa de aplicación de carga, los cambios de humedad y presión determinan la resistencia al corte de los suelos cohesivos.

### **2.2.5 Métodos de análisis de Estabilidad de Taludes**

Chow (1964), significa la seguridad de bajar el valle, así como la paciencia de la multitud del camino con un sentido de belleza y necesidad, entonces la paciencia proviene del deseo temporal de intentar cruzar el valle.

Para ello es necesario identificar el sistema de seguridad, en el que, además de la declaración, está conectado de forma arbitraria el área de seguridad "FS", que sirve para identificar el área de la amenaza representada por la inexistencia donde está duro el agujero. Condiciones motivo de esta invención. (Chow, 1964).

Esta teoría parece ser una relación entre la resistencia al corte real y el tamaño de los engranajes necesarios para provocar la ruptura de la capa superior seleccionada para la resistencia a la fractura.

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}}$$

Brown (1996) El equilibrio del deslizamiento requiere un equilibrio entre fuerzas activas y opuestas; su combinación determina el margen de seguridad. Se requiere un factor de seguridad de 1 (FS=1).

Es decir, existe un equilibrio entre rendimiento y resistencia, puedes utilizar la siguiente tabla para encontrar zonas de almacenamiento específicas:

**Tabla N° 7**

*Rango de valores de factor de seguridad*

Valores comunes de factor de seguridad	
Factor de seguridad	Estabilidad
< 1	Inestable
1.0 – 1.2	Estabilidad cuestionable
1.2 – 1.5	Estable bajo condiciones estáticas
> 1.5	Estable bajo condiciones dinámicas

*Fuente: Brown (1996)*

La NT CE.020 de Estabilización de Suelos y Taludes del RNE (2001), indica que hay que considerar en la evaluación de la condición de estabilidad del talud lo siguiente:



- Estáticas : F.S. = 1.30
- Pseudoestáticas : F.S. = 1.25 incluye solicitaciones sísmicas

Entonces, los taludes se analizarán de la siguiente manera:

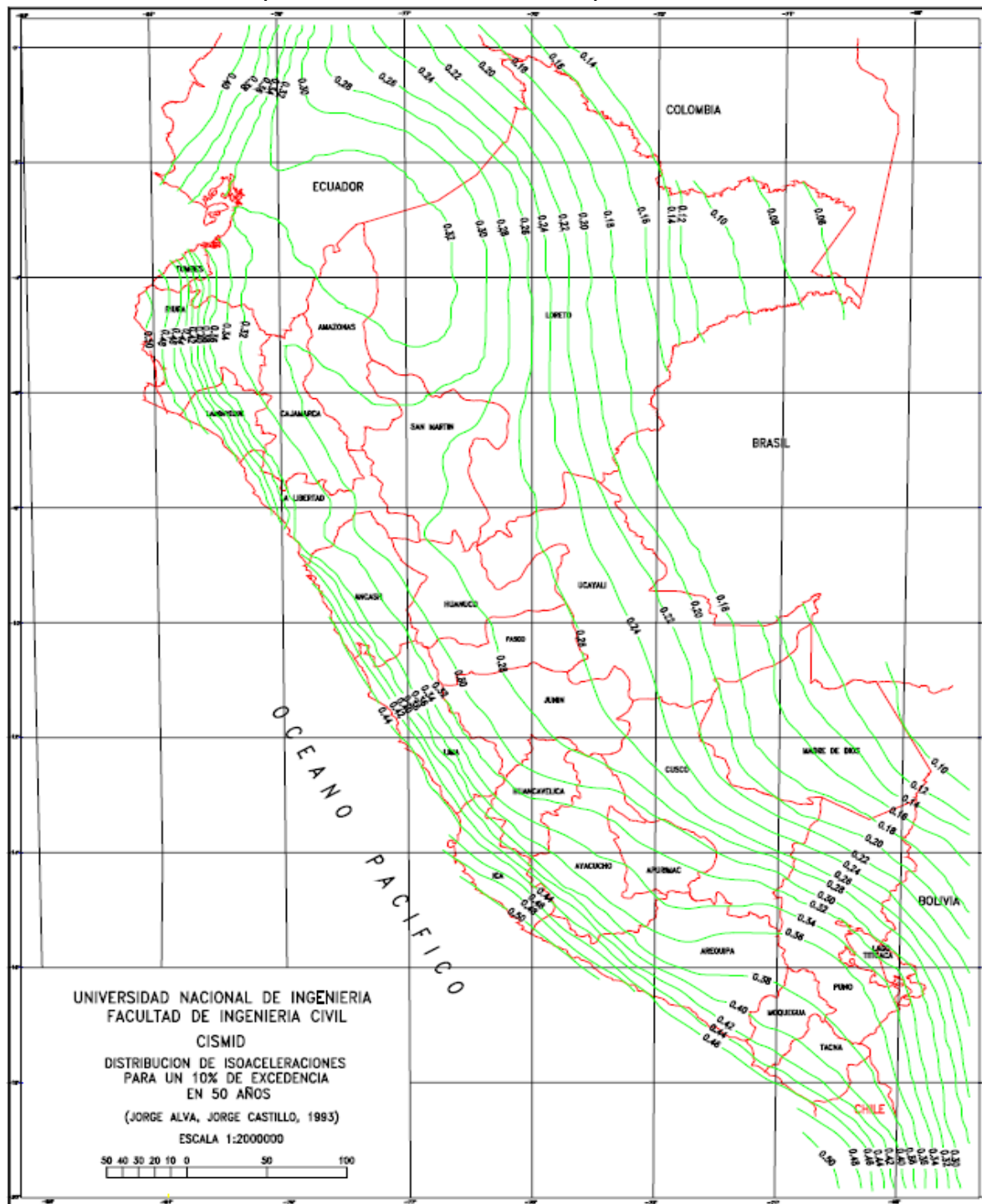
- Estudio estático
- Estudio pseudoestático.

En el análisis pseudoestático, que también se llama análisis sísmico, incluye la colección de movimientos sísmicos que ocurren en el soporte de la masa de cierre y el aumento (aceleración) se utiliza como parte de la PGA (Peak Ground Acceleration) (NT CE .020, diseñado para Estabilización de Terrenos y Taludes). (RNE revisada, 2001). Este profesor muestra una fortaleza silenciosa que roza la nada, sin juzgar los informes mencionados en el párrafo anterior. Los valores del multiplicador sísmico se dan a 50°L PGA y se basan en las recomendaciones del modelo de la Marina de los EE.UU.

Los valores adoptados son consistentes con los del PGA, especialmente el planisferio de isoaceleraciones de Alva y Castillo (1993), que describe la aceleración asociada a una respuesta del 10% al estrés de edificios con evidencia de 50 años de eventos sísmicos tiempo 475 años. (Ver Figura 5).

**Figura 5**

*Isoaceleraciones para el 10% de excedencia para 50 años*



Fuente: Alva y Castillo (1993)

### 2.2.5.1 Método de Equilibrio Limite (MEL)

Para comprobar en condiciones estables en pendientes, se puede utilizar el método de ecualización (MEL). Este método se basa en la estática, por lo que se puede tomar el nivel de equilibrio de la posible inestabilidad del terreno, asumiendo que no se tiene en cuenta la deformación del terreno. La ventaja de este método es el modelado rápido y confiable de secciones transversales complejas que representan con precisión el área potencial de falla. Valiente et al. (2015).

El análisis de equilibrio límite determina el equilibrio de las fuerzas y/o momentos del suelo en un punto potencial de falla.

Por esta razón, este método supone que el volumen del punto puede ser fuerte (plástico), tiene una resistencia al corte que aumenta en el punto de falla, y que la resistencia a la corte obtenida se acumula al mismo ritmo que sea posible falla La superficie Puede agrietarse en la superficie. Esto mantiene el almacenamiento (FS) al tanto de todo lo que se rompe. Martínez, Barrera y Gómez (2011)

Si se desconoce la falla a tierra, el número del punto de protección depende de un cierto número de puntos y se denomina punto de protección del cable más pequeño encontrado. Hay muchas formas de estimar el límite para calcular el factor de conservación de la estabilidad de taludes.

Algunos de estos métodos son hipotéticos, por ejemplo: Fellenius (1936), obispo (1955), Janbú (1954); y otros, más específicos y complejos, como Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967). Se utilizan diferentes métodos para calcular el factor de seguridad, el más común es el límite de comodidad. Esto se puede hacer examinando la longitud del área de la fractura o dividiendo la masa en secciones o secciones. Dirsch (2014).

**Tabla N° 8***Métodos Numéricos de análisis de estabilidad de taludes*

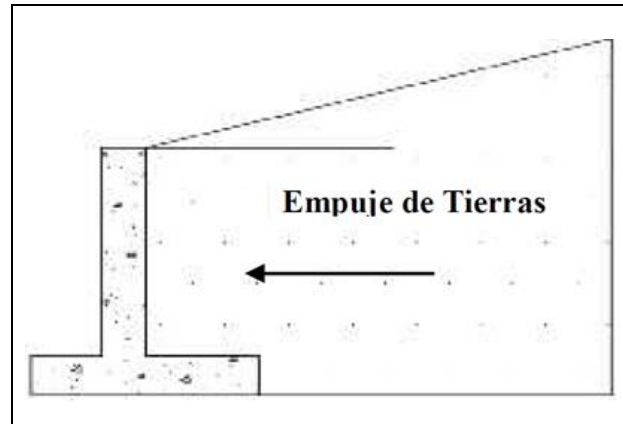
Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficies de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\phi=0$ ).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tienen en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, se asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir falla.

Fuente: (Abramson, Lee, Sharma, y Boyce, 1996)

### 2.2.6 Presión lateral de tierra en reposo

La energía lateral de tierra en reposo, o empuje de tierra, es el resultado de las fuerzas que ejerce el suelo sobre la cimentación o estructura de soporte. Esta fuerza proviene de su propio peso o de la superfuerza que actúa sobre el suelo. La magnitud de la presión sobre una estructura se debe a la deformación que experimenta como resultado de la presión (Maccaferri, 2005). (Ver Fig. 6)

**Figura 6**  
*Empuje de tierra en muro vertical*



*Fuente: Elaboración propia (2019).*

Al alejarse el muro del suelo, el esfuerzo cortante disminuye a un valor menor, lo que implica una movilización total de los esfuerzos internos del suelo. Esto se conoce como el "estado activo" y el poder se manifiesta a través del "empuje activo" (Braja, 2012). Por el contrario, a medida que el muro se acerca a la masa terrestre, la fuerza aumenta a un valor mayor, creando una nueva movilización absoluta de la resistencia del suelo. Esto se conoce como "empuje pasivo" (Braja, 2012).

En ingeniería geotécnica, se utilizan varios modelos para comprender los efectos de las influencias pasivas y activas, que tienen en cuenta la relación compleja y plástica entre la presión y la deformación del suelo.

Este programa permite medir el movimiento del producto, ya que basta con realizar un material plástico. El modelo de Mohr Coulomb que se muestra arriba se utiliza únicamente como modelo de plástico.

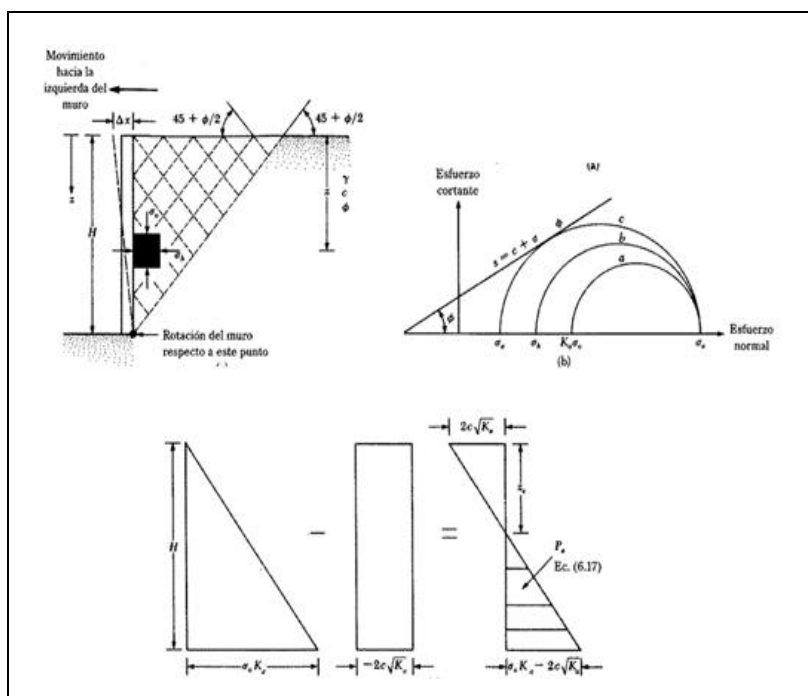
#### **2.2.6.1 Presión activa y pasiva de Rankine**

Rankin señala las fluctuaciones en el estrés que ocurren en la masa del suelo a medida que la fuerza horizontal disminuye o aumenta. Al examinar el estado de fuerza del componente del suelo en la profundidad "Z", la tensión vertical " $\sigma_v$ " se puede calcular utilizando la fórmula:  $\sigma_v = \gamma \cdot z$ .

## Presión o empuje activo

La fuerza horizontal  $\sigma h$  actúa sobre la fuerza vertical. La conexión entre ellos es el coeficiente  $K$ , que en su estado natural se llama  $K_0$ . Material. La próxima imagen nos muestra la fuerza, o impacto activo, que la tierra ejerce sobre la pared:

**Figura 7**  
*Presión activa de Rankine*



Fuente: (Braja, 2012)

La fuerza horizontal  $\sigma h$  se calcula mediante la siguiente fórmula para suelos cohesivos y con talud horizontal:

$$\sigma h = K \cdot \gamma \cdot z - 2c \cdot \sqrt{K}$$

Suelos granulares es:

$$\sigma h = K \cdot \gamma \cdot z$$

$K$  es el coeficiente de empuje activo, calculada:

$$K = c_1^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - s_1}{1 + s_1}$$

Con ese resultado se obtiene el cálculo del valor del empuje o presión activa resultante “E” o “P” sobre el muro:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K - 2 \cdot c \cdot H \cdot \sqrt{K}$$

Al existir la inclinación en el talud, se obtiene de esta manera:

$$K = c_1 \cdot \alpha \cdot \frac{c - \sqrt{c_1^2 \beta - c_1^2 \varphi}}{c_1 + \sqrt{c_1^2 \beta - c_1^2 \varphi}}$$

Cabe señalar que la teoría de Rankine no analiza los efectos de la fricción entre el muro y el edificio. En este caso, es posible construir muros con pendientes pronunciadas ( $\alpha \neq 0$ ). En la tecnología también se utilizan conceptos de menos de 10 metros de altura.

Se utiliza el mismo método de longitud para tratar todo tipo de suelo. Esto significa que se cambia la longitud de la misma pieza para trabajar con la misma sobrecarga. Al calcular la altura se toma la presión como si la altura de la superficie fuera  $H + h_s$ .

Donde:

$$h_s = \frac{q}{\gamma}$$

En un talud inclinado con sobrecarga:

$$h_s = \frac{q}{\gamma} \cdot \frac{c_1 \cdot c_1}{c_1(\omega - \beta)}$$

Presión o Empuje pasivo

La forma funcional se diferencia de la forma estructural en que esta última se produce cuando el movimiento se produce hacia la derecha con respecto al suelo. La tensión de compresión  $\sigma_h$  se calcula utilizando el método de suelo cohesivo con pendientes horizontales:

$$\sigma_h = K \cdot \gamma \cdot z + 2c \cdot \sqrt{K}$$

Para suelos granulares:

$$\sigma_h = K \cdot \gamma \cdot z$$

K resulta el coeficiente de empuje pasivo:

$$K = c_1^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + s_1}{1 - s_1}$$

Con ello se puede calcular el empuje o presión activa resultado de “E” o “P” en el muro:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K + 2 \cdot c \cdot H \cdot \sqrt{K}$$

### 2.2.7 Mecanismos de Falla de taludes

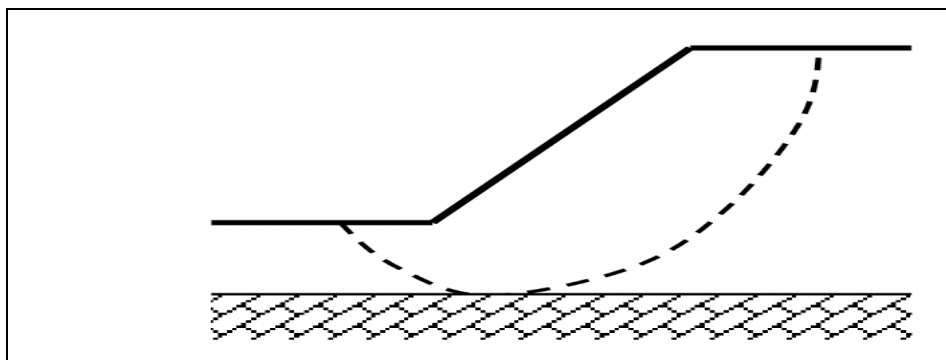
El peso del suelo tiende a moverse hacia abajo y hacia adelante por su propio peso.

Si el desplazamiento del suelo va en contra de esta característica, se produce la estabilización del talud y, por otro lado, se produce el hundimiento. (Geotechnics, 2019).

- La convergencia, o falla de la pendiente, ocurre cuando parte de una pendiente se rompe y cae hacia arriba, ejerciendo presión en la parte inferior de la pendiente, provocando el levantamiento del material deslizante. (Warrington, 2017).

#### Figura 8

*Falla de base o profunda de un talud*



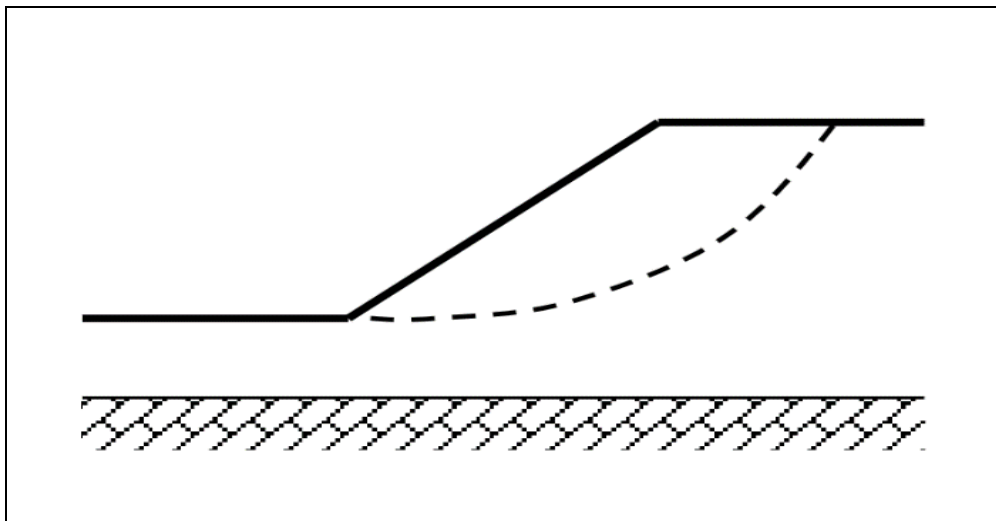
Fuente: Elaboración propia (2019).



- La falla de la punta ocurre en pendientes con características especiales, como pendientes en áreas con una alta tasa de fricción interna. La falla ocurre cuando el material de la parte superior del talud colapsa, formando una superestructura que cubre la base del talud. (Warrington, 2017).

### Figura 9

*Falla al pie de talud.*



*Fuente:* Elaboración propia (2019).

- La falla en el borde del talud se produce por exposición de la parte media de los sedimentos, lo que imposibilita aumentar el área de falla junto con la parte superior del deslizamiento. La situación es importante, ya que la complejidad de los componentes que la componen es diferente


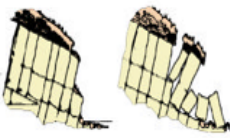
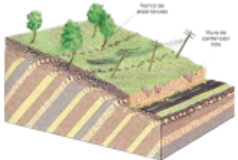
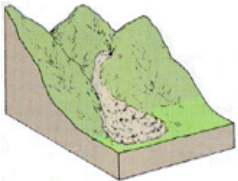
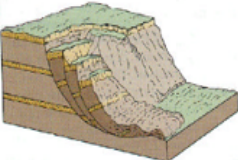
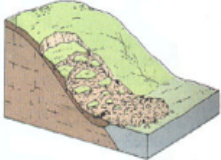
#### 2.2.8 Definición de deslizamientos

Los procesos geológicos más importantes están relacionados con los deslizamientos de tierra, que afectan a las edificaciones y a las comunidades locales. Los deslizamientos de tierra son causados por el colapso de una línea inestable que, cuando se destruye, se forma bajo tierra. Este hundimiento del suelo da como resultado un movimiento del suelo en relación con el suelo debajo de la pendiente.

## 2.2.9 Clasificación de los deslizamientos

La estructura del suelo se puede dividir en seis grupos, que están determinados por el tipo de material del talud y las fuerzas internas y externas. (Braja, 2012).

**Tabla N° 9**  
*Tipo de deslizamiento.*

Ítem	Nombre	Descripción	Grafico
1	<b>Caidos "falls"</b>	Desprendimiento y caídas de masa de suelo o roca de un determinado talud que ruedan ladera abajo.	 Varnes, 1978
2	<b>Volcamiento "topples"</b>	Rotación hacia delante de una masa de suelo o roca alrededor de un punto situado por debajo de su centro de gravedad.	 Varnes, 1978
3	<b>Reptación "Creep"</b>	Consiste en un conjunto de movimientos del suelo sub-superficial (debajo de la superficie) que se mueven lentamente, debido a la humedad del suelo, sin presencia de una línea de falla definida, lo que los convierte en el tipo de deslizamiento más <b>peligroso</b> .	 Skinner & Porter, 1992
4	<b>Flujo "flows"</b>	Son movimientos de partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Pueden ser lentos o rápidos; secos o húmedos. El material puede ser roca, suelo o combinación de ambas.	 Skinner & Porter, 1992
5	<b>Deslizamiento rotacional "slump"</b>	Se produce cuando la superficie de ruptura es formada por una curva donde la masa de suelo o roca hacia atrás alrededor de un eje paralelo a ladera.	 Skinner & Porter, 1992
6	<b>Deslizamiento traslacional "translational"</b>	Se produce cuando la superficie de ruptura es más o menos plana u ondulante, donde la masa de suelo o roca se mueve paralelamente a la superficie del terreno.	 Skinner & Porter, 1992

Fuente: Elaboración propia (2019).

### 2.2.10 Partes de un deslizamiento

Los deslizamientos se componen de (Brown, 1996):

**Tabla N° 10**

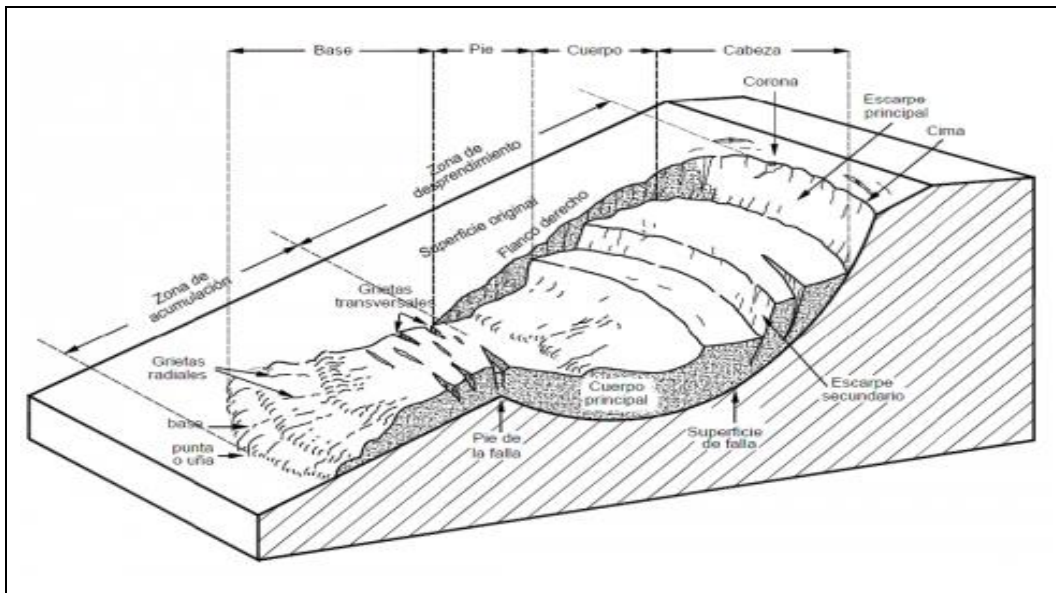
*Partes de un deslizamiento.*

Ítem	Nombre	Descripción
1	<b>Cabeza</b>	Parte superior de la masa de material que se mueve.
2	<b>Cima</b>	Es el punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
3	<b>Corona</b>	Material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado, adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza
4	<b>Escarpe principal</b>	Superficie muy inclinada (pendiente) a lo largo de la zona del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material.
5	<b>Escarpe secundario</b>	Superficie muy inclinada (pendiente) producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.
6	<b>Superficie de falla</b>	Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de esta, se desplaza.
7	<b>Pie de la falla</b>	La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
8	<b>Base</b>	El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla
9	<b>Punta o uña</b>	El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
10	<b>Cuerpo</b>	Es el material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.
11	<b>Superficie original</b>	La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento
12	<b>Flanco</b>	Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

*Fuente:* Elaboración propia (2019).

Es por ello que en la siguiente imagen se muestra las partes de un deslizamiento de forma detallada. (Ver Figura N° 10).

**Figura 10**  
Partes de un deslizamiento.



Fuente: Brown (1996)

### 2.2.11 Factores que influyen en los deslizamientos

La modificación del suelo provocada por el hombre ha afectado los procesos geodinámicos y los paisajes naturales, lo que ha provocado inestabilidad y movimientos de la tierra (Fetter, 2014). La combinación de estos factores conduce a movimientos más pesados y conduce a factores de condicionamiento y provocación que deben ser considerados.

Factores condicionantes o pasivos: Forman parte de los elementos naturales (Forree, 2001).

- Litología y Estratigrafía: capas de naturaleza, rocas, conexión de los elementos.
- Estructura geológica: presencia de planos de fisión de rocas.
- Condiciones hidrogeológicas: fuerzas intersticiales, permeabilidad.
- Propiedades Físicas, de Resistencia y Deformación: Resistencia al Cortante, Deformación.
- Propiedades naturales y estado tensión- deformación: fracturas y discontinuidades plásticas.

Indicadores o factores activos: elementos externos que provocan perturbaciones naturales y humanas (Forrester, 2001).

- Sobrecarga: montón relleno.
- Fluctuaciones hidrogeológicas: grandes lluvias, cambio de volumen (ciclo hielo-deshielo).
- Geometría variable: formación de taludes artificiales.
- Influencia climática: inundaciones.
- Parámetros de estabilidad a la caída: El material excavado se suelta al pie del talud.

### **2.2.12 Estudios de Geotecnia para estabilidad de taludes**

Hiscock (2014) afirma que el análisis geotécnico es una herramienta importante para analizar las capas de suelo para crear una base adecuada. La geometría que se considera al planificar la línea está determinada por la relación con la obra futura, lo que requiere el uso de piedras y máquinas terrestres, lo que simplifica el diseño y mejora su calidad cuando la estabilidad natural se ve rota por sus escalones.

Planificación y diseño del paisaje, cabe señalar que la información que se obtiene en esta investigación depende del uso de las pruebas de campo y laboratorio para calcular el tipo de muestra que se debe obtener.

#### **2.2.12.1 Estudios de Geotecnia para estabilidad de taludes**

Cualquier deslizamiento de volumen de un suelo se entiende como movimiento de taludes.

Los deslizamientos son aquellos movimientos de masas de residuos, tierra o roca hacia la parte inferior de un talud. También puede entrar a tallar en los procesos de erosión.

La naturaleza misma no interviene en los procesos que son producto de fuerzas hidráulicas, fuerzas gravitacionales, etc. Estos movimientos ocurren principalmente a lo largo de toda la superficie de la falla, movimientos de masa, erosión o flujo, o fractura libre. Hay ocasiones en las que los fragmentos de la

pendiente pueden moverse hacia abajo y, en otros casos, hacia arriba. Estos fenómenos suelen ser causados por denudación y una combinación de procesos erosivos interrelacionados y en algunos casos de naturaleza mixta.

### 2.2.12.1.1 Tipos de Movimiento

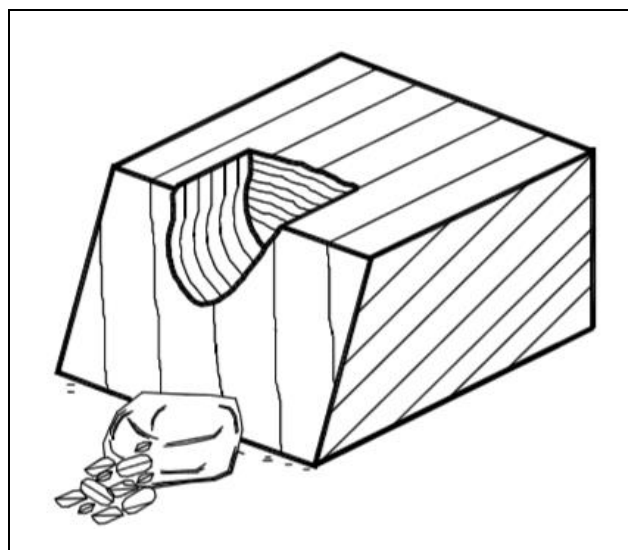
#### a) Caídas (desprendimientos)

Se definen como movimientos bruscos con una gran velocidad, están abarcados por bloques rocosos se están desplazados por caída libre en todo lo largo de un plano inclinado. Cuando uno de los bloques se desprende son originados por la meteorización en las fracturas, vibraciones, corrientes de agua subterránea, pérdida de confinamiento lateral y presiones hidrostáticas en estas.

Dichos desprendimientos están conformados por caída de tierra compuesta por masa blanda, caída de residuos compuestos por materiales pétreos y por bloques de roca sana (Ver Figura N° 11 y 12)

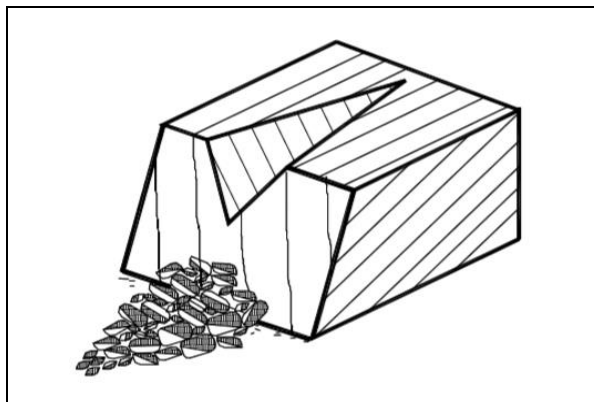
#### Figura 11

*Caídas (desprendimiento)*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p.8)

**Figura 12**  
Caídas (desprendimiento)



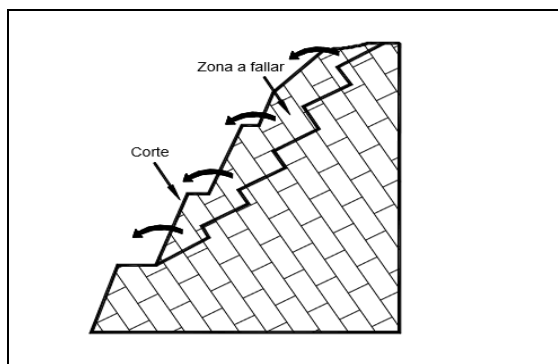
Fuente: “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p.8)

**b) Vuelco**

Este movimiento se realiza mediante el movimiento hacia adelante de una unidad o de varias partes del suelo donde su centro de rotación está por debajo del centro de gravedad. Es común en áreas con mucho uso de grava, pero también puede ocurrir en suelos estrechos que no han recibido fuertes lluvias (ligeramente secos). Su pendiente puede cubrir el tamaño de varios millones de metros cúbicos y su pendiente puede cubrir un área muy pequeña. Suarez (2009).

La inclinación está sometida a la caracterización geológica. Puede terminar en derrumbes, todo depende de la geometría de la sección y de las características geológicas. (Ver figura N°13)

**Figura 13**  
Vuelcos.



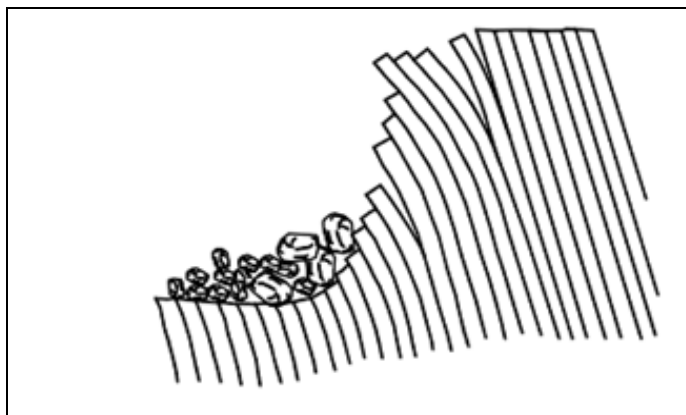
Fuente: “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p. 11)

### Volcamiento: falla por flexión

Cuando algunos se inclinan hacia adelante, las columnas se separan y se rompen. Esto es causado por la transferencia de cargas al fondo del talud. (Ver Fig. N° 14).

**Figura 14**

*Volcamiento por flexión*



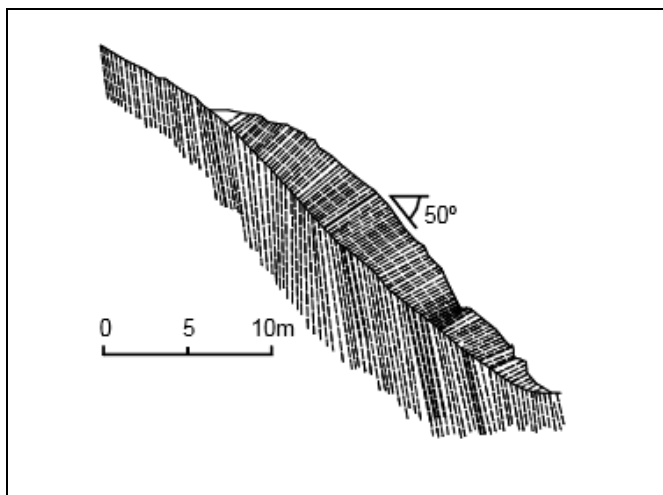
Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 12)

### Volcamiento: V invertida

Son gran cantidad de inclinaciones por parte en la parte superior inferior, debido a esto puede producir una falla en la superficie. (Ver figura N°15)

**Figura 15**

*Volcamiento en V invertida*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 12)

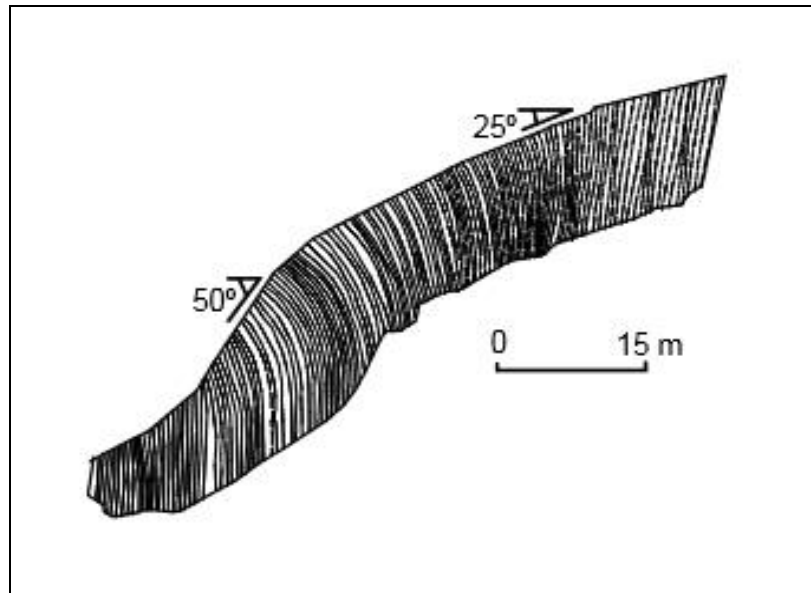


### Flexión: falla por bloque

La flexión tiende a producirse a lo largo de apoyos continuos debido a movimientos en juntas con ángulos de inclinación variables. (Ver Fig. N° 16)

**Figura 16**

*Flexión de bloque*



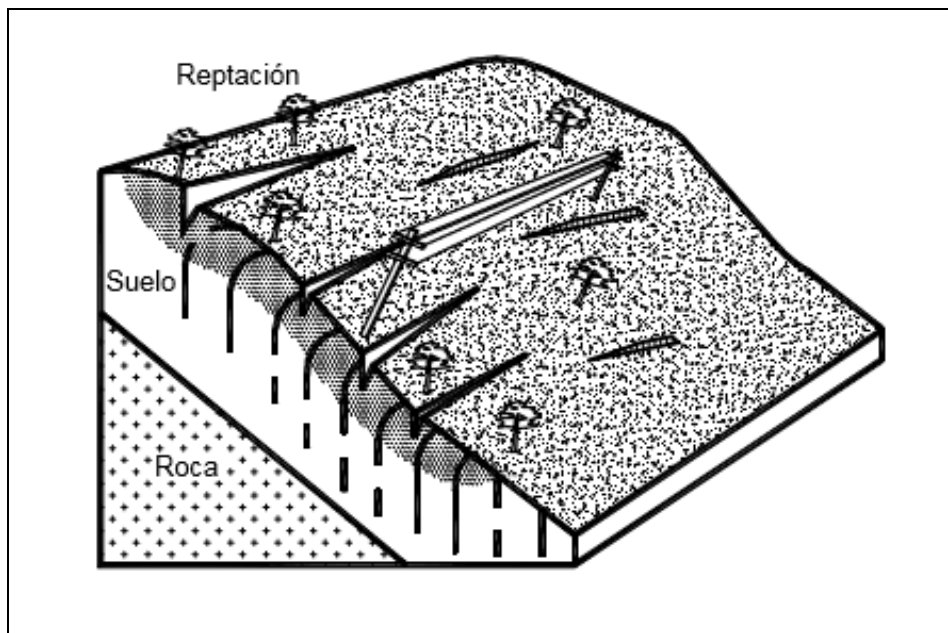
Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 12)

### c) Reptación

Es un movimiento subterráneo extremadamente lento de la tierra, que puede acelerarse durante la temporada de lluvias, el movimiento continuo sin superficies de falla definidas puede cubrir grandes áreas, y no hay una distinción clara entre cuerpos en movimiento y en movimiento.

La causa del movimiento es la acción de la gravedad asociada a la acción de la humedad y los cambios de temperatura. El movimiento ocurre en un estado de tensión que está por debajo de la resistencia al corte del suelo o la roca. Sin embargo, si el estado de tensión cambia antes de que se alcance la resistencia de la cortante del material, el movimiento de la masa se convierte en un proceso de deslizamiento con una superficie de fractura bien definida. En superficie, la fluencia se detecta por el desplazamiento del eje del camino, piedras, postes o cercas, o árboles, postes, etc. (Ver Fig. N° 17).

**Figura 17**  
*Reptación.*



*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 13)

#### **d) Deslizamiento en masa (Traslacionales y Rotacionales)**

Un deslizamiento de tierra es una transferencia rápida de masa con superficies de falla bien definidas que ocurre cuando la fuerza cortante aplicada a la masa del suelo es igual o mayor que la resistencia cortante del material.

Dependiendo de las condiciones geomorfológicas, los deslizamientos de tierra pueden ocurrir en forma de rotación o desplazamiento.

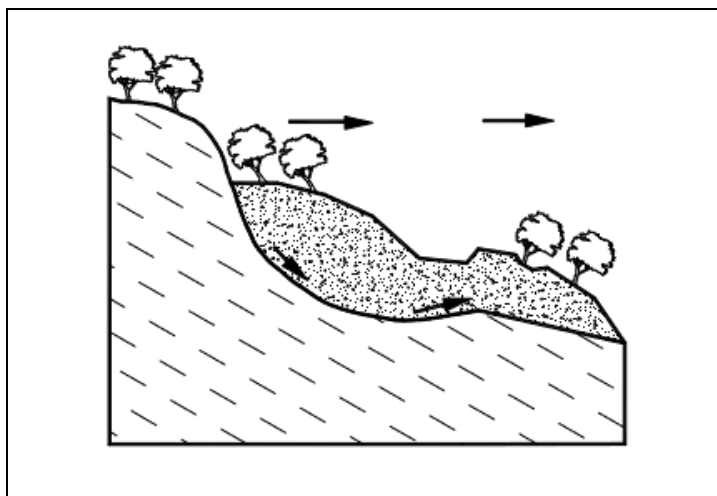
#### **Deslizamiento Rotacional**

Los rodillos que circulan por terrenos relativamente planos suelen tener una superficie redondeada.

Debido a la fuerte anisotropía de la fuerza de corte, la superficie de fractura tiene una forma relativamente plana en las direcciones horizontal y vertical.

Si hay más de dos áreas rotas, se denominan múltiples. (Ver figura N°18)

**Figura 18**  
*Deslizamiento rotacional*

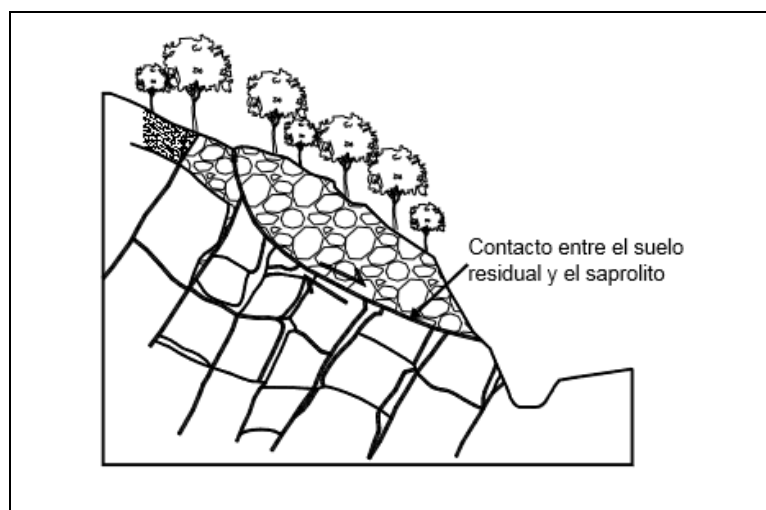


*Fuente:* “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p. 14)

### **Deslizamiento de Traslación**

La erosión se caracteriza por agrietamiento o debilitamiento. Este tipo de deslizamientos de tierra es más común en zonas estrechas, secas y rocosas. Si los planos débiles se encuentran, o si el plano débil no está alineado con el plano inclinado, la zona de falla es capturada y puede estar limitada por dos o más planos. (Ver Fig. N° 19)

**Figura 19**  
*Demostración de Deslizamiento por traslación*



*Fuente:* “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p. 17)

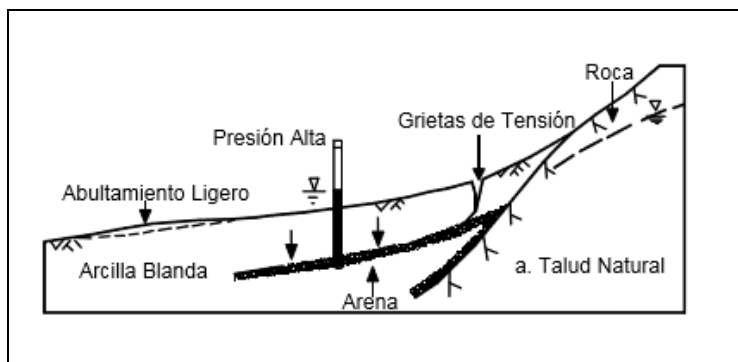
### d) Flujos

El flujo es un proceso continuo con o sin pendiente, no asociado a una velocidad constante. Si se mueve lentamente se dice que se desliza. Si se mueve rápidamente, se llama flujo residual. En general, el flujo tiene un mecanismo de deformación similar al flujo de un fluido viscoso.

Estos se clasifican de acuerdo con las características del material deslizado. (Ver figura N°20)

#### Figura 20

*Tipos de flujos.*



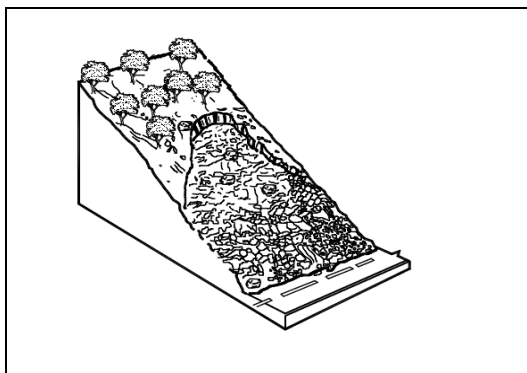
*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 21)

#### Flujos de bloques de roca

Se componen de bloques y crestas de piedra. La inclinación de las laderas suele ser superior a  $45^\circ$ . (Ver figura N°21)

#### Figura 21

*Flujos de bloques de roca*



*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 23)

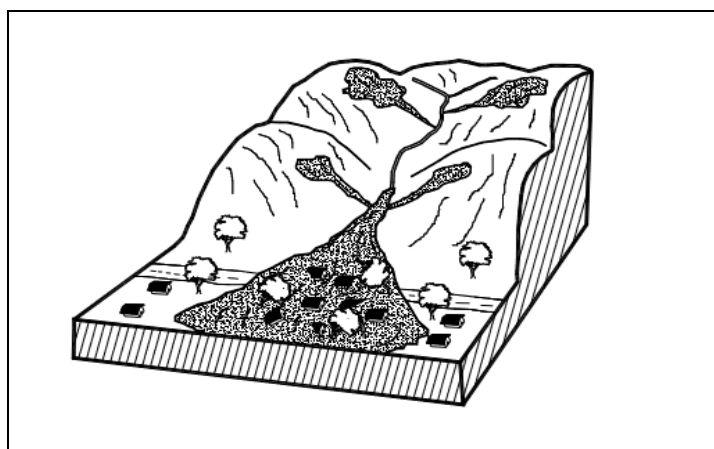
## Flujos de lodo y de detritos

Estas corrientes son movimientos rápidos de más de 10 km/h, en su mayoría causados por una pérdida total de la resistencia del fondo. La masa terrestre comienza a comportarse como un líquido y los desplazamientos alcanzan dimensiones significativas.

Los procesos de fluidización se producen cuando se aporta agua a suelos predominantemente arenosos, se producen cargas dinámicas, se reforman o transforman arcillas muy sensibles. (Ver Figura N° 22 – Figura N° 23).

### Figura 22

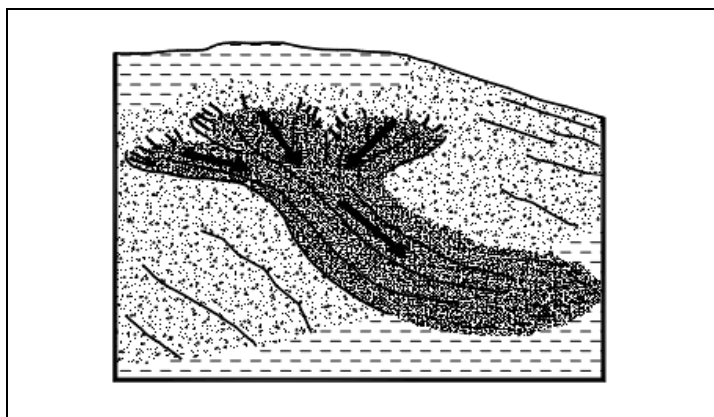
*Flujo de lodos y detritos*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 24)

### Figura 23

*Flujo de lodos y detritos*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 25)

### e) Erosión

El factor determinante en la formación de procesos erosivos fue la actividad antrópica, la cual se relaciona principalmente con la remoción y minería de taludes cortados por caminos.

El desprecio por las condiciones naturales contribuye a un desequilibrio ecológico que conduce al desplazamiento del suelo o a la pérdida de las capas más superficiales.

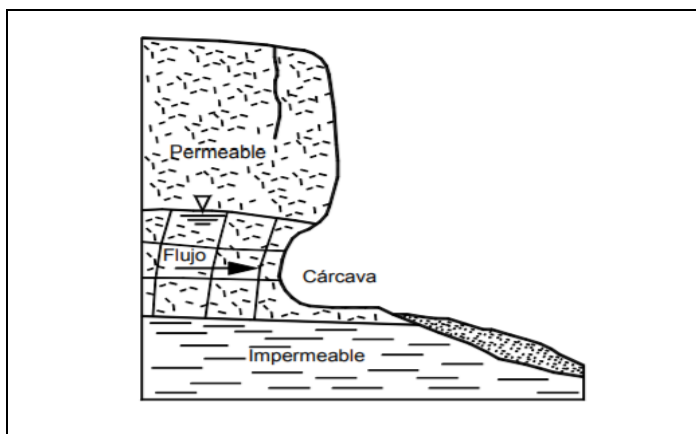
La erosión también se puede caracterizar como un proceso de evolución natural. La erosión costera, por ejemplo, es un proceso que desarrolla una serie de procesos dinámicos que pueden cambiar las condiciones de estabilidad y crear situaciones peligrosas para las poblaciones existentes o posibles ocupaciones futuras.

Los procesos de erosión se dividen en tipos según la sustancia que se descompone.

Cuando el agua subterránea es el factor principal, el proceso es equivalente a la expansión o sifón, que crea tuberías de diferentes tamaños y puede conducir a la formación de cuevas.

Si el agua superficial es un factor, se llama minería. (Ver figura N°24).

**Figura 24**  
*Erosión*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 216)

### 2.2.12.1.2 Influencia del tipo de material

“Las propiedades intrínsecas de los materiales están estrechamente relacionadas con los tipos de inestabilidad que pueden ocurrir, permitiendo el acondicionamiento y la capacidad de predecir la susceptibilidad de cada material a exhibir movimientos específicos” (IGME, 2006, p. 9).

Estos se presentan en tres grupos:

#### a) Macizos rocosos

Las rocas que componen las cadenas montañosas forman un ambiente discontinuo anisótropo, lo que plantea el problema de la estabilidad de taludes. Cadenas montañosas forman un entorno discontinuo formado por bloques individuales. El comportamiento de un macizo rocoso depende de la estratificación y litología de la matriz rocosa.

El esqueleto de la roca está formado por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Las etapas de meteorización del esqueleto de la roca se clasifican como frescas, decoloradas, meteorizadas y meteorizadas. La resistencia a la compresión delha sido probada en campo y varía de muy blanda a muy dura. Las características de las discontinuidades en una roca dependen de su dirección, espaciamiento, rugosidad y relleno. (Ver Fig. N° 25).

#### **Figura 25**

*Macizos rocosos.*



*Fuente:* Elaboración propia (2019).

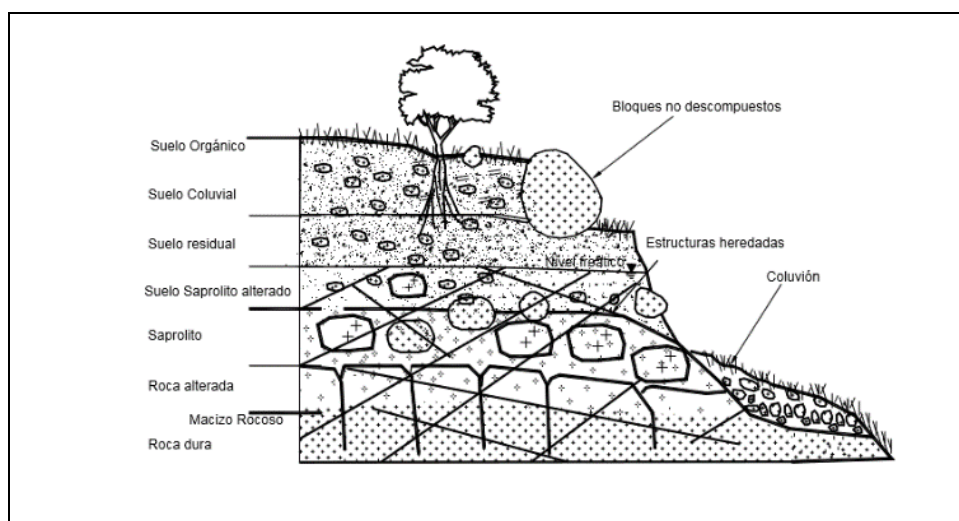
## b) Suelos

El suelo, a diferencia de las montañas, se compone principalmente de partículas sólidas, partículas sueltas y enlaces débiles, partículas minerales y orgánicas. Este proceso se basa en un proceso continuo y homogéneo que se produce en el interior de las grietas internas. La división genética del suelo está representada por suelo fósil, aluvial, glacial, eólico, aluvial y orgánico.

Las características y propiedades del suelo determinan la dinámica del material, mientras que propiedades como el tamaño, las proporciones y el contenido de agua determinan la resiliencia y la estabilidad del material. (Ver Fig. N° 26).

### Figura 26

*Agregados como suelos*



*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 389)

## c) Rellenos

Un vertedero consiste en acumulaciones de material o sedimentos hechos por el hombre, como diques y diques. El comportamiento de los acolchados es muy similar al de los suelos. Los materiales tienen propiedades muy diferentes y se comportan de manera diferente cuando siguen el patrón del movimiento del suelo.



### 2.2.12.1.3 Factores condicionantes y desencadenantes

#### Factores Naturales

Los determinantes, que incorporan el cambio y la deformación de la corteza terrestre, representan la mayoría de los elementos iniciales. Debido a la distribución geográfica, existen zonas con condiciones climáticas y sísmicas especiales que pueden provocar deformaciones de taludes.

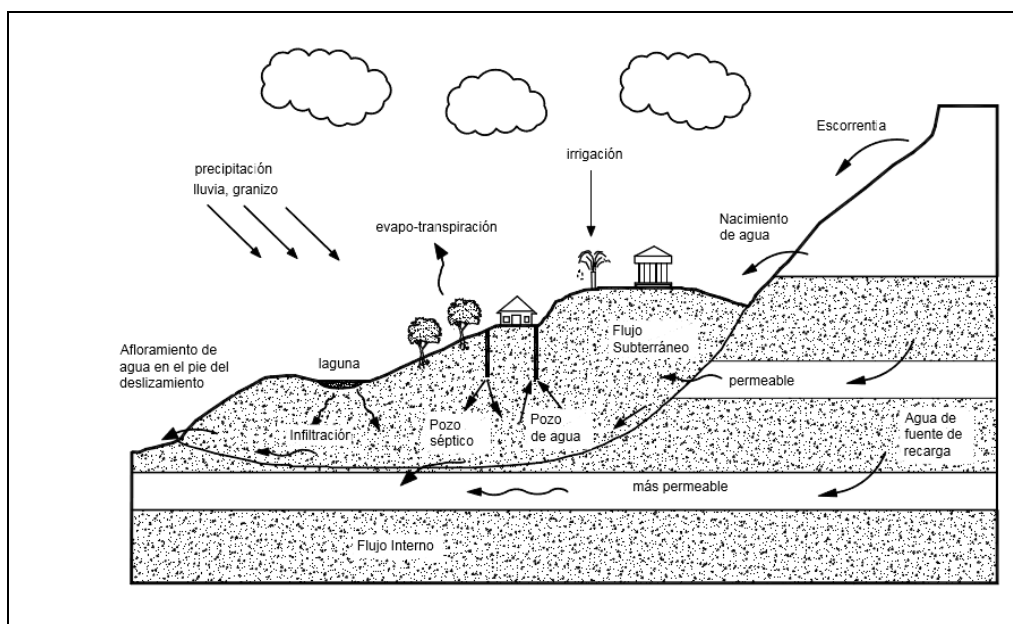
Hay varios factores condicionantes y desencadenantes que se enumeran a continuación.

#### a) El agua

Este es el elemento con mayor incidencia de factores inducidos, y el agua es el elemento más frecuentemente asociado con daños en laderas porque la mayor migración ocurre después de la temporada de lluvias. El agua generada por el proceso de filtración satura la pendiente y la presión de los poros, reduciendo así la resistencia al corte. Existen muchas variables en el país cuando se trata de ocurrencia de deslizamientos de tierra. (Ver figura N°27).

#### Figura 27

*Presencia de agua.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 209)*

## b) Ríos

La fuerza erosiva de las corrientes de agua perturba el equilibrio de las laderas por las que discurren. Trabajan continuamente con diferentes significados. La fuerza del flujo hace que se forme una socavación al pie del talud y aumenta el esfuerzo cortante en el material del talud.

El caudal y la forma del río hacen que el fregado sea más abrasivo.

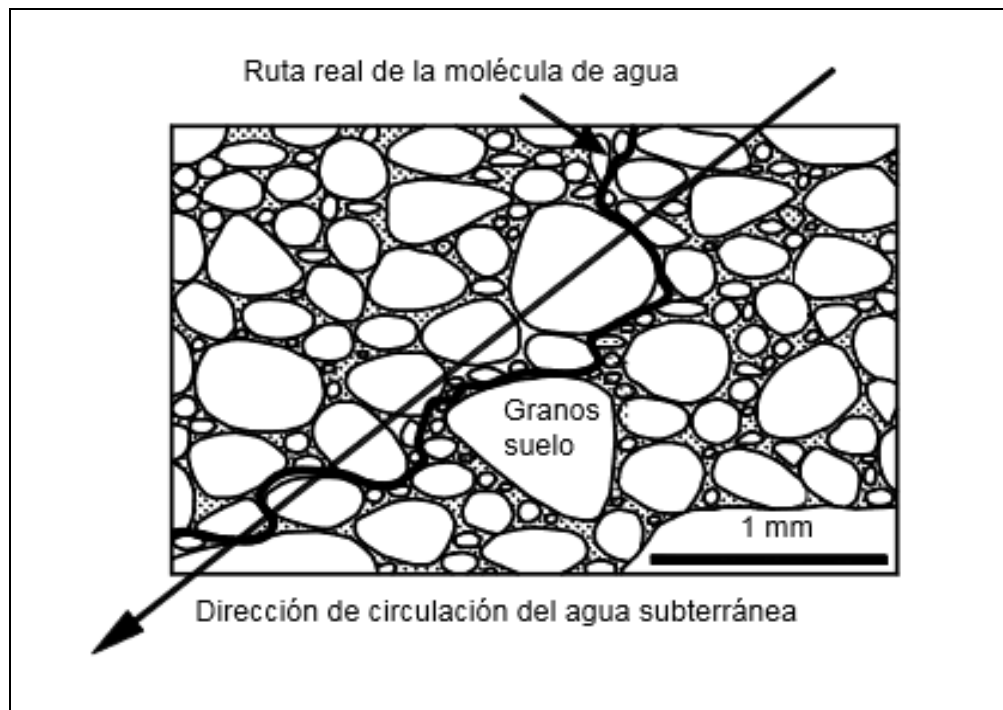
## c) Aguas subterráneas

El agua generada por la lluvia penetra en el suelo semi-verticalmente hasta que encuentra un área de alta permeabilidad y crea la formación de flujo. Dentro de la red de grietas, el agua se dispersa en los intersticios del material y proporciona estabilidad.

La absorción continua de agua en la capa permeable conduce a la expansión y contracción continuas del suelo. (Ver figura N°28)

### Figura 28

*Aguas subterráneas.*

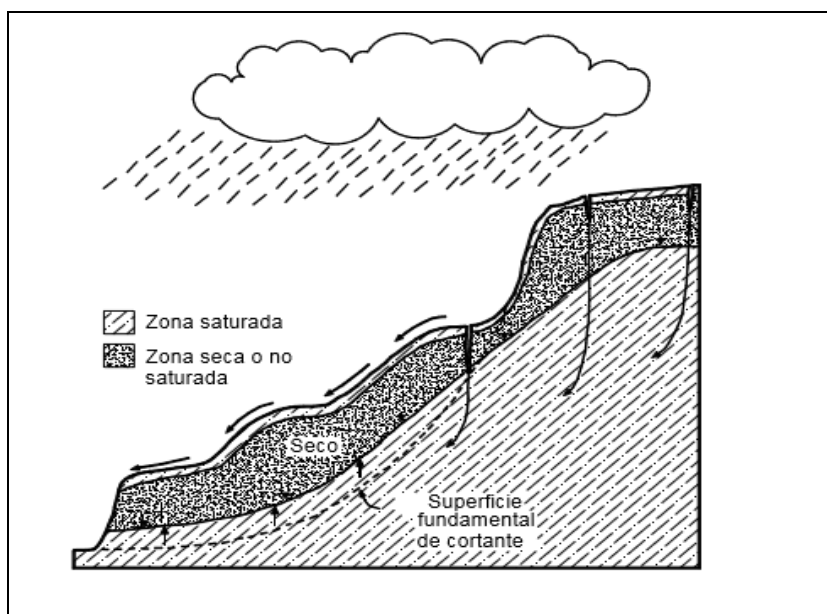


*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 229)*

#### d) Lluvias

Es un factor que regula e induce los movimientos de laderas, acelerando el proceso de meteorización y aumentando la infiltración de aguas subterráneas. La lluvia provoca el aumento del agua subterránea y la saturación del suelo, lo que reduce el estrés negativo y mejora la cohesión del suelo. Este proceso se realiza de arriba a abajo. La cantidad de precipitación, la duración y la intensidad de la precipitación determinan la saturación y activación de los deslizamientos de tierra. El proceso de desestabilización está precedido por lluvias tempranas, largas temporadas de lluvias y fenómenos de alta intensidad. (Ver dibujo N° 29).

**Figura 29**  
*Lluvias.*



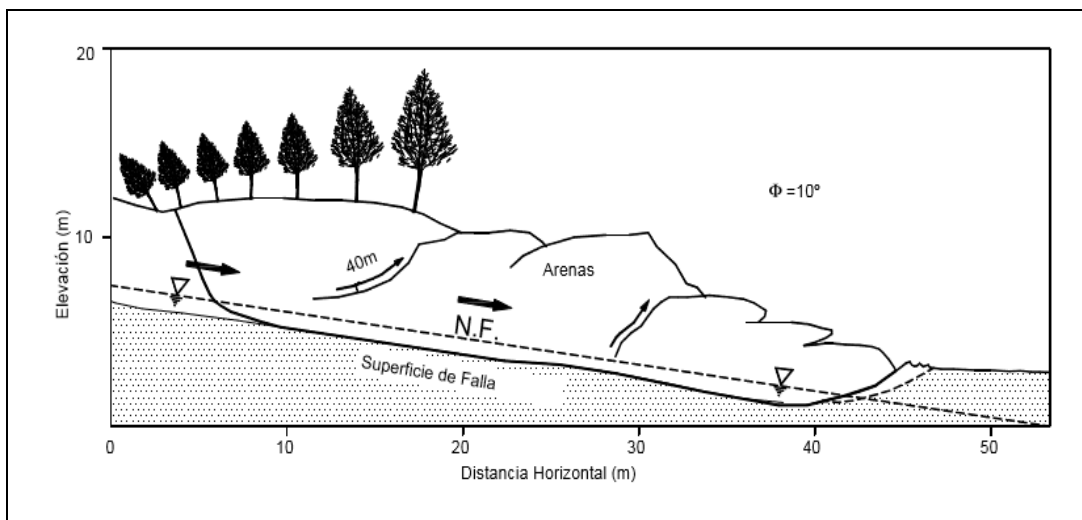
*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 245)

#### e) Sismicidad

Los terremotos son causados por el movimiento de fallas geológicas. Junto con el movimiento de las fallas, se generan diferentes tipos de ondas con fuerzas muy fuertes, que se desplazan a través de las rocas, provocando derrumbes y deslizamientos. Cuando ocurre un terremoto, el esfuerzo cortante aumenta por un factor de tres y la resistencia del suelo disminuye debido a la deformación y la presión intersticial del agua. La acción sísmica es compleja y

provoca movimientos de la corteza y deformaciones sísmicas de tipo gravedad. El primero se manifiesta como un movimiento en la corteza provocado por terremotos de magnitud superior a 6,5 en la escala de Mercalli. En la deformación por gravedad sísmica, las vibraciones a largo plazo desplazan el material sobre un área más amplia, lo que provoca deslizamientos y deslizamientos de tierra a gran escala. En áreas con actividad sísmica continua, el movimiento del suelo es la principal causa de la deformación de taludes. Cuando se produce una fisura en una falla geológica, se libera energía en todas las direcciones a lo largo de la línea alargada en la dirección de la falla. Los fenómenos sísmicos que más daños provocan son los superficiales. (Ver figura N°30).

**Figura 30**  
*Sismicidad.*



*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 268)

### **Actividad Humana**

Hoy en día, para que la economía mundial crezca, se anima a cada país a crear la infraestructura que lo permita. La construcción y la minería son industrias que apuntan a mejorar el uso de los recursos naturales y aumentar la conectividad entre regiones. Los factores que afectan la estabilidad de los taludes son el resultado de las actividades que se han realizado.

**a) Excavaciones**

Este es uno de los factores más importantes que provocan el movimiento. Debido a las obras de construcción, se requiere una ejecución técnica detallada para garantizar la estabilidad de los nuevos taludes. Conducen a cambios en el equilibrio del paisaje, creando áreas potenciales para deslizamientos y deslizamientos de tierra.

**b) Voladuras**

A través de las ondas de propagación de las explosiones, hay un impacto directo en las fracturas existentes en el paisaje, creando fracturas aptas para deslizamientos de tierra. El paisaje como entorno depende de las características de tracción.

Las ondas iniciales provocan la apertura de grietas alrededor de la carga y la fragmentación del material. Las vibraciones de las explosiones actúan como pequeños terremotos, como resultado de lo cual las redes de fallas se expanden y crean nuevas superficies de fallas potenciales para deslizamientos de tierra.

**c) Sobrecargas**

Este es una premisa que cambia el ambiente natural de las laderas, provocando esfuerzos cortantes en el suelo, especialmente si es alto en arcilla.

**d) Actividad minera**

La minería a cielo abierto y subterránea, junto con las canteras, provocan importantes movimientos superficiales. El nivel del suelo sube y baja.

**2.2.12.2 Parámetros de diseño de taludes**

Para verificar la estabilidad de diques naturales y artificiales, determinar mecanismos de falla y materiales a través de investigaciones geomorfológicas, geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas, análisis y modificación de estabilidad de diques. Es necesario determinar los parámetros de diseño reflejados en el formar una pendiente.

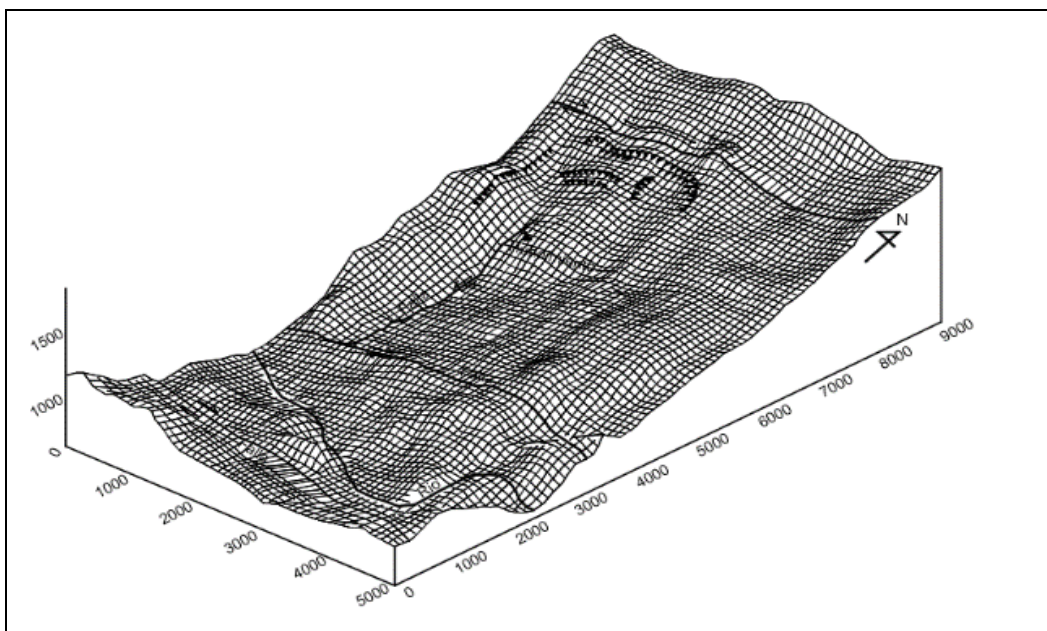
### 2.2.12.2.1 Parámetros Geotécnicos

Características del terreno de la pendiente:

La altura, la pendiente, la curvatura, el largo y el ancho, juntos o individualmente, determinan la magnitud de la fuerza total y la gravedad que provocan el movimiento y, por tanto, influyen en la estabilidad del talud. La topografía controla la tasa de erosión, infiltración y movimiento del agua a través de los materiales de la pendiente y puede influir en la disponibilidad de agua, lo que determina la aparición y la naturaleza del nivel freático. El nivel de tensión también está determinado por el volumen y ubicación del bloque o masa de material, este coeficiente depende de las características del terreno. (Suarez, 2009).

Dado que el mapa topográfico es una fuente de información para la detección de deslizamientos de tierra, es posible captar las ubicaciones de los deslizamientos de tierra en un amplio rango utilizando líneas de contorno, lo que facilita el trabajo de identificación. (Ver figura N°31)

**Figura 31**  
*Parámetros geométricos.*



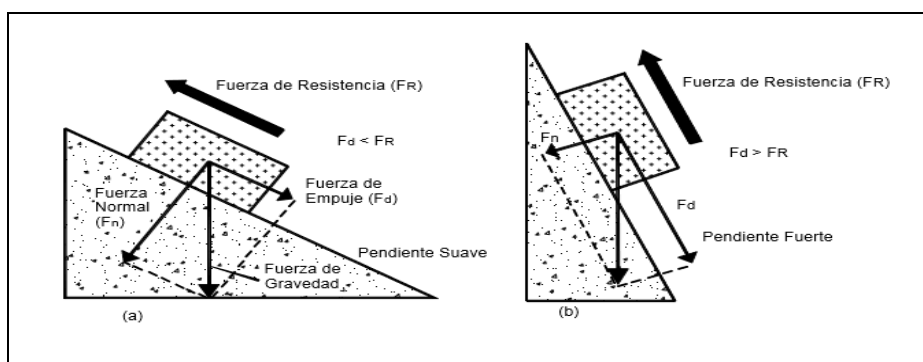
Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 42)

Los parámetros topográficos a estudiar son los siguientes:

### a) Pendiente

A medida que aumenta la pendiente, aumentan las fuerzas que desestabilizan la pendiente y disminuye el factor de seguridad. Es más probable que ocurran hundimientos y deslizamientos de tierra en pendientes empinadas. (Ver figura N°32).

**Figura 32**  
*Pendiente.*



*Fuente:* "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 43)

Se observa una característica de erosión más profunda en comparación con las pendientes más pronunciadas. Cada sección transversal tiene un ángulo de reposo que en condiciones climáticas determina la inestabilidad del talud. El resto de suelos son de origen magmático con pendientes superiores a los 45 grados. Para suelos como el de esquisto erosionado, la pendiente no debe exceder los 20°.

Mecánica de suelos. Skempton (1947) "En teoría, en condiciones secas, granuladas y limpias, el ángulo de inclinación de la pendiente con respecto a la vertical no debe exceder el ángulo de fricción del material.". (p. 160)

### b) Curvatura

La curvatura o concavidad del talud puede ser longitudinal o transversal. La concavidad de la pendiente afecta la capacidad de infiltración, el equilibrio de materiales y la erosión a través de la velocidad del agua que fluye a través del suelo.

### c) Largo - ancho

Cuanto más larga y ancha sea la pendiente, mayor será el rango de movimiento de la escorrentía y más susceptible será la pendiente a la erosión superficial.

### d) Áreas de infiltración

La concentración de agua en depresiones topográficas y áreas irrigadas es muy importante. Cuanto mayor sea la concentración, más impacto tiene el agua en la estabilidad de la pendiente.

## 2.2.12.2.2 Parámetros Geológicos

Los deslizamientos de tierra están asociados con las condiciones locales. Muchos factores geológicos importantes determinan la estabilidad. Cada grupo tiene sus propias características. Si la línea tiene varios tipos estratigráficos, se deben estudiar conjuntamente sus estructuras y discontinuidades:

### a) Formación geológica

Dichos insumos se clasifican de acuerdo a la formación y origen. (Ver tabla N°11)

**Tabla N° 11**

*Distintos materiales litológicos.*

Tipo de Material	Formación	Características	Detalles Prioritarios
Roca	Ígnea Metamórfica	Rocas formadas por cristales de minerales.	Estructura geológica. Fracturas.
	Sedimentaria (debe definirse el tipo de roca en la forma más detallada posible).	Rocas formadas por granos cementados, depositados en capas.	Planos de estratificación.
Roca meteorizada (saprolito)	Ígnea Metamórfica Sedimentaria	Permanecen algunos rasgos de la roca pero ésta se encuentra descompuesta en las discontinuidades.	Estructura geológica Discontinuidades Estado de meteorización.
Suelo	Residual	Roca meteorizada en la cual ya no aparecen las características físicas de la roca.	Estructura geológica. Discontinuidades. Propiedades físicoquímicas.
	Aluvial Coluvial. Glacial Loess	Grupos de partículas o bloques de suelo o roca.	Propiedades físicas.
Materiales heterogéneos	Roca, roca meteorizada, suelo.	Mezcla de diversos materiales en un mismo perfil.	Estructura geológica. Discontinuidades. Meteorización. Propiedades físicoquímicas.

Fuente: “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p. 340)



## b) Estructura y discontinuidades

Las discontinuidades y los movimientos estratificados crean un flujo de agua subterránea a través del suelo sobrante y las rocas erosionadas.

## c) Meteorización

La degradación física y química ocurre durante la meteorización, cambiando los parámetros de resistividad y permeabilidad. A medida que las rocas se rompen, sus ángulos de cohesión y fricción interna disminuyen, haciéndolas resbaladizas.

### 2.2.12.2.3 Parámetros Hidrogeológicos

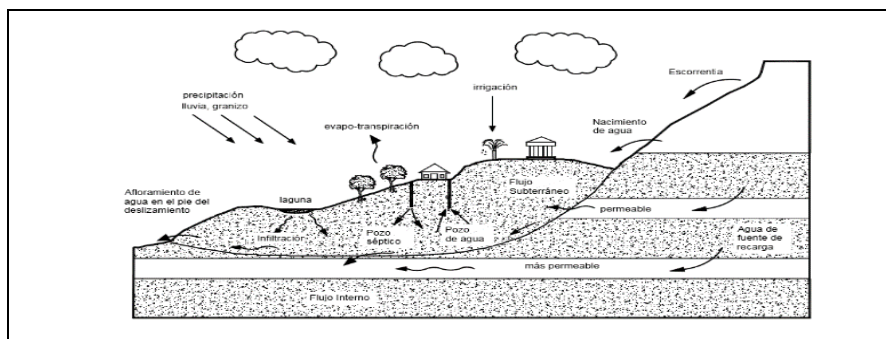
Es muy necesario el estudio hidrológico para investigar la inestabilidad y estabilidad de los taludes. La relación deslizamiento-agua proporciona una clara evidencia del efecto del agua en los deslizamientos de tierra. Varios parámetros están involucrados en el análisis hidrológico.

## a) Aguas subterráneas

Los vacíos de límite de grano y las grietas en la formación contienen agua, las litofacies permeables están alteradas, el agua subterránea se presenta principalmente en rocas sedimentarias, mientras que el principal portador de la mayor cantidad de clase de agua subterránea es la piedra caliza, los depósitos de material no están cementados, tienen mayor cantidad de agua - capacidad de retención. (Ver Fig. N° 33).

### Figura 33

*Aguas subterráneas.*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 209)

### b) Comportamiento hidrogeológico de los materiales

El agua puede viajar largas distancias y tiene un impacto significativo en los materiales absorbentes.

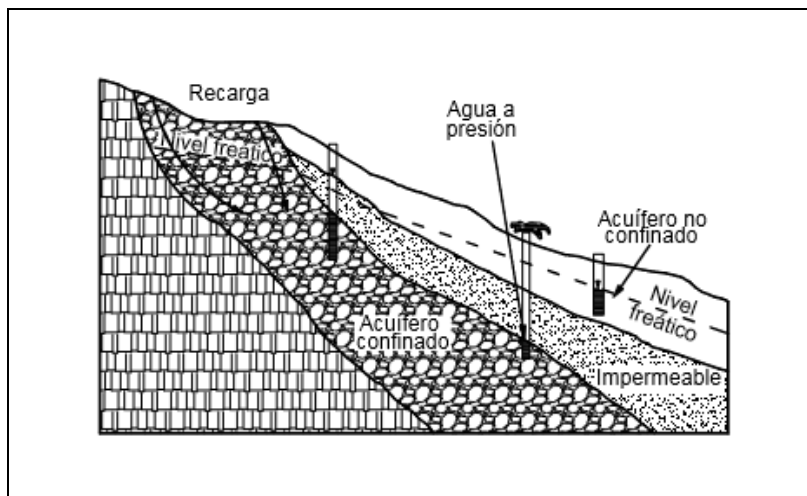
Los estudios hidrológicos son importantes para determinar el efecto de la presión del agua sobre los materiales.

### c) Niveles freáticos y piezómetros

Nivel hidrostático: donde el punto coincide con la atmósfera. La presión del agua es igual a la presión atmosférica, el nivel del barómetro depende de la altitud sobre el plano horizontal y la presión puntual también se desvía del plano horizontal. (Ver Fig. N° 34)

#### Figura 34

*Niveles freáticos y piezométricos.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 234)*

### d) Porosidad

El volumen encerrado por los poros se define como porosidad o volumen vacío. El índice de porosidad es la relación entre el volumen de la fase sólida y el volumen del poro. La porosidad del material depende de muchos factores, como su ubicación, forma y tamaño. De manera similar, los tipos de poros varían desde poros primarios hasta poros erupcionados.

### **e) Permeabilidad**

La permeabilidad se llama conductividad hidráulica y se define como la propiedad por la cual los líquidos dentro de un material pueden filtrarse a través de los poros. La permeabilidad se mide tanto in situ como en el laboratorio, y las mediciones dependen de las variaciones en el tamaño de las partículas y la composición del material.

#### **2.2.12.2.4 Parámetros Geotécnicos**

Luego de obtener los parámetros topográficos y geométricos relacionados con temas de estabilidad, el siguiente paso es obtener los parámetros que afectan la estabilidad del material mediante estudios de campo y pruebas de laboratorio. El método para calcular el ajuste de pendiente se basa en la teoría de la ecuación de límites, que utiliza cortante y resistencia superficial.

#### **a) Clasificación de tipos de materiales**

##### **Suelos:**

Estos son materiales que pueden difundirse fácilmente debido a influencias externas, químicas o físicas.

Hay varias formas de clasificar estos materiales según su composición, tamaño de grano y ductilidad. Los tipos de suelo incluyen suelo cohesivo, suelo que requiere fuerza para separar las partículas y suelo no cohesivo, que sólo se pega cuando está ligeramente húmedo. También existen suelos compactados y pre compactados que se forman cuando el área se somete a presión vertical. Los suelos que contienen partículas grandes y pequeñas están representados por grava, arena, limo y arcilla. (Ver Tabla N° 12).

##### **Rocas:**

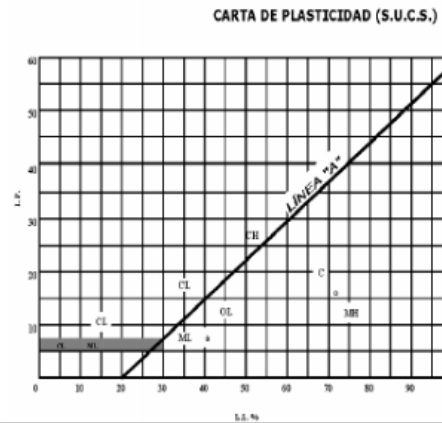
Desde el punto de vista geológico, existen diferentes tipos de rocas como las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Es importante conocer el estado de la roca y determinar si es una roca sana o una que ha cambiado. (Ver tabla N° 12 y N° 13).

**Tabla N° 12**

*Clasificación de suelos acorde a criterio mecánico.*

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO			
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GROSERA PASA POR LA MALLA N.º 4	GRAVAS MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GROSERA RETENIDA POR LA MALLA N.º 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u$ : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA $C_c$ : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))$		
			GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.	
		ARENAS MÁS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GROSERA PASA POR LA MALLA N.º 4	GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM d	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de fontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	$C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW	
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
		ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM d	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de fontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
				SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
		SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad
					CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	OL			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
	MH			Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.			
	CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS			OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
				P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		



Fuente: Geotecnia - <http://sites.ieee.org/panama>

**Tabla N° 13***Tabla de clasificación de rocas*

ÍGNEAS	ÁCIDAS	DE GRANO GRUESO	-Granito-Diorita
		DE GRANO FINO	-Andesita-Riolita
	BÁSICAS	DE GRANO GRUESO	-Gabro
		DE GRANO FINO	-Basalto
	NO GRANULARES		-Pedernal-Obsidiana
SEDIMENTARIAS	DE GRANO GRUESO		-Conglomerado-Brecha -Pudinga
	DE GRANO FINO		-Arenisca-Ortocuarcita-Arcosa-Grauvaca -Limolita-Arcillita
	NO GRANULARES		-Caliza-Dolomita
	CRISTALINAS		-Yeso-Anhidrita
METAMÓRFICAS	DE GRANO GRUESO		-Gneis
	DE GRANO FINO		-Pizarra-Esquisto
	NO GRANULARES		-Cuarcita-Mármol

Fuente: Geotecnia - <http://sites.ieee.org/panama>

## b) Resistencia a la cortante de los suelos

La resistencia de la partícula al esfuerzo cortante permite la carga y descarga sin introducir inestabilidad. De hecho, las capas de suelo saturadas se diferencian de las superficies de agua por la presencia de partículas sólidas. Es imposible para los humanos pararse sobre líquidos porque no pueden soportar las fuerzas de cizallamiento.

### Mecanismos de resistencia

Los suelos pueden resistir fuerzas de corte resistiendo el contacto entre partículas y la perturbación por dispositivos estructurales que promueven el desplazamiento relativo entre partículas. Por lo tanto, la resistencia al corte del suelo depende de dos factores: arrastre y unión entre partículas. El arrastre de partículas está determinado por la presencia de fricción entre partículas y enlaces físicos y químicos entre partículas (cohesión). El entrelazamiento es la resistencia adicional que surge de diferentes disposiciones de partículas.

### Angulo de fricción

El ángulo de fricción se expresa como el coeficiente de fricción y corresponde al ángulo de reposo para suelos granulares y cero para suelos arcillosos. Este ángulo está determinado por muchos factores, que incluyen: B. Tipo, forma, tamaño, densidad y presión de partícula. El ángulo se obtiene de la combinación de todos los elementos.

## **Cohesión**

La fuerza cohesiva describe la resistencia a la corte ejercida por las partículas.

Los suelos granulares sin material adherido tienen cohesión cero y se denominan suelos de fricción.

### **c) Investigación Geotécnica**

Los estudios geotécnicos tienen un alcance más amplio para determinar las propiedades y parámetros necesarios para estudiar el comportamiento del suelo.

Actualmente existen varias técnicas que permiten un aprovechamiento óptimo de los resultados del procesamiento. Se debe llevar a cabo una variedad de técnicas de levantamiento para recopilar la información necesaria para determinar los fenómenos de estabilidad de taludes.

### **Calicatas**

Se realiza en secciones que pueden ser fácilmente excavadas con máquina o herramientas manuales. Las dimensiones dependen del ancho de la información que se necesita extraer del material de campo.

### **Sondeos Mecánicos**

Estos se generan en ondas que se dividen en ondas batientes o giratorias, lo que le permite ver el terreno y su profundidad. La recogida de datos va acompañada de normas técnicas según el tipo de suelo. Los suelos pueden penetrar todo tipo de materiales, por lo que existen sondeos rotacionales, sondeos de percusión, barreras espirales y más.

### **Prospección Geofísica**

Estas son técnicas de investigación que complementan las pruebas de campo e incluyen métodos eléctricos, sísmicos y magnéticos.

## Ensayos geotécnicos in situ

Son muy importantes para determinar las propiedades del suelo. Estos requieren una mayor cantidad de material, por lo que representan mejor las condiciones del suelo. Las pruebas de campo están representadas por pruebas tales como penetración estándar, penetración dinámica y carga puntual.

### 2.2.12.3 Análisis de estabilidad de taludes

#### 2.2.12.3.1 Introducción

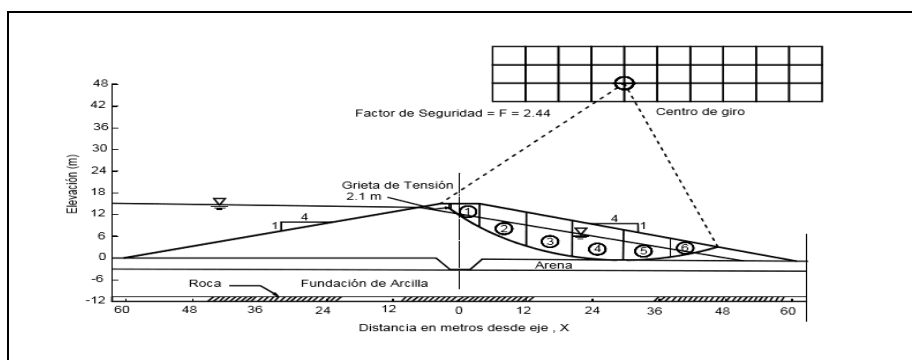
Según Suárez (2009), el modelado matemático de diques es parte de la práctica geotécnica para analizar la estabilidad de diques naturales y la seguridad y funcionalidad de la construcción de diques artificiales. Existen muchos métodos de modelado matemático, según el propósito del análisis y el resultado deseado. (p. 126) (Ver figura N°35).

Los principales objetivos del análisis de estabilidad son:

- Brinda la condición de inestabilidad de los taludes
- Realiza la investigación de los mecanismos de falla.
- Se encarga de determinar los distintos mecanismos de activación de un talud.
- Se encarga de realizar variadas opciones de estabilización.
- Realizar diseños de muro de contención con seguridad y económicos.

### Figura 35

*Análisis de estabilidad de taludes.*



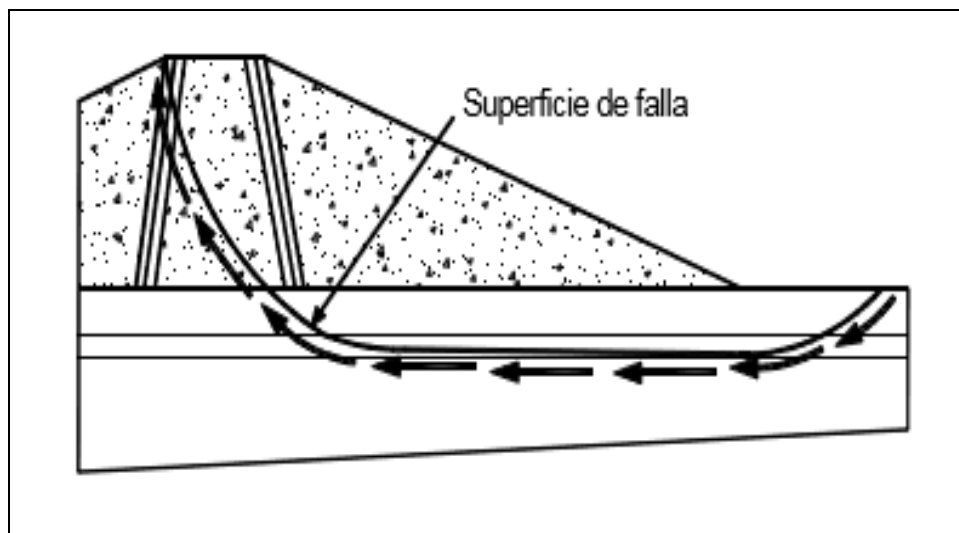
Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 127)

### 2.2.12.3.2 Superficie de falla

El término "área de colapso" se refiere a áreas donde se supone que pueden ocurrir deslizamientos y fallas de taludes. Sin embargo, si el terraplén se diseña adecuadamente, tal deslizamiento y falla no ocurrirán en estas superficies. El método del límite de equilibrio asume que el factor de seguridad es el mismo en todos los puntos a lo largo de la superficie de falla. Por tanto, este valor representa la media de los valores totales sobre toda la superficie, y si se produce la rotura, el esfuerzo cortante será el mismo en todos los puntos a lo largo de toda la superficie de rotura. En general, cuando hay un gran número de áreas de falla, se considera que se encuentra el área de falla con el mínimo factor de seguridad, y esta se denomina "área de falla mayor". Esta superficie de falla crítica es la superficie más propensa al deslizamiento.

Sin embargo, pueden existir otras zonas dañadas con un factor de seguridad ligeramente superior, que también deberían tenerse en cuenta en el análisis. (Suarez, 2009, p. 131) (Ver figura N°36).

**Figura 36**  
*Superficie de falla.*



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 131)



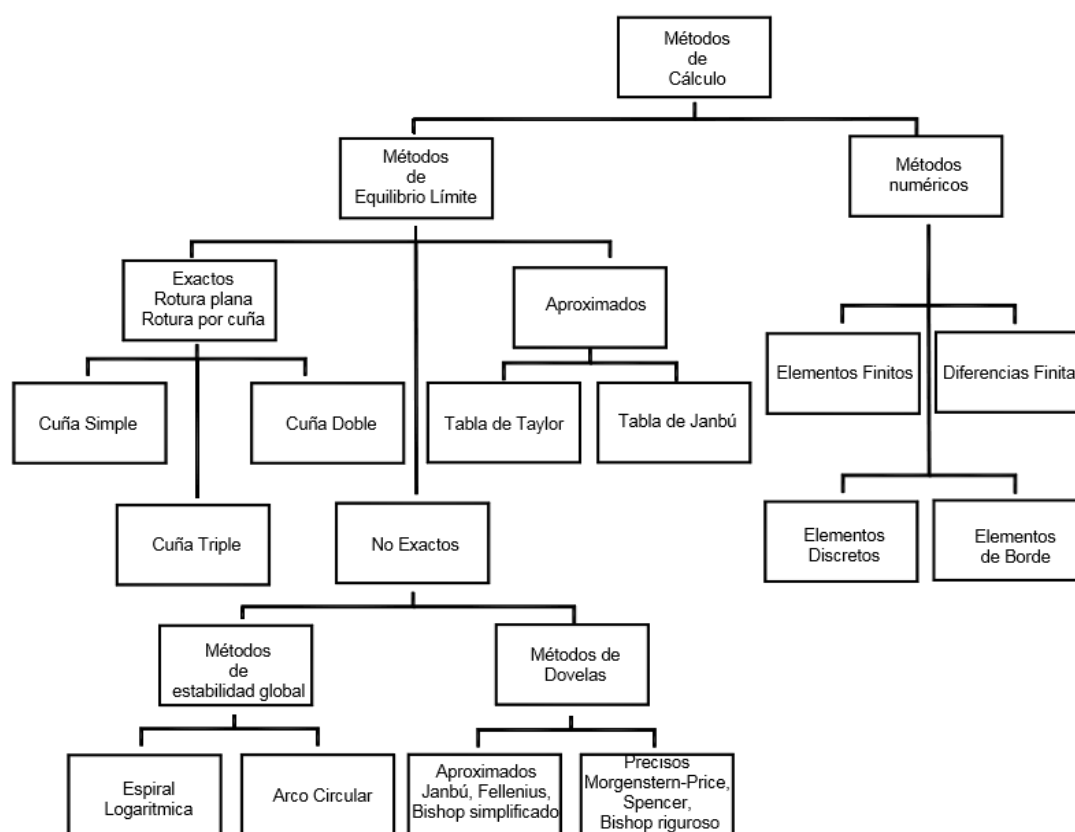
Puede explorar planos, círculos, superficies logarítmicas, paraboloides y combinaciones de los mismos. Ya hace unos años se han generado una variedad de modelos de superficies de fractura no geométrica.

### 2.2.12.3.3 Método de Cálculo

La variedad de modelos computacionales para realizar análisis de estabilidad se clasifica de esta manera: (Ver figura N°37).

**Figura 37**

*Clasificación de variedad de métodos de cálculo*



*Fuente:* Elaboración propia (2019).

### Método de Cálculo numérico

Consideran la cantidad de deformación del suelo y las leyes de la estática. Los métodos matemáticos son complejos en su funcionamiento, pero utilizamos métodos como elementos finitos, elementos diferenciales, elementos y diferencias finitas.

## Métodos de Equilibrio limite

Se basan en leyes estáticas que determinan el equilibrio de masas potencialmente inestables. Estos métodos suponen que, si se produce una fisura, la resistencia es la misma en toda la región de la fisura.

**Tabla N° 14**

*Métodos numéricos de análisis de estabilidad de taludes.*

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\phi = 0$ ).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

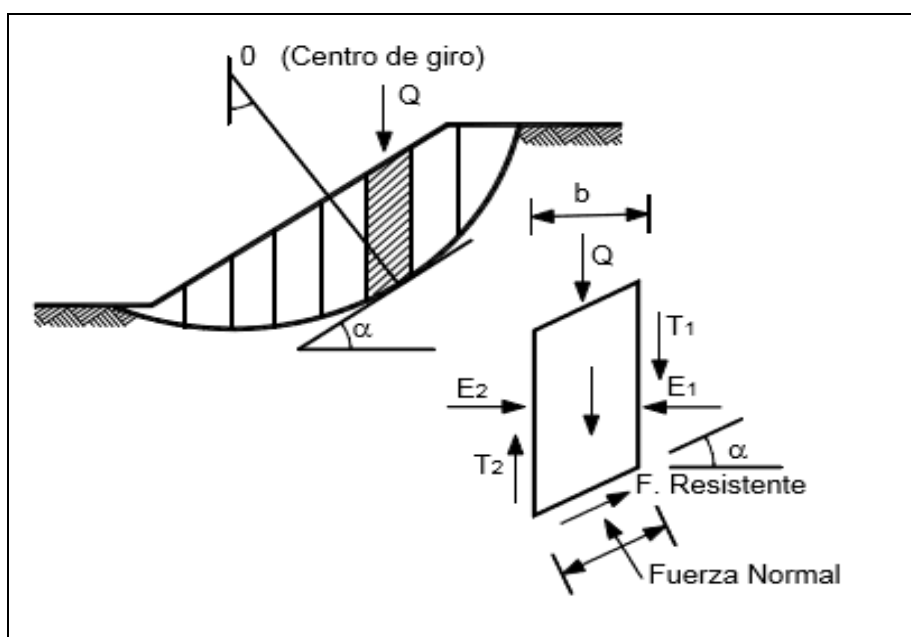
*Fuente:* “Deslizamientos - Análisis Geotécnico”, por Suarez (2009, p. 130)

### Métodos de Equilibrio límite (MEL) (Dovelas)

La mayoría de las tomografías curvas o circulares separan la superficie del plano del defecto del disco. El número de tramos depende del tipo de pendiente y de la precisión requerida para el análisis. Cuanto mayor sea el número de cortes, más evidente será el efecto. (Suarez, 2009, p. 153) (Ver figura N°38).

**Figura 38**

*Fuerzas que actúan sobre una bóveda.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 154)*

Existen una variedad de modelos usados por dovelas:

#### a) Método de Fellenius

El modelo de Fellenius, también conocido como modelo sueco, mide las fuerzas en cada dirección, normal y tangencial a la superficie de fractura. Esto da el efecto de la fuerza normal. (N).

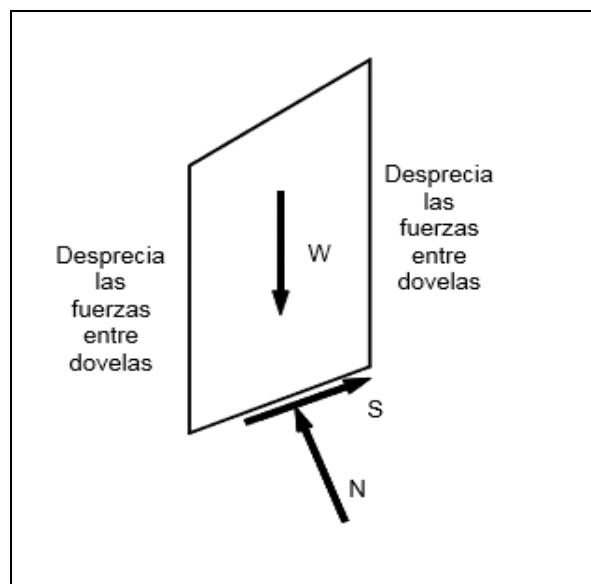
Fellenius tiene las siguientes características:

El método conserva los resultados, donde los valores de sus F.S. son bajos.

En general este método brinda resultados poco confiables. (Ver figura N°39).

**Figura 39**

Muestra de las fuerzas que actúan en una dovela por método de Fellenius



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 155)

La expresión para el cálculo del F.S. según el método de Fellenius es:

(Ver figura 40):

**Figura 40**

Cálculo de F.S Método Fellenius.

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

Donde:

$\alpha$  = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada.

u = Presión de poros =  $\gamma w h w$

$\Delta l$  = longitud del arco de círculo en la base de la tajada

C',  $\phi'$  = Parámetros de resistencia del suelo.

La ecuación anterior se conoce como ecuación de Fellenius.

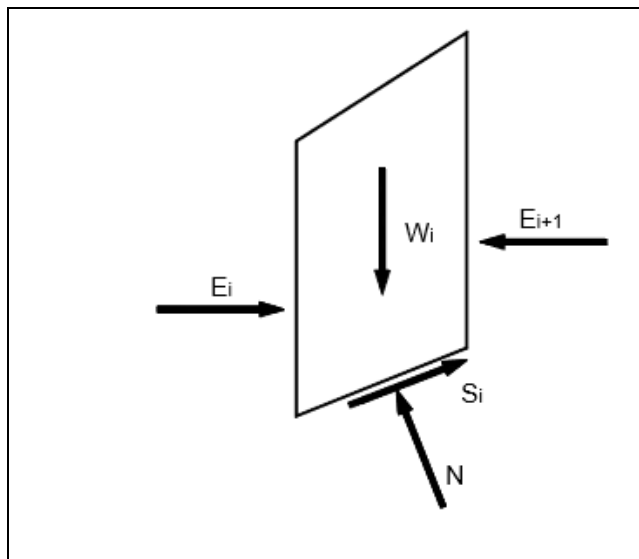
Fuente: Elaboración propia (2019).

## b) Método de Bishop

En el método de Bishop, las fuerzas se equilibran en cada corte en las direcciones vertical y horizontal y se obtiene el valor de la fuerza normal (N). (Ver figura N°41)

**Figura 41**

*Fuerzas actuantes según el método de Bishop.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 155)*

La expresión para el cálculo del F.S. según el método de Bishop es: (Ver figura N°42):

**Figura 42**

*Cálculo FS Método Bishop.*

$$F.S. = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

Donde:

$\Delta l$  = longitud de arco de la base de la dovela|

W = Peso de cada dovela

c', f = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela =  $\gamma w \times h w$

$\alpha$  = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

*Fuente: Elaboración propia (2019).*

El cálculo es obtenido mediante iteración, donde se tendrá que tener en cuenta que el FS se encuentra en ambos lados de la ecuación.

El método de Bishop es un método ampliamente utilizado para calcular FS. Este método determina el equilibrio de momentos y los resultados son más precisos en comparación con otros métodos.

### c) Método de Janbú

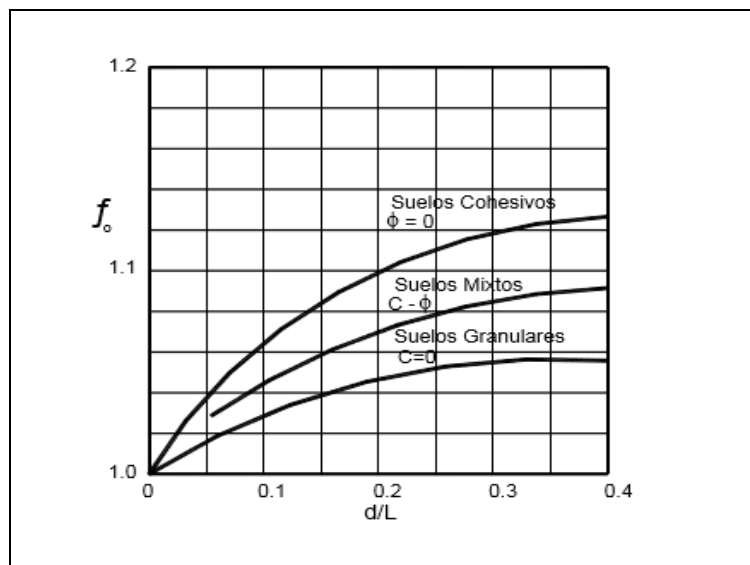
Janbú ejecuto un método generalizado y riguroso para calcular toda la variedad de ecuaciones de equilibrio. Un terrón de tierra se divide en rebanadas infinitamente pequeñas, y dentro de cada rebanada existe un equilibrio de momentos y fuerzas. (Ver Figura N°43).

Use el balance de fuerza horizontal como una medida de la estabilidad total de la masa. Janbú definió el factor de seguridad como:

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)}$$

**Figura 43**

*FS Método de Jambu*



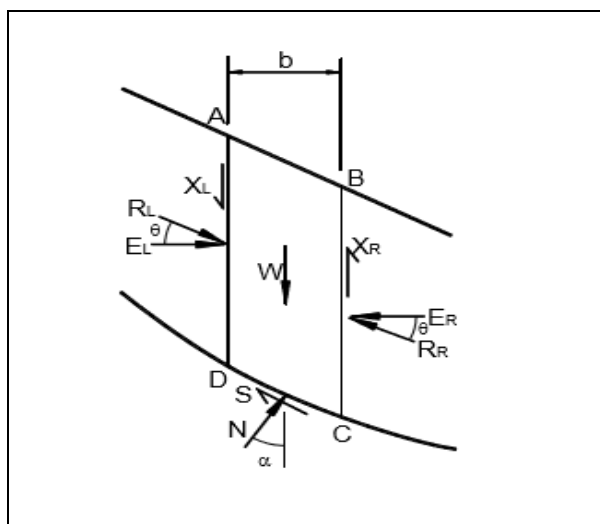
Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 156)

#### d) Método de Spencer

El método de Spencer es muy estricto porque pretende satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio y no ignora las fuerzas entre los discos. En el método plano anterior, FS se calcula únicamente a partir de la ecuación de equilibrio de fuerzas. El método del área circular hace una suposición simple sobre la fuerza entre los discos, pero utiliza una ecuación de equilibrio de momentos. (Ver Figura N° 44 - Figura N° 45).

#### Figura 44

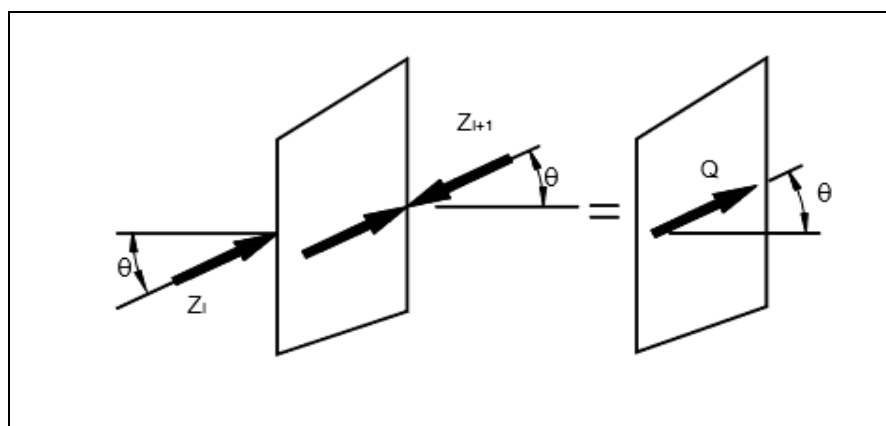
*Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método Spencer.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 157)*

#### Figura 45

*Paralelismo de fuerzas entre dovelas en el Método Spencer.*



*Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 156)*

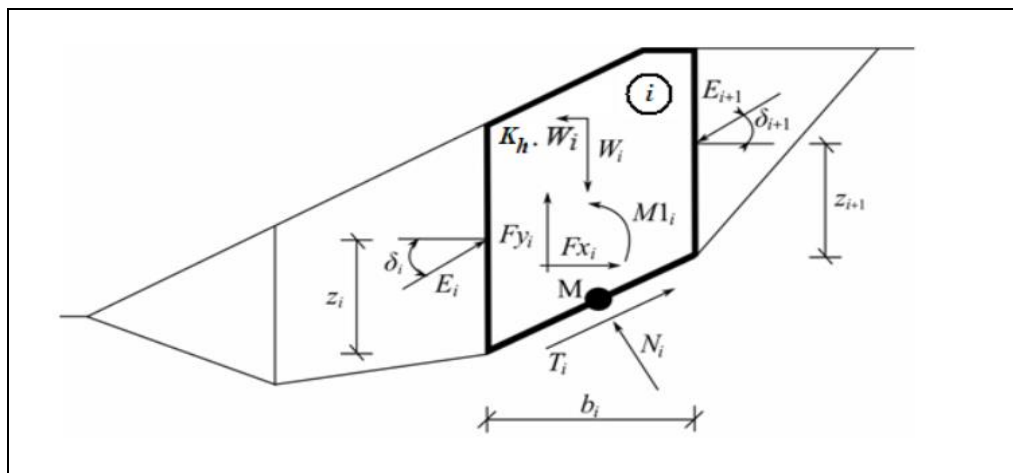
### e) Método de Morguenstern y Price

Morguenstern y Price desarrollaron el método de equilibrio más común para cualquier superficie. (Ver figura N°46).

La fuerza que actúa sobre el microdisco se expresa como:

#### Figura 46

Esquema estático Morguenstern y Price.



Fuente: "Deslizamientos - Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 160)

Para definir el problema estáticamente, Morguenstern y Price descubrieron que se suponía que la pendiente de la fuerza resultante que seguía la ecuación era variable.

#### 2.2.12.4 Correccionamiento de taludes

Después de estudiar el riesgo de seguridad y la vulnerabilidad de una presa en particular, se aplican medidas correctivas a la presa existente y se evalúan diferentes soluciones económicas y de mantenimiento para encontrar las soluciones adecuadas al problema de vulnerabilidad.

Existen cuatro niveles de manejo y manejo de taludes en función de la geometría, el drenaje, el coeficiente de arrastre y el manejo de la superficie.

Cuando la estabilidad del terraplén es incierta, la forma del terraplén se modifica para obtener nuevas configuraciones geométricas que son importantes para el proceso de estabilización. El propósito de las modificaciones



geométricas es reducir las fuerzas cinéticas generadas dentro de la masa y aumentar la resistencia al corte del terreno, aliviando así el estrés en las regiones inestables. Hay varios enfoques para la corrección de la geometría. Así es como las geometrías pueden mejorar la estabilidad del terraplén.

#### 2.2.12.4.1 Corrección por modificación de geometría

Cuando la estabilidad del terraplén es incierta, la forma del terraplén se modifica para obtener nuevas configuraciones geométricas que son importantes para el proceso de estabilización. La modificación de la forma tiene como objetivo reducir las fuerzas cinéticas generadas dentro de la masa y aumentar la resistencia al corte del terreno, aliviando así el estrés en áreas inestables. Hay varios enfoques para la corrección de la geometría.

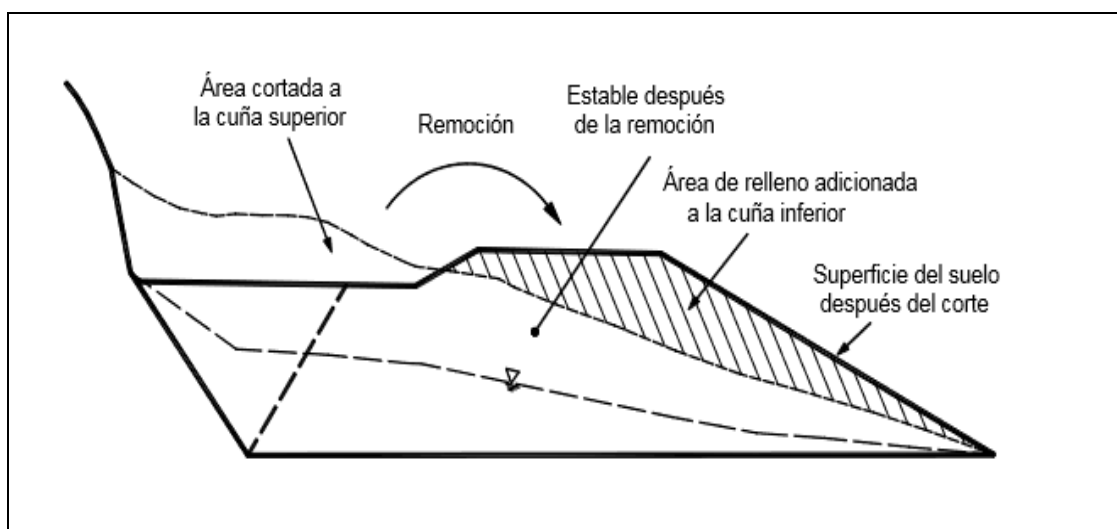
Así es como se puede usar la geometría para mejorar la estabilidad de taludes:

##### a) Eliminación de masa potencialmente inestable

Consiste en la extracción completa de la parte superior de la masa potencialmente inestable. Esta es una solución drástica y solo debe usarse como último recurso, pero es importante en la mayoría de los casos. (Ver Fig. N° 47).

#### Figura 47

*Eliminación de masa inestable.*



Fuente: "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 15)

### b) Perfilado de taludes

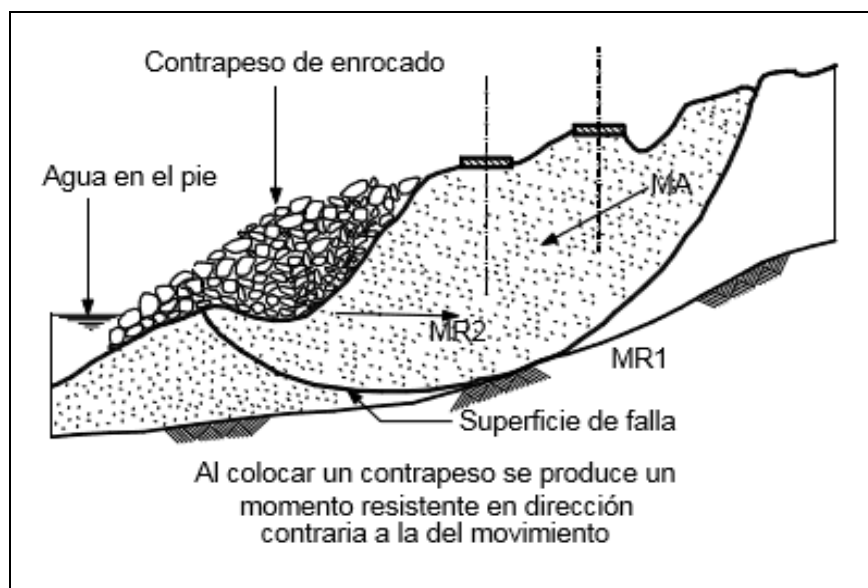
Las pendientes y los terraplenes se contornean para eliminar los surcos y los desniveles que causan. Las obras viales se realizan en paralelo con las obras de drenaje e hidráulicas. El perfilado comienza en la parte superior de la pendiente y redondea la parte superior de la pendiente para controlar el acceso de escorrentía a la pendiente mientras se controla la humedad del suelo para mantener la plasticidad del material que forma la pendiente. El perfilado de pendientes corrige pendientes pronunciadas y mejora la estabilidad y el crecimiento de la vegetación.

### c) Construcción de tacones de tierra o escollera.

Dependiendo de la naturaleza del material, el hombro se une a la parte superior del terraplén. Al usar el mismo material para el talón de pendiente superior y el talón de pendiente inferior, los costes de material se reducen considerablemente. El peso sobre el talón del pie aumenta la tensión resistiva en la parte inferior del suelo. La cantidad de aumento depende del ángulo de fricción interna. (Ver Figura N° 48).

#### Figura 48

*Efecto de un tacón sobre la resistencia del suelo.*



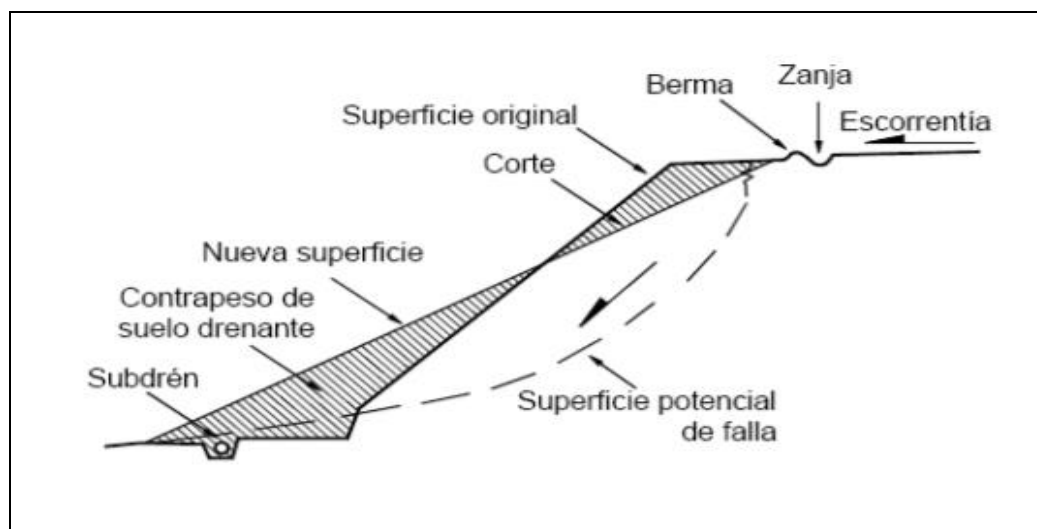
Fuente: "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 16)

#### d) Bermas

El corrido de bermas es una acción correctora de deslizamientos en taludes naturales. Tiene el efecto de facilitar el proceso de construcción y el trabajo de remoción de taludes. Las bermas reducen la erosión de la pendiente al retener la caída de rocas y el material no deseado, lo que aumenta la presión del agua intersticial. (Ver Figura N° 49).

#### Figura 49

*Construcción de Bermas.*



*Fuente: "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 54)*

#### 2.2.12.4.2 Corrección por drenaje

Al modificar un talud mediante drenaje, el objetivo principal es reducir la presión intersticial del agua que actúa sobre la superficie de la fractura, aumentando su resistencia y reduciendo las fuerzas desestabilizadoras del talud. Si hay signos evidentes de inestabilidad, la acción correctiva suele ser realizar un drenaje.

Los trabajos de construcción preservarán la condición del sitio. El costo de las medidas tomadas variará en cada caso, dependiendo del estudio hidrológico a realizar y la escala del proyecto. Sin un estudio hidrológico detallado, el tratamiento de aguas residuales no será efectivo durante el transporte de agua.

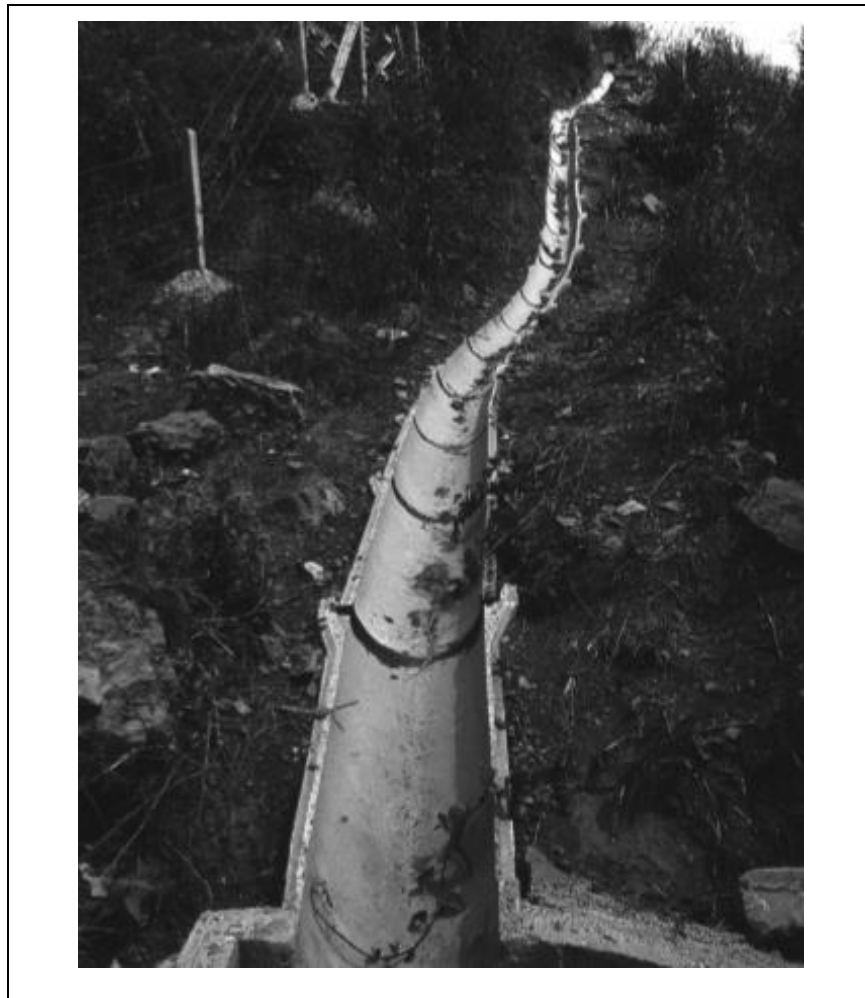
Hay dos tipos de aplicaciones de drenaje:

**Drenaje superficial:**

El principal objetivo del drenaje superficial es mejorar la estabilidad de los taludes reduciendo las filtraciones y previniendo la erosión. Los sistemas de recolección de agua superficial deben capturar la escorrentía tanto de la pendiente como de la cuenca en la pendiente y transportarla a un lugar seguro lejos de la pendiente donde se requiere protección. Si es posible, el flujo debe desviarse antes de que entre en una zona de deslizamiento o fluya hacia abajo por una pendiente. (Suarez, 2009, p.62) (ver Figura N° 50).

**Figura 50**

*Drenaje de Taludes.*



*Fuente:* “Deslizamientos - Técnicas de Remediación”, por Suarez (2009, p. 50)

La variedad de drenaje superficial consiste en: (Ver tabla N°15).

**Tabla N° 15**

*Método de análisis de estabilidad de taludes con drenaje.*

<b>Tipos de Obra de Drenaje Superficial</b>	<b>Características</b>
Canales para redireccionar el agua de escorrentía	Se debe impedir que el agua de escorrentía se dirija hacia la zona inestable.
Zanjas de corona	Son zanjas interceptoras de la escorrentía en la parte alta del talud.
Diques en la corona del talud	Son diques en relleno, colocados arriba de la corona, con el objeto de desviar hacia los lados las aguas de escorrentía.
Drenes Franceses	Son zanjas rellenas de material granular grueso que tienen por objetivo captar y conducir las aguas de escorrentía.
Trinchos o Cortacorrientes	Consisten en diques a través del talud para desviar lateralmente, las aguas de escorrentía.
Torrenteras	Son estructuras que recogen las aguas de los canales, diques o cortacorrientes y las conducen hacia abajo
Sellado de grietas con arcilla o mortero	El objeto es impedir la infiltración de agua hacia el deslizamiento.
Imprimación del talud con asfalto o impermeabilización con mortero.	La impermeabilización tiene por objeto evitar los cambios de humedad en el suelo.
Recubrimiento con plásticos	Aunque el recubrimiento no impide la infiltración, sí protege contra el impacto de las gotas de lluvia, disminuye los volúmenes de agua infiltrada y mantiene la humedad natural.

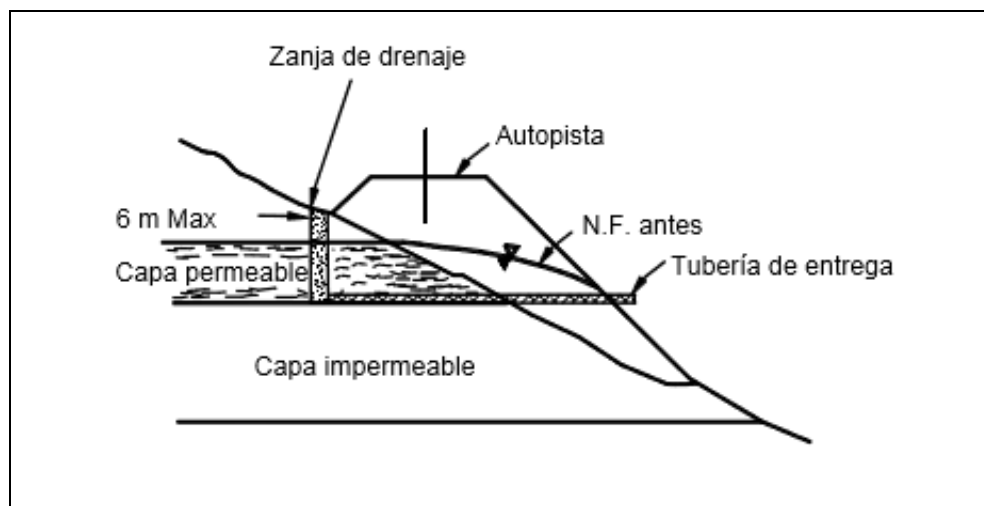
*Fuente:* “Deslizamientos - Técnicas de Remediación”, por Suarez (2009, p. 27)

### **Subdren**

La tecnología de aguas subterráneas o tecnología de drenaje subterráneo es una de las formas más efectivas de reducir la erosión del suelo. El drenaje subterráneo tiene como objetivo reducir la presión del agua intersticial o evitar que aumente. Cuanto más profundo es el pozo de agua, más fuerte es el suelo. El diseño de edificios secundarios es complicado porque muchas líneas no son suficientes para seguir el drenaje secundario, lo que dificulta la

aplicación de principios simples al diseño de áreas de drenaje secundario. El flujo de agua en las pendientes suele ser desigual y difícil. (Suarez, 2009, p.62) (ver Figura N° 51).

**Figura 51**  
*Subdren*



*Fuente:* “Técnicas de remediación-Deslizamientos”, por Suarez (2009, p. 28)

Entre la variedad de obra que se utiliza para subdrenes están los siguientes: (Ver tabla N°16).

**Tabla N° 16**

*Métodos de subdrenaje.*

Métodos de subdrenaje	Características
Subdrenes de zanja.	Los subdrenes de zanja tienen por objeto abatir los niveles freáticos.
Subdrenes de penetración.	Son subdrenes horizontales profundos que logran grandes abatimientos de los niveles
Colchones de drenaje.	Se colocan debajo de los terraplenes o llaves de cortante, para impedir el ascenso de los
Drenes verticales de alivio.	Consisten en perforaciones verticales del drenaje para disipar las presiones de poros.
Galerías de drenaje.	Son túneles con objeto de disipar las presiones de poros y disminuir los niveles
Drenes de pantalla.	Son colchones inclinados de drenaje para evitar que en los afloramientos de agua

*Fuente:* “Deslizamientos - Técnicas de Remediación”, por Suarez (2009, p. 29)

### 2.2.12.4.3 Corrección por drenaje

El uso de elementos de contención para remediar o prevenir deslizamientos está muy extendido. El funcionamiento de las estructuras es sencillo, la estructura de frenado incluye una superficie de frenado conformada o perfilada. La construcción de este tipo de elementos suele ser costosa y los resultados de este tipo de estructuras suelen ser decepcionantes por problemas de drenaje. Los edificios se levantan generalmente al pie de las laderas. Actualmente se utilizan varios métodos de almacenamiento.

#### a) Anclajes

Deslizamientos de tierra - Suarez (2009) “Los anclajes son instalaciones capaces de soportar cargas de tracción hasta la profundidad de la subrasante” (p. 149).

El problema del deslizamiento muchas veces se solucionaba mediante el uso de soportes baratos, a diferencia de este método que se utilizaba en suelos blandos con alta presión, los soportes suelen consistir en cables de acero unidos a la estructura de soporte. (Ver Fig. N° 52) (Ver Tabla N° 17)

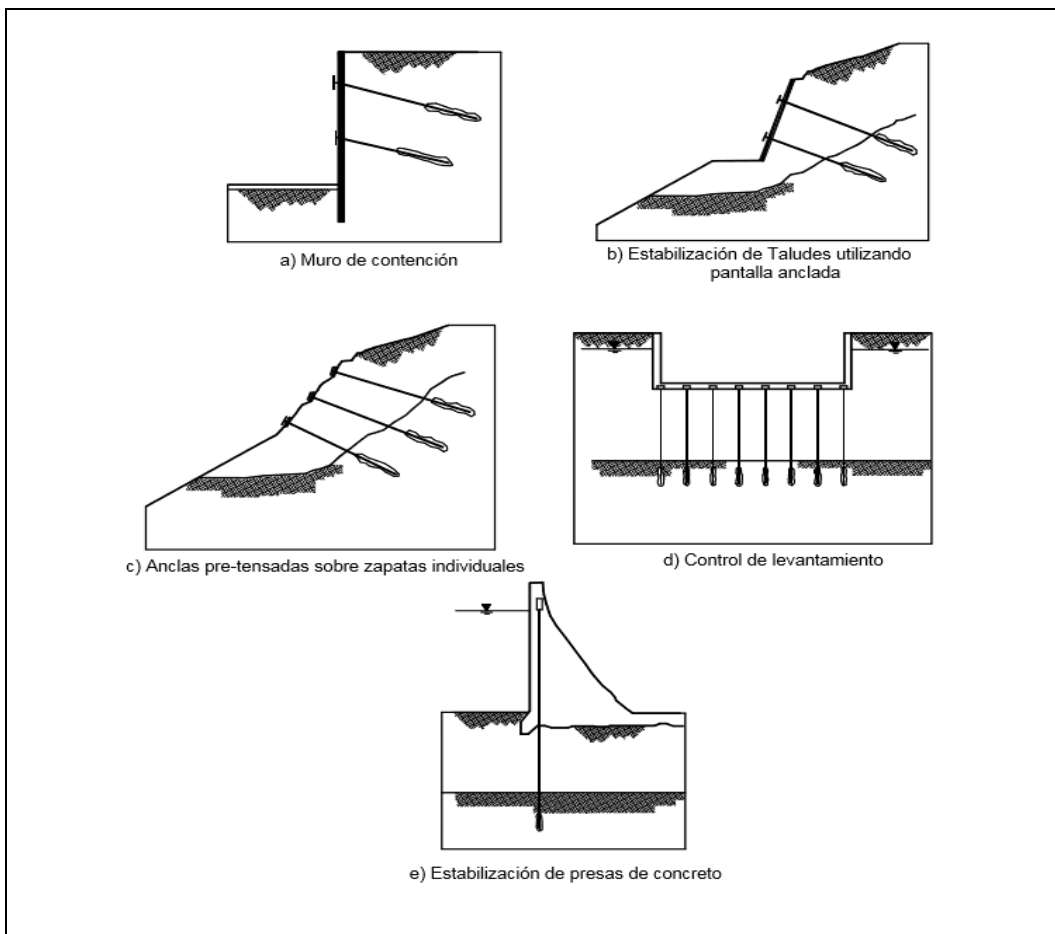
**Tabla N° 17**

*Tipos de anclajes.*

Tipos de estructuras ancladas	Características
Muros de gravedad o semigravedad.	Las estructuras de gravedad son muros de concreto armado, a los cuales se les adicionan anclas pre-tensadas a varios niveles de altura.
Pantallas	Son pantallas delgadas de concreto armado, las cuales se pueden construir utilizando concreto proyectado o fundidas en el sitio. A las pantallas de concreto se les colocan hileras de anclas a varios niveles. Las pantallas también pueden ser preexcavadas utilizando el sistema de “slurry wall”.
Tablestacas	Estructuras delgadas enterradas, metálicas o de concreto armado, ancladas en su parte superior. Una variante del sistema son los pilotes tangentes/ secantes.
Anclas Apoyadas en Bloques	En la estabilización de taludes estas estructuras también pueden ser zapatas, bloques individuales o vigas superficiales para la aplicación de las cargas de anclaje. La técnica de utilizar anclajes individuales múltiples unidos cada uno a una zapata independiente en la superficie del terreno, se le denomina como “muros de elementos”.

*Fuente:* “Deslizamientos - Técnicas de Remediación”, por Suarez (2009, p. 151)

**Figura 52**  
*Anclajes en taludes.*



*Fuente:* "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 150)

### **b) Estructuras de contención y gravedad**

Las estructuras de soporte tradicionales dependen únicamente del peso.

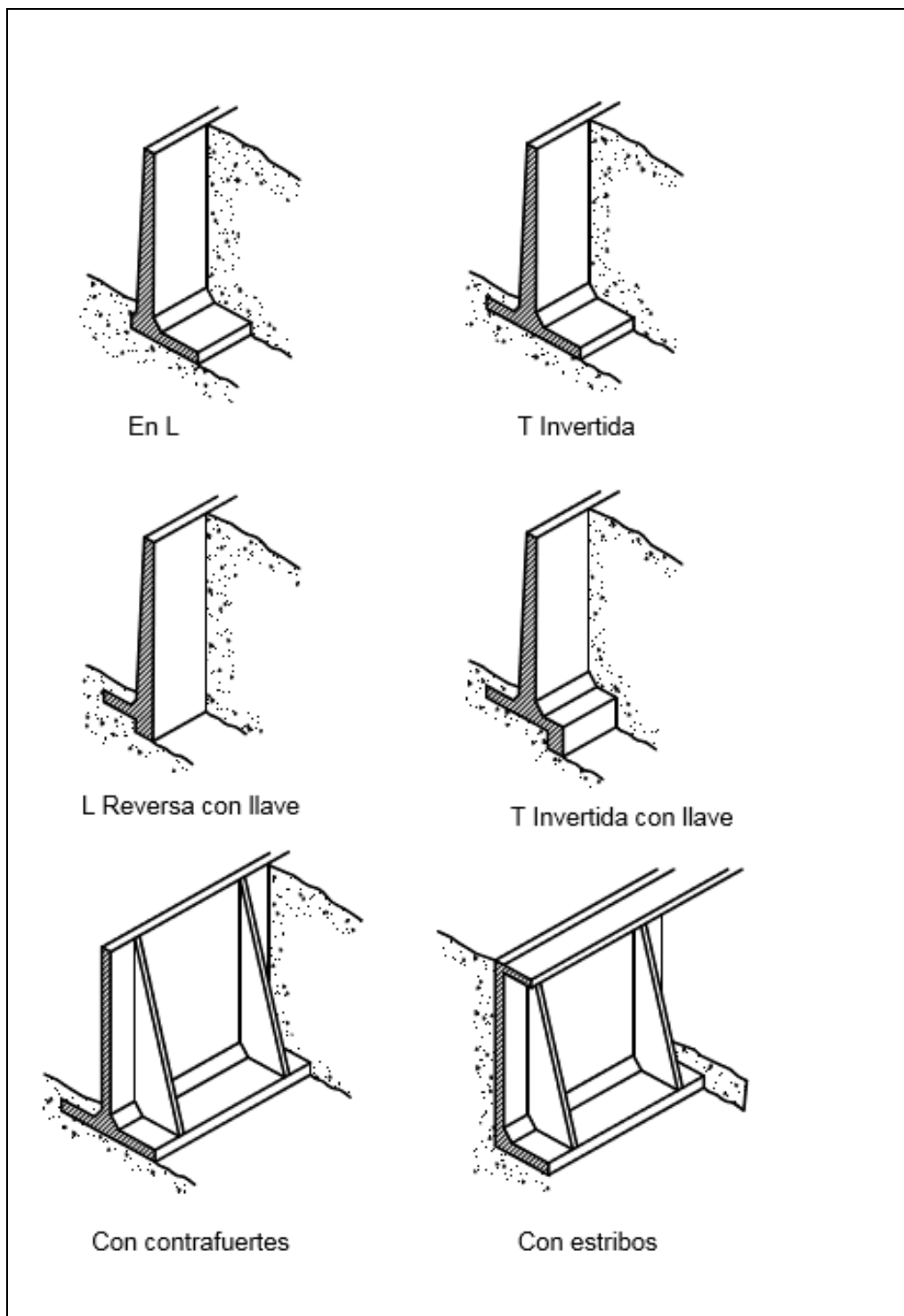
El elemento recibe cargas horizontales del suelo. La altura del muro es limitada porque depende del área de los cimientos y los muros a menudo se construyen en pendientes para evitar la erosión del suelo. La energía producida por el suelo es muy grande debido a la inestabilidad del suelo. Los muros funcionan bien contra pequeñas cantidades de barro, pero su construcción suele ser poco práctica debido al costo de construcción y mantenimiento. Hay dos tipos de paredes de pesas: Muros duros, formados por muros de hormigón armado y muros de hormigón regular y muros blandos.



(Ver Figura N° 53 - Dibujo N°. 55) (Ver Cuadro N° 17).

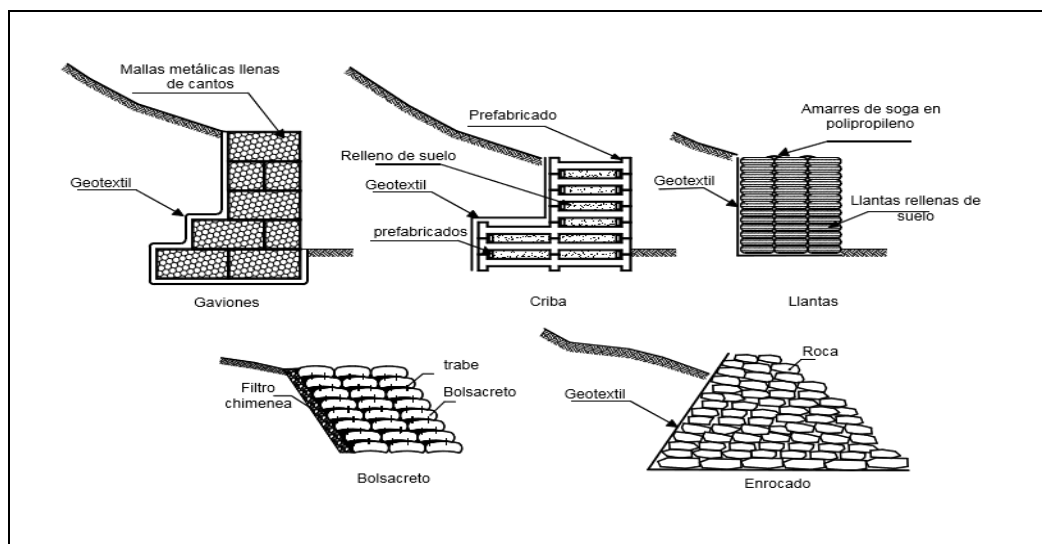
### Figura 53

*Muros de gravedad rígidos.*



Fuente: "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 112)

**Figura 54**  
*Muros de gravedad flexibles.*



Fuente: "Deslizamientos Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 116)

**Tabla N° 18**

*Estructuras de contención.*

Método	Ventajas	Desventajas
Muros en bloques de roca	Efectivos en los deslizamientos no muy grandes, especialmente en los rotacionales que actúan como contrapeso. Son flexibles y permeables.	Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno del enrocado. Se necesitan grandes volúmenes de roca.
Muros en Gaviones	Son flexibles y se acomodan a los movimientos. Son permeables.	Actúan por gravedad y comúnmente se requiere que tengan un gran volumen.
Muros MSE (Tierra con refuerzo)	Utilizan el suelo del sitio. El refuerzo ayuda a la estabilidad interna.	Son muy vulnerables a los movimientos. Requieren de un sistema de drenaje.
Muros de concreto	Poseen buena resistencia interna. Útiles para estabilizar movimientos relativamente pequeños. Son rígidos.	Se necesita una buena calidad de cimentación. Son poco efectivos en los taludes de gran altura.
Pilas, Pilotes o tablestacas	No requieren gran espacio. Se pueden cimentar a gran profundidad. Son efectivos en movimientos poco profundos. Su construcción es rápida. (Figura 1.22)	Nosonefectivosenlosdeslizamientos profundos o cuando aparece la roca o el suelo muy duro debajo de la superficie de falla. Poco efectivos en los deslizamientos rotacionales.
Anclajes o pernos	Efectivos en la roca, especialmente, cuando es estratificada.	Se requieren equipos especiales y que son costosos, por lo general.
Pantallas ancladas o claveteadas	Útiles como estructuras de contención de masas, de tamaño pequeño a mediano. Son muy efectivas cuando hay roca para el anclaje.	Existen algunas incertidumbres sobre su efectividad cuando hay aguas subterráneas. Generalmente son costosas.

Fuente: "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 22)

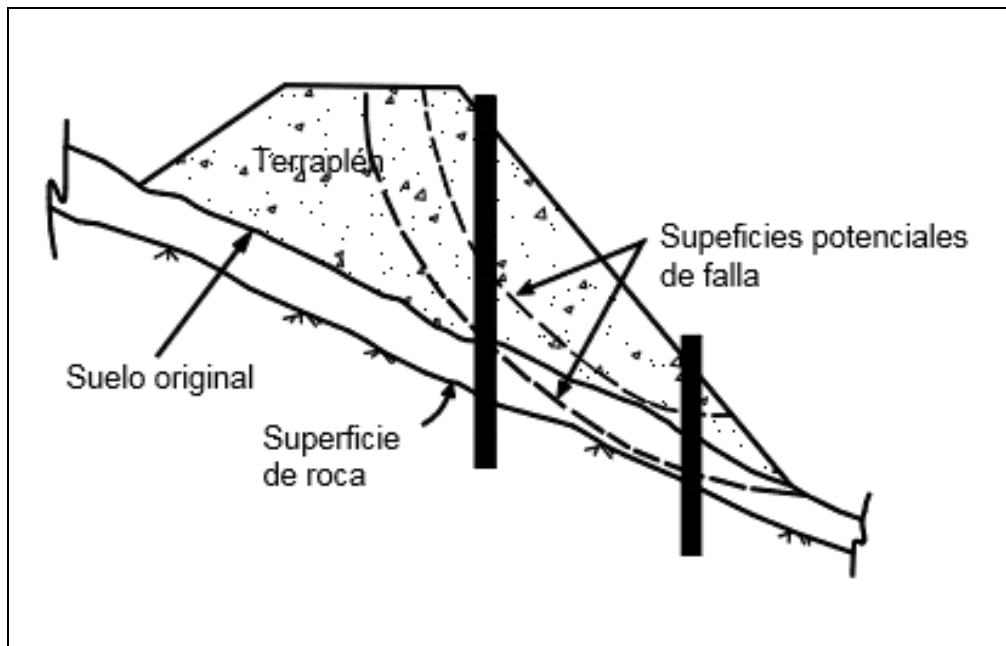
### c) Pilotes

Una solución disponible en ingeniería geotécnica para estabilizar terraplenes y terraplenes inestables es utilizar muros, normalmente pilotes, a lo largo de superficies deslizantes de longitud suficiente. Por lo tanto, se puede calcular la resistencia al corte de la estructura del pilote, lo que contribuye a la resistencia al corte del suelo, lo que a su vez puede reducir la deformación del pilote y aumentar la estabilidad del pilote. (Ortuño, 2010, p.2).

Estas restricciones se utilizan para estabilizar inclinaciones naturales, especialmente inestabilidades traslacionales profundas que requieren una alta proporción de fuerzas estabilizadoras. (Ver Figura N° 55).

#### Figura 55

*Muros de gravedad rígidos.*



*Fuente: "Deslizamientos Análisis Geotécnico", por Suarez (2009, p. 23)*

#### 2.2.12.4.4 Corrección por superficial

##### a) Mejoramiento de la resistencia del suelo

Hay formas de mejorar la cohesión y la fricción del suelo y aumentar la resiliencia del suelo a través de productos de estabilización de suelos y pendientes. Existen métodos definitivos y temporales, los cuales dependen del método de corrección utilizado. (Ver Tabla N° 19).

**Tabla N° 19**

*Formas de mejorar la resistencia del suelo.*

Método	Ventajas	Desventajas
Inyecciones de cemento, cal o químicos	Endurecen el suelo y pueden cementar la superficie de falla.	La disminución de permeabilidad puede ser un efecto negativo.
Magmaficación	Convierte el suelo en roca al utilizar rayos especiales desarrollados por la industria espacial.	Su utilización en la actualidad, es solamente para uso experimental.
Congelación	Endurece el suelo al congelarlo.	Efectos no permanentes.
Electro-ósmosis	Reduce el contenido de agua.	Utilización para estabilización no permanente.
Explosivos	Fragmentan la superficie de falla.	Su efecto es limitado y puede tener efectos negativos.
Compactación profunda o columnas de piedra	Se puede mejorar el suelo en la zona de la superficie de falla. Los equipos alcanzan grandes profundidades.	Los equipos de compactación profunda son costosos. En el proceso se pueden generar presiones de poros.

*Fuente:* “Deslizamientos - Técnicas de Remediación”, por Suarez (2009, p. 27)

##### b) Recubrimientos de la superficie

El recubrimiento es un proceso que evita la penetración. La presencia de un revestimiento o revestimiento refuerza la superficie estructural del suelo. La ventaja del revestimiento es que evita el proceso de filtración y mantiene el suelo parcialmente seco. Hay varios tipos de revestimientos que actúan como una fuerza para evitar que los pisos se rompan o colapsen. (Ver Tabla N° 19).

**Tabla N° 20***Formas de recubrimiento de la superficie del talud.*

Método	Ventajas	Desventajas
Recubrimiento de la superficie del talud.	El recubrimiento ayuda a controlar la erosión.	Se debe garantizar la estabilidad del recubrimiento.
Conformación de la superficie.	Puede mejorar las condiciones del drenaje superficial y facilitar el control de erosión.	Su efecto directo sobre la estabilidad generalmente es limitado.
Sellado de grietas superficiales.	Disminuye la infiltración de agua.	Las grietas se pueden abrir nuevamente y se requiere mantenimiento por períodos importantes de tiempo.
Sellado de juntas y discontinuidades.	Disminuye la infiltración de agua y las presiones de poros en las discontinuidades.	Puede existir una gran cantidad de discontinuidades que deben ser selladas.
Cobertura vegetal, árboles, arbustos y pastos.	Representan una alternativa ambientalmente excelente.	Pueden necesitar mantenimiento para su establecimiento.

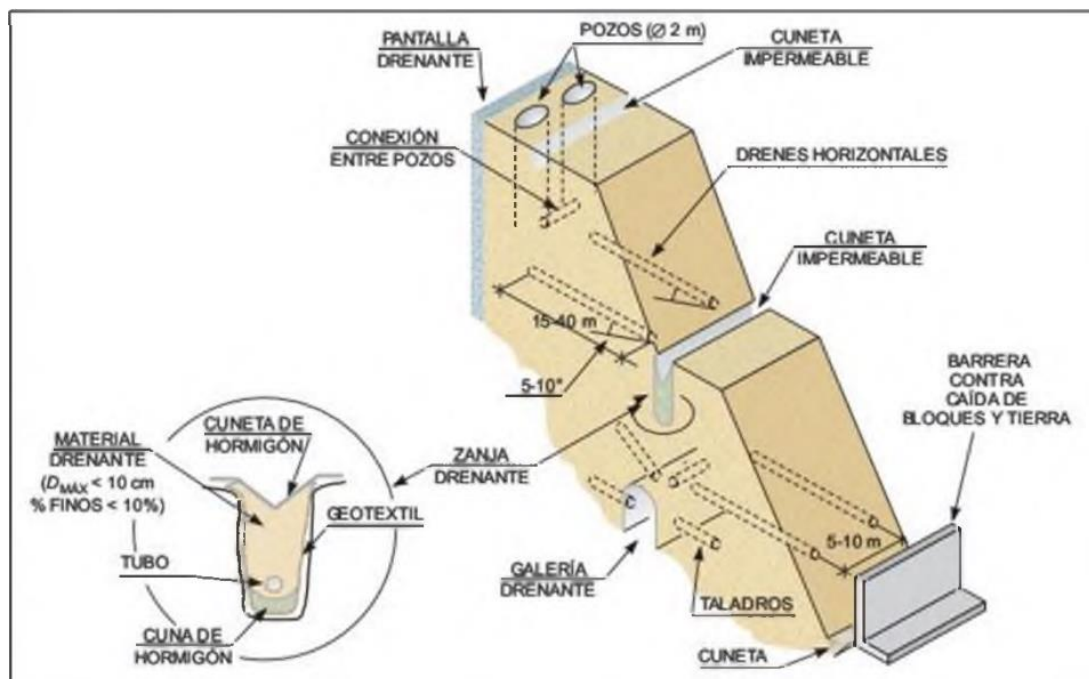
*Fuente:* "Deslizamientos - Técnicas de Remediación", por Suarez (2009, p. 40)

### **Medidas de Drenaje**

Las medidas de drenaje tienen como objetivo eliminar o reducir la cantidad de agua presente en el talud y por tanto la presión interna del agua de poro, que actúa como factor desestabilizador en caso de falla superficial y grietas por tensión. Además, el agua reduce las propiedades de resistencia de algunos materiales. Estas medidas tienden a ser más efectivas porque el agua es el principal factor que causa los problemas de inestabilidad de las laderas, aumentando el peso de la masa inestable, aumentando el nivel freático y la presión de los poros, creando una columna de agua, ablandando el suelo y erosionando el suelo en las laderas. (González de Vallejo, 2004, p. 473).

El drenaje se puede realizar a través de canales y tuberías de agua, y profundo, a través de desagües horizontales o "California", pozos o desagües verticales, garajes de agua y ventanas de agua. Las estructuras pueden ser de hormigón (como pozos o alcantarillas) o continuas (canales y túneles). (Ver Figura 56).

**Figura 56**  
Medidas de drenajes y protección en taludes.



Fuente: Gonzales de Vallejo (2004)

### Drenajes Superficiales

Evitan que el flujo se filtre hacia arriba o a través de discontinuidades y grietas, lo que hace que el nivel freático aumente, se desarrollen presiones de poros y el suelo se sature.

También previenen los efectos erosivos de las aguas residuales y la lixiviación de discontinuidades en las sierras.

Se deben diseñar medidas para evitar el ingreso y acumulación de agua en las laderas, especialmente en las áreas de cuencas hidrográficas y, en el caso de las laderas en terrazas, en las bermas porque las inundaciones a menudo ocurren durante la temporada de lluvias en estas áreas planas.

El agua de escorrentía es dirigida y evacuada mediante acequias o acequias de drenaje, normalmente situadas en la parte superior y laterales del terraplén (zanja perimetral), cuya sección y características deben calcularse en función del caudal a evacuar.

Estas medidas incluyen también la excavación de canales, el desvío o la impermeabilización de canales o fuentes cercanas a laderas o en niveles superiores.

En taludes situados en terrenos de importante extensión e inclinación adecuada, se podrá construir en superficie un sistema de acequias o canales de drenaje, verticales y horizontales, o en forma de “espiga”, para recoger el agua y salir de la zona, pendiente.

En estos casos, las zanjas ayudan a reforzar la capa superior del suelo. (Ver Fig. N° 57).

### **Figura 57**

*Drenes transversales al talud.*



*Fuente:* Gonzales de Vallejo (2004, p. 474)

### **Drenajes Profundos**

Su objetivo es bajar el nivel freático y drenar el agua del interior de la pendiente, una solución común en laderas rocosas que tienen problemas de inestabilidad.

Al diseñar medidas de drenaje profundo se deben considerar los siguientes aspectos:

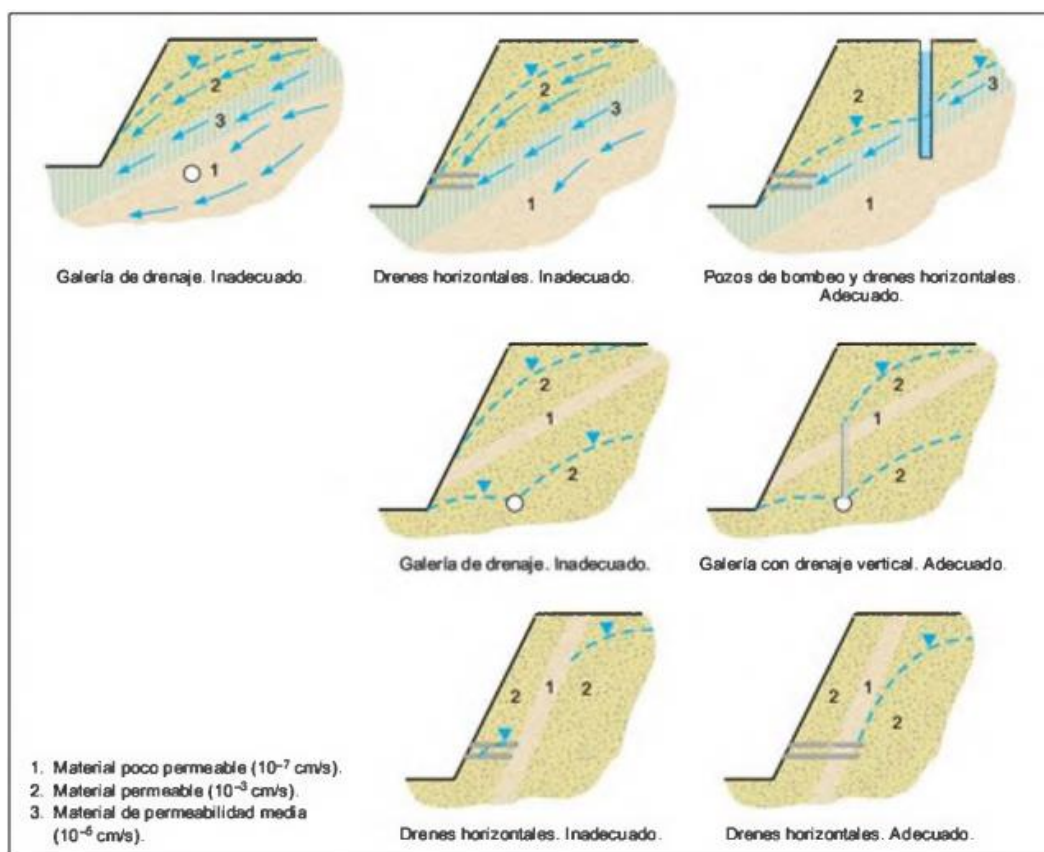
Permeabilidad y características hidrogeológicas del material, caudal a drenar y radio de funcionamiento del elemento drenante.

Los pozos deben alcanzar el nivel donde se encuentra el agua y, cuando sea necesario, deben ser tan profundos que el nivel freático deba descender.

Dependiendo de su ubicación y profundidad, los elementos de drenaje pueden dañarse o inutilizarse en caso de movimiento en pendientes y provocar los efectos contrarios a los esperados, introduciendo agua en superficie rota o bloque inestable. (Ver Figura 58)

### Figura 58

*Drenes transversales al talud.*



Fuente: Gonzales de Vallejo (2004, p. 475)



## Drenajes Californianos

Los sub pozos horizontales con una línea recta de 100 a 150 mm pueden alcanzar una longitud de 30 a 40 m y son adecuados para eliminar líquidos del terraplén (Ver Figura 59). Los pozos verticales (con una línea de 30 a 150 cm en la parte superior) pueden secar el líquido mediante una bomba montada internamente, que se enciende cuando el líquido alcanza un cierto nivel dentro del pozo o pasa a través de él, y los drenajes se conectan con el exterior. Se excavaron líneas de drenaje en el interior de los macizos, una vía muy eficaz, pero muy costosa de realizar.

Las "pantallas" de drenaje formadas por grandes pozos verticales (de 1,5 a 2 m), unidos entre sí mediante perforaciones horizontales realizadas desde el interior del pozo, son una técnica utilizada en España para estabilizar terraplenes excavados en taludes naturales en suelo o roca. (Ver Figura 59 – Figura 60).

### Figura 59

*Realización de drenes horizontales en un talud.*



*Fuente: Gonzales de Vallejo (2004, p. 475)*

**Figura 60**  
*Realización de pozos.*



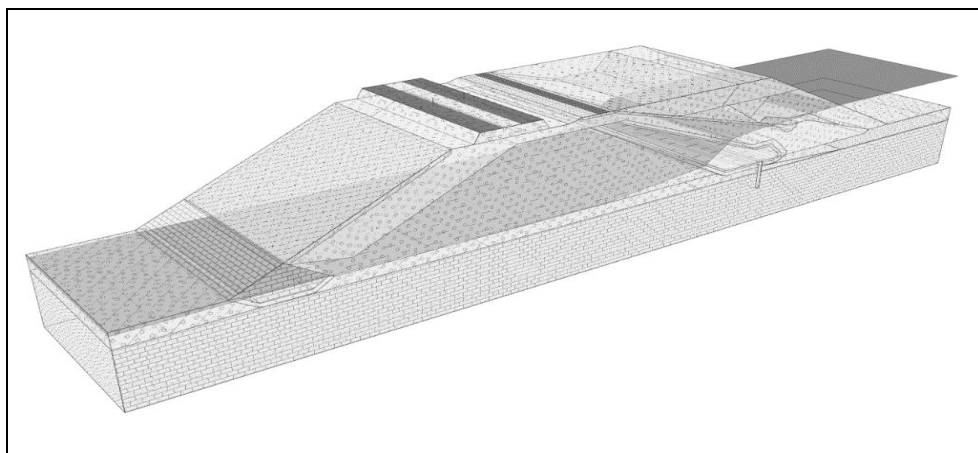
*Fuente:* Gonzales de Vallejo (2004, p. 475)

#### **2.2.12.4.5 Modelamiento Geotécnico**

Un modelo geotécnico es una representación de las propiedades mecánicas, hidráulicas y de ingeniería de los materiales en un entorno subterráneo (suelos y rocas).

Esto le permite comprender mejor las condiciones determinantes de una ubicación y tomar decisiones al diseñar construcciones, minas y otros objetos. (Ver Figura N° 61).

**Figura 61**  
*Modelamiento numérico 3D.*



*Fuente:* Fine – Software Ingeniería civil (2018)

Los bienes asociados con la factura de una disección tridimensional (3D) de inmovilidad de taludes cañón significativos. Se han explorado numerosas técnicas de disección 3D a lo dispendioso de los años, desde métodos de formación inclusive enfoques basados en computación distribuida y, más recientemente, basados en el usufructo de programación dinámica. El empeño en la disección de inmovilidad de taludes en 3D surge del argumento de que el conjunto de las fallas de inmovilidad de taludes cañón inherentemente de jaez tridimensional, es decir, las superficies de falta conveniente a menudo representan variaciones a lo dispendioso de una capacidad equivalente a una losa. La representación (2D) es una gran simplificación del entorno real, y un argumento que nos sorprende es que los ingenieros geotécnicos utilizan simplificaciones 2D de la geometría 3D para formación de inmovilidad de taludes. Existen varios programas para la disección de inmovilidad de taludes:

Slide es un programa de análisis de estabilidad de pendientes 2D que utiliza el método de equilibrio de límites para calcular la estabilidad.

Slope es un software de análisis de estabilidad de taludes que combina modelos numéricos complejos, como métodos de equilibrio límite y métodos de elementos discretos.

Geo 5 es un programa para el análisis de la estabilidad de terraplenes (terraplenes, limpieza de obra, anclajes estructurales, muros de tierra armada, etc).

La superficie de deslizamiento puede considerarse circular (Bishop, Fellenius/Peterson, Jambu, Morgensternpreis o Spencer) o poligonal (Sarma, Jambu, Morgensternpreis o Spencer).

## **2.2.12.5 Ensayos de Campo y Laboratorio**

### **2.2.12.5.1 Ensayos de Campo y Laboratorio**

Las pruebas de campo más utilizadas son la inspección visual y la extracción de muestras sin cambios. (Propio, 2019).

- Inspección visual: Se evalúan los materiales que componen el talud. Además, se pueden visualizar señales como grietas, erosión, erosión, desprendimientos y deslizamientos, que indican la posibilidad de futuros deslizamientos.
- Extracción de muestra cruda - Perforación a cielo abierto: Consiste en cavar el terreno para sentir más directamente la composición del terreno, también se llama picadura.
- Pruebas de penetración SPT: Permite perforar en la zona, analizar el subsuelo, limpiado mediante inyección de agua teniendo en cuenta la profundidad de extracción deseada para la muestra, se utiliza un dispositivo que es de caída libre y pesa 140 libras. Una vez completado el proceso de permeación, se extrae la muestra y se coloca en un recipiente sellado, el cual debe estar etiquetado con la información necesaria como: número de estudio, número de muestra, número de profundidad y valor N, la referencia utilizada es las normas NTP 339.133-ASTM D 1586 y AASHTO T-206
- Auscultación Dinámica con cono tipo pico: este método inserta permanentemente los vértices de un cono tipo pico. El equipo utilizado es similar al utilizado en las pruebas de penetración estándar. Los conos de picoteo están precalibrados de acuerdo con SPT para determinar el parámetro  $\beta$  utilizado para determinar el factor N utilizado de manera similar a las pruebas de penetración estándar. Se recomienda una profundidad de 8 metros para penetrar en el suelo sin sobrepasar los 10 metros.

- Exploración Geofísica: consiste en determinar los estratos del suelo a través de las ondas sísmicas emitidas. Las cuales se clasifican de acuerdo a la velocidad, pueden ser ondas P. También, con este método se puede explorar zonas con acceso restringido que puedan generar peligros de desplazamiento.

### 2.2.12.5.2 Ensayos de Laboratorio

La investigación actual utiliza pruebas para identificar el suelo, el límite de consistencia, el contenido de humedad, la prueba de corte directo y la prueba triaxial. (uu).

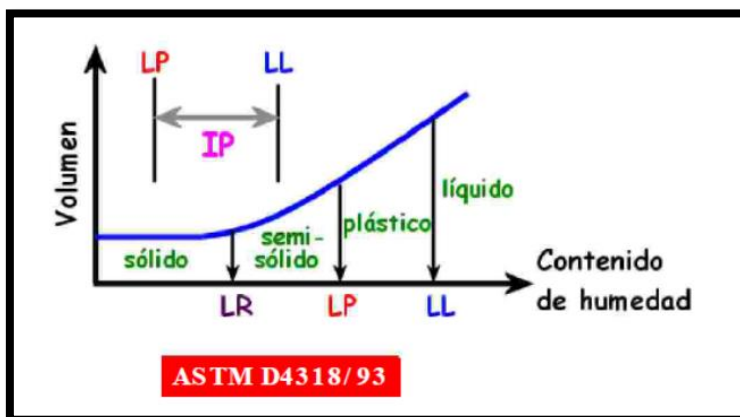
- Ensayos que permiten identificar los suelos

Análisis granulométrico mediante tamizado: El objetivo de estas pruebas es calcular la distribución granulométrica de las partículas presentes en la muestra de suelo. Esto permitirá clasificarlo a través de AASHTO o SUCS.

- Límites de coherencia: Este método permite alcanzar el límite del rango de humedad en el que el estado del suelo es plástico. Con este método se puede utilizar la Clasificación Unificada de Suelos. Por tanto, el suelo puede ser sólido, semisólido, plástico, líquido o viscoso. (Ver Figura 62)

**Figura 62**

*Límites de Atterberg.*



Fuente: (Zegarra, 2000)

- **Humedad:** Este método permite conocer el contenido de humedad del suelo. La humedad de la masa del suelo está formada por la suma de agua libre, capilar e higroscópica. La importancia del agua en la composición del suelo implica una característica fundamental que determina su estado, así como su desarrollo volumétrico, consolidación y estabilidad mecánica.
- **Prueba de corte directo:** Su objetivo es calcular la resistencia al corte de suelos cohesivos y granulares. Con esta prueba se calculará su resistencia al corte y su discontinuidad. Con parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna del suelo.
- **Ensayos Triaxial:** su fin es calcular los parámetros de resistencia y discontinuidad. Las diferencias entre el corte directo son:
  - Genera información acerca del comportamiento esfuerzo-discontinuidad unitario del suelo, a diferencia de la prueba de corte directo.
  - Genera condiciones más uniformes de esfuerzo que la prueba de corte directo.
  - Genera mayor flexibilidad en términos de trayectoria de carga.

### **2.2.13 Muros de suelo reforzado o mecánicamente estabilizados**

(Geotecnia, 2019) señala que los muros de contención tienen como objetivo retener la tierra en gran escala, así como cualquier otro material usado como relleno para generar un nivel con el suelo de acuerdo a los requerimientos de la obra. Si la superficie presenta desnivel, pendientes profundas, o carencia de pendientes naturales. Los Muro Mecánicamente Estabilizados (MME) se componen de un bloque de tierra reforzada, con una fachada de concreto, puede ser de concreto armado (Geotecnia, 2019).

Son construcciones que consisten en la introducción de elementos resistentes a la tracción convenientemente orientados que aumentan la resistencia del suelo y reducen la deformación de los muros. Este método, denominado refuerzo del suelo, mejora el comportamiento general del suelo mediante la transferencia de fuerzas a elementos estables (refuerzo) y es aplicable en áreas con comportamiento de fluencia.

Estos muros constructivamente consisten en compactar suelo en capas de 0,25 m de espesor hasta alcanzar el 100% de la máxima densidad seca del Proctor Modificado y paralelamente colocar el refuerzo (malla hexagonal a doble torsión de acero dulce) según las características técnicas y dimensiones indicadas en los planos, hasta alcanzar la altura necesaria. El suelo a compactar comúnmente denominado relleno estructural, podrá ser el material de corte que se realizará para la construcción del muro, previa selección y eliminación de material orgánico, terrones de arcilla y partículas mayores de 3".

El paramento exterior del muro será de gaviones, el cual servirá de confinamiento y protección del relleno estructural.

Con el fin de evitar la pérdida de los finos por los vacíos del paramento exterior de gaviones, se colocará una malla de geotextil que permitirá el paso sólo del agua., las características y dimensiones de este geotextil están indicadas en los planos y especificaciones técnicas, que se adjuntan al presente informe.

Para evitar que el suelo pierda resistencia por efecto del agua de infiltración, los muros deberán contar con un sistema de drenaje, para lo cual se proyecta la colocación de geotextiles, en este caso un geo compuesto de drenaje, el cual tendrá la finalidad de captar las aguas de filtración en el interior del muro y por medio de un sistema de tuberías ser evacuadas a zonas establecidas; la ubicación, dimensiones y características técnicas de este geotextil se encuentran en los planos de diseño y especificaciones técnicas que forman parte del presente informe.

En algunos casos además de utilizar el sistema de suelo reforzado es necesario usar un refuerzo adicional de geogrillas ya que estas incrementan la resistencia al corte del sistema desde 40 KN hasta 100 KN mejorando por ende la estabilidad interna del muro.

### 2.2.13.1 Condición de estabilidad

#### Análisis de Estabilidad Estático

Este análisis se refiere a la estabilidad general de los taludes que se evalúan sin considerar los efectos sísmicos. Los resultados del análisis se presentan como un factor de seguridad utilizando el método de equilibrio límite. Estos análisis se pueden realizar tanto sobre el esfuerzo efectivo como sobre el esfuerzo general. Se debe utilizar un factor de seguridad estática superior a 1,3.

En el caso de muros estabilizados mecánicamente (MESW), es necesario analizar adicionalmente los factores de estabilidad: interna, volcamiento y antideslizante, cuyos valores mínimos cumplen con la norma AASHTO. (Ver Tabla 21).

**Tabla N° 21**

*Factores de seguridad de análisis de estabilidad estático.*

FS. Interna Estático	> 1,3
FS. Deslizamiento Estático	> 1,5
FS. Capacidad Admisible Estático	> 2,5

*Fuente: AASHTO*

#### Análisis de Estabilidad Pseudoestático

El método consiste en calcular el límite de seguridad de deslizamiento cuando la fuerza horizontal es igual al producto del coeficiente sísmico por el peso de la masa potencial destructiva, sumado a las fuerzas estáticas existentes.



Para el análisis pseudoestático de taludes se utilizan coeficientes sísmicos horizontales, los cuales se seleccionan en función del potencial sísmico de la zona. Se debe utilizar un factor de seguridad pseudoestático superior a 1,0. (Ver Tabla 20).

Para el caso de los muros mecánicamente estabilizados (MESW), AASHTO recomienda valores mayores o iguales al 75% de los establecidos para en análisis estático.

### **Tabla N° 22.**

*Factores de seguridad de análisis de estabilidad Pseudoestático.*

FS. Interna Pseudoestático	> 1,0
FS. Deslizamiento Pseudoestático	> 1,1
FS. Capacidad Admisible Pseudoestático	> 1,9

*Fuente: AASHTO*

## **2.3. Marco Conceptual**

**Talud:** La superficie tiene pendiente relativa a la superficie horizontal existente si se utiliza una estructura de suelo permanente. Esto conforma una estructura analítica compleja, pues en su estudio coinciden los problemas de la mecánica de suelos y de la mecánica de rocas, teniendo en cuenta que la geología aplicada juega un papel muy importante en la formulación de cualquier criterio aceptable, Universidad Nacional de Rosario (2003)

**Estabilidad de talud:** Se define como la seguridad de la conexión a tierra contra la ocurrencia de falla o movimiento. En primer lugar, es importante poder determinar los criterios de estabilidad del talud, como, por ejemplo, en un momento dado, cuál será el talud apropiado a lo largo de la sección transversal, Universidad Nacional de Rosario (2003).

**Parámetros de resistencia del Suelo:** Estas son propiedades de resistencia al corte del suelo. Estas propiedades se determinan en laboratorio como resultado de ensayos (corte directo para suelos no cohesivos y corte

triaxial para suelos cohesivos). Estos parámetros de arrastre son el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la cohesión (C), Cuaresma y Quinto (2019).

Propiedades dinámicas del suelo: Las propiedades que presenta el suelo luego de recibir la muestra y enviarla al laboratorio mediante pruebas específicas.

Estos podrían ser: ensayo triaxial, ensayo de refracción sísmica, ensayo triaxial cíclico, etc, donde las características obtenidas son el coeficiente de contaminación ( $\nu$ ) y el módulo de corte. (G), Módulo de amortiguación ( $\xi$ ), Módulo elástico (E), estas propiedades son muy útiles para analizar el comportamiento dinámico del suelo. Cuaresma y Quinto (2019).

**Modelación Numérica:** Se trata de modelos que resuelven ecuaciones matemáticas y con ello describen el fenómeno en estudio. Uno de los fenómenos que pudieron modelar fue el transporte de sedimentos, donde diferentes ecuaciones conducen a resultados muy diferentes. Los resultados del modelo numérico dependen del tipo de ecuación utilizada, ya que, si los resultados son diferentes, el diseñador debe explicar el comportamiento mostrado, RAMMS Guide Bartelt. (2003). (hasta 2003).

**Sismo:** Liberación súbita de energía generada por el movimiento de grandes cantidades de roca en la parte interior de la tierra, entre su corteza y manto superior, donde se propagan en forma de vibraciones en las diferentes capas terrestres, INDECI (2010).

**Análisis de Equilibrio Límite:** El factor de seguridad se puede obtener mediante análisis de regresión, obteniendo los valores de la resistencia al corte en el momento de la rotura. Este análisis incluye determinar la existencia de resistencia suficiente en el suelo del talud para que pueda resistir los esfuerzos cortantes que normalmente tenderían a provocar fallas o deslizamientos, Suárez (2009).

**Análisis de Elementos Finitos:** Este método consiste inicialmente dividir las masas del suelo en unidades discretas que se le denomina elementos

finitos. En el método UDEC, el talud se tiene que dividir en bloques de acuerdo al sistema de juntas o grietas, los cuales son rígidos y deformables. Este método es muy poderoso y su utilización es algo compleja y su uso se ha venido popularizando ya que brinda solución a los problemas prácticos, Suárez (2009).

**Factor de seguridad:** El factor de seguridad es utilizado por los ingenieros para saber cuál es el factor que amenaza con provocar la falla del talud en las peores condiciones de operación para las que está diseñado. Se expresará como una relación entre la resistencia al corte real, calculada a partir del material del talud, y el esfuerzo cortante último, intentado para producir la falla, Suárez (2009).

**Coefficientes Pseudoestático:** Estos son los coeficientes sísmicos encontrados a partir del terremoto ocurrido y sus propiedades, es decir  $h$  de la aceleración horizontal que actúa sobre el talud debido al impacto de cargas sísmicas, Cuaresma & Quinto (2019).

**GEO5-MEF:** Se trata de un modelo numérico basado en el método de elementos finitos que simula y analiza una variedad de problemas geotécnicos, incluidos asentamientos, excavaciones y análisis de túneles. Proporciona múltiples modelos de materiales para caracterizar la estratigrafía del suelo y una variedad de componentes estructurales como muros, anclajes, geotextiles o geomallas. Este programa utiliza GEO5 (2021) para calcular desplazamientos, fuerzas internas en elementos estructurales, tensiones y deformaciones, zonas plásticas en el terreno y otras zonas en diferentes etapas donde se ubica la estructura.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis General**

Realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones nos permite comprobar la variación de resultados utilizando los métodos de equilibrio limite y métodos de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650

##### **3.1.2 Hipótesis Específicas**

- a) Determinar los parámetros de diseño nos permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando el método de equilibrio limite y método de elementos finitos en el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – Km 11+650.
- b) Identificar los tipos de movimientos nos permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio limite y método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650.
- c) Ejecutar un modelo numérico nos permite realizar un análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones a través del método de equilibrio limite y el método de elementos finitos para el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650.

### **3.2 Metodo**

Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo como un conjunto de procesos, no hay ningún paso que pueda saltarse porque todas las etapas están conectadas, los problemas, los objetivos y las hipótesis nacen de una idea que sirve de base a la investigación, se aplica una estrategia para comprobar las distintas hipótesis, se miden las variables que se van a estudiar para determinar su relación y se examinan todas las mediciones obtenidas estadísticamente antes de llegar a una serie de conclusiones.

### **3.3 Tipo de investigación**

Pertenece a la categoría de **APLICACIÓN**, por el interés de aplicar los conocimientos teóricos a una situación determinada y las consecuencias prácticas que de ello se derivan. Al mismo tiempo, también busca saber cómo realizar, actuar, construir o modificar una situación real.

### **3.4 Nivel o alcance de investigación**

El nivel de investigación utilizado es DESCRIPCIÓN – EXPLICACIÓN, ya que su finalidad es buscar determinar las propiedades, características de un objeto, proceso o cualquier otro fenómeno que requiera simulación analítica; y en función de la respuesta a las razones de acontecimientos y fenómenos físicos o sociales que tienen como objetivo explicar por qué ocurre un fenómeno y las condiciones bajo las cuales se manifiesta o por qué dos o más variables se relacionan entre sí.

### **3.5 Diseño de investigación**

La investigación tiene un diseño experimental y según Muñoz (2016), señala que: “un experimento es la manipulación rigurosamente controlada de variables experimentales, no comprobadas o condicionadas, con las que el investigador provoca determinadas situaciones, las cuales le permiten analizar el comportamiento de un fenómeno o problema en su campo de acción”.

### 3.6 Operacionalización de variables

En la siguiente tabla se puede ver cómo operacionalizar las variables para esta investigación, se ha definido las variables dependientes e independientes donde se definió sus dimensiones, indicadores y unidades. (Ver Tabla 23).

**Variable independiente:** Métodos de análisis de estabilidad de talud

**Variable dependiente:** Análisis de estabilidad de talud

**Tabla N° 23**

*Operacionalización de Variables.*

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES
<b>INDEPENDIENTE</b> (MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD)	EQUILIBRIO LIMITE	<b>Propiedades Físicas</b>	
		Contenido de Humedad	%
		Granulometría	
		Peso Unitario	γ
		Índice de Plasticidad	%
	ELEMENTOS FINITOS	<b>Propiedades Mecánicas</b>	
		Cohesión	c
		Fricción	Φ
		<b>Propiedades Físicas</b>	
		<b>Propiedades Mecánicas</b>	
		<b>Propiedades Dinámicas</b>	
		Relación de Poisson	ν
		Módulo de Young	E
Módulo de Corte	G		
Módulo de Amortiguamiento	ξ		
<b>DEPENDIENTE</b> (ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD)	ANALISIS ESTÁTICO	Factor de Seguridad Estático	FS
	ANALISIS PSEUDOESTÁTICO	Factor de Seguridad Dinámico	FS

*Fuente:* Elaboración Propia.

### **3.7 Población, muestra y muestreo**

#### **3.7.1 Población**

Como señala Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), “población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones”, entonces en este caso la población es el tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650.

#### **3.7.2 Muestra**

La muestra son las 2 secciones transversales del tramo Pucallpa – Aguaytía Km 11+290 – 11+650 que permitirán ser analizadas y comparadas mediante métodos de equilibrio limite (MEL) y método elementos finitos (MEF).

#### **3.7.3 Muestreo**

Una parte de la población se elige mediante el proceso de muestreo para el análisis de la investigación. Se emplea cuando estudiar a toda la población sería difícil o imposible debido a problemas de disponibilidad, gastos o tiempo.

Hernández y Carpio (2019), menciona el muestreo intencional implica que el investigador seleccione elementos que, según sus estándares, sean representativos de la población objeto del estudio.

El muestreo para esta tesis son los levantamientos topográficos que se realizaron para obtener las secciones transversales que fueron analizadas.

### **3.8 Técnicas e instrumentación**

#### **3.8.1 Técnica**

En esta investigación se utilizó el método de observación que consiste en registrar, analizar y cargar todos los datos necesarios para así evaluar. Este método se utilizó porque era necesario observar las condiciones del suelo para determinar la geología y geomorfología local, así como registrar visualmente las propiedades físicas del suelo y los niveles de la superficie del suelo.

También se utilizó documentos y archivos, en donde se revisó información que se encuentra en los sitios web de organismos oficiales como CENEPRED, ANA, GEOCATIN, OSINERMIN.

### **3.8.2 Instrumentos**

Utilizar software de recolección y análisis de información como el Google Earth Pro, Auto Cad Civil 3D, para la generación de la ubicación satelital de la zona de estudio y a su vez para la generación de la topografía.

Se utilizó el software Auto Cad Civil 3D 2020, para la generación de las secciones transversales para la evaluación de cada una de estas en otro software de análisis de estabilidad de taludes por elementos finitos y equilibrio límite.

Se utilizó el Office Excel, para la interpretación de los resultados del ensayo de laboratorio, muestras extraídas de la zona del talud para su reconocimiento de los parámetros de resistencia.

Se utilizó el software GEO 5, para la simulación numérica de los métodos de equilibrio límite y elementos finitos para las secciones propuestas en la investigación.

Se realizó una comparación de los factores de seguridad evaluados en los métodos de análisis tanto estático como sísmico, lo que dará ventajas, desventajas, conclusiones y recomendaciones.

Para lograr los objetivos de esta investigación, se desarrolló lo siguiente:

- Se exploró las características generales del área: ubicación, clima, geología local y análisis geotécnico. Con este fin, recopilamos la información relevante existente y necesaria.
- Se estudió los problemas que presenta el talud del tramo del km 11+290 - 11+650 de la carretera Huánuco – Tingo María – Pucallpa, Sector Aguaytía – Pucallpa, Tramo 2 San Alejandro - Neshuya, con la finalidad de conocer los factores que afectan la estabilidad, que se presentan.
- Por ello, se ha recopilado información de diferentes libros tales como; mecánica de suelos, análisis geotécnico de deslizamientos, libros de



soluciones para deslizamientos, información sobre soluciones para inestabilidad de taludes y deslizamientos.

- Se ha realizado visita al lugar de investigación a fin de adquirir datos in situ, y así proseguir con el análisis de estabilidad de taludes.
- Después de haber recopilado la información y el estudio de la zona, se procedió con el análisis de la alternativa de solución. Para el desarrollo del análisis se hizo uso del software Geo 5, que es un software que analiza la estabilidad de taludes en dos dimensiones y utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad.
- Finalmente, con el análisis geotécnico y los resultados del modelamiento en el programa, se determinó la mejor alternativa para que el talud sea estable.

### **3.9 Consideraciones éticas**

- Veracidad en toda la documentación obtenida según la normativa técnica y metodológica.
- Los resultados obtenidos tienen veracidad ética del investigador.
- La investigación respetó todas las normas que plantea la universidad, así como la normatividad nacional, donde prima la objetividad en los hechos y datos reales.
- En la realización de este estudio se respetaron tanto el cronograma del proyecto de tesis como los estándares técnicos aplicados en el análisis.

### **3.10 Procesamiento de estadísticos**

Los datos que se obtuvieron en la ficha técnica de uso común por los laboratorios de suelos (cohesión, fricción), el levantamiento topográfico, son datos necesarios para el empleo del software Geo 5, que permitió analizar y comprar las características de las variables, sus indicadores y los resultados para de esta forma hacer una conclusión. Por tanto, es confiable la investigación y técnicamente son confiables los resultados ya que el diseño se hizo por dos métodos en un software confiable.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

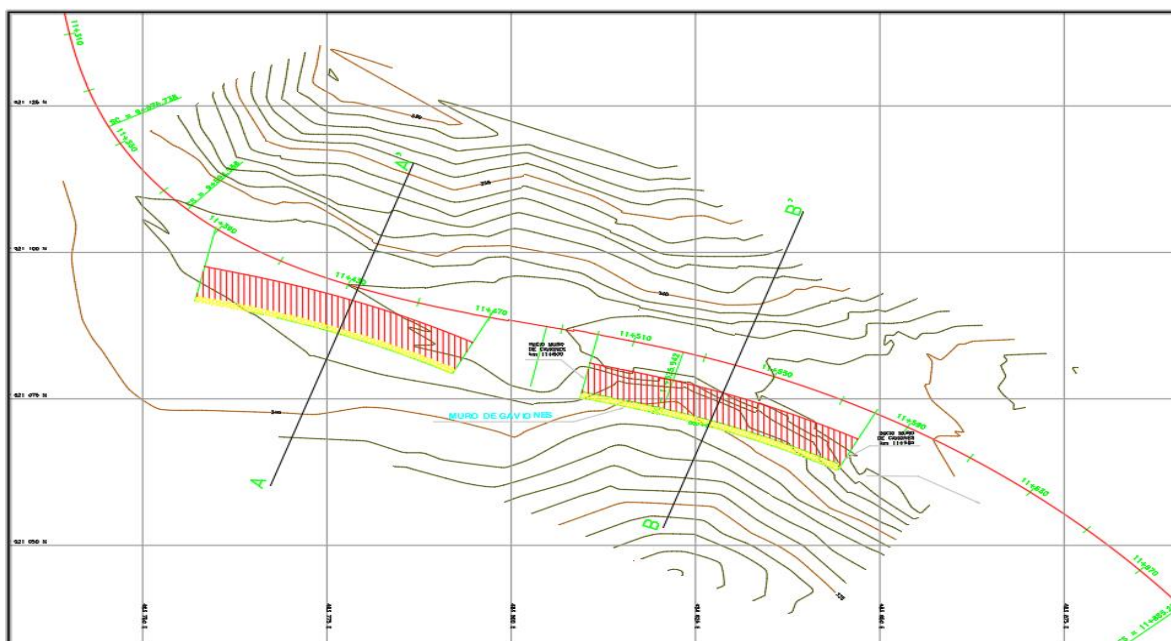
#### 4.1 Resultados

##### Topografía del Lugar

Al realizar un levantamiento topográfico en el sector Pucallpa - Aguaitia, se procesaron las coordenadas UTM recibidas, se construyeron curvas de nivelación y se identificaron las zonas de buzamiento más críticas, obteniendo dos tramos del perfil longitudinal con buzamientos entre 45 y 50%. (Véase la Plano 63.)

#### Figura 63

*Plano Topográfico de Zona de estudio.*

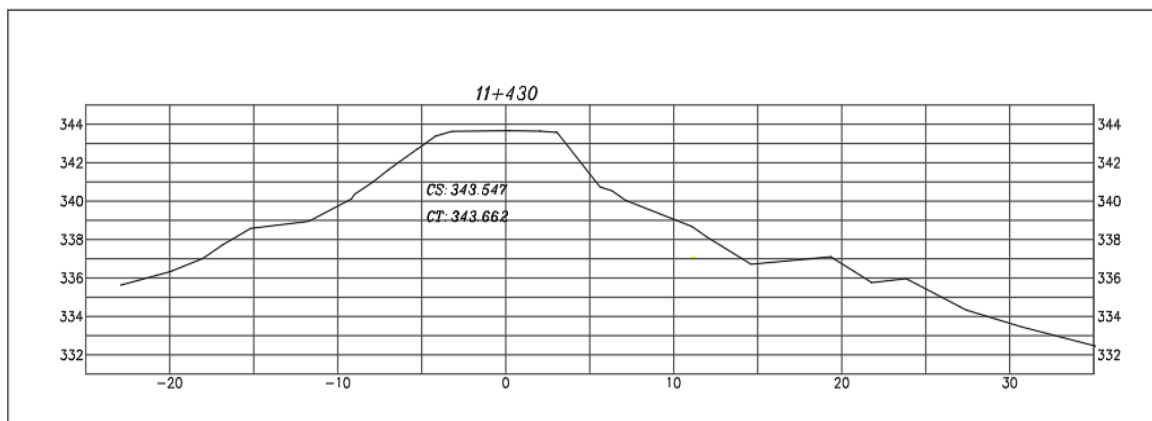


Fuente: Elaboración Propia.

Se prosigue a presentar la primera sección transversal el cual contempla el Km 11+430 y donde se consideró dicha sección con la finalidad de hacer el análisis de estabilidad de taludes bajo el método de elementos finitos y equilibrio límite para fines de diseño. Dicha sección en la corona tiene una cota de terreno de 343.662 m.s.n.m. Se muestra a continuación la Figura N° 65 detallando lo mencionado líneas arriba. (Ver Figura N° 64)

### Figura 64

*Sección Transversal N° 01.*

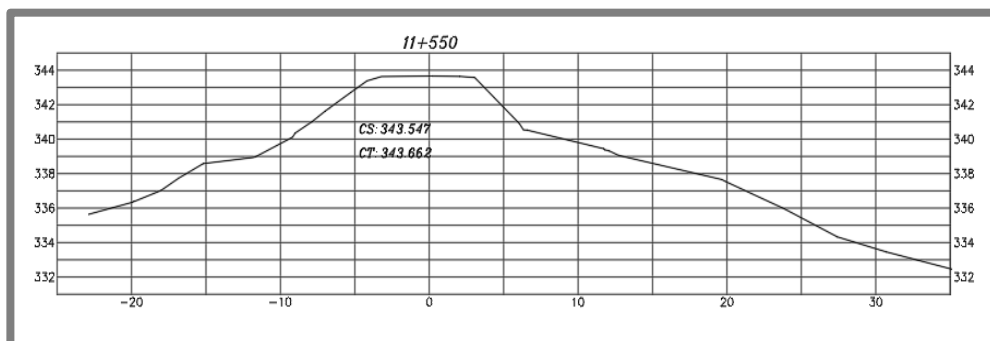


*Fuente:* Elaboración Propia.

Se prosigue a presentar la segunda sección transversal el cual contempla el Km 11+550 y donde se consideró dicha sección con la finalidad de hacer el análisis de estabilidad de taludes bajo el método de elementos finitos y equilibrio límite para fines de diseño. Dicha sección en la corona tiene una cota de terreno de 343.662 m.s.n.m. Se muestra a continuación la Figura N° 66 detallando lo mencionado líneas arriba.

Cabe mencionar que los ensayos de laboratorio que se obtuvo son para ambas secciones transversales, es por ello que la realización del modelamiento numérico varía acorde a la geometría que tiene cada una de estas secciones transversales. (Ver Figura N° 65)

**Figura 65**  
Sección Transversal N° 02.



Fuente: Elaboración Propia.

### Descripción y ubicación de la zona de estudio

La carretera que va de Huánuco a tingo maría y Pucallpa, estos dentro del sector Aguaytia, se encuentran separados en 3 tramos:

Tramo 01: Aguaytía – San Alejandro 50.469 Km

Tramo 02: San Alejandro – Neshuya 50.109 Km

**Tramo 03: Pucallpa – Aguaytía 59.768 Km (tramo de investigación)**

Siendo materia de estudio de la presente tesis el Tramo 3 que comprende las localidades de Pucallpa y Aguaytía

### Ubicación

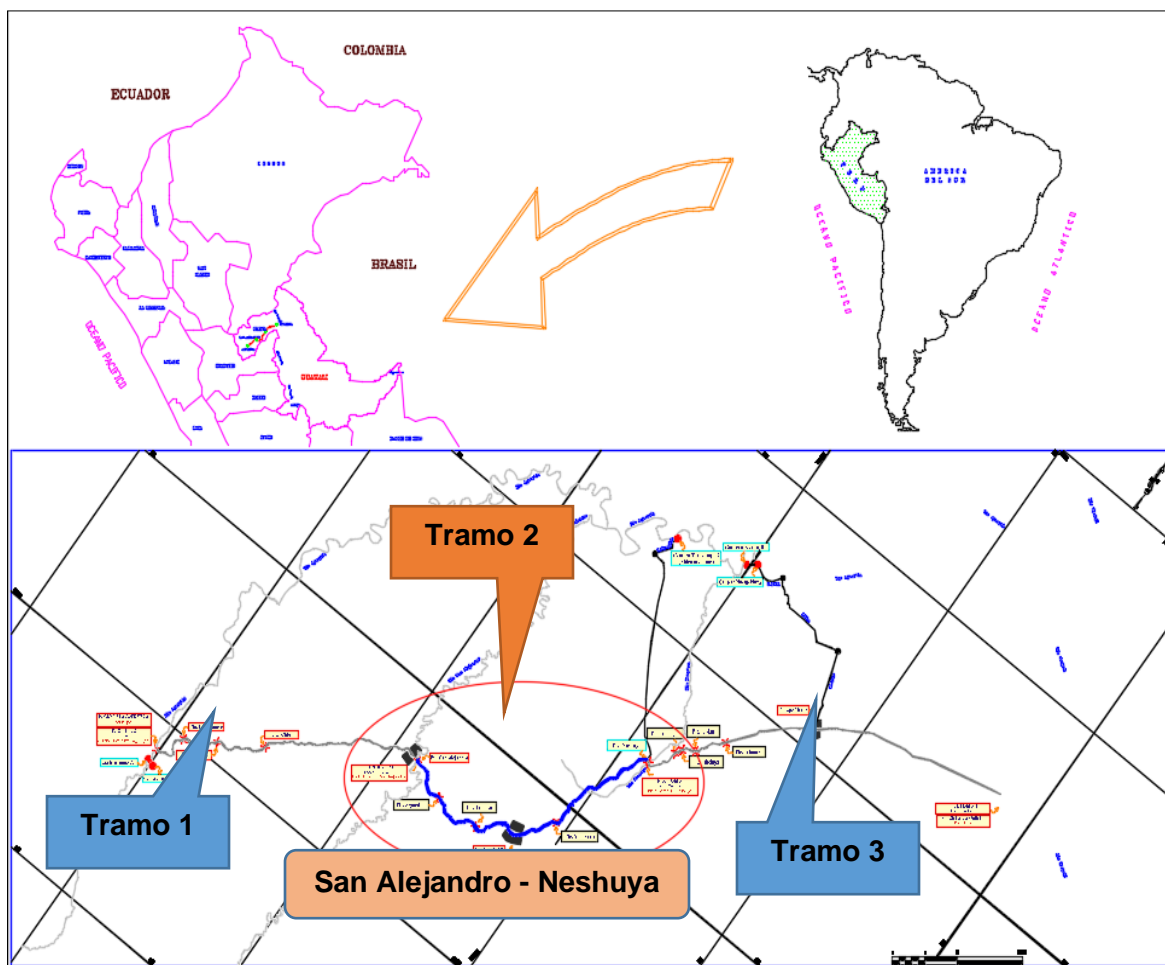
En el “Estudio de Actualización y Complementación del Estudio Final para el mejoramiento de la carretera Huánuco - Tingo María - Pucallpa”, las ubicaciones del proyecto de este estudio se encuentran geográficamente en las provincias de coronel Portillo y Padre Abad de la provincia de Ucayali. Dijo que aquí se construiría la carretera Huánuco-Tingo María Pucallpa, conexión desde la ciudad de Lima al puerto fluvial de Pucallpa a orillas del río Ucayali, que permite el paso del río. Del lado Atlántico se prevé una conexión con la ciudad de Iquitos a orillas del Amazonas.

Ubicada a lo largo de la carretera y también en la parte central del país, esta carretera es la vía principal que conduce a selvas bajas y pueblos bajos como Cerro de Pasco, Huancayo, Tingo María y Pucallpa. (Ver Figura 66).

La ampliación de la vía se realizará en una zona de selva baja a una altura de 380 metros sobre el nivel del mar. 3000 metros de descenso. y 155 m.s.n.m. Pucallpa.

### Figura 66

Mapa de ubicación de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

### Características Geomorfológicas

Tramo 3: Pucallpa - Aguaytia comienza en el pueblo de San Alejandro en la margen izquierda del río del mismo nombre y es mayormente montañoso durante los primeros 20 km y claramente plano durante los primeros 30,109 km. y el final del tramo está determinado por la coordenada  $8^{\circ}49'43''S / 75^{\circ}12'48''W$ . y  $8^{\circ}38'32'' S / 74^{\circ}57'41'' W$  respectivamente (Ver Figuras. 67, 68 y 69).

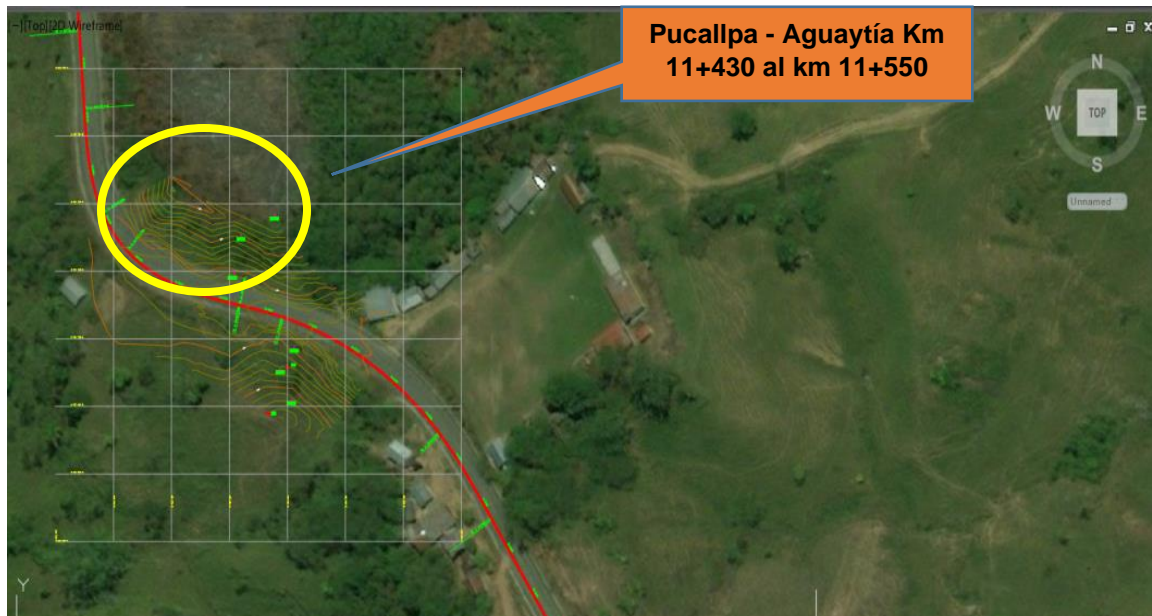
**Figura 67**  
*Vista de la zona de toma de muestras M-01.*



*Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 68**

*Localización de la zona de estudio*



*Fuente:* Elaboración propia.

**Figura 69**

*Ubicación de las calicatas*



*Fuente:* Elaboración propia.

## **Vegetación y Clima**

El camino objeto de este trabajo se ubica en una zona de selva baja. Las temperaturas medias fluctúan entre 23 y 24 grados, las medias son 31 y 16 grados, las temperaturas más altas y más bajas están entre 35 grados. La humedad relativa promedio es del 84,4% y el viento es de 2,5 a 1,0 m/s principalmente del noroeste.

Estos indicadores meteorológicos muestran que la precipitación promedio anual varía de 1600 mm en Pucallpa a 4000 mm en Aguaytía, y la temporada más húmeda en Pucallpa es de octubre a abril, lo que indica que el clima es tropical, templado, húmedo y lluvioso, con otros dos picos. . . en noviembre y otra en marzo, y la temporada alta en enero de noviembre a marzo en Aguaytía. La vegetación existente es típica de la Selva Baja. H. Está desgastado. El área del proyecto cubierta por este estudio se origina en los Andes inferiores y las llanuras amazónicas orientales y está moldeada y moldeada por la fase continental plio-cuaternaria de la que surgieron los Andes. También incluye la zona al sur de los Andes. Se puede observar el proceso de erosión y sedimentación de las llanuras.

## **Geología**

El área del proyecto, objeto de esta tesis, se inicia con la zona andina oriental y el altiplano amazónico, cuya forma y forma se debe a la fase continental Plio-Cuaternaria durante la cual se levantó la Cordillera de los Andes, que también comprende esta uno. región al sur de los Andes. En las llanuras se observan procesos de erosión y procesos de acumulación de sedimentos.

Toda el área que bordea la carretera actual está formada por rocas sedimentarias y probablemente esté relacionada con el desarrollo estructural en curso del área y los procesos físico-geológicos posteriores. Las unidades litoestratigráficas expuestas y no expuestas de la ruta Pucallpa-Aguaytía varían en edad desde el Neógeno hasta el Cuaternario, los dos últimos sistemas de los Caisozoa. Las principales unidades donde se ubican las áreas de terreno del camino investigado son las siguientes:



- Formación Chambira (PN-ch)
- Formación Ipururo (N-I)
- Depósitos Cuaternarios
- Depósitos Fluviales (Qh-fl)

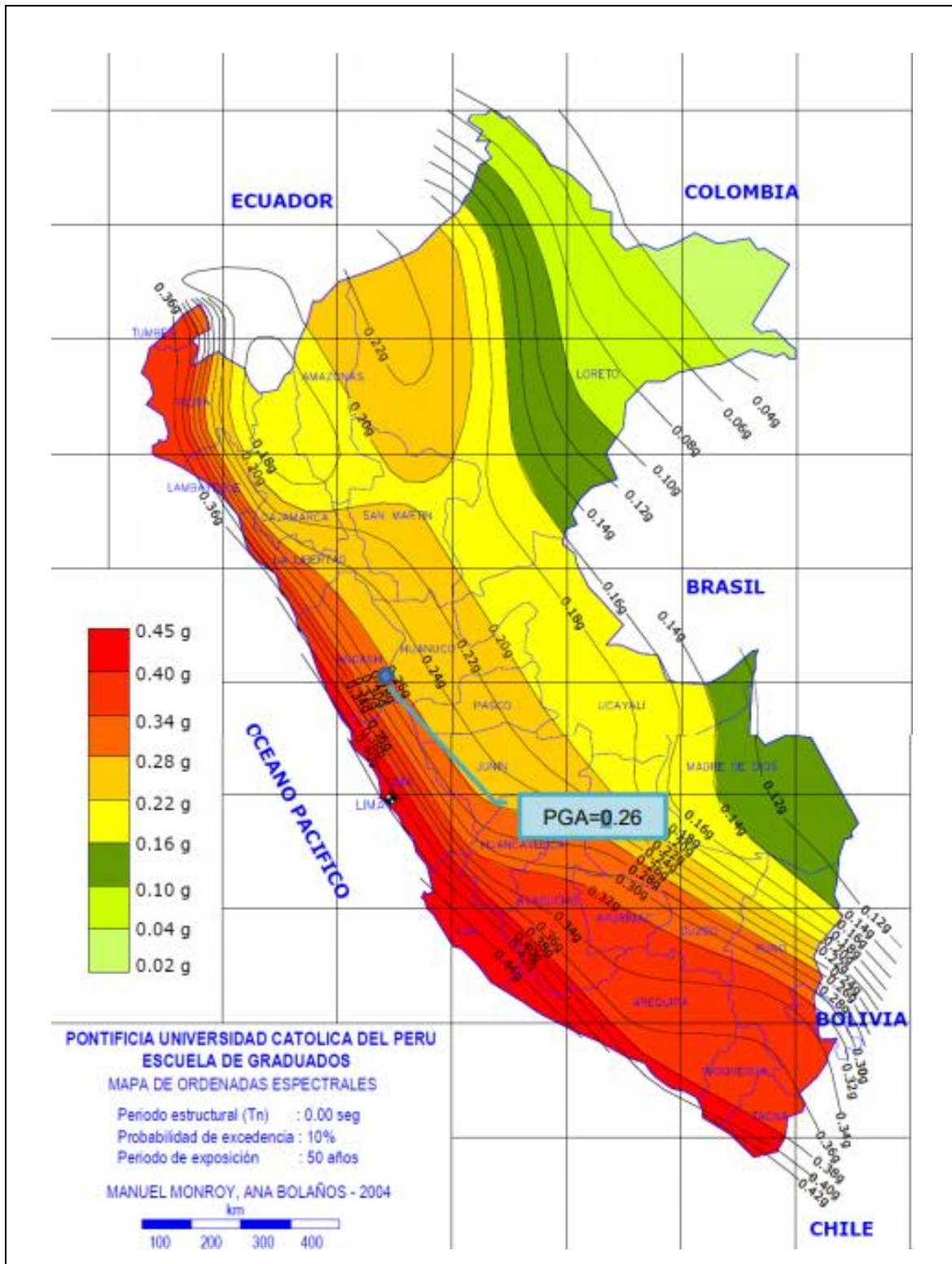
### **Sismicidad**

El evento sísmico del oriente peruano, donde se ubica el radio de búsqueda de la tesis, está relacionado con la mineralogía de los departamentos, los cuales se encuentran moderada y racionalmente deformados debido principalmente a diversos procesos tectónicos ocurridos durante la fase inca.

De acuerdo a la Norma de Estructuras Sismorresistentes (NTP E-030-2018), el oficio de zona sísmica provincial concluye que la viga Pucallpa - Aguaytía se ubica en la Cámara Sísmica 2 (Zona 2). (Ver figura 70)

Valores de PGA según metáfora #71, valores espaciales esperados de 0.24 g para Aguaytía y 0.21 g para Pucallpa para 50 eventos de charpa primaveral con períodos de recuperación de eventos sísmicos ( $T_r$ ) de 475 fuentes. Teniendo en cuenta los valores indicados anteriormente, se utiliza una velocidad de 0,18 g para un uso seguro en pendientes.

**Figura 70**  
**Mapa de Isoaceleraciones del Perú**



Fuente: Pontificia Universidad Católica del Perú.

En la siguiente tabla se presentan las principales características de la vía:

**Tabla N° 24**

*Principales características del Tramo N° 03*

<b>ÍTEM</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Red vial</b>	Red Vial Nacional
<b>Categoría según demanda</b>	Segunda Clase
<b>Orografía</b>	Ondulada - plana
<b>Tipo de pavimento</b>	Asfaltado
<b>Estructura pavimento (m)</b>	Tramo 2: San Alejandro – Neshuya Asfaltado: Km 00+000 - Km 38+000: 0.09m Km 38+000 - Km 47+500: 0.10m Km 47+500 - Km 50+109: 0.09m Base: 0.10m
<b>Ancho de calzada</b>	6.60 m
<b>Ancho de bermas a cada lado</b>	1.20m
<b>Pendiente máxima, peralte máximo</b>	6%, 8%
<b>Velocidad directriz</b>	40km/h hasta el km 20 50km/h en la parte restante
<b>Radio mínimo y máximo</b>	50m – 65m
<b>Bombeo de calzada</b>	2.50%
<b>Puentes</b>	Puente San Alejandro : 192.00 m longitud Puente Aguaytillo : 30.90 m longitud Puente Tauayllo : 40.70 m longitud Puente Yanayacu : 40.70 m longitud

*Fuente:* PROVIAS - Estudio de actualización y complementación de los estudios definitivos para el mejoramiento vial de la Carretera Huánuco – Tingo María – Pucallpa, Sector Aguaytía-Pucallpa (2002).

### **Ensayo de Mecánica de Suelos**

Para el avance metodológico del análisis geotécnico de estabilización de taludes en el tramo de la carretera Pucallpa - Aguaitia se considera como área de estudio los kilómetros comprendidos entre los kilómetros 11+290 y 11+650 de esta carretera, entre los asentamientos de Aguaytia existe una sección inestable cuya zona de análisis geotécnico 11+ 430 y 11+550 kilómetros. Con esto en mente, se

realizaron viajes a la ciudad de Pucallpa los días 11 y 19 de febrero de 2022 para realizar una inspección e iniciar el muestreo de suelo en el área de estudio de esta investigación de grado. (Ver Tabla 25).

### Procedimiento

En este sentido, continuamos con el detalle de las normas necesarias y materiales y métodos específicos de ensayo de suelos:

- a) Localización de la zona a intervenir
- b) Excavación de Calicata propuesta
- c) Toma de muestras de Suelo (0.00-1.50m)
- d) Envío de muestras desde Pucallpa a la ciudad de Lima vía terrestre.
- e) Envío de muestras de al local del LABORATORIO INGEOTEST INGENIEROS, se entregará a los 25 días hábiles.
- f) Ejecución de los ensayos estándares de suelo:
  - Contenido de Humedad
  - Análisis granulométrico por tamizado
  - Limite Líquido y Plástico
- g) Ejecución de los ensayos estándares de suelo:
  - Ensayo de corte directo

#### 4.1.1 Resultados de Laboratorio

A continuación, se presentan los resultados de una muestra en sitio que fue correctamente analizada por el laboratorio INGEOTEST INGENIEROS S.A.C. cuyo laboratorio está ubicado en el Jr. Los Lirios 530, Urb. San José, El Agustino, Lima. (Ver figuras 72 y 73)

**Tabla N° 25**

*Fecha de realización de ensayos*

Muestra N°	Calicata	Profundidad	Tipo	Fecha	Fecha	Laboratorio
				Toma de muestra	Ensayo de Laboratorio	
M-01	C-01		Alterada	12/02/2022	23/02/2022	INGEOTEST INGENIEROS S.A.C

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 71**  
*Excavación de calicata N° 01*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 72**  
*Excavación de calicata N° 01*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Realizada la visita a la zona de estudio, se tomaron unas muestras para realizar los siguientes ensayos que se pasan a describir en la siguiente tabla. (Ver Tabla N° 26)

**Tabla N° 26**

*Resultados de los Ensayos de Laboratorio*

Ítem	Ensayos	M-01
<b>1</b>	<b>Ensayos de Características Física</b>	
1.1	Contenido de Humedad	23.80%
		SUCS - OH
1.2	Análisis Granulométrico por tamizado	Arcillas Orgánicas de Plasticidad media a elevada, limos orgánicos
1.3	Limite Liquido	63.00%
1.4	Limite Plástico	39.78%
1.5	Índice de Plasticidad	23.00%
<b>2</b>	<b>Ensayos de Características Física</b>	
2.1	Coefficiente de Permeabilidad (k)	4.33 E-05 cm/s
<b>3</b>	<b>Ensayo de Corte Directo</b>	
3.1	Cohesión (c)	0.357 kg/cm <sup>2</sup>
3.2	Fricción ( $\phi$ )	24.80°

*Fuente: Elaboración Propia*

## 4.1.2 Análisis Geotécnico de Estabilización de Talud

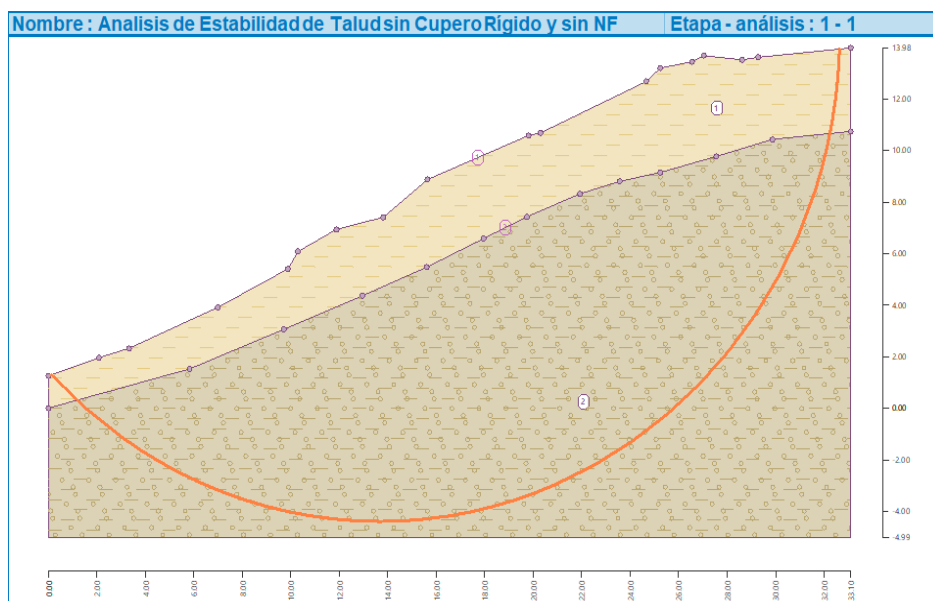
### 4.1.2.1 Análisis Geotécnico de Estabilización de Talud – Equilibrio Limite

#### 4.1.2.1.1 Análisis de Estabilidad Estático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

A continuación, se procede a mostrar la sección transversal con vistas 2D y 3D con su respectiva diferenciación de sus perfiles estratigráficos y a su vez con valores de parámetros de resistencia con los cuales fueron cálculos los factores de seguridad para la presente condición, cabe mencionar que la línea en naranja en forma parabólica es el área de influencia para el cálculo de dicho valor. (Ver Figuras N° 73 y 74)

#### Figura 73

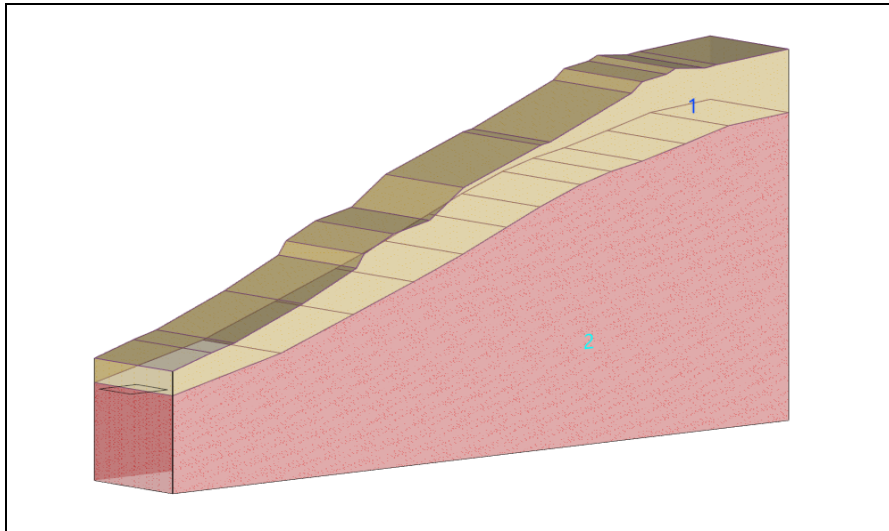
Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 74**

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

Una vez visualizada las secciones transversales tanto en 2D y 3D, se pasa a detallar los valores de parámetros de resistencia para un tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad), los cuales son: el Angulo de fricción, cohesión y peso específico (Ver Figura N° 75)

**Figura 75**

*Parámetros de Resistencia para tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.)*

Identificación		Dibujar	
Nombre:	INORGANICO LIMOSO - OH	Categoría de patrón:	GEO
Datos Básicos		Buscar:	
Peso unitario:	$\gamma = 13.32$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Subcategoría:	Suelos (1 - 16)
Estado de tensión:	efectivo	Patrón:	4 Arcilla
Ángulo de fricción interna:	$\phi_{ef} = 24.80$ [°]	Color:	
Cohesión de suelo:	$c_{ef} = 35.70$ [kPa]	Fondo:	automático
Subpresión		Saturación <10 - 90>:	50 [%]
Modo de cálculo de subpresión:	Estándar		
Peso unitario de suelo saturado:	$\gamma_{sat} = 14.60$ [kN/m <sup>3</sup> ]		
Estratificación			
Estratificación de suelo:	no considerar		

Fuente: Elaboración Propia (2022)



Una vez visualizada las secciones transversales tanto en 2D y 3D, se pasa a detallar los valores de parámetros de resistencia para un tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad), los cuales son: el Angulo de fricción, cohesión y peso específico (Ver Figura N° 76)

### Figura 76

*Parámetros de Resistencia para tipo de suelo OH (arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.)*

*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

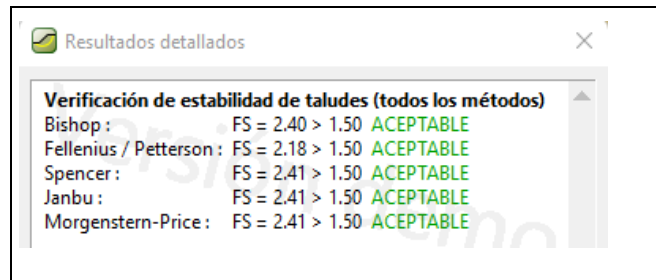
Ahora bien, una vez ya determinada los tipos de suelo en las secciones transversales y añadidos los valores de las propiedades de resistencia del suelo, se pasa a hacer el análisis de dicho talud en los distintos métodos ya mencionados en la presente tesis.

Los resultados que se muestran para un análisis estático sin la presencia de nivel freático son de 2.40, lo cual que indica que dicho talud en condiciones estáticas tendría un comportamiento positivo, sin embargo, es importante que las condiciones de diseño para dicho talud sean distintas, las cuales serán analizadas líneas debajo de la presente tesis. (Ver Figura N° 77)

También se pasa a mostrar el área de análisis de falla (línea naranja), la cual será el área de influencia para el análisis estático no saturado. (Ver imagen N° 78)

**Figura 77**

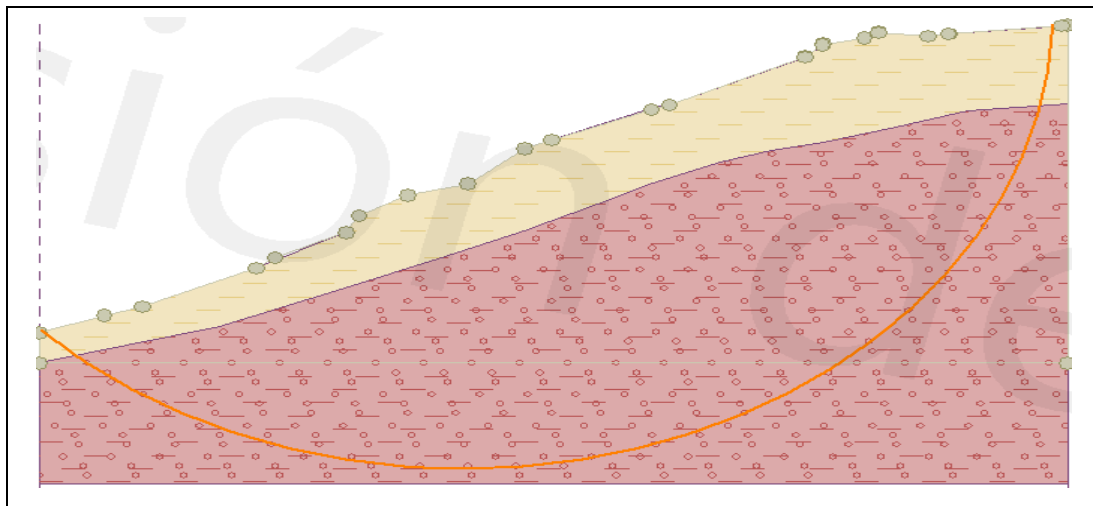
*Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones estática – No saturada*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 78**

*Sección Transversal con el área de Influencia de análisis para condiciones estáticas no saturadas.*



#### **4.1.2.1.2 Análisis de Estabilidad Estático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático**

Ahora bien, se pasa a mostrar el detalle de visualización 2D y 3D con la presencia de Nivel Freático, el propósito de ello es analizar el comportamiento de dicho talud en condiciones saturadas, cabe mencionar que la zona de análisis del presente estudio es de constantes precipitaciones pluviales lo que hace que el suelo del presente talud siempre se encuentre en condiciones saturadas.

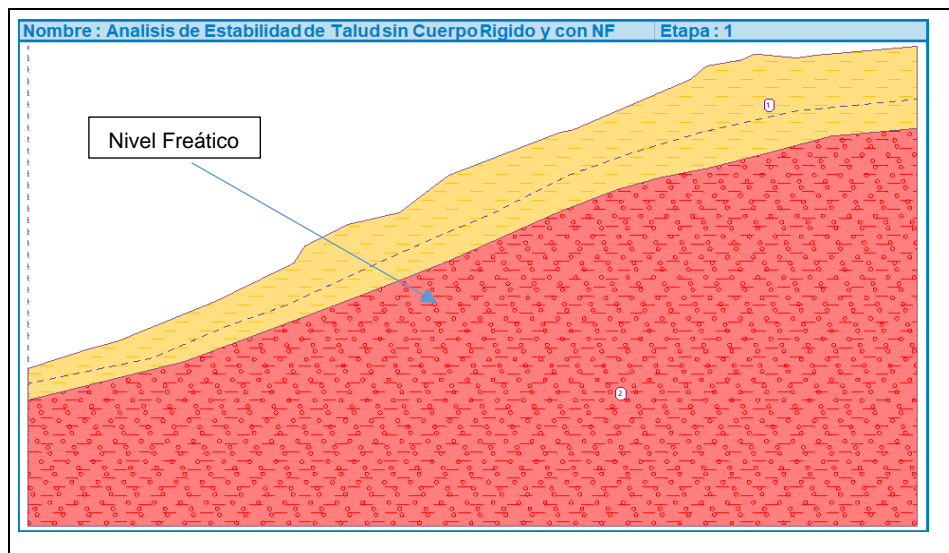
Es debido a eso que el análisis que se realizará a continuación tiene la presencia de nivel freático acorde a lo que se encuentra en los estudios de mecánica de suelos, lo que hará que el F.S disminuya debido a que el agua produce cierto

debilitamiento a toda la sección transversal general del suelo. (Ver imagen N° 79 y 80).

Cabe mencionar que el análisis de esta sección es con la granulometría descrita anteriormente.

### Figura 79

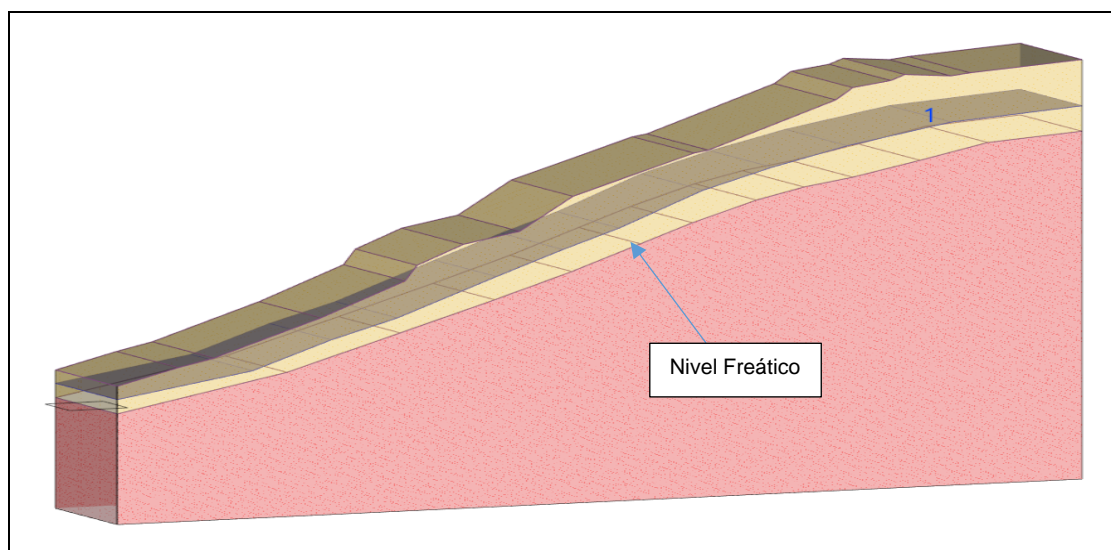
*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

### Figura 80

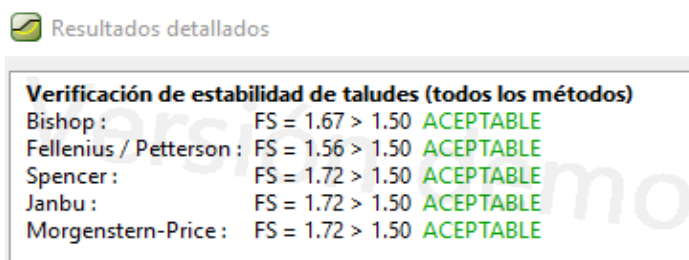
*Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático*



A continuación, se procede a mostrar los resultados del modelamiento, el cual arroja valores aun dentro de los rangos establecidos, pero que como se mencionó en el texto anterior los valores se vieron reducidos por la presencia de agua a los 0.80m. Como se muestra los valores tienen un promedio de  $F. S = 1.65$  (Ver Imagen N° 81)

### Figura 81

*Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones estáticas saturadas.*

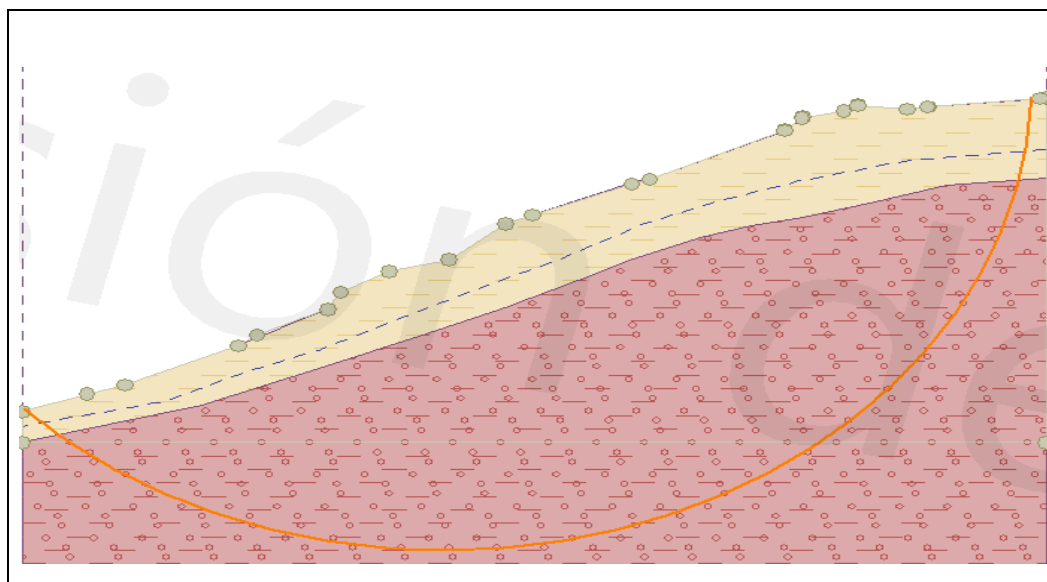


Fuente: Elaboración Propia (2022)

Ahora bien, también se muestra el área de análisis de falla de la sección transversal, el cual comprende ambos perfiles estratigráficos, incluyendo el nivel de agua. (Ver Imagen N° 82)

### Figura 82

*Sección Transversal con el área de Influencia de análisis para condiciones estáticas saturadas.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

#### 4.1.2.1.3 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

Ahora bien, se pasa a mostrar el detalle de visualización 2D y 3D sin la presencia de Nivel Freático bajo un análisis Pseudoestático, el propósito de ello es analizar el comportamiento de dicho talud en condiciones no saturadas, cabe mencionar que la zona de análisis del presente estudio es de constantes precipitaciones pluviales, pero se procede a realizar el análisis de forma contraria para ver el comportamiento de esta.

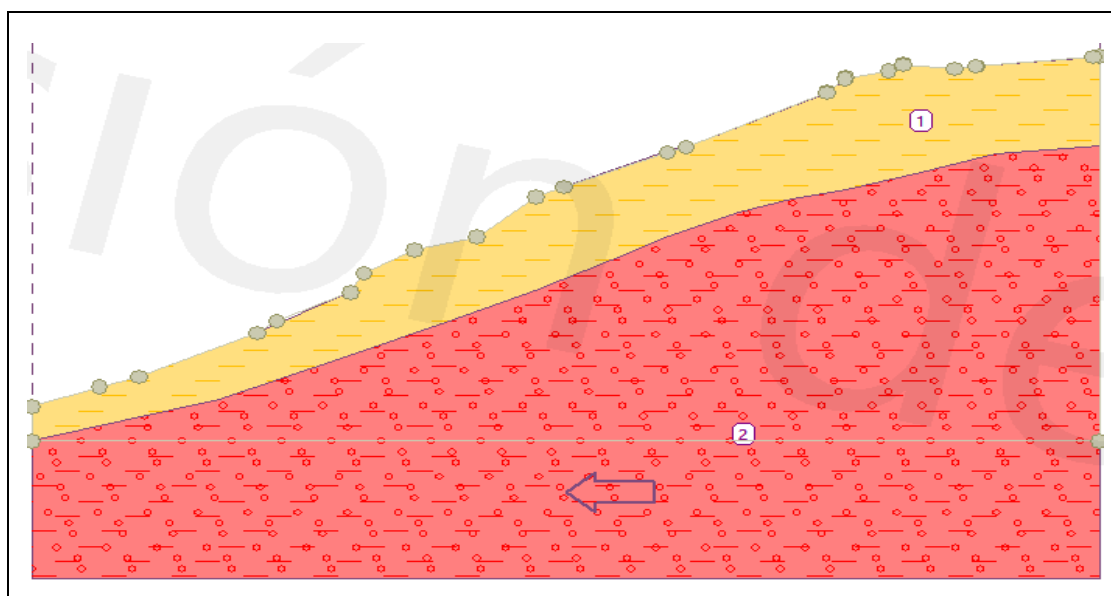
En este caso el valor del coeficiente de sismo horizontal es de: 0.18g, el cual ha sido calculado bajo los valores descritos en las líneas superiores de este documento. (Ver Figura N° 83 y 84)

Cabe mencionar que el análisis de esta sección es con la granulometría descrita anteriormente las cuales se encuentran descritas líneas arriba de este documento.

El coeficiente de sismo vertical no está siendo considerado en este análisis, ya que en la bibliografía encontrada recomiendan no utilizarla en los análisis para el cálculo de los Factores de Seguridad. (Ver Figura N° 85)

#### Figura 83

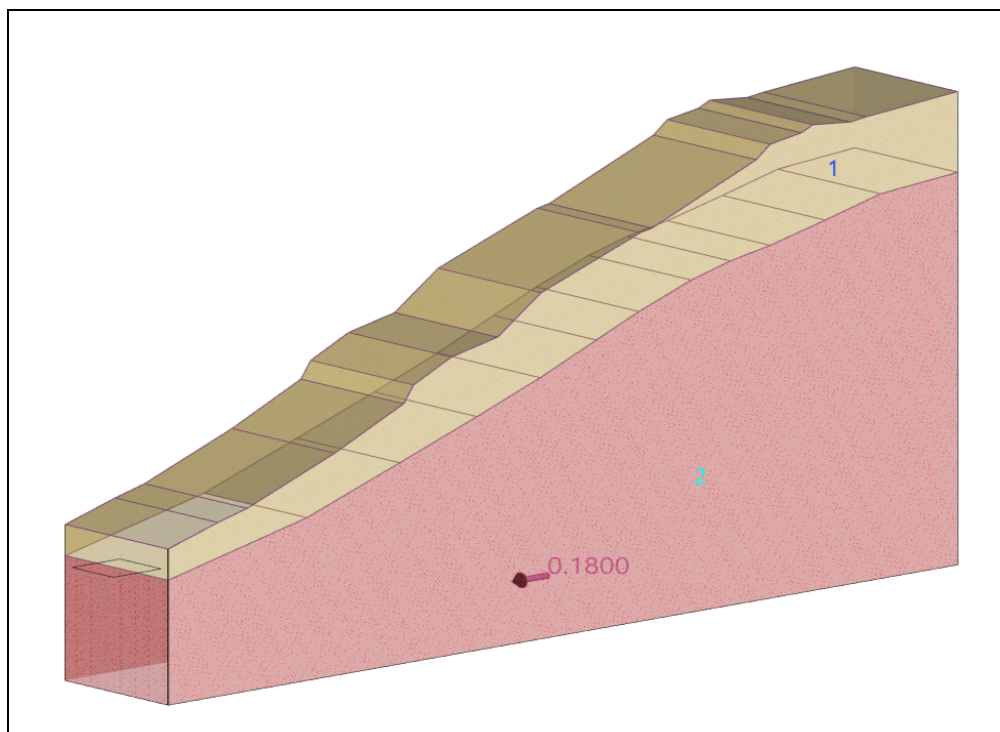
*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 84**

*Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

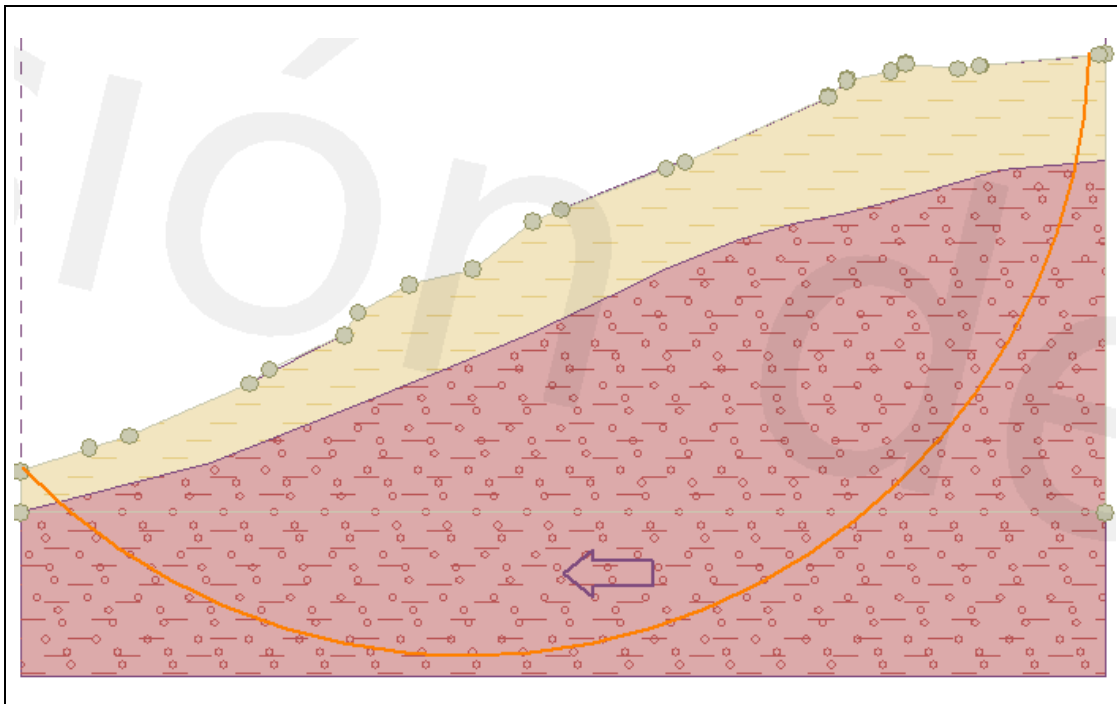
Ahora bien, también se muestra el área de análisis de falla de la sección transversal, el cual comprende ambos perfiles estratigráficos, sin incluir el nivel freático. (Ver Imagen N° 85)

A continuación, se procede a mostrar los resultados del modelamiento, el cual arroja valores aun dentro de los rangos establecidos, se puede apreciar que dichos valores son muy cercanos a su valor referencial. Tener en cuenta que el análisis es en forma estática y el propósito del análisis es ver cómo es al comportamiento en condiciones de un evento sísmico.

Se puede apreciar que bajo el método de Fellenius/Petterson el valor es de  $F. S = 1.50$ , el cual no es aceptable las condiciones de diseño que se tiene. (Ver Imagen N° 86)

**Figura 85**

Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas.

**Figura 86**

Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones Pseudoestáticas No saturadas.

Verificación de estabilidad de taludes (todos los métodos)		
Bishop :	FS = 1.65 > 1.50	ACEPTABLE
Fellenius / Petterson :	FS = 1.50 < 1.50	NO ACEPTABLE
Spencer :	FS = 1.69 > 1.50	ACEPTABLE
Janbu :	FS = 1.68 > 1.50	ACEPTABLE
Morgenstern-Price :	FS = 1.68 > 1.50	ACEPTABLE

Fuente: Elaboración Propia (2022)

#### 4.1.2.1.4 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático

Ahora bien, se pasa a mostrar el detalle de visualización 2D y 3D con la presencia de Nivel Freático, el propósito de ello es analizar el comportamiento de dicho talud en condiciones saturadas, cabe mencionar que la zona de análisis del presente estudio es de constantes precipitaciones pluviales lo que hace que el suelo del presente talud siempre se encuentre en condiciones saturadas.

Es debido a eso que el análisis que se realizará a continuación tiene la presencia de nivel freático acorde a lo que se encuentra en los estudios de mecánica de suelos, lo que hará que el F.S disminuya debido a que el agua produce cierto debilitamiento a toda la sección transversal general del suelo. (Ver imagen N° 87 y 88).

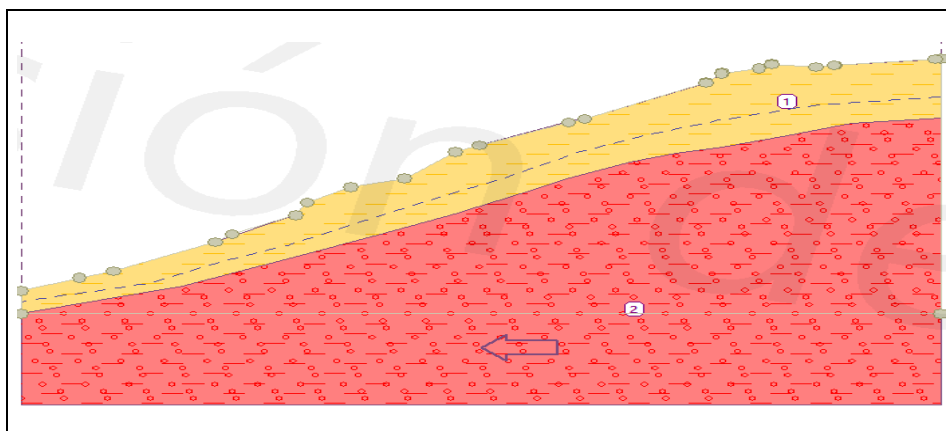
Cabe mencionar que el análisis de esta sección es con la granulometría descrita anteriormente líneas arriba de este documento.

En este caso el valor del coeficiente de sismo horizontal es de: 0.18g, el cual ha sido calculado bajo los valores descritos en las líneas superiores de este documento. (Ver Figura N° 88)

El coeficiente de sismo vertical no está siendo considerado en este análisis, ya que en la bibliografía encontrada recomiendan no utilizarla en los análisis para el cálculo de los Factores de Seguridad. (Ver Figura N° 88)

#### Figura 87

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*

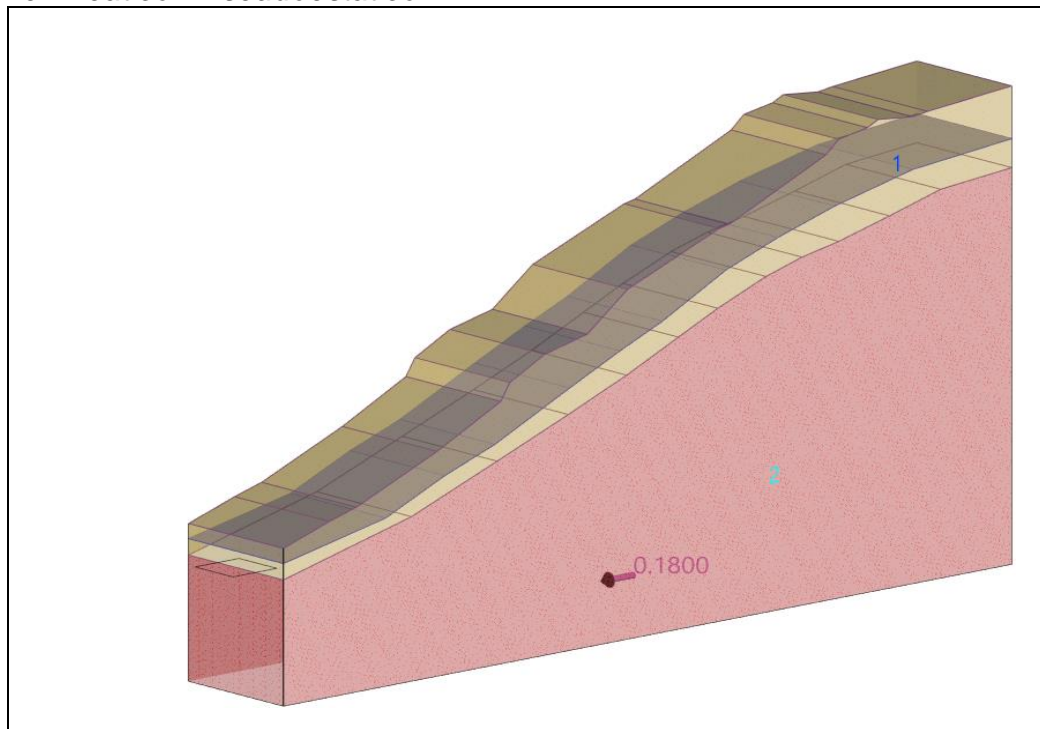


Fuente: Elaboración Propia (2022)



**Figura 88**

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

A continuación, se pasa a mostrar los resultados del análisis bajo condiciones pseudoestáticas y con presencia de nivel freático, como se sabe, las condiciones de la zona de estudio por naturaleza son saturadas y el análisis bajo estas condiciones es el ideal para hacer la propuesta de un muro de gaviones para refuerzo de dicho talud. (Ver Imagen N° 89)

**Figura 89**

*Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático.*

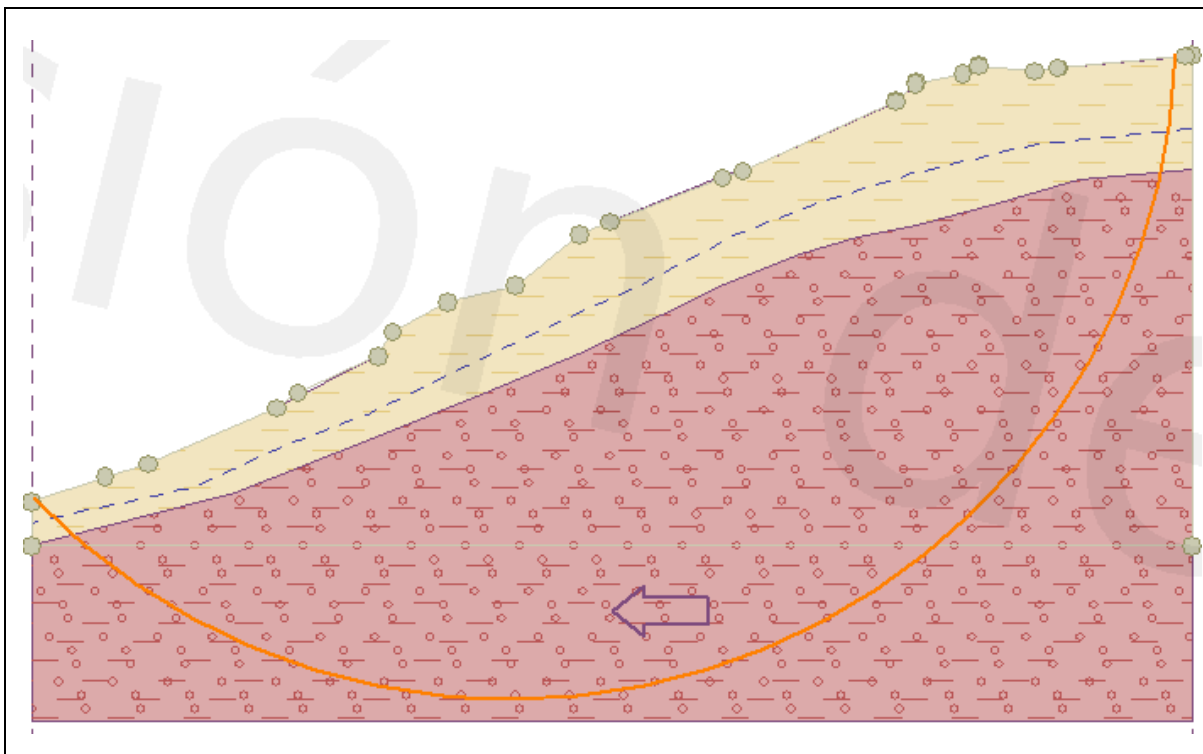
Verificación de estabilidad de taludes (todos los métodos)	
Bishop :	FS = 0.93 < 1.00 <b>NO ACEPTABLE</b>
Fellenius / Petterson :	FS = 0.85 < 1.00 <b>NO ACEPTABLE</b>
Spencer :	<b>La solución no ha sido encontrada.</b>
Janbu :	FS = 0.98 < 1.00 <b>NO ACEPTABLE</b>
Morgenstern-Price :	FS = 0.98 < 1.00 <b>NO ACEPTABLE</b>

Fuente: Elaboración Propia (2022)

Como se puede ver en los resultados los valores oscilan entre 1.04 hasta 1.23, lo cual hace que se vea en la necesidad que se proponga la colocación de un muro de gaviones, tal cual y como se menciona en la presente tesis. Es por ello que los análisis posteriores serán con la presencia de un cuerpo rígido, el cual vendrá estar representado por el muro en gaviones. Cabe mencionar que se pasa a mostrar el área de análisis donde es la misma para todos los casos analizados hasta el momento. Nuevamente mencionar que el perfil estratigráfico se está manteniendo donde los valores de los parámetros de resistencia se encuentran descritas líneas arriba de la presente tesis. (Ver Imagen N° 90)

**Figura 90**

*Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas.*



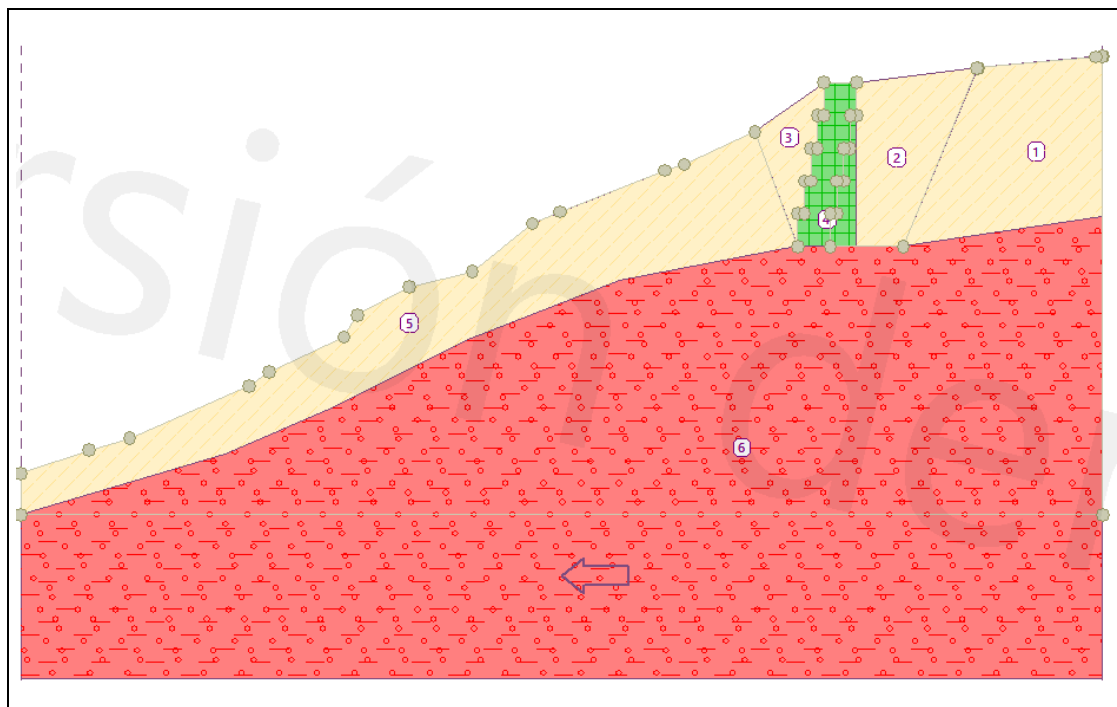
Fuente: Elaboración Propia (2022)

#### 4.1.2.1.5 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural con Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

Ahora bien, se pasa a mostrar el detalle de visualización 2D y 3D sin la presencia del nivel freático y con la presencia del cuerpo rígido que vendría estar representado por el muro de gaviones, se hace este análisis con la finalidad de ver el comportamiento de dicho talud por que habiéndose realizado el análisis pseudoestático sin la presencia de este muro de gaviones se vio en la necesidad de estabilizar dicho talud con algún cuerpo rígido que cumpla con las condiciones técnicas y económicas para su reforzamiento. Es interesante mencionar que en la zona de la colocación del muro de gaviones existe un refuerzo del suelo con la finalidad de que también se pueda mejorar el F.S. y exista un mejor comportamiento en el análisis que se esté realizando. (Ver Figura N° 91 y 92).

#### Figura 91

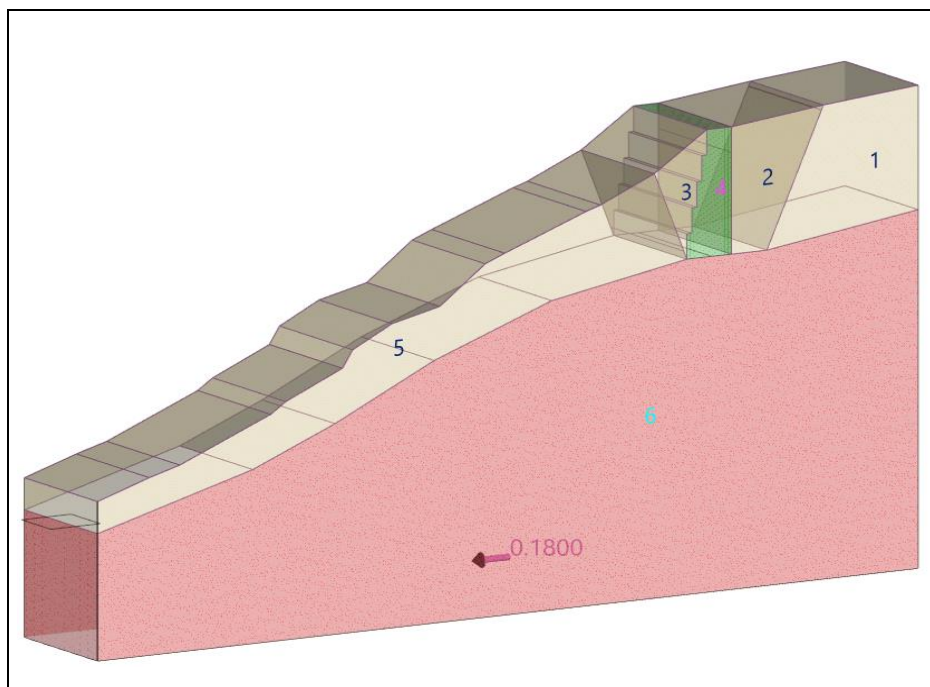
*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 92**

*Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

A continuación, se muestra los valores del F.S. una vez realizado el análisis Pseudoestático con la presencia del cuerpo rígido (Muro de Gaviones), como se puede apreciar en las imágenes anteriores, no existe la presencia de nivel freático, lo cual hace que los valores del factor de seguridad sean algo elevados, pero es importante mencionar que el análisis correcto tiene que ser con la presencia de nivel freático ya que la zona en estudio es de constante presencia de aguas pluviales lo que hace que exista nivel freático en todo su comportamiento. (Ver Figura N° 93).

**Figura 93**

*Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático.*

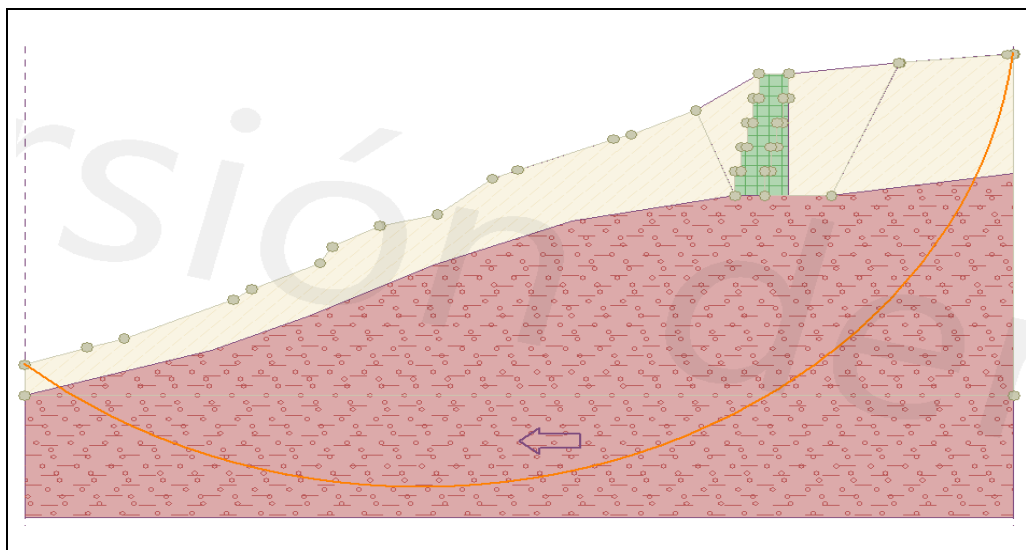
Verificación de estabilidad de taludes (todos los métodos)	
Bishop :	FS = 1.55 > 1.00 ACEPTABLE
Fellenius / Petterson :	FS = 1.42 > 1.00 ACEPTABLE
Spencer :	FS = 1.59 > 1.00 ACEPTABLE
Janbu :	FS = 1.59 > 1.00 ACEPTABLE
Morgenstern-Price :	FS = 1.59 > 1.00 ACEPTABLE

Fuente: Elaboración Propia (2022)

Cabe mencionar que se pasa a mostrar el área de análisis donde es la misma para todos los casos analizados hasta el momento. Nuevamente mencionar que el perfil estratigráfico se está manteniendo donde los valores de los parámetros de resistencia se encuentran descritas líneas arriba de la presente tesis. (Ver Imagen N° 94).

**Figura 94**

*Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas con presencia de cuerpo rígido sin Nivel Freático.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

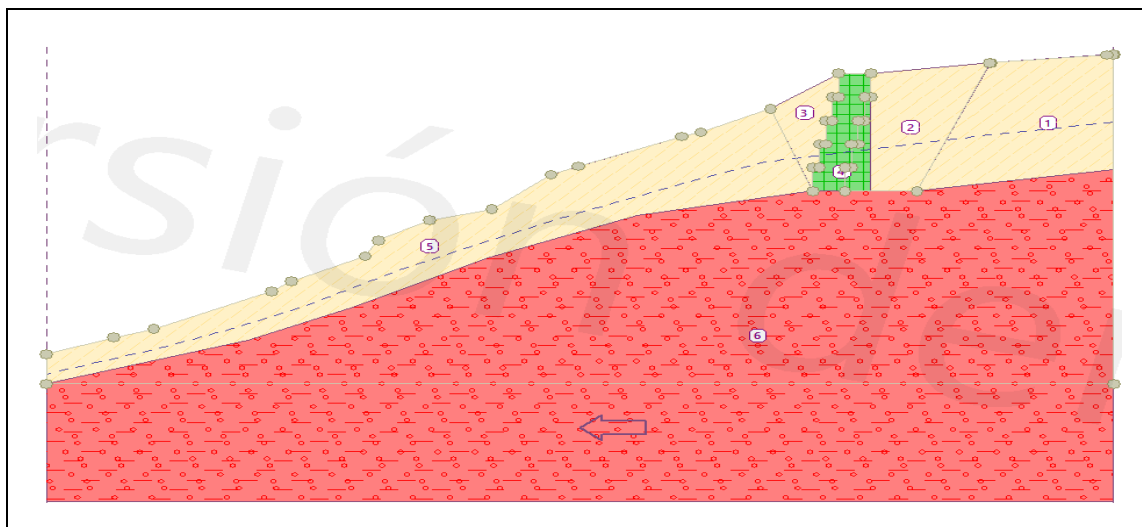
**4.1.2.1.6 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural con Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático**

Ahora bien, se pasa a mostrar el detalle de visualización 2D y 3D con la presencia del nivel freático y con la presencia del cuerpo rígido que vendría estar representado por el muro de gaviones, se hace este análisis con la finalidad de ver el comportamiento de dicho talud por que habiéndose realizado el análisis pseudoestático sin la presencia de este muro de gaviones se vio en la necesidad de estabilizar dicho talud con algún cuerpo rígido que cumpla con las condiciones técnicas y económicas para su reforzamiento. Es interesante mencionar que en la zona de la colocación del muro de gaviones existe un refuerzo del suelo con la finalidad de que también se pueda mejorar el F.S. y exista un mejor comportamiento

en el análisis que se esté realizando y donde ahora el análisis es con la presencia de nivel freático. (Ver Figura N° 95).

### Figura 95

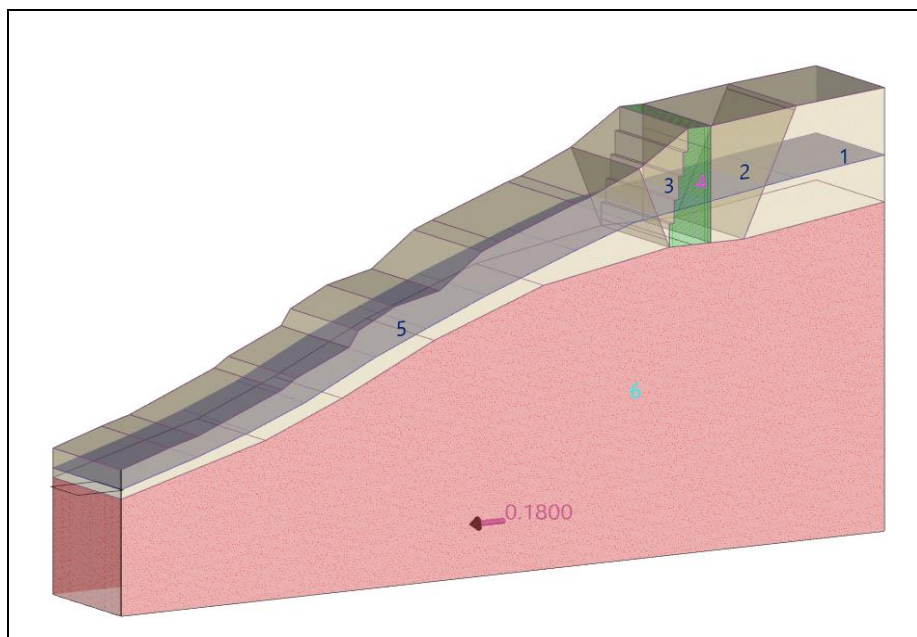
*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

### Figura 96

*Sección Transversal 3D con su respectivo Perfil Estratigráfico Con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

A continuación, se muestra los valores del F.S. una vez realizado el análisis Pseudoestático con la presencia del cuerpo rígido (Muro de Gaviones). Como se aprecia los valores del factor de seguridad a comparación del anterior resultado bajaron considerablemente con el hecho de que exista la presencia de agua, es por ello que el presente análisis es el correcto ya que cuenta con todos los factores en contra que pueda existir en un talud (fuerza sísmica, nivel freático) (Ver Figura N° 97).

### Figura 97

*Factores de Seguridad con distintos métodos para condiciones pseudoestáticas con Presencia de Nivel Freático.*

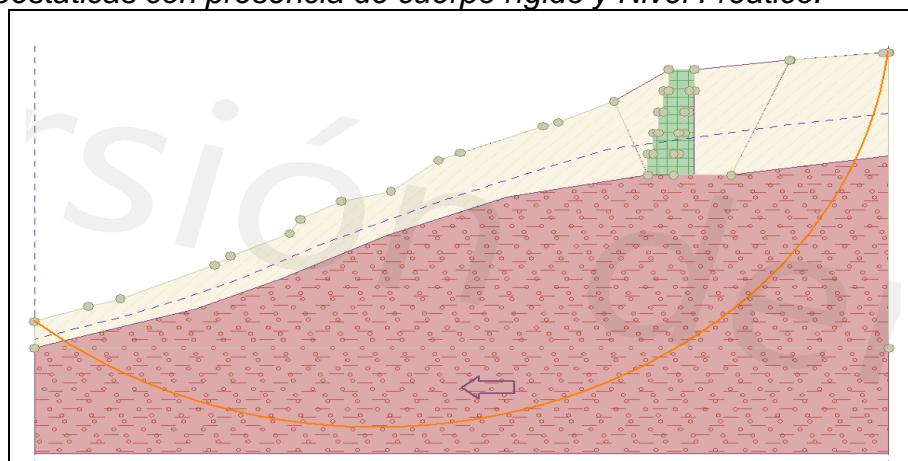
Verificación de estabilidad de taludes (todos los métodos)		
Bishop :	FS = 1.11 > 1.00	ACEPTABLE
Fellenius / Petterson :	FS = 1.04 > 1.00	ACEPTABLE
Spencer :	FS = 1.18 > 1.00	ACEPTABLE
Janbu :	FS = 1.16 > 1.00	ACEPTABLE
Morgenstern-Price :	FS = 1.16 > 1.00	ACEPTABLE

*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Cabe mencionar que se pasa a mostrar el área de análisis donde es la misma para todos los casos analizados hasta el momento con presencia del nivel freático. Nuevamente mencionar que el perfil estratigráfico se está manteniendo donde los valores de los parámetros de resistencia se encuentran descritas líneas arriba de la presente tesis. (Ver Imagen N° 98).

### Figura 98

*Sección Transversal con el área de Influencia de análisis en condiciones Pseudoestáticas con presencia de cuerpo rígido y Nivel Freático.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

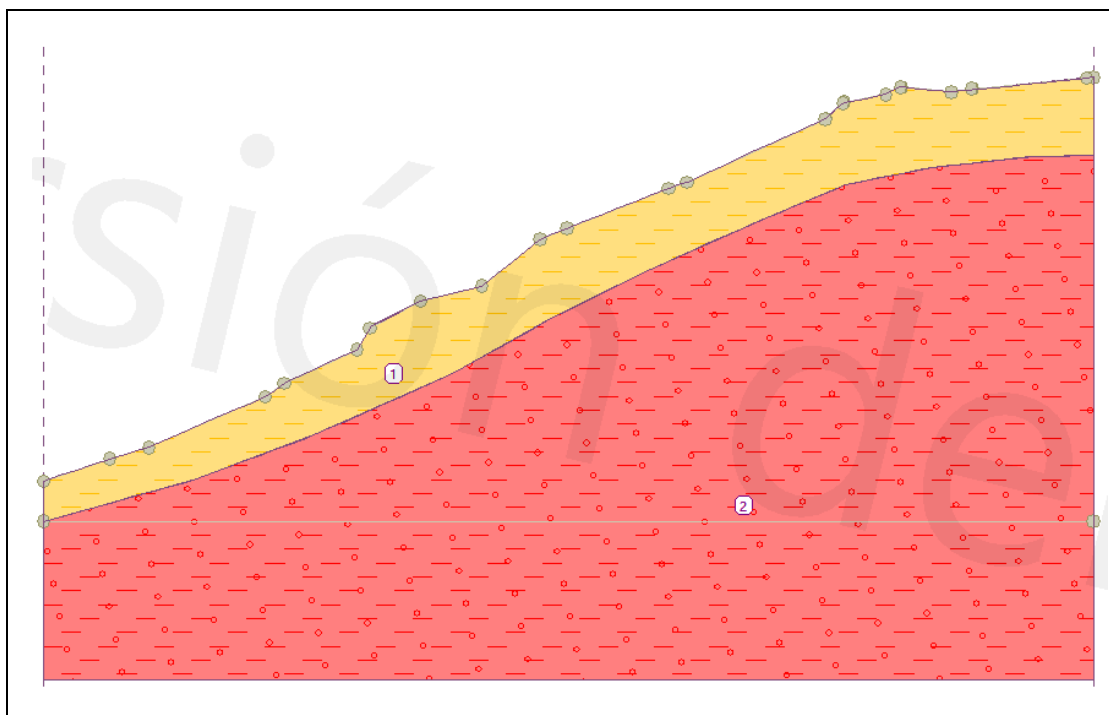
#### 4.1.2.2 Análisis Geotécnico de Estabilización de Talud – Elementos Finitos

##### 4.1.2.2.1 Análisis de Estabilidad Estático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

A continuación, se procede con el análisis mediante el método de elementos finitos, bajo las condiciones de: sin cuerpo rígido y sin nivel freático, se está realizando este tipo de análisis porque, así como en el anterior método de análisis, es interesante poder saber cómo es el comportamiento de dicha sección transversal bajo el método de elementos finitos. Cabe mencionar que, la estratigrafía de los suelos se sigue manteniendo para la realización de este análisis, con los mismos parámetros de resistencia del suelo. (Ver Imagen N° 99)

#### Figura 99

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Estático*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices

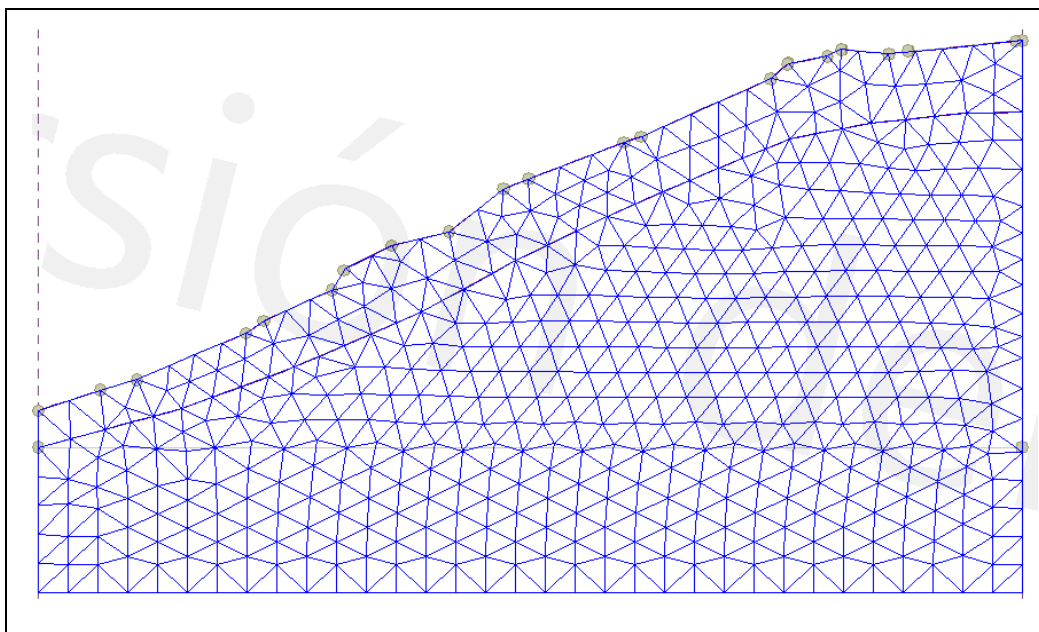


deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición.

En el siguiente grafico se puede apreciar que la malla de elementos finitos ha sido creada satisfactoriamente con un total de 2610 nodos y un total de número de elementos de 1492. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio limite. (Ver Imagen N° 100)

**Figura 100**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

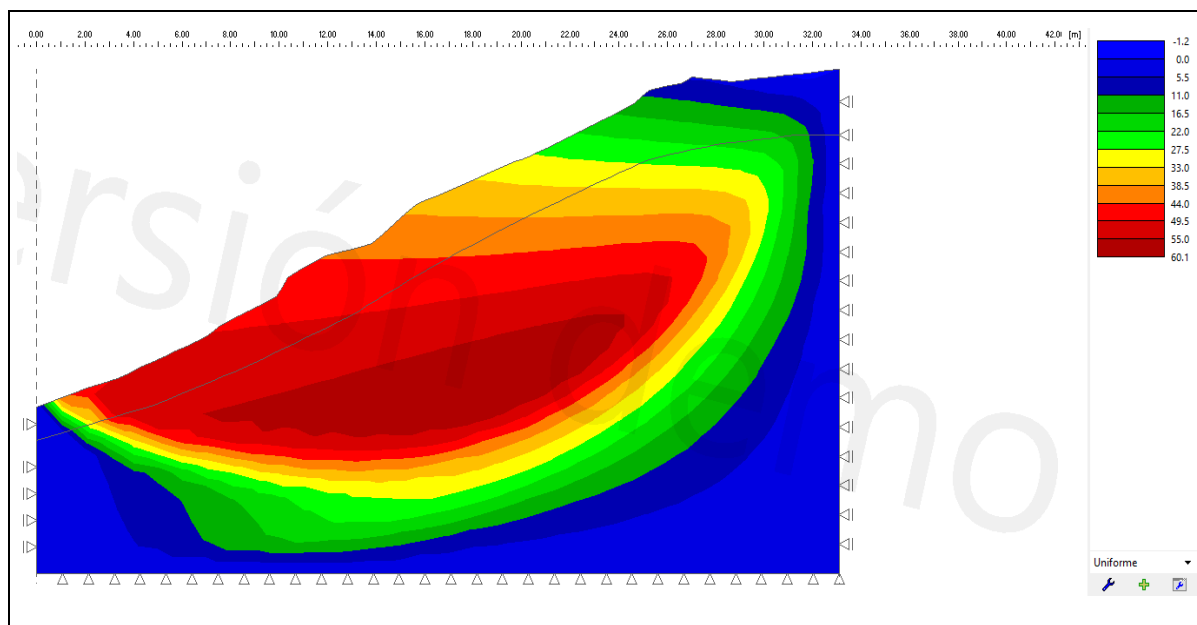
Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección "X", donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 11 a 41 mm, el cual representa un valor que no presentaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 101)

Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 40 al 60 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal no representaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 102)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 51.00 al 76.00 mm, valores que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud con la presencia del muro de gavión: (Ver Imagen N° 103)

### Figura 101

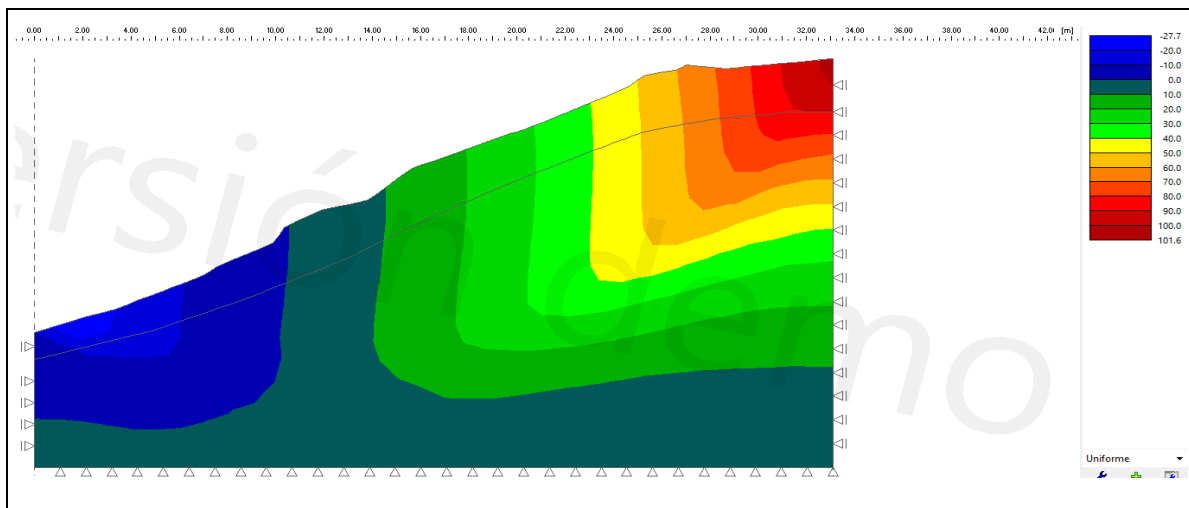
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 102**

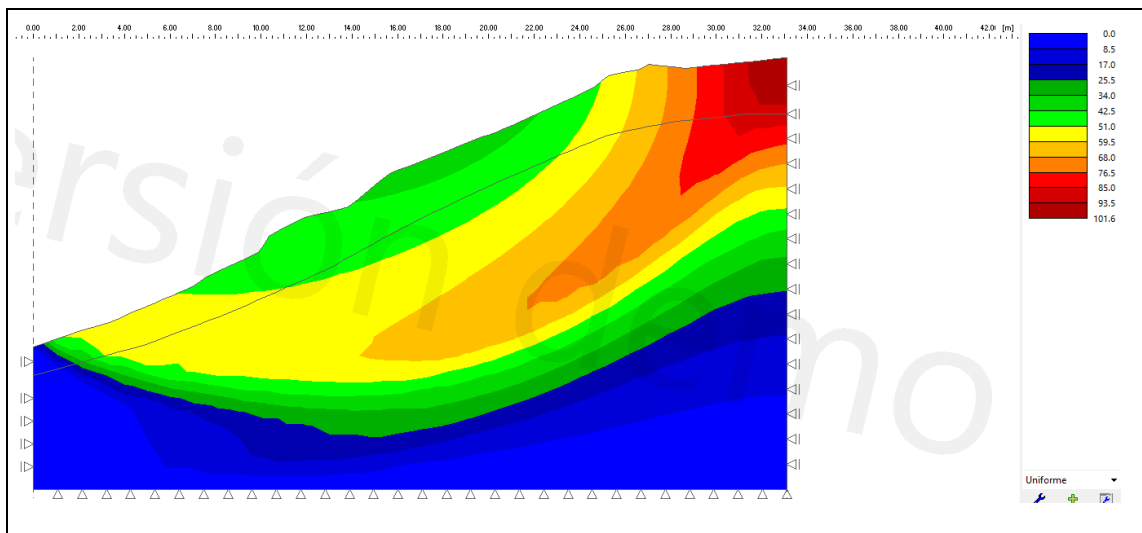
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 103**

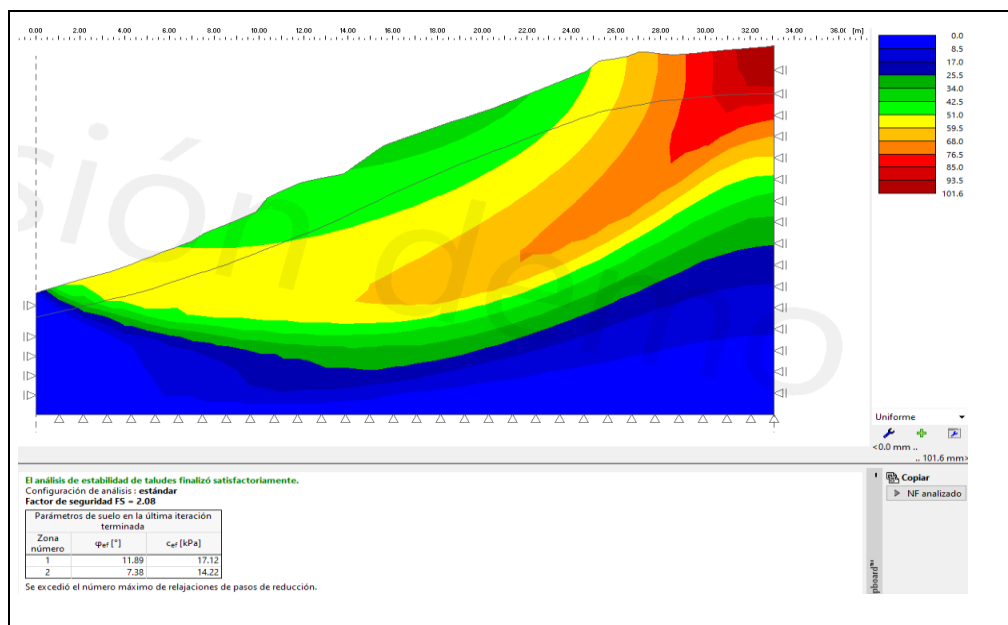
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

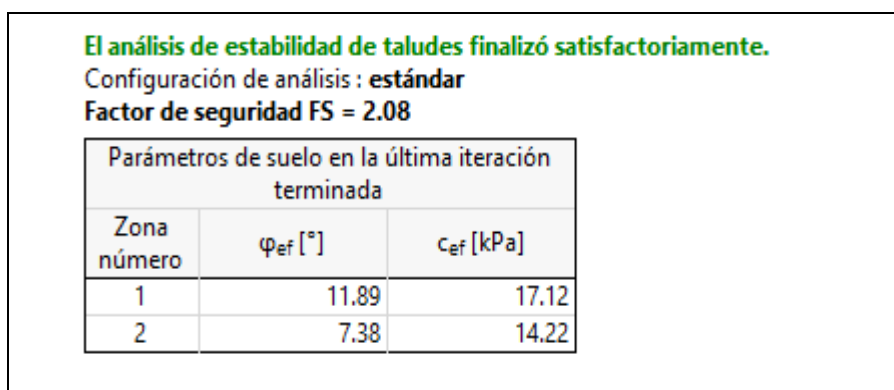
Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 2.08 sin la presencia de Nivel Freático y sin cuerpo rígido. (Ver Figura N° 104 y 105).

**Figura 104**  
Perfil Estratigráfico + F.S.



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 105**  
Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.



Fuente: Elaboración Propia (2022)

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 2.08 sin la presencia de Nivel Freático y sin cuerpo rígido (muro de gaviones), dicho valor es razonable para las condiciones en las que se encuentra el suelo y para la colocación del cuerpo

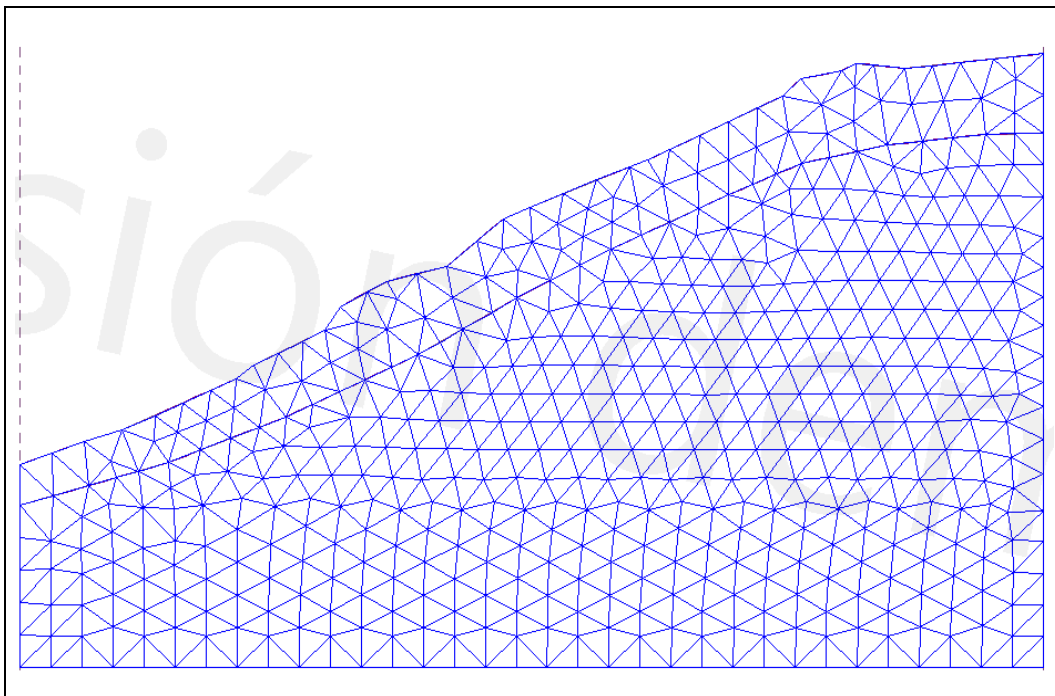


A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición.

En el siguiente grafico se puede apreciar que la malla de elementos finitos ha sido creada satisfactoriamente con un total de 2610 nodos y un total de número de elementos de 1492. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio limite. (Ver Imagen N° 107)

**Figura 107**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta

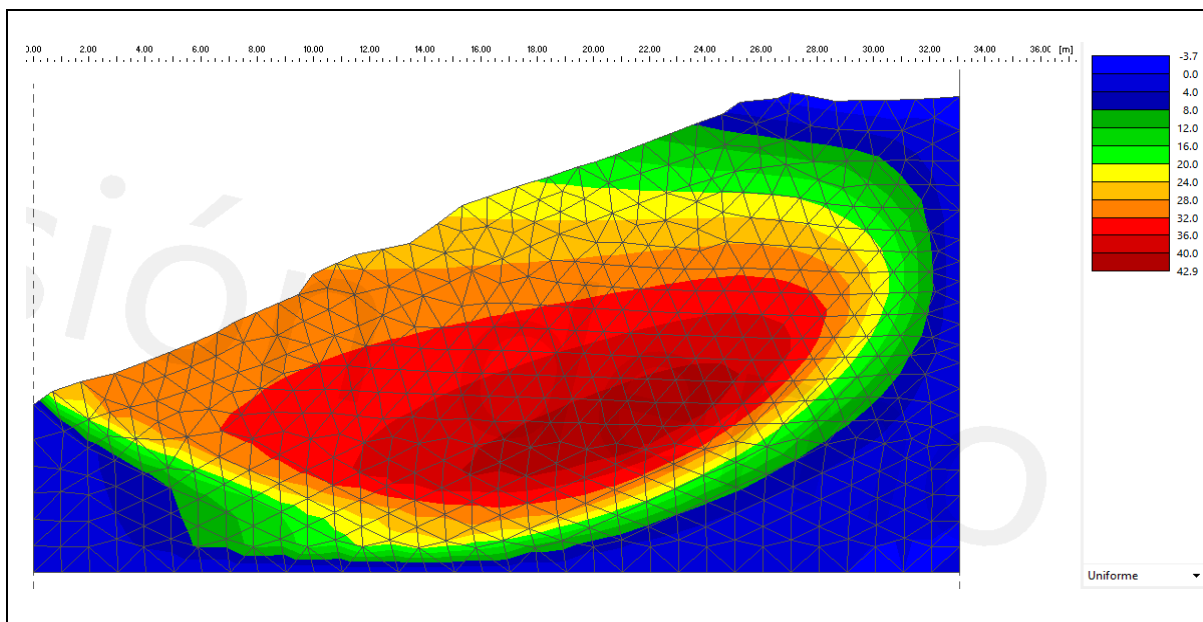
primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección “X”, donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 20 a 32 mm, el cual representa un valor que no presentaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 108)

Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 51 al 74.3 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal no representaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 109)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 26.00 al 71.50 mm, valores que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud con la presencia del muro de gavión: (Ver Imagen N° 110)

### Figura 108

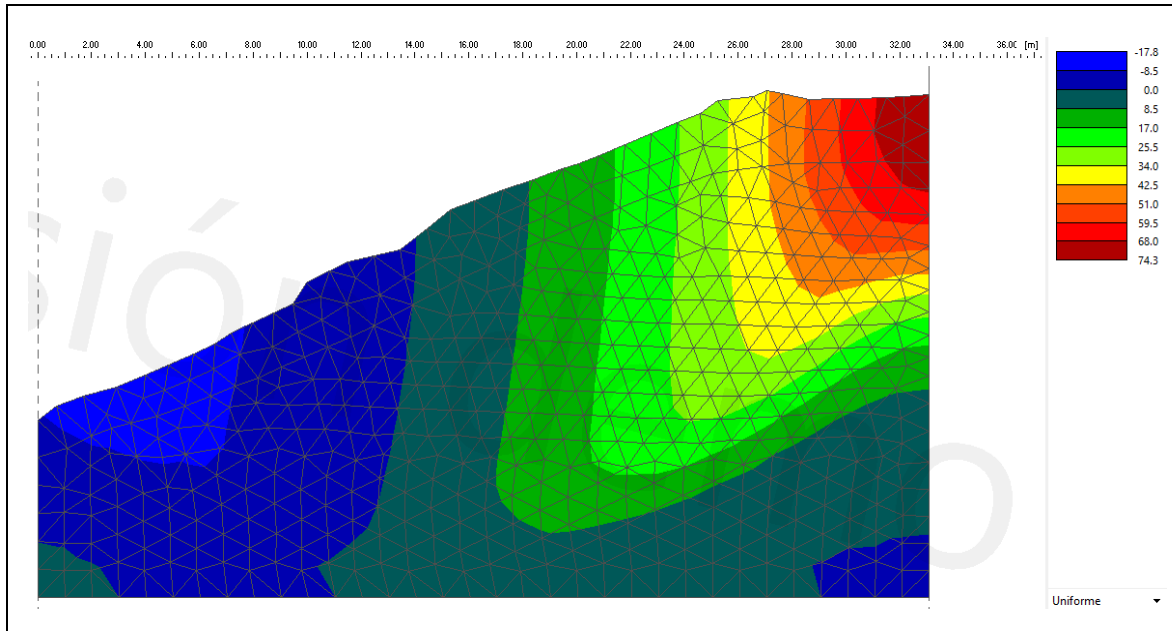
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 109**

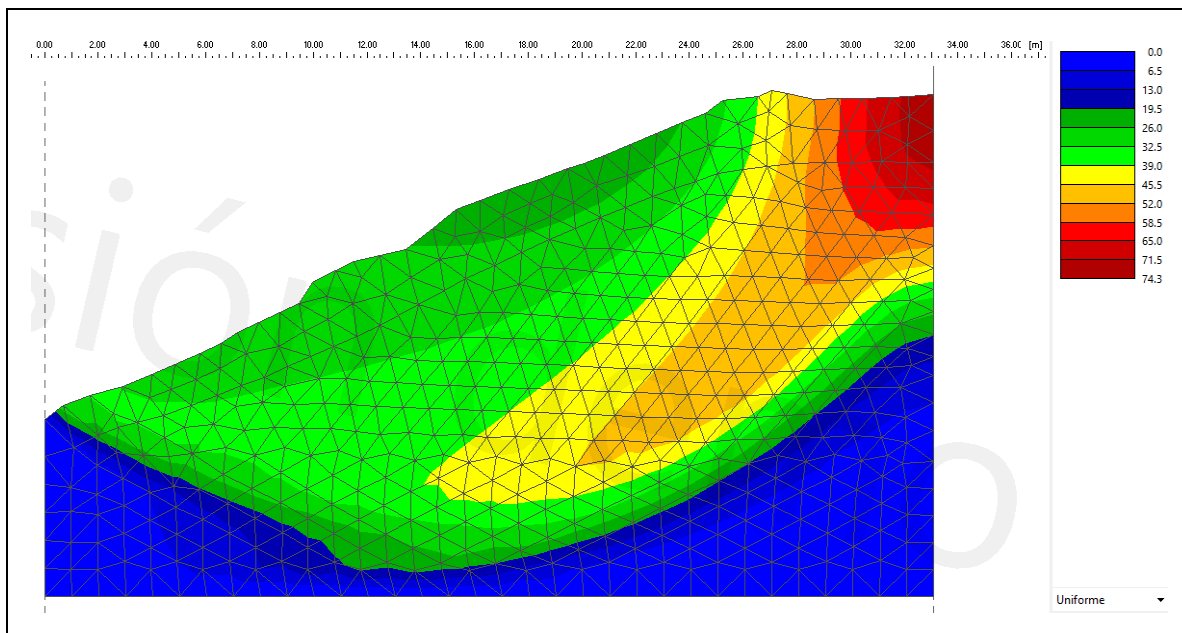
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 110**

*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*



Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 1.44 sin la presencia de Nivel Freático y sin cuerpo rígido. Dicho valor está por debajo al valor tope que se tiene que es de 1.50, es por ello que es necesario que exista la presencia de un cuerpo rígido (muro de gaviones) para poder estabilizar dicho valor de factor de seguridad que arrojo como resultado. Cabe mencionar que los valores que están arrojando el presente método de elementos finitos son de mayor confiabilidad debido a que no solo nos brinda valores de factor de seguridad, sino que también valores de deformaciones, los cuales nos pueden indicar con mayor precisión donde es que se puede colocar el muro de gaviones, exactamente donde exista menor deformación. (Ver Figura N° 111 y 112)

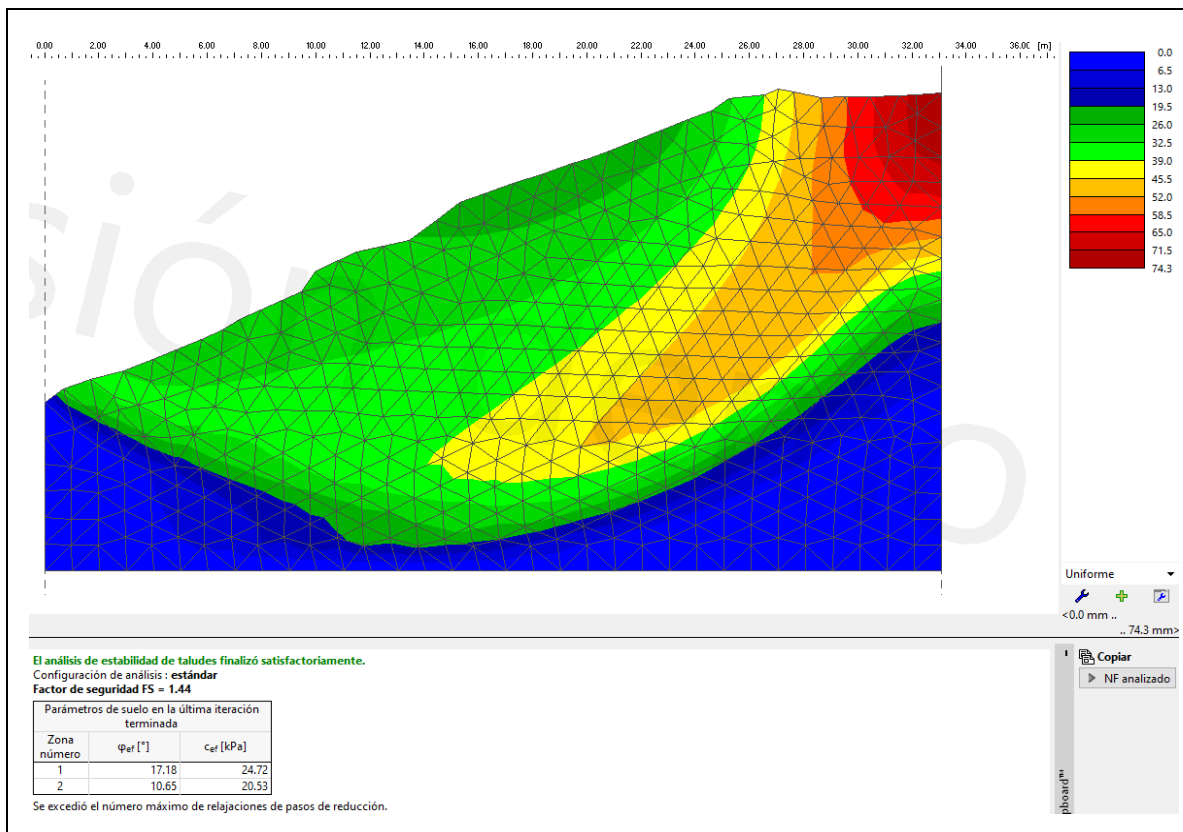
### Figura 111

*Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.*

El análisis de estabilidad de taludes finalizó satisfactoriamente.		
Configuración de análisis : estándar		
Factor de seguridad FS = 1.44		
Parámetros de suelo en la última iteración terminada		
Zona número	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [kPa]
1	17.18	24.72
2	10.65	20.53

*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 112**  
**Perfil Estratigráfico + F.S.**



*Fuente:* Elaboración Propia (2022)

Habiéndose realizado el análisis bajo condiciones saturadas, lo que prosigue ahora es hacer el análisis bajo la presencia de una carga sísmica horizontal, el cual es el óptimo para ver en qué condición se encuentra dicho talud ante la presencia de un sismo.

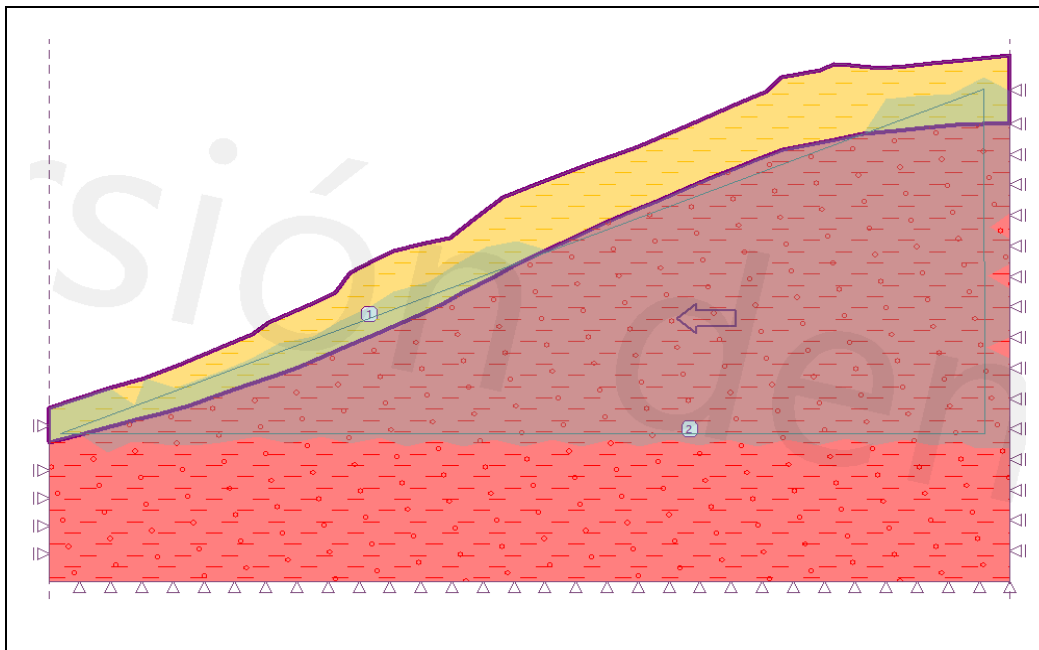
#### 4.1.2.2.3 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

A continuación, se procede con el análisis mediante el método de elementos finitos, bajo las condiciones de: sin cuerpo rígido y sin nivel freático, pero en condiciones pseudoestáticas, se está realizando este tipo de análisis porque, así como en el anterior método de análisis, es interesante poder saber cómo es el comportamiento de dicha sección transversal bajo el método de elementos finitos. Cabe mencionar que, la estratigrafía de los suelos se sigue manteniendo para la

realización de este análisis, con los mismos parámetros de resistencia del suelo. El valor que se está utilizando como coeficiente sísmico horizontal es de 0.18 g. (Ver Imagen N° 113)

**Figura 113**

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



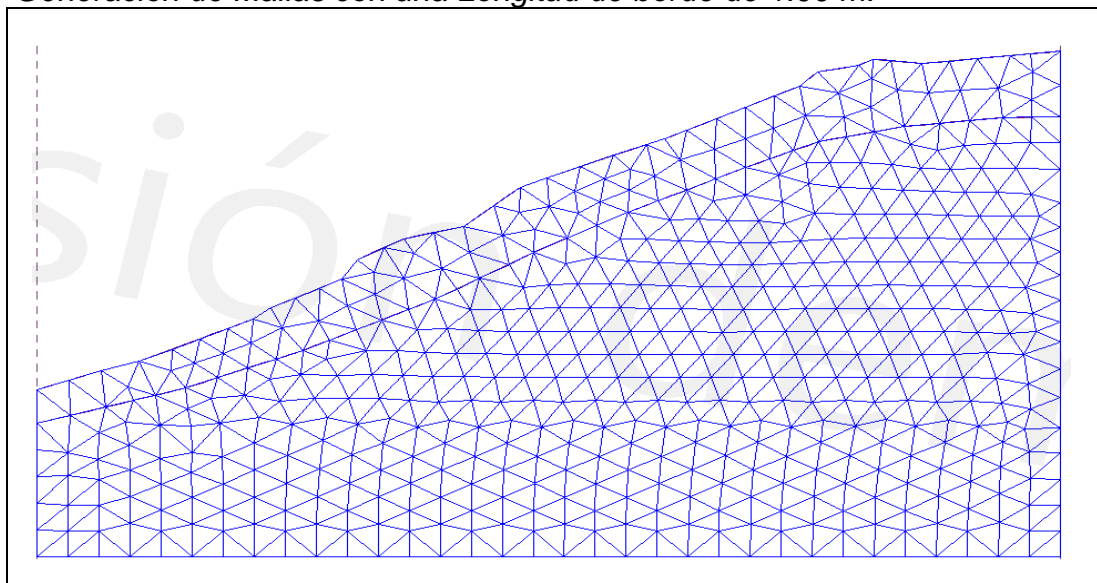
Fuente: Elaboración Propia (2022)

A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición.

En el siguiente gráfico se puede apreciar que la malla de elementos finitos ha sido creada satisfactoriamente con un total de 2610 nodos y un total de número de elementos de 1492. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio límite. (Ver Imagen N° 114).

**Figura 114**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección “X”, donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 9.00 a 31.00 mm, el cual representa un valor que no presentaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 115)

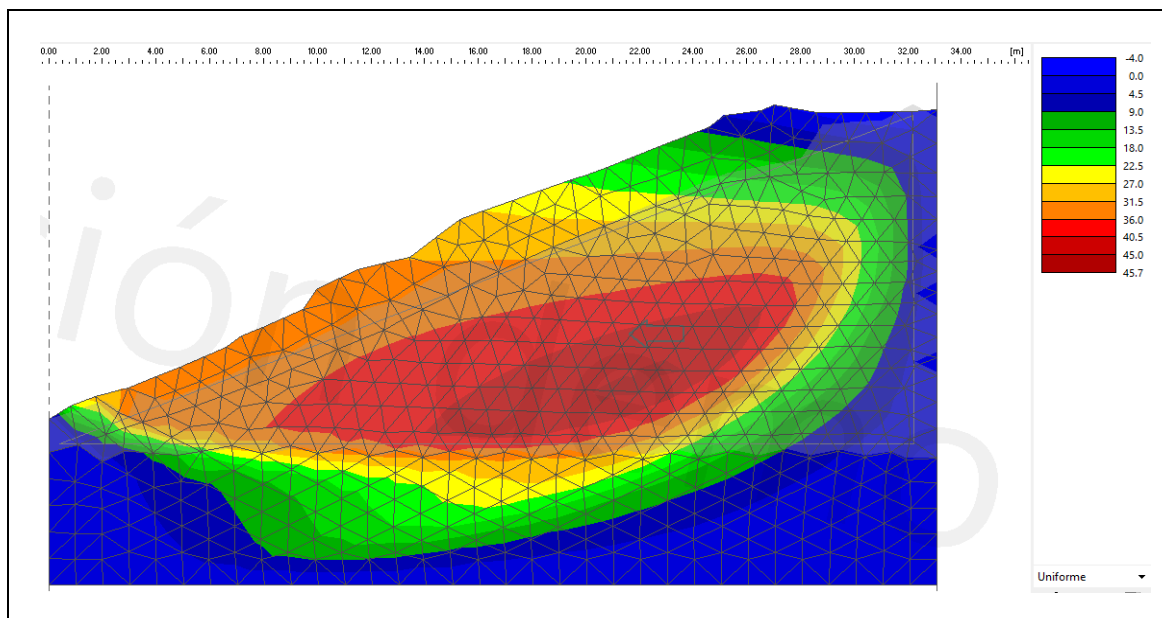
Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 27.00 al 63.00 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal no representaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 116)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 22.00 al 67.50 mm, valores

que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud con la presencia del muro de gavión: (Ver Imagen N° 117)

**Figura 115**

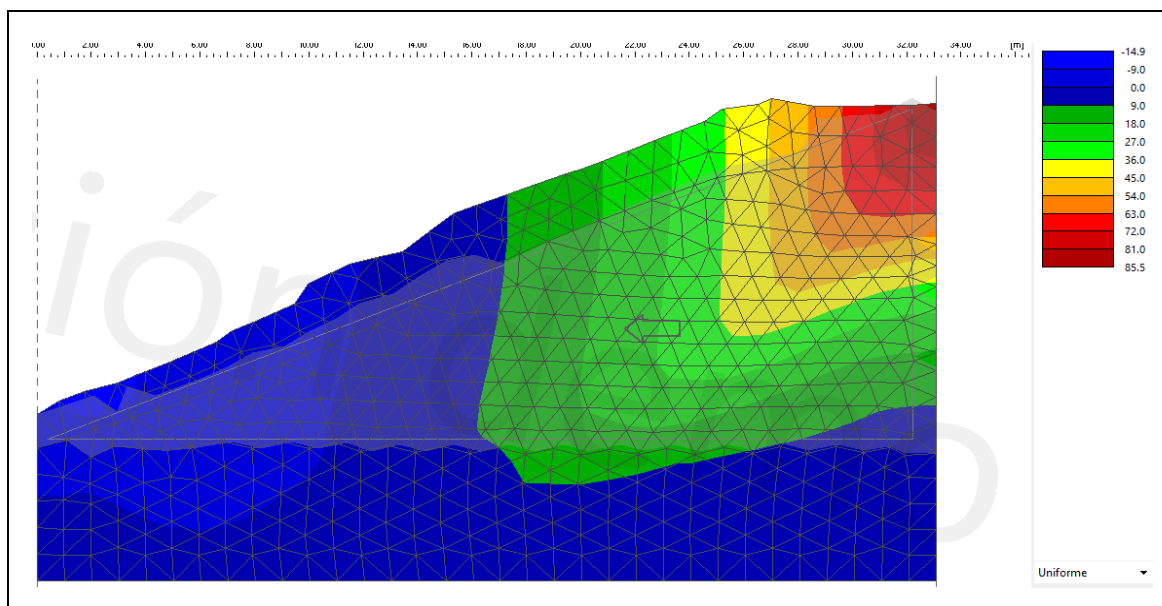
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 116**

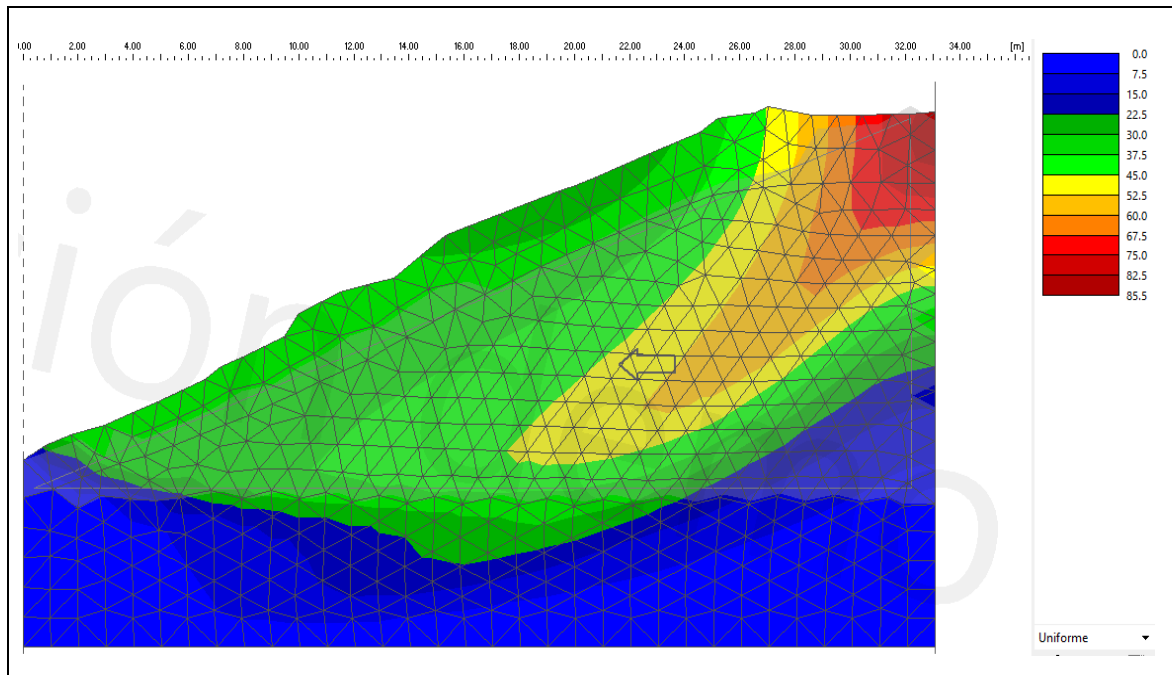
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 117**

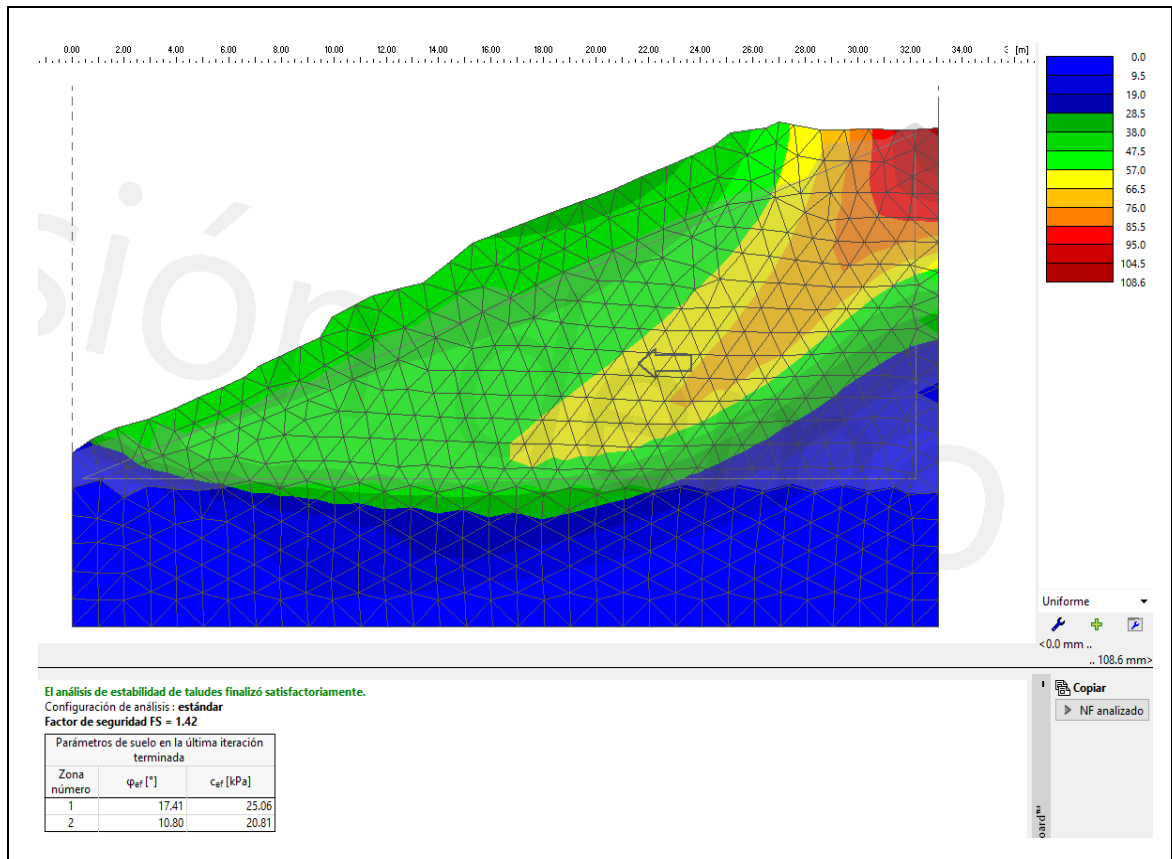
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

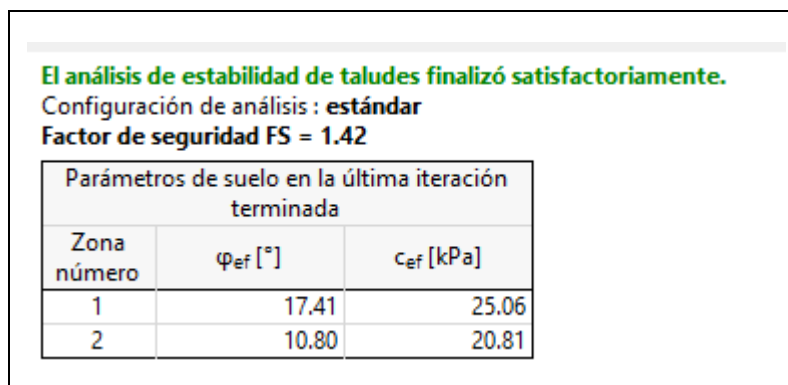
Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 1.42 sin la presencia de Nivel Freático y sin cuerpo rígido. Dicho valor está por debajo al valor tope que se tiene que es de 1.50, es por ello que es necesario que exista la presencia de un cuerpo rígido (muro de gaviones) para poder estabilizar dicho valor de factor de seguridad que arrojo como resultado. Cabe mencionar que los valores que están arrojando el presente método de elementos finitos son de mayor confiabilidad debido a que no solo nos brinda valores de factor de seguridad, sino que también valores de deformaciones, los cuales nos pueden indicar con mayor precisión donde es que se puede colocar el muro de gaviones, exactamente donde exista menor deformación. (Ver Figura N° 118 y 119)

**Figura 118**  
*Perfil Estratigráfico + F.S.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 119**  
*Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.*



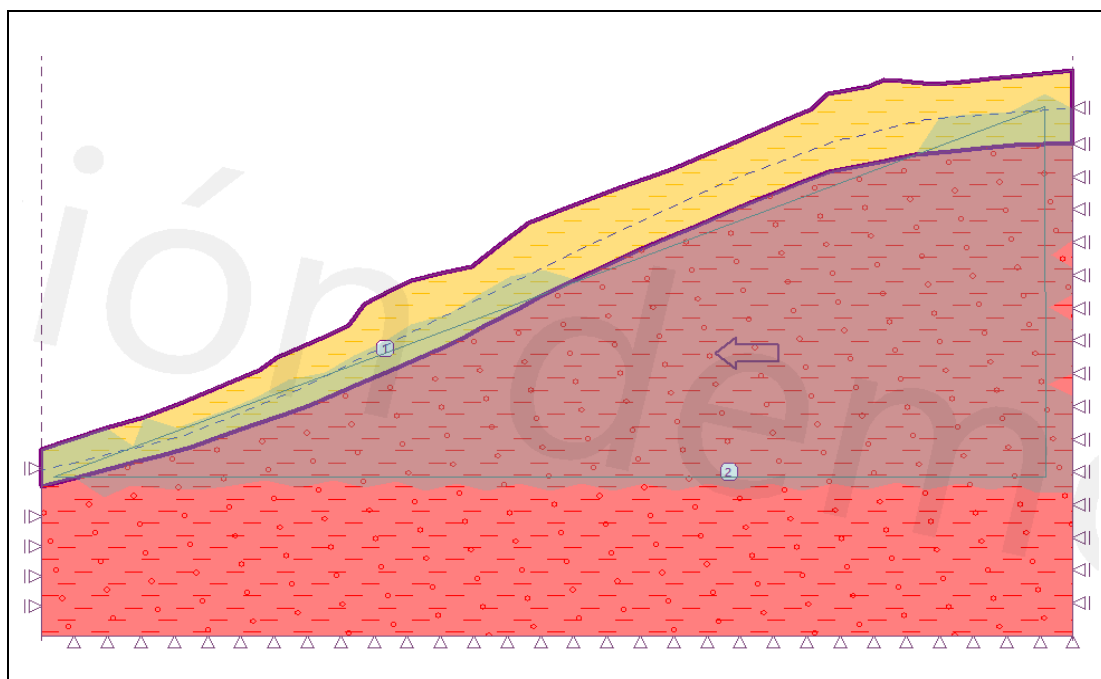
Fuente: Elaboración Propia (2022)

#### 4.1.2.2.4 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático

A continuación, se procede con el análisis mediante el método de elementos finitos, bajo las condiciones de: sin cuerpo rígido y con nivel freático, pero en condiciones pseudoestáticas, se está realizando este tipo de análisis porque, así como en el anterior método de análisis, es interesante poder saber cómo es el comportamiento de dicha sección transversal bajo el método de elementos finitos. Cabe mencionar que, la estratigrafía de los suelos se sigue manteniendo para la realización de este análisis, con los mismos parámetros de resistencia del suelo. El valor que se está utilizando como coeficiente sísmico horizontal es de 0.18 g. se hace mención que el resultado que obtengamos en el presente análisis definirá si es necesario la colocación de un cuerpo rígido para su estabilización, para este caso el valor del factor de seguridad tiene que ser mayor a 1, valor referencial que se tiene para el análisis pseudoestático en estabilidad de taludes. (Ver Imagen N° 120)

#### Figura 120

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

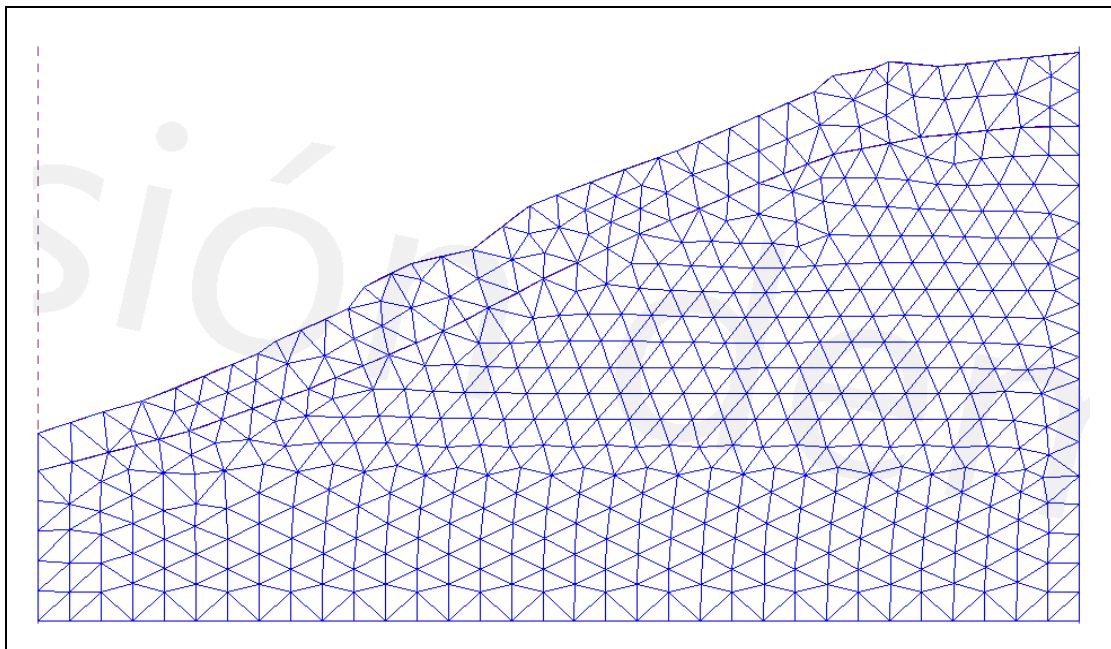


A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición.

En el siguiente gráfico se puede apreciar que la malla de elementos finitos ha sido creada satisfactoriamente con un total de 2610 nodos y un total de número de elementos de 1492. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio límite. (Ver Imagen N° 121)

**Figura 121**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 1.00 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección “X”,

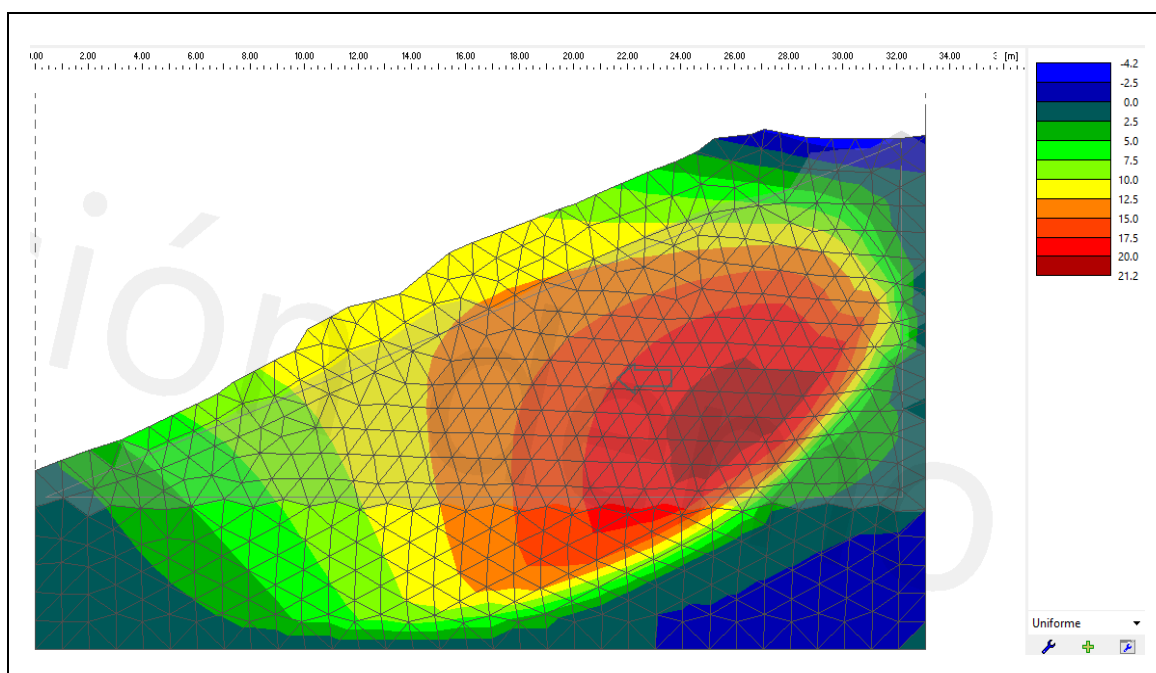
donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 2.50 a 12.50 mm, el cual representa un valor que estaría causando inconvenientes en el comportamiento de dicho talud. (Ver Imagen N° 122)

Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 4.50 al 36.00 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal representaría problemas en su comportamiento para eventos sísmicos posteriores. (Ver Imagen N° 123)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 8.00 al 40.00 mm, valores que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud bajo en evento sísmico y la presencia de nivel freático en su sección. (Ver Imagen N° 124)

### Figura 122

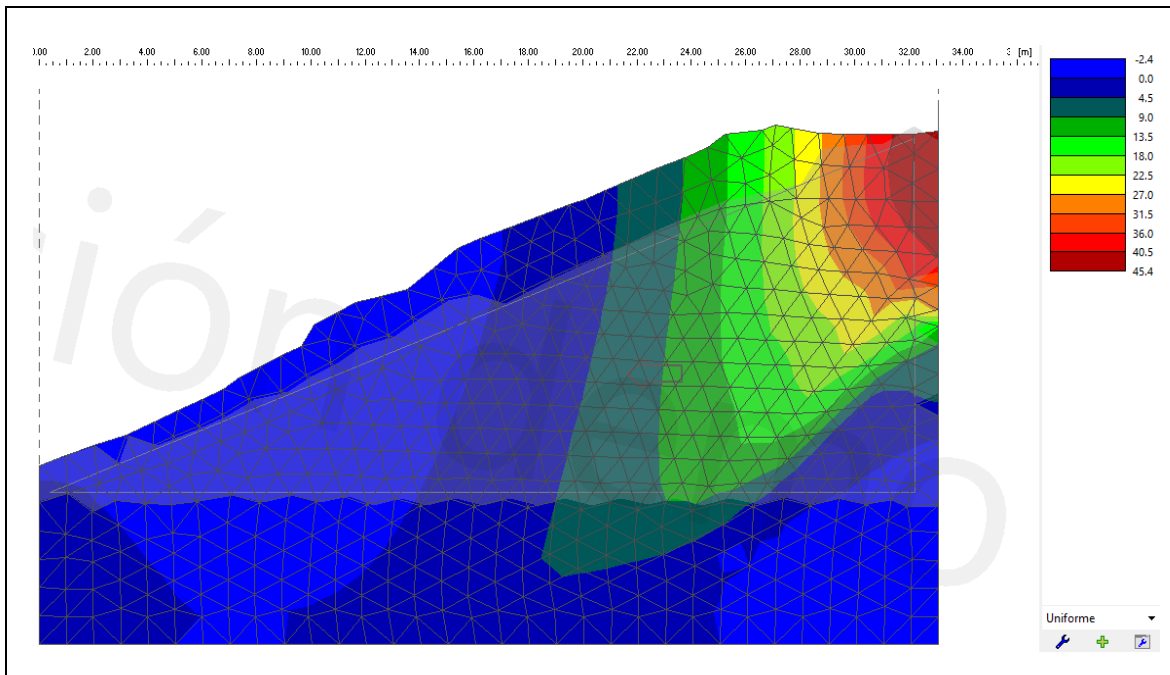
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 123**

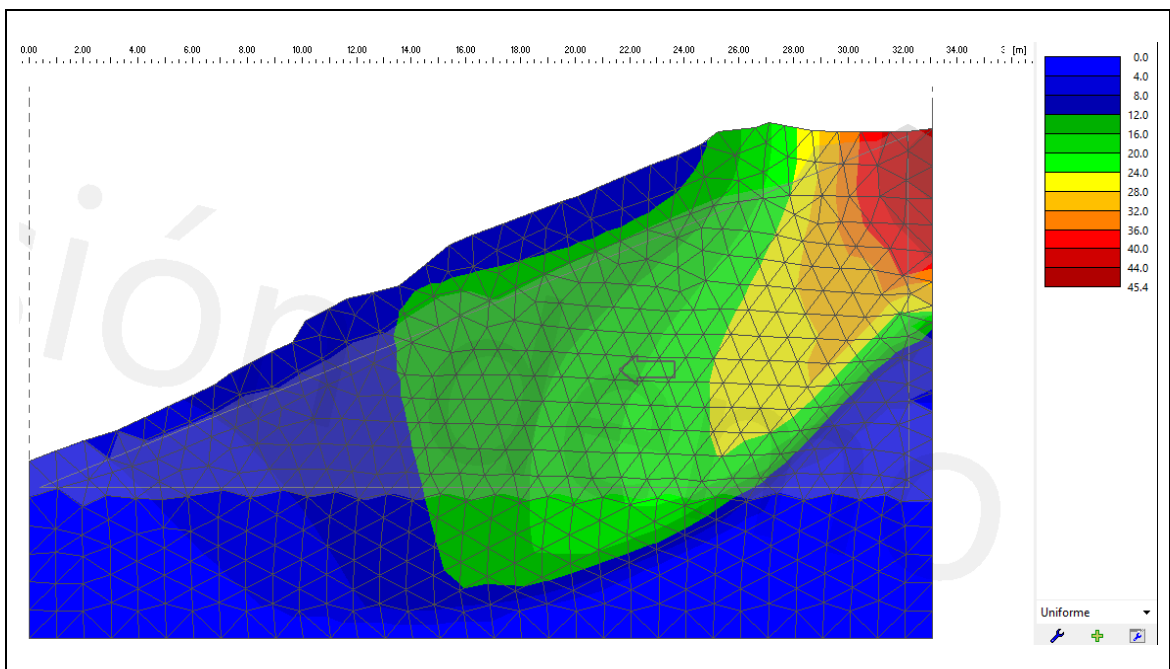
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 124**

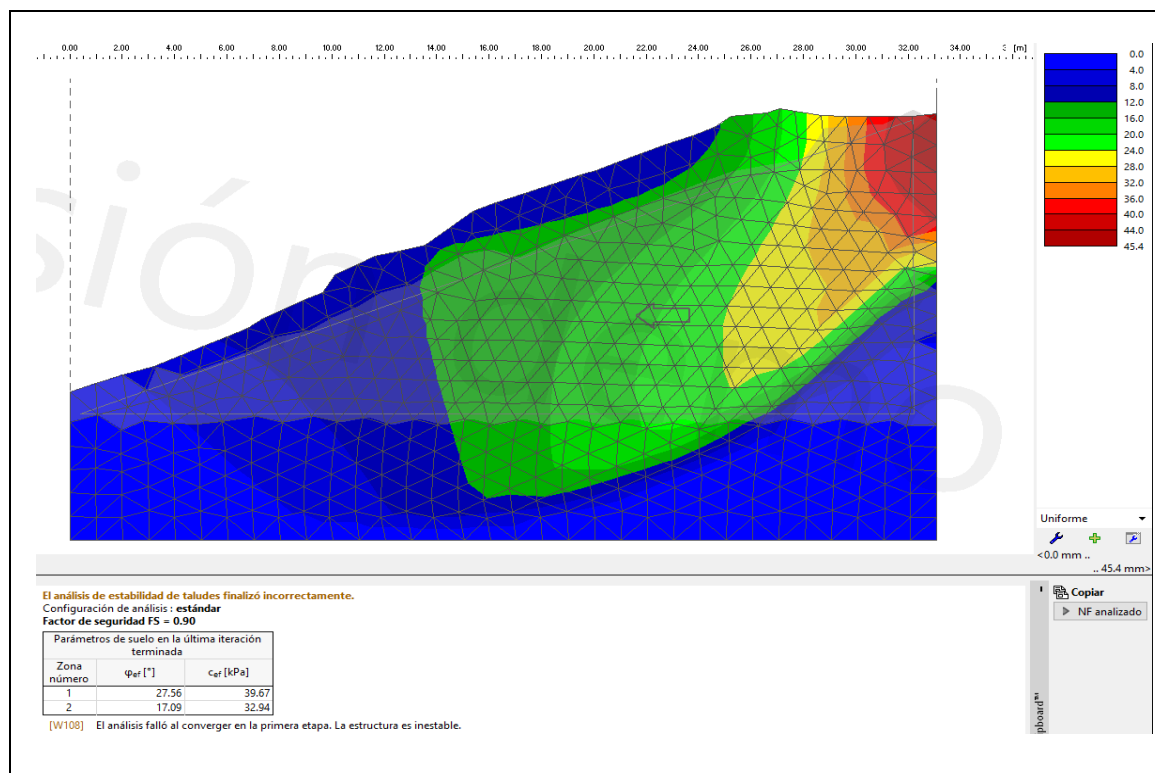
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojó el programa GEO5 que es de 0.90 con la presencia de Nivel Freático y sin cuerpo rígido bajo un evento sísmico. Dicho valor está por debajo al valor tope que se tiene que es de 1.00, es por ello que es necesario que exista la presencia de un cuerpo rígido (muro de gaviones) para poder estabilizar dicho valor de factor de seguridad que arrojó como resultado. Cabe mencionar que los valores que están arrojando el presente método de elementos finitos son de mayor confiabilidad debido a que no solo nos brinda valores de factor de seguridad, sino que también valores de deformaciones, los cuales nos pueden indicar con mayor precisión donde es que se puede colocar el muro de gaviones, exactamente donde exista menor deformación. (Ver Figura N° 125 y 126)

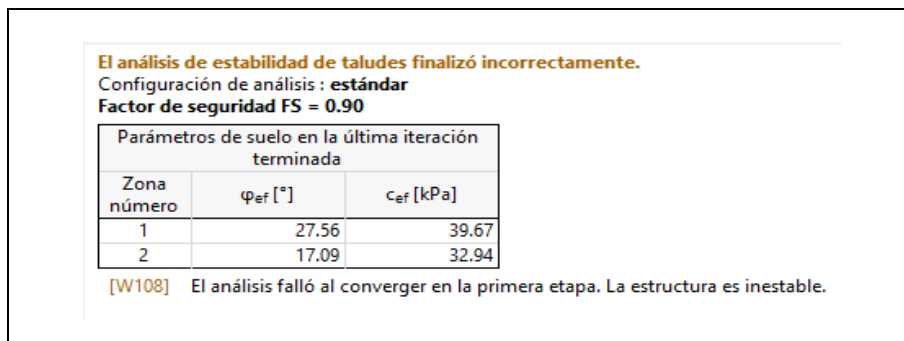
**Figura 125**  
*Perfil Estratigráfico + F.S.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 126**

Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.



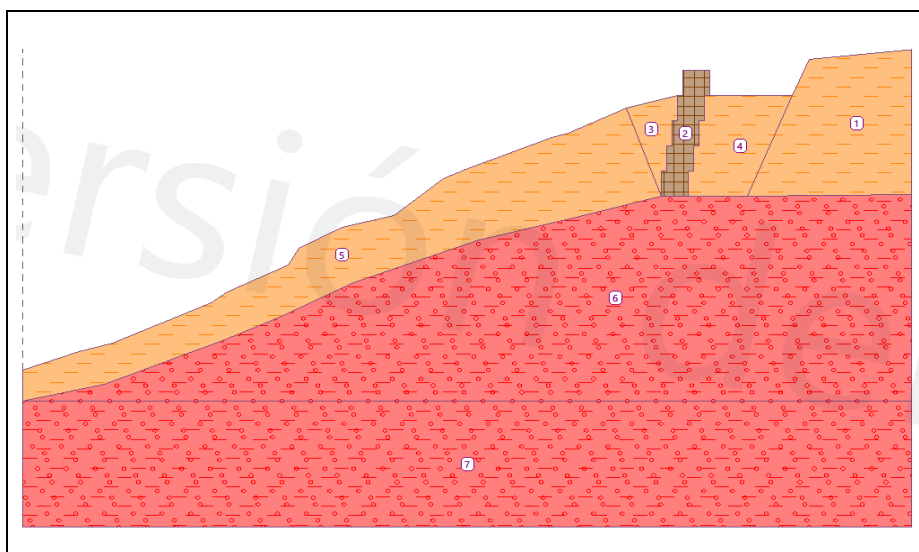
Fuente: Elaboración Propia (2022)

#### 4.1.2.2.5 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural con Presencia de Cuerpo Rígido y sin Nivel Freático

A continuación, se aprecia el perfil estratigráfico en 2D, donde se procede a hacer el análisis de elementos finitos con la presencia del cuerpo rígido (muro de gaviones) y sin la presencia de nivel freático, siempre es importante saber cómo es que se comporta la sección transversal del talud sin estar saturado el suelo, casos que no son fortuitos en la zona ya que la zona de estudio es una zona saturada. (Ver Imagen N° 127)

**Figura 127**

Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático - Pseudoestático



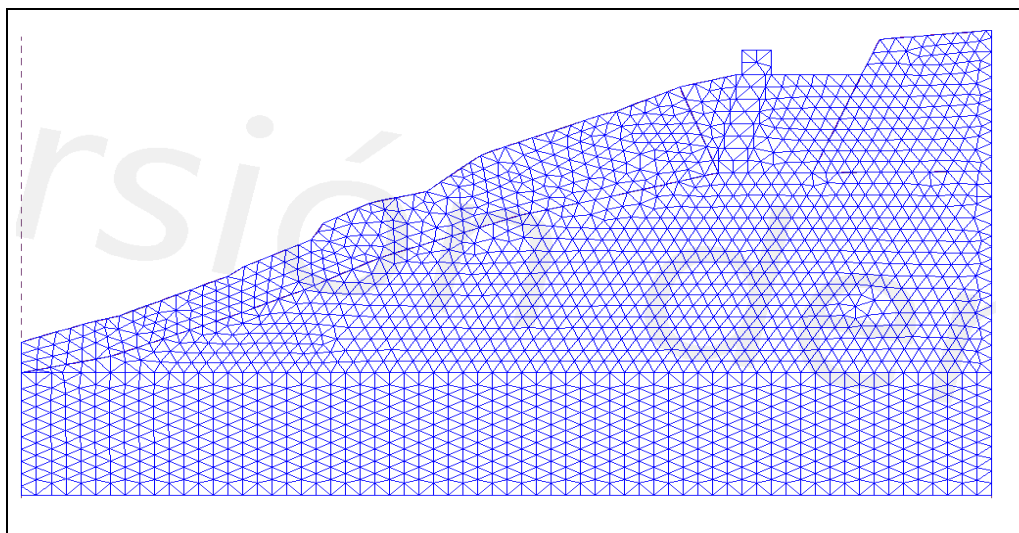
Fuente: Elaboración Propia (2022)

A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición.

En el siguiente grafico se puede apreciar que la malla de elementos finitos a sido creada satisfactoriamente con un total de 9387 nodos y un total de número de elementos de 5288. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio limite. (Ver Imagen N° 128)

**Figura 128**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 0.50 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección "X", donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 16 a 24 mm, el cual representa un valor que no

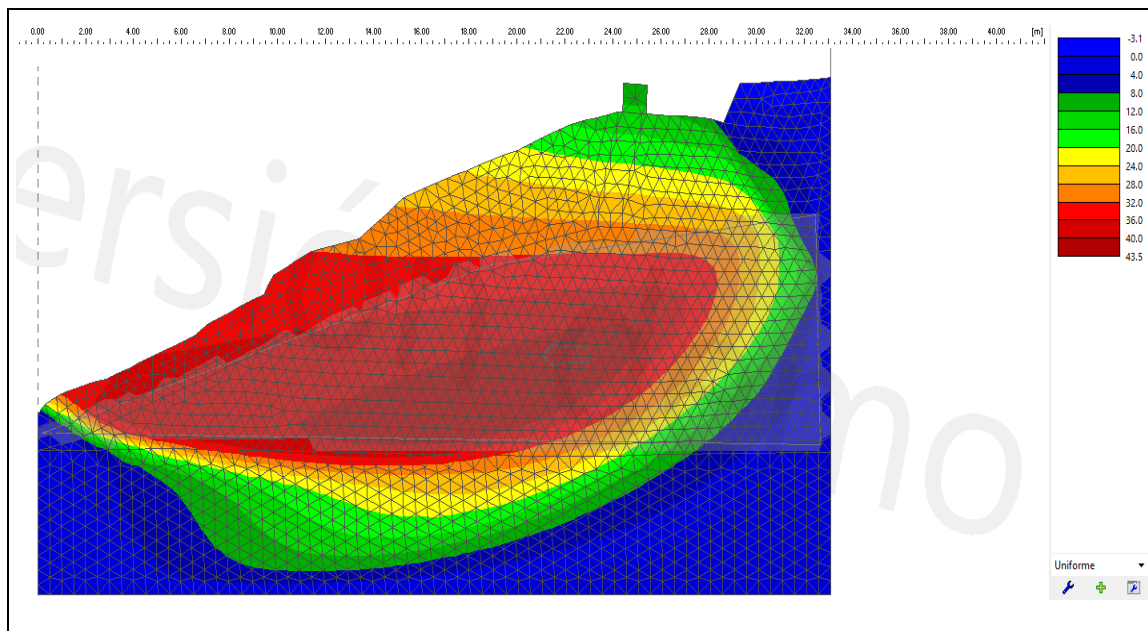
presentaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 129)

Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 25 al 34 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal no representaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores. (Ver Imagen N° 130)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 32.5 al 39.00 mm, valores que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud con la presencia del muro de gavión: (Ver Imagen N° 131)

### Figura 129

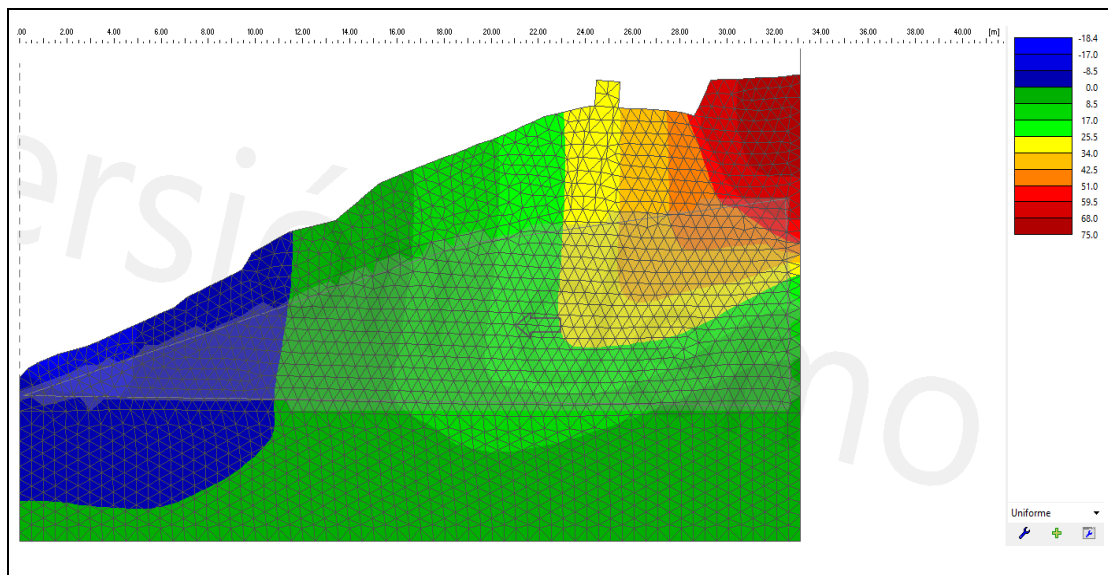
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 130**

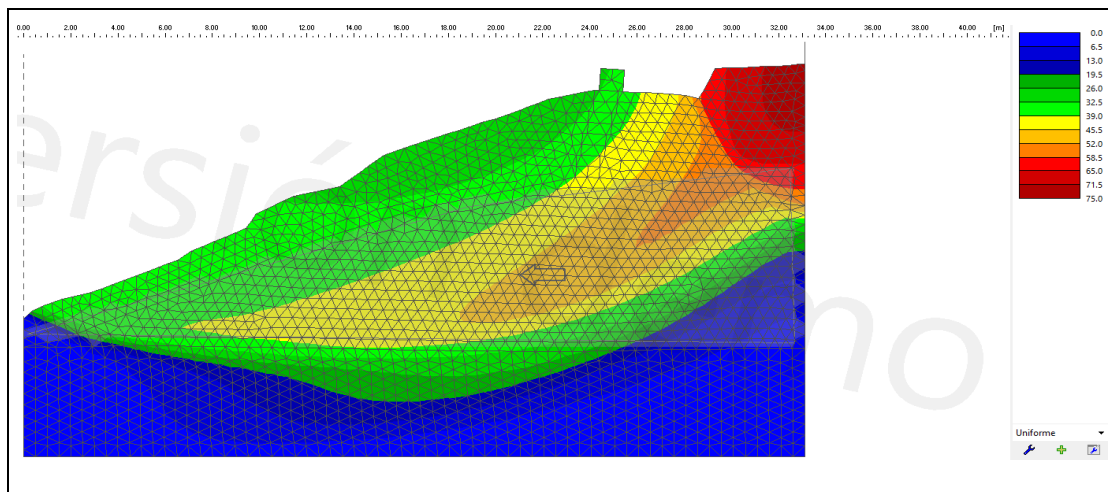
*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

**Figura 131**

*Realización del análisis sin presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”*

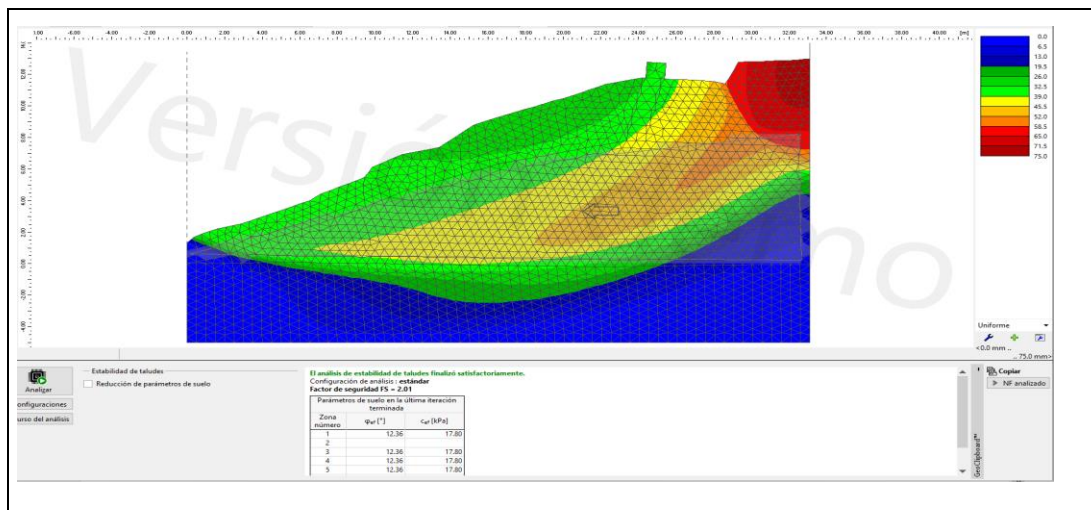


*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 2.01 sin la presencia de Nivel Freático. (Ver Figura N° 132 y 133)

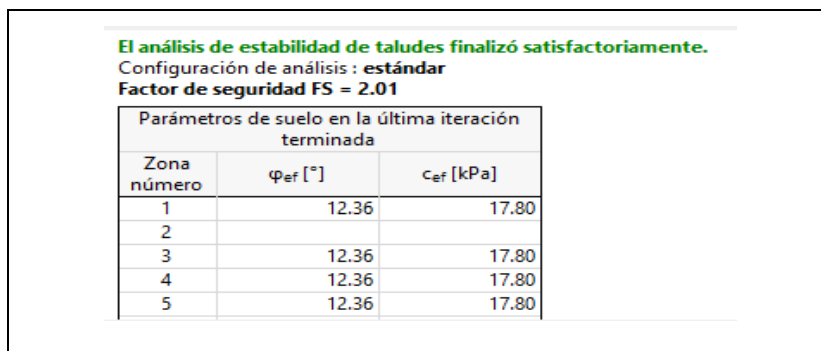


**Figura 132**  
*Perfil Estratigráfico + F.S.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

**Figura 133**  
*Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.*



Fuente: Elaboración Propia (2022)

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojó el programa GEO5 que es de 2.01 sin la presencia de Nivel Freático, dicho valor es razonable para las condiciones en las que se encuentra el suelo y para la colocación del cuerpo rígido como se muestra en las imágenes anteriores.

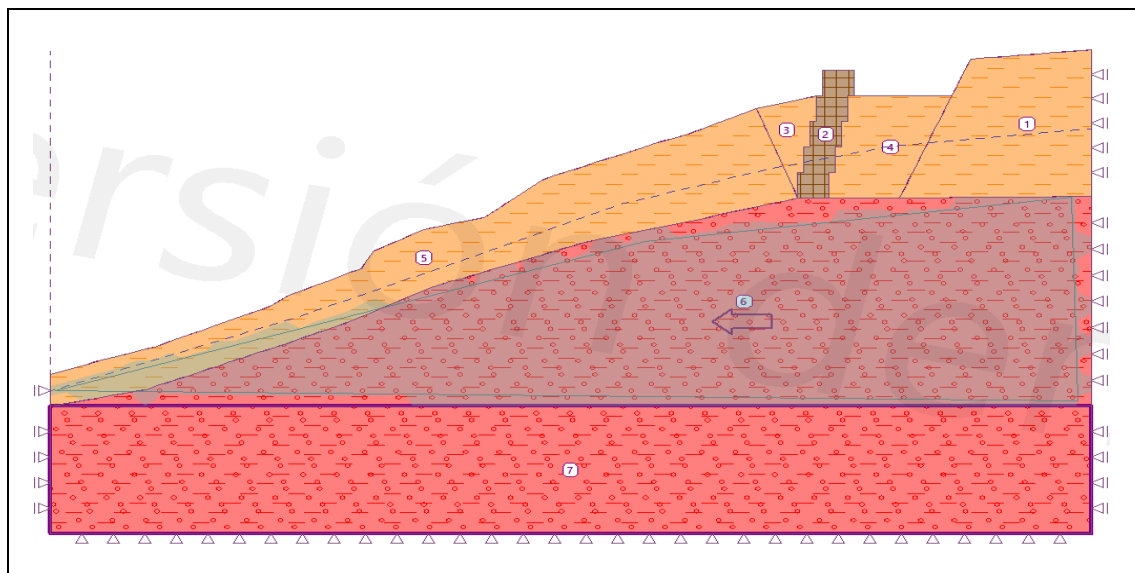
Para el siguiente análisis si se hará bajo la presencia de nivel freático ya que son las condiciones actuales del terreno a estudiar.

#### 4.1.2.2.6 Análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural con Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático

A continuación, se aprecia el perfil estratigráfico en 2D, donde se procede a hacer el análisis de elementos finitos con la presencia del cuerpo rígido (muro de gaviones) y con la presencia de nivel freático, siempre es importante saber cómo es que se comporta la sección transversal del talud estando el suelo saturado, casos que son muy comunes en la zona que se está realizando la presente tesis debido a la frecuente presencia de aguas pluviales. (Ver Imagen N° 134).

#### Figura 134

*Sección Transversal 2D con su respectivo Perfil Estratigráfico con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático - Pseudoestático*



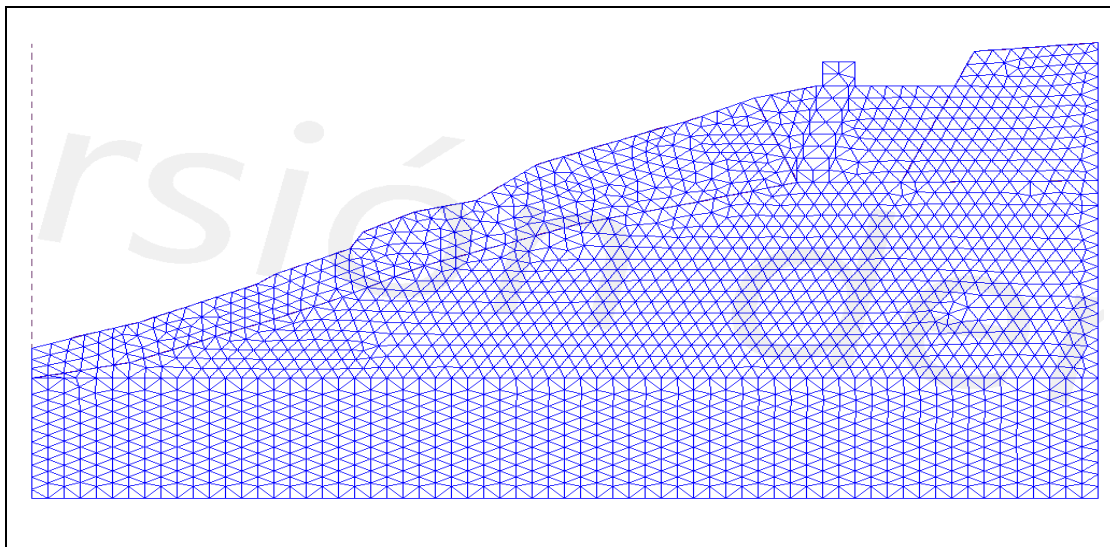
*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

A continuación, se procede a la generación de las mallas, donde la meta principal de ello es lograr que los lados de los triángulos que conforman los elementos sean de la misma longitud. Para que se logre ese objetivo los vértices deben ser creados, removidos y reemplazados hasta que se pueda satisfacer esta condición. En el siguiente gráfico se puede apreciar que la malla de elementos finitos ha sido creada satisfactoriamente con un total de 9387 nodos y un total de número de elementos de 5288. La generación de la presente malla es muy importante para los cálculos posteriores que se vienen, entre ellos el factor de

seguridad que es el que más nos importa ya que con dicho resultado haremos la comparación de valores con el método de equilibrio limite. (Ver Imagen N° 135)

**Figura 135**

*Generación de Mallas con una Longitud de borde de 0.50 m.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

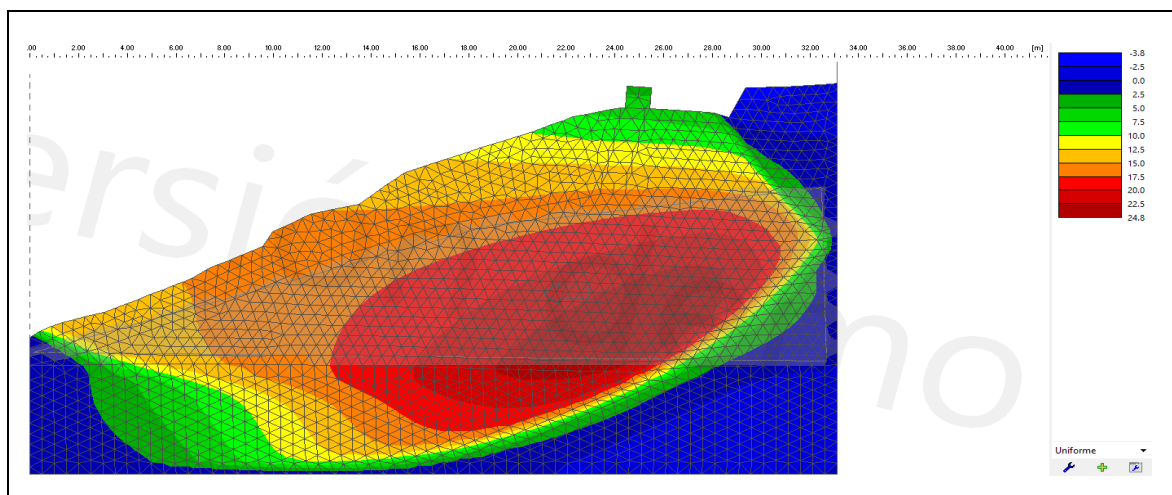
Ahora bien, una vez realizado la generación del enmallado para la respectiva sección transversal se procede a la generación del análisis correspondiente para el cálculo del Factor de Seguridad, donde también se va a obtener los valores de las deformaciones verticales y horizontales en toda la sección transversal. Para esta primera imagen se puede ver los valores de los desplazamientos en la dirección “X”, donde se puede apreciar que en la zona donde se encuentra el muro de gaviones tiene valores que oscilan entre 2.5 a 12.5 mm, el cual representa un valor que no presentaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores y el cual es ideal ante la presencia de una carga sísmica y del nivel freático en su sección transversal. (Ver Imagen N° 136)

Para la siguiente imagen se aprecia los desplazamientos verticales en la dirección “Z”, donde los desplazamientos en dicha zona del muro de gavión están entre el 5.00 al 15.00 mm, lo que al igual que el desplazamiento horizontal no representaría problemas en su comportamiento para eventos posteriores y el cual es menor ya que se le está añadiendo el nivel freático en el presente análisis. (Ver Imagen N° 137)

Teniendo los valores de los desplazamientos horizontales y verticales se procede a mostrar los valores del desplazamiento resultante que vendría representa el promedio de ambos desplazamientos ya mencionados anteriormente y que como se ve, los valores en la zona del muro de gavión son de 12.00 al 20.00 mm, valores que redondean de forma general el comportamiento de dicho talud con la presencia del muro de gavión. (Ver Imagen N° 138)

**Figura 136**

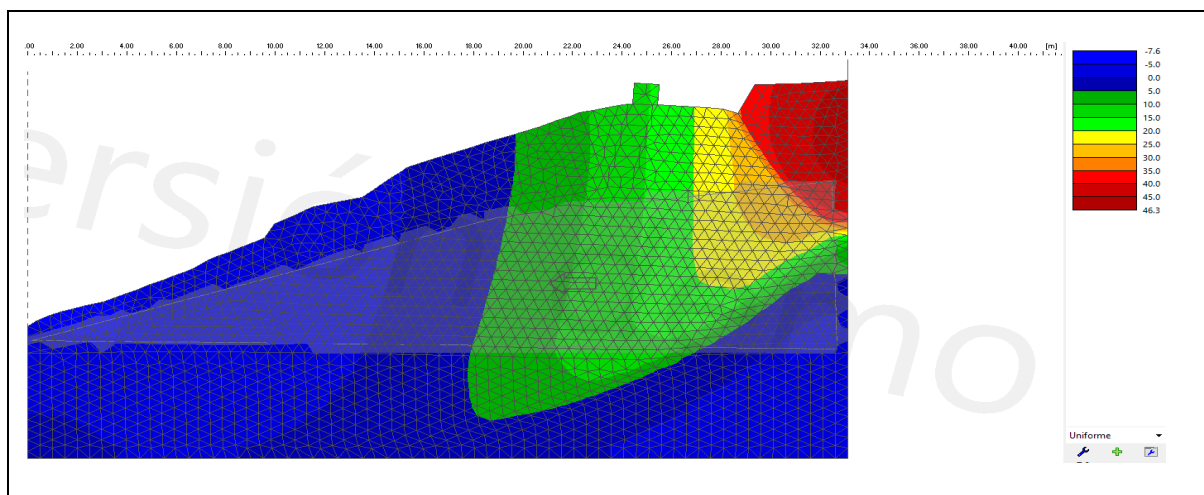
*Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “X”*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

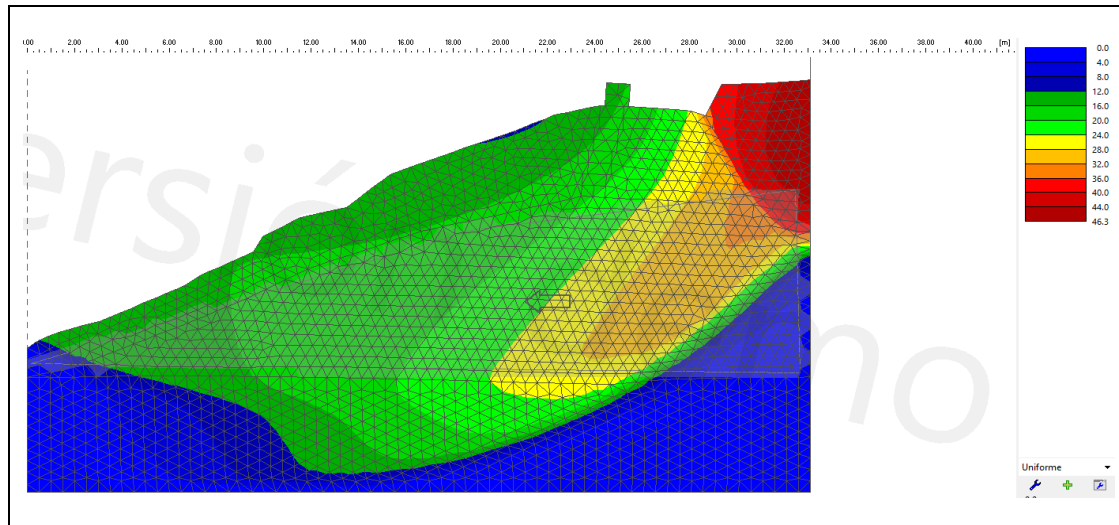
**Figura 137**

*Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Z”*



**Figura 138**

*Realización del análisis con presencia del Nivel freático – Desplazamiento “Resultante”*

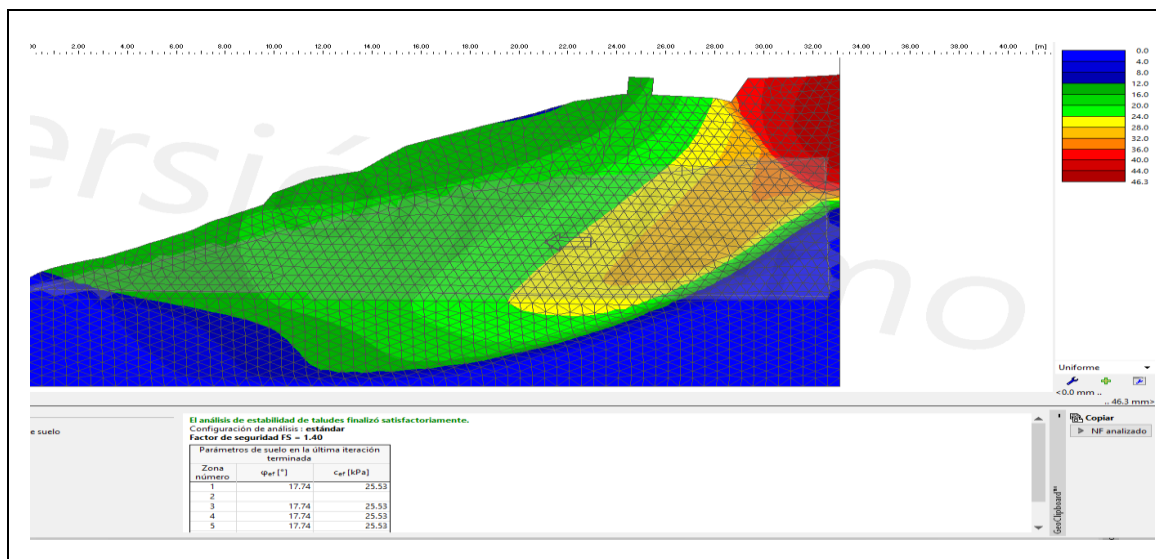


*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores de del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojó el programa GEO5 que es de 1.40 sin la presencia de Nivel Freático. (Ver Figura N° 139 y 140)

**Figura 139**

*Perfil Estratigráfico + F.S.*



*Fuente: Elaboración Propia (2022)*

### Figura 140

Valor del Factor de Seguridad – Elementos Finitos.

**El análisis de estabilidad de taludes finalizó satisfactoriamente.**  
 Configuración de análisis : estándar  
**Factor de seguridad FS = 1.40**

Parámetros de suelo en la última iteración terminada		
Zona número	$\varphi_{ef}$ [°]	$c_{ef}$ [kPa]
1	17.74	25.53
2		
3	17.74	25.53
4	17.74	25.53
5	17.74	25.53

Fuente: Elaboración Propia (2022)

Ahora bien, habiéndose mostrado los valores de los desplazamientos para un análisis por el método de elementos finitos, en donde se vio los valores del desplazamiento vertical, horizontal y resultante, ahora se pasará a mostrar el resultado del F.S. que arrojo el programa GEO5 que es de 1.40 con la presencia de Nivel Freático, dicho valor es razonable para las condiciones en las que se encuentra el suelo y para la colocación del cuerpo rígido como se muestra en las imágenes anteriores.

Es interesante mencionar que este análisis de sección transversal con la presencia de un muro de gaviones y nivel freático con una carga sísmica es el análisis ideal ya que representa lo que se tiene en campo y ese valor de 1.40 del factor de seguridad sería el valor ideal de diseño ya que supera el valor de 1.00.

#### 4.2 Discusión de Resultados

Al realizar las pruebas de hipótesis sobre el análisis comparativo de estabilidad de taludes con gaviones utilizando los métodos de equilibrio límite y métodos de elementos finitos, se puede evidenciar que en las figuras (N), que para un análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural sin Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático, en estas condiciones el talud se encuentra inestable con factores de seguridad de 0.90 en equilibrio limite y 0.92 en elementos finitos los cuales están por debajo de (FS=1.00) el mínimo permisible par que un talud se encuentre estable en estas condiciones.

Los resultados mostrados en las figuras 97 y 140, donde se puede observar que para un análisis de Estabilidad Pseudoestático de Talud Natural con Presencia de Cuerpo Rígido y con Nivel Freático, donde el muro gavión es un factor que genera estabilidad al talud frente a las fuerzas que generan inestabilidad como son la presencia de agua y carga sísmica, se obtuvo un factor de seguridad de 1.18 en equilibrio límite y 1.40 en elementos finitos, el cual sería el valor ideal de diseño ya que supera el valor de 1.00.

## CONCLUSIONES

- Al momento de realizar el análisis por el método de equilibrio límite bajo las condiciones que se encuentran descritas líneas arriba de la presente tesis se obtuvieron los siguientes resultados de su factor de seguridad:

**Tabla N° 27**

*Valores de Factor de Seguridad – Equilibrio Límite*

EQUILIBRIO LIMITE	
DESCRIPCIÓN	F.S.
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel freático (ESTÁTICO)	2.41
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y con Nivel Freático (ESTÁTICO)	1.72
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	1.69
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	0.93
Terreno Natural Con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	1.59
Terreno Natural Con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	1.18

*Fuente:* Elaboración Propia (2022)

Habiéndose mostrado todos los valores de factor de seguridad con el método de “**equilibrio límite**” para todas las condiciones favorables y en contra, los resultados arrojan que para un escenario donde exista la presencia de nivel freático con un evento sísmico, el valor del factor de seguridad da un valor de 0.93, es por ello que se ve en la necesidad de estabilizar dicho talud con la colocación de un cuerpo rígido con las mismas condiciones desfavorables, con presencia de nivel freático y carga sísmica horizontal, con ello el valor del factor de seguridad dio un valor de 1.18 el cual es el indicado ya que es mayor que 1.



**Tabla N° 28***Valores de Factor de Seguridad – Elementos Finitos*

<b>ELEMENTOS FINITOS</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>F.S.</b>
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel freático (ESTATICO)	2.08
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y con Nivel Freático (ESTATICO)	1.44
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	1.42
Terreno Natural Sin Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	0.90
Terreno Natural Con Cuerpo Rígido y Sin Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	2.01
Terreno Natural Con Cuerpo Rígido y Con Nivel Freático (PSEUDOESTÁTICO)	1.40

*Fuente:* Elaboración Propia (2022)

Ahora bien, mostrado todos los valores de factor de seguridad con el método de “**elementos finitos**” para todas las condiciones favorables y en contra, los resultados arrojan que para un escenario donde exista la presencia de nivel freático con un evento sísmico, el valor del factor de seguridad da un valor de 0.90, es por ello que se ve en la necesidad de estabilizar dicho talud con la colocación de un cuerpo rígido con las mismas condiciones desfavorables, con presencia de nivel freático y carga sísmica horizontal, con ello el valor del factor de seguridad dio un valor de 1.40 el cual es el indicado ya que es mayor que 1.

### **Conclusión para el objetivo general**

El método de equilibrio límite es el más sencillo de usar al momento de utilizarlo en la práctica, pero lamentablemente tiene deficiencias en su metodología de cálculo, ya que esta considera equilibrio estático en cada tajo de la sección transversal y que la aceleración sísmica siempre es constante; mientras que el método de los elementos finitos es más exacto y se acerca más a la realidad ya que realiza discretización de masas, el cual hace considerar el peso propio de la sección transversal, los registros sísmicos son completos y toma en consideración las propiedades dinámicas.

### **Conclusión para el objetivo específico 1**

Se determinó los parámetros de diseño donde los ensayos de laboratorio arrojaron que la muestra N° 01, el cual fue utilizado para el análisis de estabilidad de talud donde el Angulo de fricción fue de:  $24.80^\circ$  y su cohesión:  $0.357 \text{ kg/cm}^2$ . Con ello se determinó que el tipo de suelo del cual se está analizando es de Suelo Orgánico de Alta Plasticidad.

### **Conclusión para el objetivo específico 2**

Una vez realizada el análisis de estabilidad de taludes bajo ambos métodos de análisis se determinó que los tipos de movimientos encontrados en dicha sección transversal fueron de deslizamientos, los cuales son muy comunes al realizar el análisis en condiciones saturadas y bajo un evento sísmico.

### **Conclusión para el objetivo específico 3**

Se realizó la ejecución del modelo numérico con el programa GEO5, tanto de equilibrio límite, así como también de elementos finitos, los resultados ya han sido mencionados en el primer acápite de esta sección. Existen muchos programas de modelación numérica que brindan como resultado los valores del factor de seguridad, pero a comparación de este programa es que brinda la solución de problemas geotécnicos por métodos analíticos tradicionales y por método de elementos finitos (MEF).

## RECOMENDACIONES

**Para el objetivo general.** Para tener una mayor información de análisis comparativo se sugiere realizar el análisis de varias secciones transversales para obtener una mayor información de los factores de seguridad del tramo que se requiere analizar con el propósito de obtener un promedio de estas y con ello tener una mejor elección para la realización de diseños posteriores de cuerpos rígidos para estabilización de taludes.

**Para el objetivo específico 1.** Para la realización de un mejor análisis y diseño de estabilidad de taludes se recomienda realizar un ensayo más minucioso del suelo (estudios geofísicos), por ejemplo, el de refracción sísmica, sondeo eléctrico vertical (SEV's), los cuales brindan información de las ondas Sísmicas en capas geológicas de suelo y/o roca para caracterizar las condiciones del suelo y estructura geológica.

**Para el objetivo específico 2.** Se recomienda la utilización otro tipo de cargas externas para la identificación de otro tipo de movimientos, como, por ejemplo; expansión lateral, flujos y caídas. Todo ello va de la mano en la utilización de un buen software de modelación numérica como el que se está utilizando para la presente tesis, el cual brinda resultados que resuelve problemas geotécnicos de gran envergadura. Asu vez también, se recomienda realizar el análisis de otras secciones en algún otro tramo para ver su comportamiento y sacar conclusiones en base a los resultados generados por las demás secciones transversales.

**Para el objetivo específico 3.** Para diseños posteriores de análisis de estabilidad de taludes, así como también para diseños de muros de contención, tanto de concreto armado, gaviones, mampostería, Terraplenes y otros, se recomienda usar el programa GEO5 ya que arroja resultados más cercanos a la realidad debido a todos y resuelve problemas geotécnicos de gran envergadura. Cabe mencionar que, para que arroje resultados cercanos a la realidad, se sugiere que la información que se ingresa a dicho programa sea de calidad y ajustados a la realidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, G., & Zuñiga, R. (2015). Analisis comparativo de taludes mediante los metodos de Equilibrio Limite aplicado a taludes o laderas al Cerro de Popa, Casco Urbano de Cartagena. Colombia: Universidad de Cartagena-Bolivar.
- al, B. e. (2003). Manual RAMMS.
- Ávila, P. (2017). Análisis Sismico - Dinámico en taludes para aseguramiento de estructuras de irrigación Sangalia - Huarochiri - Región Lima 2017 (Tesis de Pregrado). Lima, Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- Braja, M. (2013). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Mexico: Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectural Instituto Politécnico Nacional .
- Chow, V. (1964). Hidrologia Aplicada. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería .
- Curasma, C., & Quinto, S. (2019). Estudio Comparativo entre el metodo de equilibrio limite y elementos finitos en el analisis de estabilidad de ladera en el sector de Heramocco - Comunidad de Sacsamarca - 2019 (Tesis de Pregrado). Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- De la Cruz, Q., & Tunque, H. (2015). Inestabilidad de Taludes en el sector de Santa Barbara de la ciudad de Huancavelica. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- Espinoza, D., & Tapia, B. (2013). Análisis comparativo entre los metodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto PACALORI (Tesis Pregrado). Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Garzón, I., Valencia, P., & Muñoz, C. (2012). Evaluación de la vulnerabilidad y consecuencias por deslizamiento en la conexión vial Aburrá-Rio Cauca entre las abscisas Km 04+000 y Km 39+000. Colombia: Universidad de Medellin.
- Gonzales de Vallejo, L. (2004). Meidas de drenajes y protección en taludes. España: Luis Ortuño Uriel y Asociados, S A .
- Granados, L. (2006). Estabilización de Talud de la Costa Verde en la zona del distrito de Barranco. Lima: Pontificia Universidad Catolica del Perú.
- Linares, M. (2020). ANALISIS COMPARATIVO DE ESTABILIDAD DE TALUDES USANDO METODOLOGIAS GRAFICAS, NUMERICAS Y DE EQUILIBRIO LIMITE. Bogotá: UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- Llatas, D., & Capuñay, J. (2019). Análisis Comparativo Entre Los Métodos De Equilibrio Límite, Cuña Profunda Y Software Especializado En Elementos Finitos, Para El Diseño Geotécnico De Muros Anclados; Aplicado A Ejecución

De Sótanos En Lima Metropolitana”. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Sepulveda, B. (2011). Comportamiento Sísmico de taludes de roca. España: Universidad Politécnica de Madrid.

Suarez, J. (1998). Deslizamientos, (Análisis Geotécnico). Colombia: Bucaramanga.

Suarez, J. (2009). Analisis Geotecnico. Colombia: U. S. Corps of Engineeers.

Urrutia, V. (2008). Analisis Dinámico de Estabilidad por elementos finitos de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Miraflores. Lima: Pontificia Universidad Catolica del Perú.

Valiente, R., Sobrecases, S., & Diaz, O. (2015). Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo.  
<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/viewFile/16157/16579>.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina del repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica delos Andes.