



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE
LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y
FELLENIOUS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE
TALUDES**

Diego Bernabé Morales Alvarado

Asesorado por: Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Ing. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS
MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIOUS PARA EL
CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIEGO BERNABÉ MORALES ALVARADO

ASESORADO POR: ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Oswaldo Escobar Alvarez
EXAMINADOR	Ing. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE
LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y
FELLENUS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE
TALUDES,**

tema que fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 4 de marzo de 2009



Diego Bernabé Morales Alvarado



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 008833

Guatemala, 17 de septiembre de 2009

Ingeniero
Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Quiñónez:

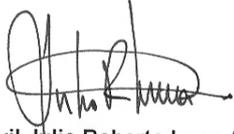
Atentamente nos dirigimos a usted para informarle que el trabajo de graduación "PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIUS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES", elaborado por el estudiante Diego Bernabé Morales Alvarado, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por ambos, por lo cual recomendamos su aprobación.

Sin otro particular, nos despedimos de manera cordial.

Atentamente,


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado No. 6842
Jefe de la Sección de Mecánica de Suelos




Ing. Civil Julio Roberto Luna Aroché
Colegiado No. 2514
Director Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 28 de septiembre de 2009

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

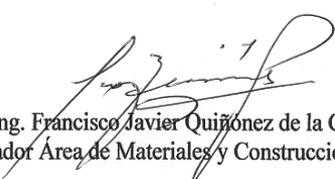
Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“Procedimientos de investigación y comparación de los métodos de Bishop Modificado, Janbù y Fellenius para el cálculo de estabilidad de taludes”**, realizado por el estudiante universitario **Diego Bernabé Morales Alvarado**, quien contó con la asesoría de los Ingenieros Omar Enrique Medrano Méndez y Julio Roberto Luna Aroche .

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Morales Alvarado** cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

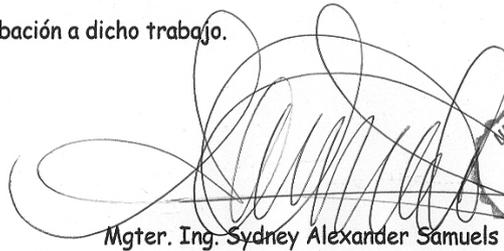
Cc archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de los Asesores Ing. Omar Enrique Medrano Méndez e Ing. Julio Roberto Luna Aroche y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Diego Bernabé Morales Alvarado, titulado PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIUS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Mgter. Ing. Sydney Alexander Samuels Milson

Guatemala, octubre 2009

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.377.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIUS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES**, presentado por el estudiante universitario **Diego Bernabé Morales Alvarado**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2009



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Dios por su inmenso amor y misericordia, por darme la vida, inteligencia y sabiduría para alcanzar esta meta. Te doy gracias Dios por lo que has permitido que viva para llegar a este momento.

Mi mamá y tía, por su dedicación, esfuerzo, esmero, paciencia, amor, tiempo y confianza que siempre depositaron en mí. Las amo y valoro todo lo que han hecho para que llegue este momento, nunca escatimaron nada y dieron lo mejor en cada instante de mi vida.

Mis asesores, ingenieros Omar Enrique Medrano Méndez y Julio Roberto Luna Aroche, por su asesoría, dedicación, apoyo y tiempo invertidos en la elaboración de este trabajo de graduación.

El ingeniero Jorge Mario Vettorazzi Gándara, por su motivación y ejemplo para ser un profesional de calidad.

Mis amigos Vicente Carranza y Saturnino Ordóñez, por apoyarme y alentarme a concluir este trabajo de graduación.

El ingeniero Edgar Calderón, por su amistad, oraciones y consejos que me ha brindado durante toda mi vida.

DEDICATORIA A:

- Jesús: A quien sea toda la honra, gloria y poder por los siglos de los siglos. Este título es tuyo Señor.
- Mis padres: Alba América de Alvarado, Miguel Oscar Alvarado Salazar (D.E.P) por su respaldo, amor y confianza que siempre me han brindado.
- Mi tía: Brenda Lily Alvarado de León, por ser mi segunda mamá y brindarme su amor, apoyo y confianza en todo momento.
- Mis tíos: Oscar Ronald Alvarado de León, Carmen de Arriaga, Carlos Raúl Arriaga Escobar, Gustavo Adolfo Barrios de León y Surama Alvarado, por su amor incondicional.
- Mi familia: Brenda, Gabriel, Alba Helen, Oscar Rodrigo, América, Daniel, Samuel, Ricardo Andrés, Juan Carlos, Ana Lucía, Armando, Oscar Pablo, José Miguel, Andrea, Nancy, Alicia, Leonel y Byron. Con mucho amor.
- Mis amigos: Por su sincera amistad, oraciones y apoyo, en especial a Saturnino, Vicente, Sergio, Melody, Elena, Fernando, Diana, Abigail, Sesian, Victor, Mario, Ana Mercedes, Manuel, Regina, Helen y Suzzete.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS	1
1.1 Nomenclatura de un talud o ladera	3
1.2 Nomenclatura de los procesos de movimiento	5
1.3 Etapas en el proceso de falla	8
1.4 Procesos en la etapa de deterioro	9
1.5 Clasificación de los movimientos en masa	10
1.6 Evolución o proceso de falla	21
2. PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN	27
2.1 Parámetros básicos que afectan la estabilidad	27
2.1.1. Parámetros geométricos	27

2.1.1.1	Pendiente	28
2.1.1.2	Curvatura	28
2.1.1.3	Largo – ancho	29
2.1.1.4	Áreas de infiltración arriba del talud	29
2.1.2	Parámetros geológicos	29
2.1.3	Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos	30
2.1.4	Parámetros geotécnicos	31
2.2	Organización del estudio	33
2.2.1	Causas comunes de fracasos en la investigación	36
2.3	Procedimiento de análisis de la información existente	37
2.3.1	Fotografías aéreas	39
2.3.1.1	Interpretación de fotografías aéreas	40
2.3.2	Estudio de los mapas geológicos y topográficos	42
2.3.2.1	Planos topográficos	42
2.3.2.2	Mapas geológicos	43
2.3.2.3	Mapas agrícolas	44
2.4	Visita de reconocimiento	45
2.5	Estudio topográfico	46
2.5.1	Presentación de datos topográficos	48
2.6	Investigación geotécnica detallada	49
2.6.1	Descripción de suelos y rocas	50
2.6.2	Mapas geológicos	51
2.7	Sondeos geotécnicos	53
2.7.1	Muestreo	56
2.7.1.1	Muestras alteradas	56
2.7.1.2	Muestras inalteradas	57
2.7.1.2.1	Método del bloque	58
2.8	Ensayo de campo	59

2.8.1	Ensayo de penetración estándar SPT	61
2.8.2	Cono estático CPT	63
2.8.3	Presurómetro	64
2.8.4	Ensayo de veleta	65
2.8.5	Ensayo de veleta de bolsillo (Torvane)	67
2.8.6	Ensayo de corte en el sondeo	67
2.8.7	Corte directo de campo	68
2.8.8	Ensayo de permeabilidad	69
2.9	Ensayos de laboratorio	70
2.10	Instrumentación	71
	2.10.1 Equipos convencionales de topografía	73
	2.10.2 GPS diferencial	73
3.	ESTABILIDAD DE TALUDES	75
3.1	Equilibrio límite y factor de seguridad	77
3.2	Métodos de análisis	81
3.2.1	Método del talud infinito	81
3.2.2	Método del bloque deslizante	85
3.2.3.	Método ordinario o de Fellenius	87
3.2.4.	Método de Bishop	91
3.2.5	Método de Janbú	95
3.3	Métodos numéricos y aplicaciones del computador	98

4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	99
4.1 Síntesis general del proyecto	99
4.1.1 Ubicación geográfica y área de influencia del proyecto	99
4.1.2 Ubicación político-administrativa	100
4.2 Descripción del ambiente físico	101
4.2.1 Geología regional	101
4.2.2 Panorama geotectónico de Guatemala	102
4.2.3 Geología del área de estudio	104
4.2.3.1 Geomorfología	105
4.2.3.2 Estratigrafía	106
4.2.3.2.1 Rocas metamórficas del Paleozoico	107
4.2.3.2.2 Rocas intrusivas Paleozoicas	108
4.2.3.2.3 Rocas carbonáticas del Cretácico Inferior	108
4.2.3.2.4 Rocas del Cretácico Superior	108
4.2.3.2.5 Rocas volcánicas Terciarias	109
4.2.3.2.6 Rocas volcánicas Cuaternarias	109
4.2.3.3 Cuadro tectónico	110
4.2.4 Suelos	117
4.2.5 Clima	118
4.2.6 Hidrología	119
4.2.6.1 Aguas superficiales y subterráneas	119
4.2.7 Amenazas naturales	120
4.2.7.1 Amenaza sísmica	120
4.2.7.2 Movimientos en masa	122
4.2.7.3 Erosión	123
4.2.7.4 Inundación	123

5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIOUS	125
5.1 Consideraciones	125
5.2 Definiciones	128
5.3 Coeficiente de seguridad	132
5.4 Aplicación de los Métodos de Fellenius, Bishop Modificado y Janbú en el proyecto estudiado	134
CONCLUSIONES	159
RECOMENDACIONES	163
BIBLIOGRAFÍA	165
ANEXOS	167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Nomenclatura de taludes	4
2. Nomenclatura de un deslizamiento	5
3. Derrumbe y caída de bloques	11
4. Reptación de suelo	13
5. Deslizamiento superficial	15
6. Deslizamiento rotacional	16
7. Deslizamiento traslacional	17
8. Deslizamientos complejos	18
9. Deslizamiento compuesto	20
10. Procedimiento de obtención de muestras	56
11. Ubicación de las perforaciones	57
12. Esquema de ensayo del presurómetro	62
13. Ensayo de la veleta de corte	63
14. Ensayo de corte directo <i>"in situ"</i>	66
15. Ensayo de permeabilidad de campo (U.S. Bureau of Reclamation)	67
16. Diagrama de análisis método del talud infinito	82

17. Esquema del método del bloque deslizante o de cuñas	86
18. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.	89
19. Fuerzas involucradas en la dovela	90
20. Fuerzas que actúan en una rebanada	93
21. Gráfico para la determinación de $M_i(\alpha)$	94
22. Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú.	97
23. Ubicación del proyecto	100
24. Evaluación de la amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala	102
25. Principales fallas geológicas	104
26. Columna geológica generalizada del área de estudio	107
27. Evaluación de la amenaza sísmica, ciudad de Guatemala	113
28. Evaluación de la amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala	114
29. Evaluación de la amenaza sísmica para el valle de Guatemala	115
30. Geología local proyecto	116
31. Nomenclatura mapa geológico	117
32. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante	129
33. Perfil del terreno	135
34. Círculo de falla 1 asumido	137
35. Dovelas asumidas con el círculo de falla 1	138

36.Radiaciones del centro del círculo de falla	
al centroide de las dovelas	139
37.División de estratos del terreno	141
38.Círculo de falla 2 con sus dovelas y ángulos respectivos	148
39.Superficie crítica de falla con programa Geo Slope	157

TABLAS

I.	Ubicación político administrativa del proyecto	100
II.	Variables climáticas zona de estudio	119
III.	Actividad sísmica en Latinoamérica	122
IV.	Coordenadas del perfil del terreno	136
V.	Coordenadas de las dovelas	139
VI.	Solución por el Metodo de Fellenius	142
VII.	Solución por el Método de Bishop Modificado	143
VIII.	Solución por el Método de Bishop Modificado iteraciones 1 a 3	144
IX.	Solución Método Janbú	145
X.	Solución Método Janbú iteraciones 1 a 3	146
XI.	Solución Método Janbú iteraciones 4 a 6	146
XII.	Solución Método Janbú iteraciones 7 a 9	147
XIII.	Coordenadas de las dovelas en círculo de falla 2	149
XIV.	Resolución Método de Fellenius círculo de falla 2	150
XV.	Resolución Método de Bishop modificado círculo de falla 2	150

XVI.	Método de Bishop modificado círculo de falla 2 iteraciones 1 a 3	151
XVII.	Método de Bishop modificado círculo de falla 2 iteraciones 4 a 6	151
XVIII.	Método de Janbú círculo de falla 2	152
XIX.	Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 1 a 3	153
XX.	Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 4 a 6	153
XXI.	Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 7 a 9	154

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Longitud de la base de la dovela
b	Ancho de la tajada de la dovela
c'_m	Cohesión efectiva del suelo blando en la base del bloque central.
C'	Cohesión del suelo
CESEM	Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas
E	Empuje lateral en la cara vertical del elemento
F.S	Factor de seguridad
f_o	Factor de corrección empírico
I.G.N	Instituto Geográfico Nacional
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología
L	Longitud del fondo del bloque central.
N	Fuerza total, normal a la base del elemento
P_a	Fuerza activa producida por la cuña superior
P_p	Fuerza pasiva producida por la cuña inferior
T_m	Fuerza de corte resistente para mantener el equilibrio
u	Presión de poros
W	Peso del elemento
α	Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

γ	Peso específico total del material
θ_m	Fricción del suelo en el fondo del bloque
Φ	Ángulo de fricción interna del suelo

GLOSARIO

Abrasión	Acción y efecto de raer o desgastar por fricción.
Aluvión	Un aluvión es un río de barro originado tras fuertes lluvias o deshielos que ocasionan inundaciones, o también como resultado de un terremoto o erupción volcánica. Arrastra consigo limo, arena, rocas, entre otras cosas.
BMs (Bancos de marca)	Conocido también como Banco de Nivel, son puntos de referencia sobre un objeto fijo cuya elevación es conocida a un determinado nivel medio del mar y desde la cual se puede determinar otras elevaciones.
C.P.T.	Ensayo de penetración de cono dinámico para suelos.
Cohesión	La cohesión entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.
Coluviones	Un coluvión es un aluvión constituido por los granos más finos del limo y de la arena, transportados a corta distancia por las aguas no canalizadas de forma difusa.

Derrumbe	Deslizamiento y hundimiento de terreno, formando precipicios o despeñaderos.
Deslizamiento	Deslizamiento y hundimiento de terreno, formando precipicios o despeñaderos. Una estructura geológica que consiste de una fractura en la roca, a lo largo de la cual ha habido un perceptible deslizamiento.
Dovela	Elemento vertical de forma trapezooidal, en el que se divide el talud para analizar las fuerzas que están involucradas en la misma.
Erosión	Desagregación, desprendimiento y arrastre de sólidos desde la superficie terrestre por la acción del agua, viento, gravedad, hielo u otro. Proceso por el cual el sustrato es resquebrajado y acarreado lejos de un área.
Esfuerzos de confinamiento	Presión ejercida sobre una muestra inalterada de suelo desde distintas direcciones.
Esquistosas	Roca metamórfica, de grado bajo a medio. Su principal característica es que tiene una estructura plana definida por orientación preferencial de minerales laminares, que les confiere un carácter exfoliable. que pueden tener una composición mineral diversa (mica, feldespatos, cuarzo, carbonatos, anfíboles, grafito, etc.), existiendo tanto términos de composición monomineral, como otros en los

que se identifican todas las especies minerales citadas. Se excluyen de este estudio otros materiales esquistosos como las pizarras o los neises

Esquistosidad

Estructura plana definida por orientación preferencial de minerales laminares, que les confiere un carácter exfoliable.

Estratificación

Sedimentos que se depositan en capas horizontales (estratos). Cada uno de éstas está delimitado por dos superficies de estratificación, la inferior, sobre la que se inició el depósito se llama muro, y la superior, que marca el final de la sedimentación se llama techo.

Fotointerpretación

Estudio de la superficie terrestre utilizando imágenes tomadas desde aviones o satélites. Mediante el uso de imágenes aéreas, los científicos pueden analizar los efectos de la erosión del suelo, observar el crecimiento de los bosques, gestionar cosechas o ayudar a la planificación del crecimiento de las ciudades.

Geodinámica

Estudio de las modificaciones de la corteza terrestre, sus causas y consecuencias.

Geomorfología	Ciencia que estudia las formas de la corteza terrestre. Estudio de las características propias de la corteza terrestre.
Geotecnia	Es la rama de la ingeniería civil que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la Tierra. Los ingenieros geotécnicos investigan el suelo y las rocas por debajo de la superficie para determinar sus propiedades y diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, centrales hidroeléctricas, etcétera.
Hidrogeológico	Parte de la geología que estudia las aguas subterráneas en las que se abarca la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, fisuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos.
Inclinómetros	Herramienta que permite medir con exactitud inclinaciones, horizontales y ángulos de 0° a 30°, tales como tejados, ajustes de ventanas, tendido de tuberías, etc.
Isotrópico	Material que posee las mismas propiedades mecánicas y físicas en todas las direcciones.

Litología	Parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas.
Lutitas	Roca detrítica, es decir, formada por detritos, y está integrada por partículas del tamaño de la arcilla y del limo.
Meteorización	Alteración superficial " <i>in situ</i> " de las rocas expuestas a la superficie, no va acompañada de denudación.
Métodos geoacústicos	Estudios del estado de mantenimiento de la superficie (Deterioro, daño superficial, colmatación de superficies porosas) de forma geo referenciada a través de ondas sínicas referenciadas.
Neotectónica	Consiste en el estudio de las estructuras tectónicas que se han formado o que muestran evidencias de actividad reciente. Algunas de estas estructuras, por ejemplo las fallas, pueden generar terremotos durante su actividad.
Ortomapas:	En los fotomapas y espaciomapas, las imágenes se complementan con información cartográfica complementaria, leyenda marginal y otros, ofreciendo la riqueza de información de las imágenes, combinada con las

características básicas de los productos cartográficos.

Pelíticas

Rocas sedimentarias arcillosas.

Permeabilidad

Capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.

S.P.T

Ensayo de penetración de cono standard para suelos.

Sedimentación

Proceso en el cual las sustancias en suspensión se depositan en el fondo.

Talud

Es la acumulación de fragmentos de roca partida en la base de paredes de roca, acantilados de montañas, o cuencas de valles que se acumulan por la erosión al pie de un acantilado o de una vertiente abruptiva.

Tectónica:

Es la especialidad de la geología que estudia las estructuras geológicas producidas por deformación de la corteza terrestre, las que las rocas adquieren después de haberse formado, así como los procesos que las originan.

Tensión tangencial

Fuerzas de fricción entre dos puntos en dos sólidos que están en contacto.

RESUMEN

En algunas regiones de nuestro país, hay vías de comunicación que se encuentran en estado de alto riesgo, debido a las condiciones topográficas de los terrenos y la falta de los estudios preliminares correspondientes para la construcción de los taludes que están involucrados en las mismas. Además, el crecimiento de la población, la falta de un plan de ordenamiento territorial y el nivel agudo de pobreza, ocasiona que las personas edifiquen sus viviendas en las laderas, zonas propensas a derrumbes o deslizamientos poniendo en riesgo sus vidas.

En ciertos casos la estabilidad de los taludes juega un papel muy importante en la obra, condicionando la existencia de la misma como puede verse en presas de tierra, donde un mal cálculo puede hacer fracasar la obra, por lo que realizar un estudio previo para la obtención de todas las características del terreno de una manera ordenada y detallada es vital para proporcionar datos precisos y confiables del tipo de suelo que se está estudiando.

Los métodos más ampliamente utilizados para el análisis de la estabilidad de taludes son los de equilibrio límite, ya que están amparados por la amplia experiencia que hay en su empleo con éxito para resolver problemas

de estabilidad de taludes. Dentro de estos métodos se encuentran el Ordinario o Fellenius, Bishop Modificado y Janbú.

La descripción y comparación de los métodos descritos en el párrafo anterior constituyen una herramienta básica y elemental para el cálculo de estabilidad de taludes que servirá como guía para los estudiantes y profesionales interesados en este campo, ya que la mayoría de programas comerciales que existen en el mercado, utilizan alguno de estos tres métodos como base para realizar los cálculos.

Además, se plantea una guía que se debe seguir para realizar la caracterización del talud que se estudiará. Dentro de este punto es de suma importancia poder tener claro los estudios de suelos que se deben ejecutar. En el campo se busca obtener la mayor cantidad de información posible. Para lograr este objetivo es necesario realizar los ensayos que mejor se relacionen con el suelo en cuestión, ya que a partir de ellos y mediante correlaciones desarrolladas a lo largo del tiempo se pueden inferir ciertas propiedades de los materiales en estudio.

OBJETIVOS

General:

Elaborar una guía que incluya los lineamientos básicos y elementales para el estudio de estabilidad de taludes, tomando en cuenta los diversos factores que intervienen en el mismo, ya que el buen conocimiento del comportamiento del mismo frente a sus posibles roturas, repercute enormemente en los costes y en la seguridad, por ello, las investigaciones de campo (*in situ*) y de laboratorio planteadas en el presente trabajo de manera detallada deben ser las suficientes, como para poder garantizar en la medida de lo posible las condiciones geomecánicas del terreno, así como los posibles mecanismo de rotura. Además de realizar la comparación de los métodos de equilibrio Límite de Bishop Modificado, Fellenius y Janbú ya que son los más ampliamente utilizados por su facilidad y confiabilidad para el cálculo del factor de seguridad del talud.

Específicos:

1. Recopilar la información reciente existente sobre los procedimientos de investigación que se están aplicando para evaluar la estabilidad de los taludes.

2. Determinar las ventajas de la aplicación de los métodos de equilibrio límite planteados para calcular la estabilidad de los taludes.
3. Realizar problemas aplicando los tres métodos recomendados y utilizados de manera universal por los expertos en éste campo, debido a su simplicidad y efectividad para calcular los factores de seguridad.
4. Desarrollar una guía que contenga procedimientos prácticos y detallados para realizar los estudios preliminares de cualquier tipo de talud que sea de utilidad para los estudiantes de los cursos de Mecánica de suelos y Cimentaciones, además de los profesionales que tengan interés en el tema.

INTRODUCCIÓN

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, desarrollo de proyectos inmobiliarios, carreteras, etc., han puesto al diseño y construcción de taludes en un plano de importancia ingenieril de primer orden y por ende, los estudios preliminares que se deben realizar son de suma importancia para tener datos precisos y concretos para pasar a la fase de análisis y diseño del talud.

Tanto por el aspecto de inversión, como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. En el advenimiento de la Mecánica de Suelos fue posible aplicar al diseño de taludes normas y criterios para hacer un estudio racional en este campo.

Estas normas y criterios apuntan directamente a la durabilidad del talud, esto es a su estabilidad a lo largo del tiempo.

El objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo.

Generalmente, los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos es la prevención.

Los problemas relacionados con la estabilidad de laderas naturales difieren radicalmente de los que se presentan en taludes contruidos por el ingeniero. Dentro de éstos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes de laderas y los de los terraplenes. Las diferencias importantes radican, en primer lugar, en la naturaleza de los materiales involucrados y, en segundo, en todo un conjunto de circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de su historia geológica, de las condiciones climáticas que primaron a lo largo de tal historia y de la influencia del hombre que ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado. Esta historia y génesis de formación de laderas y taludes, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas o, en general, ambientales, definen aspectos tan importantes como configuración de los suelos y las rocas, o el flujo de las aguas subterráneas a través de los suelos que forman la ladera o el talud, el cual influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad que se deben analizar detenidamente antes de realizar cualquier tipo de proyecto, debido a eso es tan importante recopilar toda la información necesaria para poder realizar un estudio objetivo que nos garantice la obtención de resultados confiables para realizar cálculos y proyecciones adecuadas con la realidad del terreno.

En aquellos lugares identificados como más propensos a la inestabilidad, según lo descrito anteriormente, deberá obtenerse información adicional para caracterizar mejor el subsuelo y conocer los parámetros que sirvan de base para el análisis y solución del problema, lo cual es el fin primordial de este trabajo.

Al momento de tener recopilada la información del lugar de estudio, obtención de las muestras y análisis de las mismas en el laboratorio, se procede a calcular el factor de seguridad del talud, haciendo una comparación con los métodos mayormente utilizados por los ingenieros geotécnicos en el mundo para el cálculo de estabilidad de taludes, tales como Bishop modificado, Fellenius y Janbú. Esto debido a que los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos del factor de seguridad.

Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos pero más fáciles de manejar como es el método simplificado de Bishop, Fellenius (también conocido como el método sueco o de dovelas) y Janbú.

Todos los métodos que satisfacen equilibrio completo dan valores similares de factor de seguridad.

Existen varias formas de enfocar y resolver cada problema específico y la metodología que se requiere emplear depende de una serie de factores técnicos, sociales, económicos, políticos; con una gran cantidad de variables en el espacio y en el tiempo.

1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS

Los accidentes causados por los deslizamientos, ocurren desde épocas remotas, provocando pérdidas de vidas humanas y perjuicios materiales. A pesar de los avances en el conocimiento técnico y científico de los procesos geológicos, muchas comunidades, principalmente en las zonas urbanas, son vulnerables a situaciones de desastre. Sin embargo, actualmente existen condiciones técnicas para aumentar la seguridad de las personas y de obras civiles que se encuentran en áreas y situaciones de riesgo geológico, considerando, los factores naturales que intervienen en el mismo y realizando un estudio detallado del talud o ladera, para minimizar la ocurrencia de cualquier desastre y prevenirse contra sus efectos.

Los movimientos en masa son procesos que ocurren en la corteza terrestre, los cuales modifican las diferentes formas del terreno. Los deslizamientos, a su vez, son la principal manifestación de los movimientos en masa.

Los deslizamientos, como todos los movimientos en masa, involucran el movimiento, pendiente abajo, de los materiales que componen la ladera bajo la influencia de la gravedad y pueden ser disparados por lluvias, sismos y actividad humana.

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños considerables en las propiedades, los cuales muchas veces son irreparables; sin embargo,

muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tal como lo son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

La rotura de los materiales en las laderas ocurre cuando la fuerza de gravedad excede el esfuerzo de la roca o suelo que conforman la ladera, es decir, ocurren cambios en el equilibrio de las fuerzas de resistencia al corte.

El material desplazado puede moverse de forma lenta (milímetros por año), rápida y extremadamente rápida (metros/día) según la topografía, el volumen de la masa de suelo o roca, el mecanismo de rotura y la acción del agua, entre otros factores. Pueden activarse o acelerarse a causa de terremotos, erupciones volcánicas, precipitaciones, aumento de nivel de aguas subterráneas, por erosión, socavamiento de los ríos y por actividad humana. Los factores que contribuyen a crear una situación de inestabilidad en una ladera son múltiples; rara vez actúa uno solo.

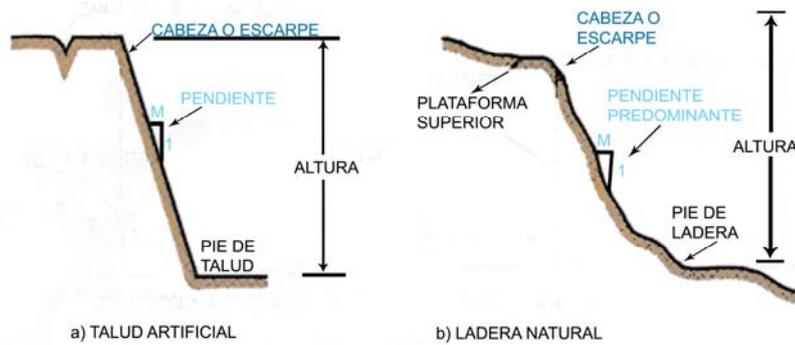
1.1 Nomenclatura de un talud o ladera

Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea el origen de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Existen tres categorías generales en los que se puede agrupar los taludes: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar diversas combinaciones de los tipos de taludes y laderas.

Figura 1. Nomenclatura de taludes



En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos fundamentales.

Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza. En las laderas es complicada de cuantificar debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.

Pie

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

Cabeza

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

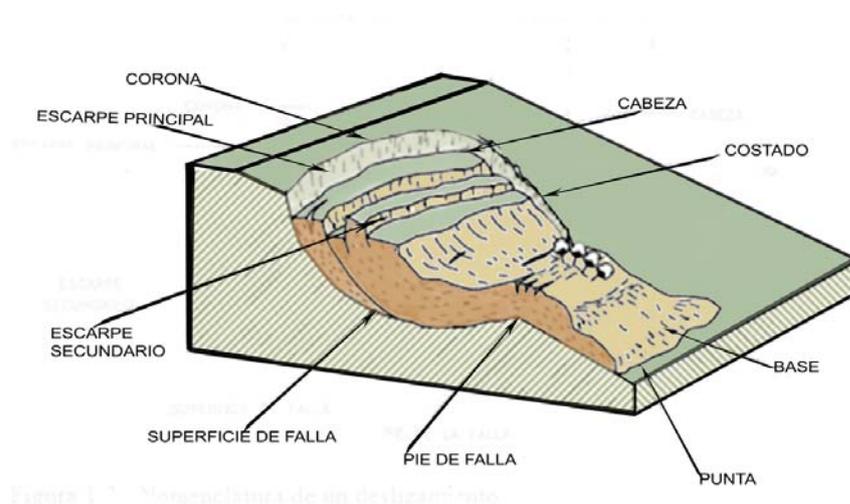
Pendiente

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación.

1.2 Nomenclatura de los procesos de movimiento

Debido a que un deslizamiento involucra una masa de suelo o roca moviéndose ladera abajo, este puede ser descrito con base en las diferencias entre la masa que forma el deslizamiento y la ladera que no ha fallado. La ladera que no ha fallado se puede definir como la superficie original de terreno. Esta es, a su vez, la superficie que existía antes de que el movimiento se diera. Si esta es la superficie de un deslizamiento antiguo, el hecho debe resaltarse, pues se trata de una reactivación del deslizamiento.

Figura 2. Nomenclatura de un deslizamiento



En la figura No.2 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

Escarpe principal

Superficie de pendiente muy fuerte, localizada en el límite del deslizamiento y originada por el material desplazado de la ladera. Si este escarpe se proyecta bajo el material desplazado, se obtiene la superficie de ruptura.

Escarpe secundario o menor

Superficie de pendiente muy fuerte en el material desplazado y producida por el movimiento diferencial dentro de este material.

Cabeza

La parte superior del material desplazado a lo largo de su contacto con el escarpe principal.

Corona

El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal. Puede presentar grietas, llamadas grietas de la corona.

Superficie de falla

Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.

Pie de la superficie de falla

La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Base

El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

Punta

El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

Costado o flanco

Un lado (perfil lateral) del movimiento.

1.3 Etapas en el proceso de falla

El objetivo de la clasificación de deslizamientos es, describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas.

Existen caracterizaciones geotécnicas propuestas por Varnes o Hutchinson, en donde las clasificaciones son eminentemente topográficas y morfológicas, por lo tanto, deben adaptarse a las condiciones verdaderas de los movimientos.

Se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo está intacto.
- b. Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- c. La etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.

- d. La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

1.4 Procesos en la etapa de deterioro

Con el tiempo, el deterioro puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. Sin embargo, al deterioro se le da muy poca atención en el momento del diseño y el énfasis se dirige a evitar las fallas profundas, más que a evitar los fenómenos anteriores a la falla.

Cuando un talud se corta, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado.

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de suma importancia en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud.

1.5 Clasificación de los movimientos en masa

Entre las clasificaciones existentes para los movimientos de masa están: por el contenido de agua, la velocidad del movimiento, la profundidad de la superficie de ruptura, el tipo de ruptura, estado de la actividad y el tipo de movimiento.

Una de las clasificaciones de inestabilidad de laderas más utilizadas en la actualidad es la de Varnes, el cual tipifica los principales tipos de movimiento, siendo estos:

1. Derrumbes y caídas de bloques
2. Avalanchas de rocas / de detritos
3. Volcamiento
4. Reptación de suelos
5. Deslizamientos
6. Coladas de flujos
7. Deslizamientos compuestos.

A continuación la especificación de cada una:

1. Derrumbes y caída de bloques (Rockfalls)

Los derrumbes o caídas son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos y suelos. Se caracterizan por presentar discontinuidades subverticales bien desarrolladas, estratificación, esquistosidad y fracturación. Este tipo de fenómeno, presenta una ruptura brusca y caída más o

menos libre y a gran velocidad de un bloque o una masa rocosa en seco. La zona de origen corresponde prioritariamente a acantilados rocosos o laderas de fuerte pendiente, donde la roca está fracturada y alterada, y ocurre el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente.

Tienen un alto componente de sorpresa, pues rara vez presentan signos precursores o anunciadores (o éstos son difíciles de detectar) y, muy a menudo, son desencadenados por factores exógenos (sismos, vibraciones de maquinaria pesada, explosiones, árboles sobre el macizo rocoso, etc.).

La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, puede llegar hasta 40m/seg, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta.

Figura 3. Derrumbe y caída de bloques



2. Avalanchas de rocas / de detritos (Rock / Debris Avalanche)

Las avalanchas son el movimiento rápido de escombros, de suelo o de roca y puede o no comenzar con la ruptura a lo largo de una superficie de falla. Toda la vegetación, el suelo y la roca suelta pueden ser arrastrados.

Dentro de las principales causas para su ocurrencia, se destaca las altas fuerzas de infiltración, alta pluviosidad, sismos o deslizamiento gradual de los estratos de roca. Es un fenómeno que presenta una ruptura brusca sin previo aviso y caída más o menos libre y a gran velocidad de una masa rocosa en seco. Se considera un evento catastrófico, temporalmente instantáneo y de muy alta recurrencia, que generalmente es impredecible. Los efectos pueden ser desastrosos ya que sepultan extensas áreas al pie del talud.

La velocidad del movimiento suele ser mayor de los 40m/s.

3. Volcamiento (topple, toppling, rock topple)

Se refiere al desplazamiento lateral de masas desde la cara de un talud natural o artificial, las cuales rotan alrededor de un punto y un eje, situado en el centro de gravedad de la masa desplazada. El movimiento puede deberse a la presión ejercida

por el material situado encima de la masa afectada, o a la presión del agua en las grietas. Ocurrido el volcamiento la masa puede caer o deslizar dependiendo de su forma, de la geometría de su superficie de separación y de la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas.

4. Reptación de suelos (Soil Creep)

Se trata de movimientos lentos, imperceptibles, el desplazamiento es difuso, afectando a los materiales menos cohesivos de la cubierta de suelo (edáfica), es decir, a los materiales poco consolidados (particularmente a los terrenos de cultivo), afecta los suelos hasta una profundidad promedio de un metro. Es un fenómeno prácticamente invisible a nivel morfológico, por lo que puede ser reconocido sólo en cortes o a través de signos indirectos. La causa principal, al parecer, la constituyen las variaciones estacionales del contenido de la humedad, suficiente para causar deformaciones permanentes y agrietamientos.

Para zonas tropicales como la centroamericana (húmedas, con cubierta vegetal bien desarrollada) se ha demostrado que las velocidades promedio son de apenas 1-2 mm/año. En zonas semiáridas con poca cubierta vegetal, la velocidad varía entre 5 y 10 mm/año.

Sus efectos son desarreglos menores (inclinación y apertura de grietas en muros y postes de cimentación poco profunda, torceduras en los troncos de los arboles, discontinuidades en el manto vegetal bajo, etc.).

Figura 4. Reptación de suelo



5. Deslizamientos

Desplazamiento descendente, con una componente horizontal apreciable, a lo largo de una o varias superficies de falla o zonas de corte, que pueden coincidir con superficies preexistentes (planos estructurales o superficies antiguas de falla), o generarse durante el movimiento. Los deslizamientos se pueden clasificar en:

Deslizamientos superficiales

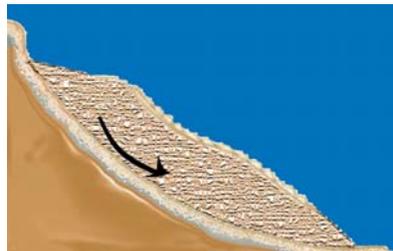
Presentan una superficie de deslizamiento y provoca cambios notables de la estructura del suelo. Es un

fenómeno abundante en Centroamérica, en laderas empinadas utilizadas para agricultura y/o pastoreo del ganado (ganadería extensiva).

La principal característica de estos deslizamientos es la morfología de *cáscara de naranja*, lo que se conoce como *camino de vaca*, con ondulaciones pequeñas que corresponden a pequeños deslizamientos rotacionales, con diámetro promedio (profundidad máxima) de hasta uno o dos metros.

Esta forma de cáscara de naranja forma escalones que son aprovechados por el ganado y la gente, evolucionando hacia una forma de escalones en trama enrejada o en rombos, que, en algunos casos, progresivamente se desploman, formándose gradas en las laderas, desapareciendo estas posteriormente, en otros casos son removidos de forma abrupta.

Figura 5. Deslizamiento superficial



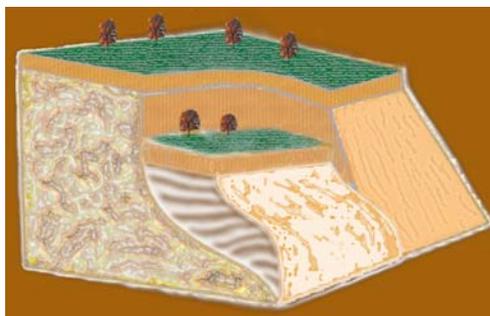
Deslizamientos rotacionales o circulares (*slump*)

Movimiento relativamente lento de una masa de suelo, roca o ambos, a lo largo de una superficie de ruptura en forma circular (que coincide con la de transporte) sobre la cual se mueve una masa. En su fase inicial, existe poca distorsión de los materiales. En algunos casos, a medida que la masa se desplaza, los materiales se dislocan progresivamente y el mecanismo de inestabilidad deviene complejo.

Eventualmente se da en terrenos homogéneos, isotrópicos, cohesivos. Su ocurrencia en la naturaleza es rara en estado puro o efímera pues rápidamente evoluciona hacia mecanismos combinados.

Este tipo de movimientos pueden involucrar tanto volúmenes pequeños como volúmenes grandes de material. Y las velocidades de propagación de la masa desplazada pueden ser también muy variables.

Figura 6. Deslizamiento rotacional



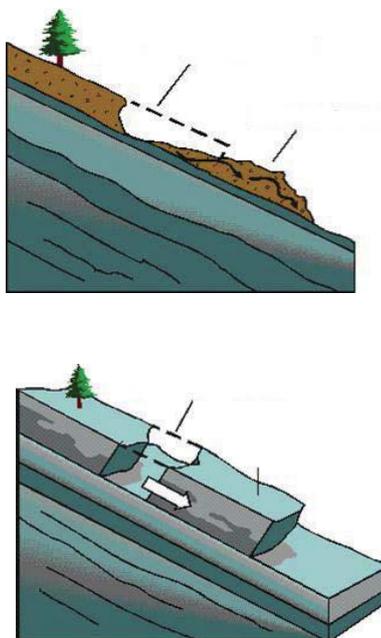
Deslizamientos traslacionales (*Dip slope*)

Movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de deslizamiento planar. Se originan en zonas que presentan superficies de discontinuidad, de niveles poco competentes; también en bloques tabulares o paquetes de estratos dentro de estructuras conformes de estratificación o esquistosidad; sobre capas poco competentes o niveles de alteración; sobre planos de fallas o sistemas de diaclasas conformes (a favor de la pendiente).

El material afectado es rocoso, estratificado, formando placas o paquetes cuyas bases quedan desprovistas de soporte, ya sea por erosión natural o por cortes artificiales en un talud (es tal vez el problema geodinámico más comúnmente desencadenado por la intervención humana, cuando se hacen cortes para carreteras)

Este tipo de movimientos pueden involucrar tanto volúmenes pequeños como volúmenes grandes de material. Y las velocidades de propagación de la masa desplazada pueden ser también muy variables.

Figura 7. Deslizamiento traslacional



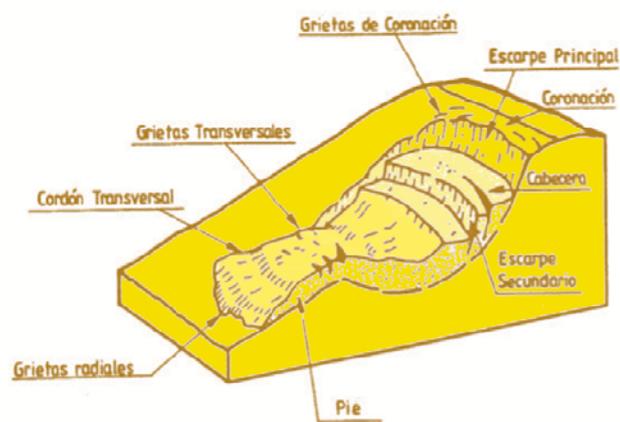
Deslizamientos complejos

Se aplica a grandes deslizamientos donde aparecen mecanismos combinados, debido a una larga evolución. Por lo general se trata de deslizamientos de edad milenaria, de gran talla y de evolución muy lenta, con periódicos episodios de aceleración. Puede decirse que son deslizamientos permanentes, regidos por la acción de los esfuerzos residuales posteriores a la fase de ruptura.

Pueden llegar a cubrir varios kilómetros cuadrados de superficie, involucrando cientos y hasta miles de millones de metros cúbicos de masa en movimiento y hasta algunas centenas de metros de profundidad.

En la región centroamericana existen cientos de deslizamientos de este tipo, casi todos con relación genética estructural y que ocupan vertientes enteras (caso de San José de los Remates, San Dionisio, Esquipulas).

Figura 8. Deslizamientos complejos



6. Coladas o flujos (flows)

Son masas de material sin cohesión que fluye como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido, pueden formarse en cualquier material poco y hasta en rocas, especialmente pelíticas y esquistosas más o menos descompuestas. Se pueden desplazar grandes distancias.

Son fenómenos básicamente estacionales, es decir, frecuentes en temporada de lluvias, aunque son numerosos los casos relacionados con roturas de conductos de agua, depósitos

de agua, o por efecto de la aceleración de deslizamientos, por trastornos en el régimen hidrogeológico e, inclusive, por sacudida sísmica (Licuación de arenas).

En Centroamérica y, en general, en las áreas tropicales húmedas con morfología montañosa, las coladas son los fenómenos más frecuentes y pueden asociarse, al menos en su génesis, con derrumbes o deslizamientos secundarios o localizados.

Pero, en la gran mayoría de casos, se originan en los débiles horizontes edáficos de pendiente acentuada.

7. Deslizamientos compuestos

Cuando un movimiento de ladera presenta más de un mecanismo de movilización de los materiales en diferentes lugares de la masa en movimiento.

Figura 9. Deslizamiento compuesto



1.6 Evolución o proceso de falla

La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores que incluyen:

1. Condiciones originales del talud (Susceptibilidad a los deslizamientos)

La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.

2. Factores de deterioro (Modificación lenta de las condiciones originales)

El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.

1. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.
2. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.
3. Erosión interna o sifonamiento.

Los factores de deterioro pueden producir movimientos en el talud, los cuales en ocasiones pueden ser detectados por medio de métodos geoacústicos o por inclinómetros.

3. Factores detonantes (Activación del movimiento)

El resultado es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento.

En el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro:

a. Procesos geomorfológicos y físicos

- La tectónica y neotectónica producen esfuerzos e inducen deformaciones, las cuales son muy difíciles de evaluar o medir.
- La erosión genera cambios topográficos que inducen esfuerzos en el talud.

- La sedimentación.
- La lluvia, la cual produce modificaciones en la humedad y presión de poros afectando la resistencia del suelo.
- Las inundaciones, al producir saturación repentina, presiones de poro y erosión.
- Los sismos, los cuales pueden producir fracturación, remoldeo, aumento de presión de poros y consiguiente, disminución en la resistencia del suelo, licuación y generación de fuerzas de tipo dinámico sobre las masas de talud.
- Las erupciones volcánicas, las cuales además del efecto vibratorio, generan cambios en temperatura y la disposición de materiales sobre el talud.
- La expansión de los suelos, etc.

b. Procesos antrópicos

- Las excavaciones o cortes que modifican la topografía original del terreno.

- Las excavaciones subterráneas (túneles), las cuales afectan la estructura y condiciones de esfuerzos del suelo encima de ellos.
- Los rellenos o depósitos de materiales sobre el talud, disposición de residuos, etc.
- La irrigación que facilita la infiltración y los cambios de humedad y presión de poros.
- Las fugas de agua de las redes de servicios.
- El mantenimiento inadecuado de sistemas de drenaje y subdrenaje.
- La deforestación que produce cambios hidrológicos y afecta la resistencia del suelo, al eliminar el refuerzo de las raíces.
- Las vibraciones artificiales, tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc., las cuales generan fuerzas dinámicas y deterioro de la estructura de los materiales.
- La disminución repentina del nivel de agua como en el caso del desembalse de una presa.

4. Fallamiento

El proceso de fallamiento después de que interviene el factor detonante es un fenómeno generalmente físico, en el cual las condiciones de esfuerzo y deformación juegan un papel preponderante.

Las fallas en la mayoría de los casos no ocurren en forma repentina sino que toman un tiempo, el cual puede durar de minutos a años.

Las deformaciones que se producen por la actuación de los esfuerzos generan a su vez disminuciones en la resistencia. Al inicio del movimiento, es muy posible que estas deformaciones progresivas afecten volúmenes de talud, pero a medida que avanza el proceso de fallamiento las deformaciones principales se concentran en una superficie o banda de falla a lo largo de la cual se produce la rotura o falla del material.

Es esencial para el análisis de un deslizamiento o para la determinación de niveles de amenaza y riesgo, que se tenga claridad sobre los procesos de evolución que generan un deslizamiento, la susceptibilidad, los procesos de deterioro y factores detonantes así como el proceso de fallamiento propiamente dicho.

Cada una de estas etapas involucra fenómenos mecánicos, leyes y parámetros que pueden ser muy diferentes y deben analizarse como un todo y también en forma separada.

2. PROCEDIMIENTOS DE INVESTIGACIÓN

Se realizan estudios detallados e investigaciones de sitio, en las laderas, taludes o deslizamientos para obtener la información requerida sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible, un diseño efectivo de solución y el planeamiento de medidas correctivas en deslizamientos. Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

2.1 Parámetros básicos que afectan la estabilidad.

2.1.1. Parámetros geométricos

La altura, pendiente, curvatura, largo y ancho, que conforman la topografía básica de un talud, afectan la estabilidad del mismo, actuando en forma conjunta o separada, debido a que determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.

El nivel de esfuerzos es determinado por el volumen y ubicación de los bloques o masas de materiales, factores que dependen de las características topográficas.

Entre los parámetros topográficos más importantes se pueden enumerar los siguientes:

2.1.1.1 Pendiente

Para cada formación de terreno, existe un estado determinado de meteorización que forma un ángulo con la pendiente, a partir del cual un talud es inestable.

Existen algunos suelos residuales de origen ígneo que generan ángulos del talud superiores a 45° , en ciertas Lutitas meteorizadas saturadas éste no debe exceder los 20° y hasta valores de la mitad del ángulo de fricción.

En la literatura de Mecánica de Suelos, se establece que, teóricamente en suelos granulares limpios y secos el ángulo de inclinación del talud con la horizontal no debe sobrepasar el de fricción del material.

2.1.1.2 Curvatura

Esta afecta el equilibrio de masa, así como la capacidad de infiltración y de erosión, debido a su efecto en la velocidad del agua de escorrentía. La curvatura es la concavidad que se presenta en el terreno, tanto es sentido longitudinal como transversal.

2.1.1.3 Largo – ancho

Cuanto más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre éste y por lo tanto el talud estará más expuesto a la erosión superficial.

2.1.1.4 Áreas de infiltración arriba del talud

Identificar las áreas de concentración de agua arriba del talud es de suma importancia, ya que siempre coinciden con depresiones topográficas, y entre mayor sea la zona que aporte agua al talud, será más grande la cantidad de agua que afecte la estabilidad del talud.

2.1.2 Parámetros geológicos

El relieve y la topografía están determinados por la geología del área, lo que permite estimar la susceptibilidad al movimiento en el nivel regional. En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas, sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves.

La Geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la

presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad.

En los suelos residuales y rocas la estratificación y las discontinuidades actúan como planos de debilidad o como conductores de corrientes de agua subterránea y las características de estas pueden facilitar los movimientos.

La descomposición física o química, producto de la meteorización, origina alteraciones en la roca o suelo, las cuales modifican substancialmente los parámetros de resistencia y permeabilidad, facilitando la ocurrencia de deslizamientos.

2.1.3 Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos

Cualquier cambio que exista en las aguas subterráneas, genera movimientos en las laderas o taludes, debido a que estos se encuentran relacionados con las lluvias y la hidrología superficial.

En un estudio de deslizamientos se deben tener en cuenta los parámetros relacionados con la hidrogeología y en especial las características de las lluvias y el régimen de aguas subterráneas.

Cuando ocurren períodos de lluvia intensos, ascienden los niveles piezométricos y la saturación disminuye las tensiones capilares.

Los niveles de agua freáticas pueden fluctuar de manera considerable con el tiempo y modificar la resistencia de los materiales y el estado de esfuerzos.

Es importante determinar las áreas de recarga y descarga, partiendo de la base del conocimiento del clima regional y análisis del terreno, incluyendo el tipo y distribución de la roca, fallas, fracturas, etc.

2.1.4 Parámetros geotécnicos

La resistencia al corte representa la modelación física del fenómeno de deslizamiento. Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos cohesivos se rompen a veces por tensión, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

Los parámetros de ángulo de fricción interna y cohesión determinan el factor de seguridad al deslizamiento de una determinada superficie dentro del terreno.

Los ángulos de fricción interna varían de cero en materiales muy blandos, a 50° en gravas angulosas o mantos de arenisca y las cohesiones de cero en materiales granulares limpios, a más de 10 Kg/cm² en suelos muy bien cementados y valores superiores en las rocas masivas.

La resistencia interna de los materiales al flujo del agua es medida por la permeabilidad, además puede definir el régimen de agua subterránea, concentración de corrientes, etc.

La sensibilidad se define como la relación de la resistencia pico al corte entre una muestra inalterada y otra remoldeada. En algunos suelos arcillosos esta relación puede ser hasta de 4, lo que equivale a que se pierde gran parte de la resistencia al remoldearse; y en la literatura se conoce de casos catastróficos, donde por acción del cambio de esfuerzos, el suelo se remoldea in situ, pierde su resistencia y se produce el deslizamiento.

Los suelos arcillosos al contacto con el agua expanden su volumen produciéndose movimientos de extensión dentro de la masa del suelo. En suelos sensitivos se puede producir pérdida de resistencia al corte por acción del remoldeo generado por el proceso expansivo.

La expansividad de suelos arcillosos en los rellenos de juntas puede generar deslizamientos de rocas.

La facilidad con la cual el suelo puede ser desprendido y transportado por acción del agua se denomina erosionabilidad. Este

factor puede afectar la estabilidad de un talud, ya que produce cambios topográficos desestabilizantes o genera conductos internos de erosión.

2.2 Organización del estudio

La fase de la investigación del lugar y el muestreo del suelo de la ingeniería de cimentaciones es la fuente más grande de incertidumbres. No importa cuán extensiva sea, existe siempre alguna duda si las perforaciones retratan exactamente las condiciones del subsuelo, si las muestras son representativas, y si los ensayos están midiendo correctamente las propiedades del suelo. Los ingenieros tratan de compensar estas incertidumbres aplicando factores de seguridad en sus análisis. Desafortunadamente, esta solución solo incrementa los costos de la construcción.

El ingeniero debe escoger un programa de investigación y muestreo mas extensivo para mejorar la definición de los suelos, en un esfuerzo para reducir el nivel de conservación necesario para el diseño de la obra que se planea construir.

Para encontrar las causas y mecanismos de falla y poder cuantificar los parámetros que determinan la estabilidad de un talud, diagnosticar y diseñar las obras de estabilización se recomienda realizar una investigación del sitio que contenga los siguientes objetivos:

- Determinación de la ubicación y espesor de los estratos de suelo.
- Determinación de la ubicación del nivel freático así como cualquier otra característica asociada.

- Extracción de muestras de suelo.
- Definición de problemas especiales y todo lo concerniente para el proyecto y ejecución de obras técnica y económicamente correctas. Observar la zona, identificando posibles problemas de drenaje o de estructuras antiguas.

Se deben conseguir estas metas usando una combinación de:

- a) Recolección de información preliminar.
- b) Técnicas de exploración *in-situ*.

La definición de la información que se requiere del subsuelo se efectúa a partir de la confrontación de los requerimientos propios del proyecto con la hipótesis hecha acerca del subsuelo. Los alcances de la información que se requiere del subsuelo son también en cierta medida una hipótesis, como que están basados en otra hipótesis.

Conforme avanza la exploración se debe estudiar si la hipótesis originalmente concebida acerca del subsuelo, es cierta o no; en la medida en que lo sea, lo serán también los alcances iniciales de la información requerida del subsuelo.

Las características del programa de exploración dependerán de varios factores: del tipo de suelo a investigar, del tipo de parámetro que se busca determinar, del nivel de la investigación (preliminar o definitiva).

Para realizar eficientemente estos trabajos se requiere el concurso de un grupo interdisciplinario integrado por Ingenieros, Geólogos, Hidrólogos, Topógrafos, Laboratoristas y otros especialistas; quienes deben conformar un equipo de trabajo, en el cual es muy importante efectuar los análisis con una mente muy amplia, sin caer en dogmatismos o en conclusiones simplistas.

El trabajo de campo es el más costoso y el que mejor información puede proveer para un análisis detallado conjuntamente con el del laboratorio. En contraste, el análisis de la información y modelación es más económico. El anterior problema ha conducido con mucha frecuencia a que se realizan evaluaciones numéricas muy precisas, utilizando información de muy baja calidad o inexistente, lo que provoca la obtención de datos poco confiables para su utilización. En el caso de problemas de taludes, el planteamiento de una teoría sin comprobación puede conducir a errores de análisis que llevan necesariamente, a la escogencia de soluciones equivocadas y en ocasiones a provocar deslizamientos mayores que el que se pretende estabilizar.

El análisis y la evaluación del deslizamiento generalmente, requieren de experiencia del profesional encargado, sin embargo, la experiencia puede ser mala consejera porque lo que ocurrió en un sitio no es necesariamente lo que está ocurriendo en un sitio distinto, así, los factores exteriores lo indiquen. En estabilidad de taludes son muchos los errores que se han cometido por falta de profundización en los estudios y por creer que la primera teoría planteada es la verdadera.

El presente capítulo procura presentar información amplia sobre las diversas herramientas con que se cuenta para estudiar un talud o un deslizamiento.

2.2.1 Causas comunes de fracasos en la investigación

Después de obtenida la información se debe proceder a su análisis para la toma de decisiones, y es esta la etapa más importante del programa de investigación y en ocasiones se toman decisiones equivocadas por la falta de un análisis racional y completo de la información.

Hay cinco razones generales para los fracasos en las investigaciones de procesos de deslizamiento, siendo estos:

- El conocimiento general de los procesos geológicos no se utilizó en la planificación del programa de exploración y en la evaluación de la información recolectada.
- El investigador tenía una noción preconcebida de lo que debería ser la evaluación del sitio y no permitió considerar evidencias que contradecían la idea preconcebida.
- No se utilizaron todas las herramientas disponibles para la investigación del sitio, aún en el caso de que eran simples y obvias.

- El investigador no discutió apropiadamente los objetivos del programa de investigación con todas las personas involucradas.
- No se establecieron líneas abiertas y libres de comunicación.

2.3 Procedimiento de análisis de la información existente

Antes de realizar una exploración nueva en el sitio de un proyecto, se debe recolectar la información ya disponible, para la estructura propuesta y las condiciones del subsuelo del lugar. En algunos lugares esta información será abundante, mientras que en otros incluso pueda no existir. La información referente a la estructura incluirá:

- Su localización y dimensiones.
- El tipo de construcción, las cargas de las columnas, el espaciamiento entre columnas y los asentamientos admisibles.
- El uso.
- La elevación final.
- El número y profundidad de los sótanos.
- La profundidad y extensión de cualquier pendiente propuesta.
- Los requerimientos de los códigos locales de construcción.

También se debe realizar el esfuerzo para obtener al menos una idea preliminar de las condiciones del subsuelo. Sería muy difícil planear un programa de exploración sin tal conocimiento. Afortunadamente, existen

muchos métodos y recursos disponibles para obtener un conocimiento preliminar de las condiciones del suelo local.

Estos métodos podrían incluir:

- Determinación de la historia geológica del sitio, incluyendo evaluaciones anticipadas de rocas y tipos de suelos, la proximidad de fallas, y otras características geológicas.
- Recolección de copias de reportes de perforaciones y resultados de ensayos de laboratorio a partir de investigaciones previas en éste u otros sitios cercanos.
- Revisión de mapas de suelos desarrollados para propósitos de la agricultura.
- Revisión de fotografías aéreas antiguas y nuevas, además de mapas topográficos (pueden revelar el desarrollo previo o la nivelación del lugar).
- Revisión de reportes de pozos de agua (ayuda a establecer los niveles freáticos históricos)
- Localización de las cimentaciones de las estructuras adyacentes, especialmente aquellas que puedan ser afectadas por la construcción propuesta.

Los deslizamientos ocurren en sitios específicos bajo ciertas condiciones topográficas, geológicas, climáticas y ambientales. Por lo tanto, es importante utilizar la información existente, con el fin de entender las propiedades topográficas, geológicas, etc., de los deslizamientos.

Se recomiendan los siguientes pasos para el análisis de la información existente:

2.3.1 Fotografías aéreas

La fotointerpretación es uno de los métodos de trabajo más utilizados en geología, constituyendo una herramienta fundamental en cartografía, geología, topografía, reconocimientos litológicos y en estudios geomorfológicos entre otras aplicaciones.

Se pueden emplear fotografías en varias escalas para obtener información regional y local. En Guatemala, el Instituto Geográfico Nacional (I.G.N) se dedica a obtener estas fotografías.

La variedad y cantidad de fotografías está sujeto a la planificación de los planes de vuelo y el presupuesto que se tenga destinado para esto. Se pueden obtener fotografías en blanco y negro y en colores, en otros países, según sea la tecnología, se poseen una gama de tomas con sensores remotos, incluyendo imágenes de satélite y radar de sus regiones, por lo que facilita en gran manera el trabajo de interpretación.

Además de la información topográfica y geomorfológica, se pueden inferir la geología (tipo de roca, discontinuidades estructurales, localización de coluviones) y detalles de la historia del sitio tales como rellenos, cortes o deslizamientos antiguos. Otra utilización de las fotografías aéreas es la clasificación del terreno en áreas homogéneas; basados en la pendiente, material geológico, erosión e inestabilidad.

2.3.1.1 Interpretación de fotografías aéreas

No existe duda alguna, que la interpretación de fotografías aéreas es uno de los sistemas más efectivos para el reconocimiento y demarcación de deslizamientos. En la actualidad, no hay otra técnica que ofrezca una vista tridimensional del terreno. Se estiman precisiones de más del 95% en la identificación de deslizamientos en los mapas a escala 1:5,000 o menor. La escala es muy importante y la mayoría de las fotografías antiguas se encuentran en escalas que no permiten la identificación precisa de deslizamientos; Sin embargo, el análisis de fotografías tomadas de años anteriores, puede ofrecer información muy importante para el diagnóstico de los problemas actuales al compararlas con fotografías más recientes. En estudios previos las escalas más útiles en ingeniería geológica son las comprendidas entre 1:30,000 y 1:5,000. Como apoyo para los reconocimientos de de campo, las escalas pueden variar entre 1:10,000 y 1:5,000.

Para el análisis de las fotografías aéreas es de suma importancia estudiar la topografía, las formas del terreno y los cambios de relieve, ya que de este análisis se pueden separar los varios tipos de forma del terreno, obteniendo claves como la naturaleza y estabilidad de los materiales que conforman una determinada topografía.

Además, la densidad y el sistema de los canales de drenaje natural reflejan la naturaleza del suelo y la roca que conforman la

superficie del terreno. En general, un drenaje en forma de árbol indica un material uniforme y zonas planas y un sistema de drenaje paralelo indica la presencia de discontinuidades y pendientes fuertes.

Los sistemas rectangulares son evidencia del control por parte de la roca subyacente y un sistema desordenado indica la presencia de coluviones y residuos superficiales.

Un sistema de hoja de árbol es común en zonas de erosión muy severa por la presencia de limos y suelos erosionables.

Las formas de la sección de los canales de drenaje o erosión también son muy útiles para detectar el tipo de material; un canal redondeado indica la presencia de arcillas, un canal en U indica limos y uno en V muestra la existencia de arenas y gravas.

Por último, los tonos grises indican la humedad del suelo, así un tono oscuro representa gran humedad y un tono claro poco contenido de agua.

En las fotografías aéreas se pueden identificar zonas de concentración de infiltración o afloramiento de agua por su coloración más oscura, debida a la vegetación verde y espesa y a la capacidad reflectiva del suelo húmedo.

2.3.2 Estudio de los mapas geológicos y topográficos

2.3.2.1 Planos topográficos

Los mapas topográficos representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos y, algunas veces, se puede identificar en ellos grandes áreas de deslizamiento. En los mapas topográficos, la escala y el intervalo de las curvas de nivel facilitan la identificación de los deslizamientos. Esta identificación se puede llevar a cabo mediante:

1. Características topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja.
2. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.
3. Movimientos menores o irregularidades en zonas de pendientes empinadas, acantilados, bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

La identificación de deslizamientos en mapas topográficos se verá ayudada por la escala y el intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

Generalmente, se requiere realizar planos topográficos diseñados específicamente para el proyecto. Los nuevos sistemas de mapas topográficos (Ortomapas) dibujados directamente sobre fotografías aéreas son de gran utilidad práctica.

2.3.2.2 Mapas geológicos

La geología permite conocer la roca madre –muy importante en el caso de suelos residuales- así como estimar los perfiles de intemperización. Igualmente la geología provee información valiosa para la determinación del origen de los suelos, que cualitativamente pueden servir para estimar los tipos de suelos y su uniformidad. Por lo que el primer paso en el programa de exploración de campo es realizar un reconocimiento geológico, incluyendo un mapeo de campo del área. Las notas de campo deben registrarse en un mapa topográfico a gran escala. El reconocimiento debe anotar la uniformidad de la topografía, infiltración, existencia de trazas de deslizamientos antiguos, verticalidad de árboles y la condición de los taludes aledaños.

Aunque el mapa geológico en sí puede no especificar la presencia de deslizamientos o terrenos susceptibles a movimientos del talud, esta información puede inducirse por la relación estrecha que existe entre la Geología y la inestabilidad de los taludes.

Generalmente, un caso de deslizamiento no se presenta solo, sino que es un evento dentro de una serie de eventos que han ocurrido, están ocurriendo y ocurrirán en la misma formación geológica y topográfica.

Con los mapas geológicos se pueden obtener los parámetros geotécnicos básicos y con los topográficos se pueden conocer las pendientes, accidentes, presencia de cambios de pendiente, sistemas de drenaje y geomorfología. Es importante obtener planos en escalas diferentes para determinar los elementos regionales y locales que puedan afectar el comportamiento geotécnico de los suelos. Adicionalmente, se deben consultar los planos que se encuentren disponibles.

2.3.2.3 Mapas agrícolas

En países desarrollados, los estudios agrícolas presentan un concepto tridimensional sobre la extensión horizontal y el perfil vertical de cada unidad de suelo. Adicionalmente, se encuentran ensayos de composición química y PH que son de gran ayuda en la identificación del tipo de suelo presente en el sitio.

En algunos planos aparece la profundidad hasta la roca, distribución, granulométrica y ensayos especiales.

2.4 Visita de reconocimiento

El reconocimiento de campo de la zona de estudio es una de las tareas más importantes en la fase de estudios previos. Debe efectuarse después de la revisión de información y la fotointerpretación, de las que se obtendrá una síntesis geológica y una topográfica básica del área de interés. Esta información permite acometer los reconocimientos geológico-geotécnicos a partir de los mapas existentes. El área a visitar debe incluir los taludes afectados o que se requiere analizar y las regiones adyacentes que pueden contribuir en las causas de los movimientos.

Algunos deslizamientos pueden originarse en un sitio y trasladarse distancias importantes, ladera abajo y se requiere analizar no solamente las áreas donde se producen, sino también las áreas que pueden ser afectadas, abajo del deslizamiento propiamente dicho.

La visita ofrece un panorama tridimensional y se puede información muy variada y en grandes cantidades. Se obtiene el tipo o clasificación de los movimientos, sistemas de agrietamiento, tipo de suelo, afloramiento de agua y al final de la visita, se puede tener una visión global que puede equivaler a más del 50% de la solución del problema planteado.

Se recomienda examinar los patrones regionales y locales de la topografía para localizar elementos anormales tales como valles truncados, cambios bruscos de pendiente, vegetación o estructura de la superficie del terreno.

Se debe mapear y tomar información de las exposiciones de roca, sistemas de drenaje de aguas superficiales, depósitos superficiales y estructura geológica. El reconocimiento geológico debe dedicarle gran atención a detalles tales como agrietamientos de la superficie del terreno, depresiones, árboles inclinados y nacimientos de agua.

Después de la visita se requiere re-estudiar la información geológica, topográfica, etc. Y se puede organizar un programa de ensayos y estudios en detalle.

2.5 Estudio topográfico

Para el análisis de los movimientos de deslizamiento de un sitio, la topografía produce información básica. Los reconocimientos preliminares utilizan los planos topográficos existentes o las fotografías aéreas. Sin embargo, se requiere un detalle topográfico para localizar muchos elementos críticos, los cuales pueden estar ocultos por la vegetación.

Los objetivos de los levantamientos topográficos son los siguientes:

- a) Obtener detalles topográficos, especialmente, de aquellos factores ocultos por la vegetación.
- b) Determinar los perfiles topográficos para los análisis de estabilidad.
- c) Establecer un marco de referencia sobre el cual puedan compararse los movimientos futuros del terreno.
- d) Para prever cortes y rellenos y establecer plataformas más o menos planas.

- e) Para ubicar volúmenes de materiales en las investigaciones de canteras.
- f) Estudiar necesidades de drenaje superficial y subdrenaje, que se relacionan con propiedades de los suelos.

Como punto de partida de un levantamiento topográfico es el establecimiento de un sistema de Bancos de Marca (BMs), los cuales deben permanecer estables y sin moverse en el futuro. Los BMs deben localizarse lo más alejados posibles de la masa deslizada y al mismo tiempo en sitios de fácil referencia. Estos deben relacionarse con coordenadas oficiales, las cuales están dadas por el Instituto Geográfico Nacional. Por lo menos dos puntos de elevación deben establecerse a cada lado del movimiento. Debido a la vasta experiencia en el tema, los expertos recomiendan que la distancia de los BMs al punto más cercano al movimiento deba ser del 25% del ancho de la zona deslizada. En lo posible deben buscarse afloramientos de roca.

Los mapas topográficos deben incluir la localización y representación lo más precisa posible de agrietamientos, levantamientos del terreno y afloramientos de agua. Los agrietamientos especialmente, en los bordes de las líneas agrietadas, en ocasiones se ocultan dentro del pasto, hojas y raíces y estas deben ser descubiertas para su levantamiento topográfico. Adicionalmente, a los nacimientos de agua deben determinarse las zonas de infiltración localizada.

El movimiento continuo de un deslizamiento puede ser medido por un sistema de grilla o transversas a través del área deslizada, generalmente, se utiliza una serie de líneas más o menos perpendiculares a los ejes del movimiento, espaciadas 15 ó 30 metros.

Se pueden utilizar todas las técnicas existentes para levantamientos, de acuerdo a la necesidad y la disponibilidad de los equipos.

2.5.1 Presentación de datos topográficos

La utilización de las escalas varía según el tipo de información que se quiera plasmar en los mapas. Para deslizamientos grandes se pueden emplear planos en escala 1: 2,000 a 1: 5,000 y los detalles se pueden presentar en escalas de 1: 500 a 1: 1.000, y para deslizamientos o zonas de estudio más pequeñas se pueden emplear escalas de mayor precisión.

Además, a los mapas en planta deben presentarse perfiles. El más importante de estos perfiles es generalmente, el que sigue la línea de mayor pendiente dentro del movimiento. Se recomienda que siempre se haga un mínimo de tres perfiles para que incluyan las peores condiciones y las menos críticas.

Los perfiles deben abarcar 15 ó 30 metros más por fuera de los movimientos. Cada perfil debe dibujarse por separado y debe incluir todos los detalles, tales como cambios bruscos de nivel, vegetación, nacimientos de agua, etc.

2.6 Investigación geotécnica detallada

El área a investigar está en función del tamaño del proyecto y de la extensión de los factores geológicos y topográficos que afectan el problema a estudiar, además de los recursos disponibles que con que se cuenten para realizar la investigación.

Cuando se buscan movimientos potenciales que no se han desarrollado, el área a investigar no se puede determinar por adelantado.

El planteamiento para la resolución de un problema geotécnico, ya que no es posible estandarizar una mecánica general, debe soportarse con un estudio lo más extenso y detallado posible, tomando en cuenta que los deslizamientos deben relacionarse con áreas estables a su alrededor, recordando que generalmente los deslizamientos son más extensos que lo que se sospecha inicialmente.

La profundidad de la investigación es todavía más difícil de definir, los sondeos deben profundizarse hasta identificar los materiales estables por debajo de los movimientos reales o potenciales. El estudio debe incluir datos sobre la precipitación pluvial y por lo menos debe tenerse información de un año de duración, aunque es común que los fenómenos climáticos críticos tarden 10 a 20 años en repetirse en su máxima actividad.

Todo talud debe diseñarse para algo más que las peores condiciones climáticas que se esperen, de lo contrario se puede llegar a conclusiones optimistas que tienen un nivel muy alto de riesgo.

Para el planeamiento del estudio detallado, se debe incluir los siguientes puntos: Topografía, Geología, Agua subterránea, Clima, Sismicidad y vibraciones, Historia de deslizamientos en la zona y Caracterización de movimientos. Esto nos permite contar con la mayor cantidad de información para realizar un análisis detallado y presentar una información confiable sobre el área que se está estudiando.

2.6.1 Descripción de suelos y rocas

Una buena descripción de los suelos y rocas que se encuentren durante la investigación es de suma importancia para el éxito del mismo.

La composición del suelo se estudia mediante el sistema unificado de clasificación de suelos diferenciando los suelos según el tamaño de grano.

El color corresponde al observado en el terreno, y puede indicar propiedades importantes: por ejemplo, el color rojo amarillo-rojo indica una meteorización intensa y la existencia de óxidos de hierro, el color marrón-verde oscuro y el negro indican presencia de materia orgánica.

La estructura de un suelo se define como homogénea cuando se trata de un suelo de características similares; estratificada cuando aparecen diferentes niveles de suelo, bandeada si se aprecian niveles de suelo residuales y laminados cuando los niveles de suelo tienen un espesor de 3mm.

La densidad en suelos granulares y la consistencia en suelos cohesivos se puede determinar fácilmente en campo mediante ensayos sencillos.

La buena descripción de los suelos y rocas presentes es uno de los factores más importantes para una buena investigación y esta debe hacerse por un profesional muy calificado y con gran experiencia.

La descripción de los materiales debe incluir:

- a) Color
- b) Tamaño de granos y otros detalles de la textura
- c) Resistencia
- d) Nombre del suelo o roca

2.6.2 Mapas geológicos

El fin de los mapas geológicos es documentar las características de la superficie del terreno para poder representar las condiciones del subsuelo. Los mapas en el caso de deslizamientos deben mostrar las características del material en la superficie del terreno y determinar claramente si se trata de roca sana o meteorizada, suelo residual coluviones o aluviones. Además, de la litología se deben presentar los detalles de la estructura y las características del drenaje superficial y subterráneo, tipos de materiales, litología y composición, contactos litológicos, estratificación y estructuras sedimentarias. Además de la

estructura geológica y contactos tectónicos, grado de fracturación, discontinuidades sistemáticas (diaclasas, foliación, estratificación) y singulares, zonas de falla y brechas y actividad tectónica.

Los detalles de la superficie del terreno son generalmente, la clave para entender las causas y procesos de deslizamientos. Se deben utilizar convenciones y símbolos geológicos aceptados por las prácticas nacionales o internacionales para permitir el análisis de los mapas de deslizamientos por otros profesionales.

Un deslizamiento puede afectar estructuras existentes, ductos de servicios y otros elementos artificiales, tales como pavimentos y cercas. Los movimientos de estas estructuras, así como su inclinación, pueden dar una idea de la cantidad de desplazamiento y características de los movimientos. Los detalles externos de la topografía en el área del deslizamiento se van modificando con el tiempo y se pueden identificar deslizamientos antiguos con aproximación de su edad.

La estratificación condiciona a los posibles movimientos en cuanto representa un factor favorable, o no, a los desplazamientos. Una inclinación de los estratos a contra-pendiente favorece la estaticidad, todo lo contrario de lo que ocurre con un buzamiento en el sentido de la pendiente topográfica.

El grado de estaticidad, o de movilidad, que propicia la disposición estratigráfica dependerá del grado de inclinación y de la rigidez de los estratos.

Así, con estratos a contra-pendiente y rígidos, a mayor ángulo de inclinación habría un mayor impedimento al desplazamiento. La fisuración rompe la continuidad del material, con lo que se obtienen elementos “libres” para el desplazamiento.

En determinadas situaciones, el resultado puede ser diferente en función del material que pueda rellenar las fisuras. Si un material arcilloso rellena fisuras a favor de la superficie topográfica, y si el resto de los condicionantes son favorables, se crearían niveles de despegue, con todas sus consecuencias.

En tanto que si las fisuras se rellenan de material de precipitación que cemento, se contrarrestan los procesos tendentes a movimientos de terreno.

2.7 Sondeos geotécnicos

Sondear es una técnica que se emplea para hacer un agujero en la tierra o en una construcción. El tipo de sondeo dependerá del fin que se persiga, y en segundo lugar, de la rapidez y economía.

En el sondeo geotécnico se realiza una perforación de pequeño diámetro que permite reconocer la naturaleza y localización de las diferentes capas del terreno, así como extraer muestras del mismo y realizar ensayos “*in situ*”.

La exploración subsuperficial incluye sondeos, ensayos de campo y ensayos geofísicos.

La investigación debe contener los siguientes puntos:

- a) Definir con anticipación la geología del terreno para poder determinar el tipo y característica de la investigación.
- b) Determinar los sistemas de investigación subsuperficial.
- c) Determinar localización, espaciamiento y profundidades de sondeos.
- d) Determinar frecuencia y tipo de muestras.

Los objetivos generales de los sondeos son:

1. Identificar y caracterizar las formaciones más débiles que pueden afectar el movimiento.
2. Identificar las formaciones más resistentes que pueden limitar la extensión de la zona de falla.
3. Localizar niveles de agua subterránea, presiones y características del agua.
4. Identificar la distribución subsuperficial de materiales.

5. Cuantificar las propiedades físicas de los materiales (humedad, gradación, plasticidad, resistencia al corte y otras propiedades) para emplearlos posteriormente en el análisis de estabilidad.
6. Realizar ensayos de campo, tales como penetración, veleta, etc.

El espaciamiento de los sondeos depende del tamaño y características del movimiento.

Para una zona donde se sospecha pueda ocurrir un movimiento se sugiere un sistema de cuadrícula de sondeos, y donde ya ocurrió el deslizamiento se requieren sondeos por dentro y por fuera del movimiento.

Debe planearse un número suficiente de sondeos, a modo de obtener información detallada de la superficie y del subsuelo del área en estudio. Algunas veces debido a la topografía accidentada, el acceso del equipo puede ser difícil, por lo que puede necesitarse equipo especial montado en camiones.

Se prefieren sondeos de gran diámetro a los de diámetro pequeño al perforar en áreas sujetas a deslizamientos, debido a que es a menudo posible el localizar el plano de falla, al examinar las muestras de una perforación de gran diámetro. Las zonas de corte o proporcionan evidencias de movimientos en el pasado. Se deben tomar muestras inalteradas a profundidades seleccionadas en la perforación y cuando se encuentre cambio en el tipo de suelo. En el caso de deslizamiento existente, deben tomarse de ser posible, muestras en la zona de falla. En algunos casos puede ser necesario que un geólogo entre en la

perforación para examinar los lados de la misma en busca de zonas de falla, evidencia de movimientos o infiltración. Las profundidades de los sondajes deberán extenderse por debajo del pie del talud, y de ser posible, deberán llegar a suelo firme o roca.

Las anomalías que presente la litología de una ladera, determinan su estabilidad, pero muchas veces éstas no son detectadas en los sondeos.

2.7.1 Muestreo

Las muestras geotécnicas se toman tanto en sondeos u otro tipo de excavaciones, con el fin de obtener testigos representativos de las características y propiedades del terreno para efectuar ensayos de laboratorio. El muestreo en las perforaciones depende del material que se consiga y del grado de precisión de los datos geotécnicos.

Los tipos de muestra que se obtienen son los siguientes:

2.7.1.1 Muestras alteradas

Son muestras que sufren modificaciones en su estructura y en su contenido de humedad pero conservan su composición mineralógica. Las muestras alteradas se obtienen habitualmente con muestreadores de tubo partido y excavaciones. Permiten la realización de ensayos de laboratorio en suelos de identificación, compactación, etc.

2.7.1.2 Muestras inalteradas

Se denomina muestreo inalterado a aquel que procura una muestra no disturbada, es decir que cumpla no solamente con los requisitos de la muestra representativa, sino que además mantiene intacta su forma, estructura original y sus características físicas (peso volumétrico, humedad, color, estructura, etc.). Una muestra inalterada perfecta que cumpla con estos requisitos no existe, debido a que se puede producir: la liberación de los esfuerzos in-situ del suelo, un posible secado o desecación del suelo, corte y compresión del suelo durante el proceso de inserción del muestreador o la vibración de la muestra durante su recuperación y transporte; así que debemos conformarnos con una muestra lo menos disturbada posible. La obtención de este tipo de muestras es necesaria para ensayos de resistencia, deformación, permeabilidad y determinar propiedades de los suelos.

Las muestras inalteradas se obtienen generalmente, en forma manual o en un sondeo con tubo de pared delgada.

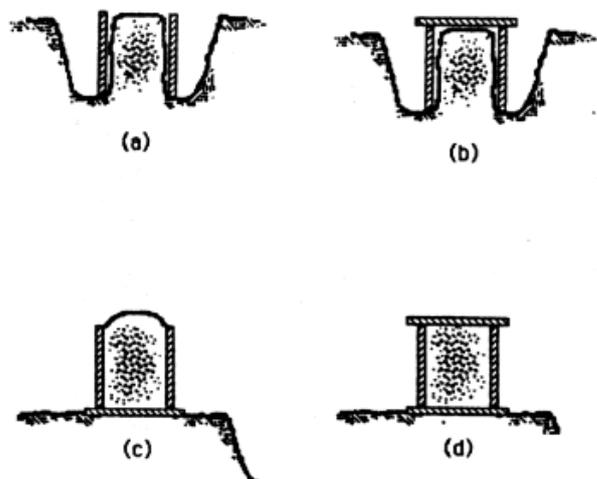
Para el caso de deslizamientos, se recomienda realizar muestreo continuo.

El muestreo inalterado en excavaciones a mano se lleva a cabo principalmente mediante dos métodos: el método del bloque de suelo o muestra cúbica y el método del tubo metálico.

2.7.1.2.1 Método del bloque

Se talla un bloque de suelo en la pared o en el piso de la calicata, cuidando de escoger un sector de suelo fresco, no alterado por la excavación o por la intemperie. Para ello se sigue el procedimiento graficado en la Figura 10 al término del tallado, se coloca encima del bloque una caja de madera con el fondo lleno con 2 cm. de cera blanda, recién vaciada y se cubre el bloque de tal manera que asiente correctamente en el fondo, posteriormente se voltea la caja (después de haber cortado la muestra por su base) y se rellenan todos los costados con cera microcristalina fundida, que no produce retracción (de esa manera no se raja y no se separa de las paredes de la caja); finalmente la caja se llena de cera de tal manera de cubrir la muestra con un mínimo de 2 cm. de ella.

Figura 10. Procedimiento de obtención de muestras



En un procedimiento equivalente, pero menos seguro, la muestra antes de ser extraída se sella con cera derretida, haciendo uso de una brocha, adhiriéndole cera líquida. Al final, se corta la base de la muestra y se termina de forrarla con capas sucesivas (no menos de 3) de cera derretida. Este tipo de muestras solo pueden ser seguras si el transporte se realiza por auto y en cajas debidamente amortiguadas.

Los suelos muy sensitivos deben colocarse en cajas protectoras inmediatamente después de cortados, agregándoles coberturas de parafina. Las caras expuestas deben sellarse para impedir su secamiento. En ocasiones se utilizan muestreadores de gran tamaño o cortadores hincados a mano.

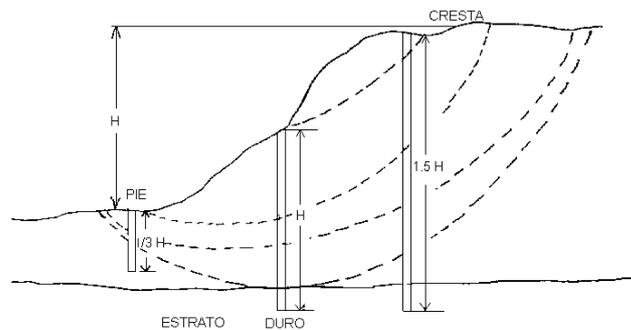
La calidad de las muestras es un factor muy importante para que los resultados de los ensayos sean confiables. Sin embargo, en algunos tipos de investigación se pueden obtener muestras de baja calidad para obtener información general de los perfiles de suelo.

2.8 Ensayo de campo

Los objetivos principales de las perforaciones son definir la litología del área de estudio y tomar muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

El número y ubicación de las perforaciones a realizar en un estudio dependen del tamaño y forma del área considerada. Los criterios para determinar estas dos características básicas varían considerablemente, sobre todo en áreas planas. En el caso de taludes es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones; este número se puede incrementar dependiendo del tamaño del talud.

Figura 11. Ubicación de las perforaciones



Se puede hacer una perforación en la cresta con una profundidad aproximada de 1.5 veces la altura del talud, otra hacia la mitad del talud con una profundidad comparable con la altura de ese talud y una última al pie del mismo con una profundidad aproximada de $1/3$ de la altura

Los ensayos de campo tienen la ventaja de poder simular situaciones en el ambiente mismo del talud y son muy útiles para cuantificar los parámetros que se emplean en el análisis de un deslizamiento.

En nuestro país, la excavación a mano resulta más económica que la exploración con equipos mecánicos. La excavación a mano es técnicamente más conveniente que la mecánica en los suelos cohesivos, debido a que

permite la obtención de muestras inalteradas de la mejor calidad posible y a menor costo; sobre todo permite la observación directa de los estratos, circunstancia esta que resulta invaluable en especial cuando se requiere el perfil continuo en taludes.

Los ensayos más empleados en campo están: ensayo de penetración estándar (SPT), Cono estático, presurómetro, veleta, veleta de bolsillo, ensayo de corte directo en el sondeo, corte directo de campo y ensayo de permeabilidad.

2.8.1 Ensayo de penetración estándar SPT

El ensayo de penetración estándar, que nació en 1,920 (U.S.A) con la finalidad de estimar el grado de densificación de los suelos y fue desarrollado en 1927, es actualmente el más común de los ensayos in-situ, y el medio más económico de obtener información subterránea. Debido a su amplio uso, el método ha sido estandarizado con la norma ASTM D1586 desde 1958 y con periódicas revisiones.

Este ensayo de penetración dinámica se realiza en el interior de sondeos durante la perforación. Permite obtener un valor de resistencia a la penetración que puede ser correlacionado con parámetros geotécnicos como la densidad relativa, el ángulo de rozamiento, la carga admisible y los asentos en los suelos granulares. En el ensayo también se obtiene una muestra alterada, para realizar ensayos de identificación en laboratorio.

En el ensayo SPT puede ejecutarse prácticamente en todo tipo de suelos, incluso en roca muy alterada, aunque es en los suelos granulares donde se realiza preferentemente; la dificultad de obtener muestras inalteradas en este tipo de suelos añade relevancia al SPT.

La información que provee este ensayo permite determinar la densidad relativa de los suelos granulares y la consistencia de los suelos cohesivos.

La frecuencia habitual para la realización del SPT a lo largo del sondeo es de un ensayo cada 2 ó 5 metros o incluso mayor, en función de las características del terreno.

El resultado de los ensayos SPT puede verse afectado por factores como:

- Preparación y calidad del sondeo: Limpieza y estabilidad de las paredes de la perforación.
- Longitud del varillaje y diámetro del sondeo: condicionan el peso del elemento a hincar y la fricción con las paredes del sondeo.
- Dispositivo de golpeo: puede ser manual o automático, existiendo diferencias notables entre los resultados de ambos. Deben emplearse dispositivos automáticos, pues garantizan la aplicación de la misma energía de impacto en todos los casos.

2.8.2 Cono estático CPT

El ensayo del cono de penetración o CPT, es otro ensayo in-situ comúnmente usado, de acuerdo a la norma ASTM D 3441. Fue desarrollado en el oeste de Europa en los años 30 y también en los 50. Aunque se han usado muchos diferentes estilos y configuraciones, el cono estándar se trabajó en Holanda y por eso algunas veces es llamado cono holandés.

El penetrómetro de cono estático mide el esfuerzo necesario para el desplazamiento lento de un cono dentro del suelo. Las puntas del cono varían de 30° a 90° y de 36 a 50 milímetros de diámetro. El cono provee información sobre la resistencia de los materiales a intervalos muy pequeños. La resistencia del cono estático puede ser utilizada para calcular la capacidad de soporte, densidad y resistencia de los suelos para partículas menores que el tamaño del cono, el CPT define el perfil del suelo con mayor resolución que el SPT.

Los ensayos de penetración estática se realizan en suelos granulares y en suelos cohesivos de consistencia blanda. La presencia de gravas, suelos cementados y roca produce rechazo y daños en los equipos.

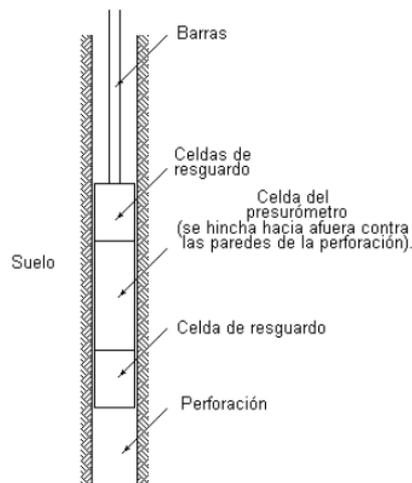
El CPT es una manera de evaluar los perfiles del suelo muy útil y económico.

El CPT no puede sustituir las perforaciones exploratorias convencionales porque no puede recuperar ninguna muestra de suelo.

2.8.3 Presurómetro

El presurómetro (ASTM D4719-07) es un globo cilíndrico que se inserta en el suelo y luego se infla, como se muestra en la figura adjunta. Las mediciones del volumen y la presión se usan para evaluar los esfuerzos in-situ, la compresibilidad, y la resistencia del suelo adyacente y así el comportamiento de una cimentación.

Figura 12. Esquema de ensayo del presurómetro



El PMT proporciona más mediciones directas de la compresibilidad del suelo y los esfuerzos laterales que el SPT y el CPT.

Por lo tanto, en teoría, éste debería proporcionar una mejor base para el análisis de asentamientos y posiblemente para el análisis de la capacidad de pilotes. Sin embargo, el PMT es un ensayo difícil de realizar y está limitado por la disponibilidad del equipo y el personal

entrenado para su uso. Aunque, el PMT es ampliamente usado en Francia y Alemania, su uso es sólo ocasional en otras partes del mundo. Sin embargo, puede llegar a ser más popular en el futuro.

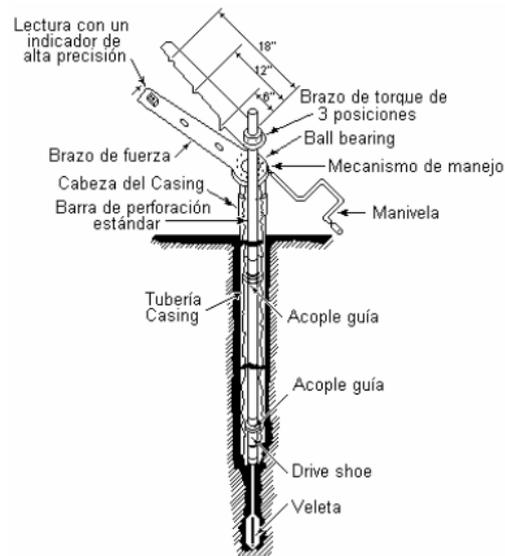
El ensayo suministra una gráfica de presión contra cambio volumétrico y este puede convertirse en una curva esfuerzo - deformación. El módulo de deformación también puede ser determinado.

2.8.4 Ensayo de veleta

El ingeniero sueco John Olsson desarrolló en los años 20 el ensayo de la veleta de corte para ensayar las arcillas sensitivas de Scandinavia in-situ. Este ensayo ha crecido en popularidad, especialmente desde la segunda guerra mundial y es ahora usado en todo el mundo.

Este ensayo (ASTM D2573) consiste en insertar una veleta metálica en el suelo, como se muestra en la figura 13, y se le hace rotar hasta que el suelo falla por corte. La resistencia al corte no drenado puede ser determinada a partir del torque en la falla, las dimensiones de la veleta, y de otros factores.

Figura 13. Ensayo de la veleta de corte



La veleta puede avanzar a grandes profundidades simplemente empujándola en lo más profundo (especialmente en suelos blandos) o el ensayo puede desarrollarse bajo el fondo de una perforación y puede ser repetido conforme avanza la perforación. Sin embargo, la veleta debe ser muy delgada para minimizar la disturbancia del suelo, y lo suficientemente fuerte para usarse en suelos cohesivos blandos a medios. El ensayo se realiza rápidamente (aproximadamente en un minuto se produce la falla) y por lo tanto se mide solo la resistencia no drenada.

Se puede obtener la resistencia pico y la resistencia residual que queda después de una falla y es uno de los ensayos más útiles para obtener el valor de la resistencia al corte. Debe tenerse en cuenta que el ensayo no da valores exactos de la resistencia al corte no drenada y

es necesario realizar el ensayo en la misma forma cada vez para poderlo correlacionar. Esto significa que debe utilizarse la misma tasa de deformación (aproximadamente 0.1 grado por segundo) y la misma demora en la iniciación del ensayo (preferiblemente más de 5 minutos). Si el suelo contiene grava o partículas grandes puede dar resultados erráticos.

2.8.5 Ensayo de veleta de bolsillo (Torvane)

La veleta de bolsillo es un equipo utilizado para la determinación rápida de la resistencia al cortante de suelos cohesivos, tanto en el campo como en las muestras de tubo Shelby. La veleta de bolsillo consiste en una serie de cuchillas que se entierran ligeramente en el suelo y sobre las cuales se aplica un torque, el cual mide la resistencia al cortante del material. El ensayo da una determinación cruda de la resistencia y para su utilización debe correlacionarse con otros ensayos. La norma que rige este ensayo es la ASTM D 2573-08.

2.8.6 Ensayo de corte en el sondeo

Este ensayo puede ser realizado en el sondeo utilizando un equipo expandible que se incrusta ligeramente en la superficie y al cual se le coloca una carga de presión determinada, después el suelo es ensayado al cortante tirando hacia arriba el aparato, a través del hueco.

Este tipo de ensayo es bastante útil porque permite la evaluación de la cohesión c , y el ángulo de fricción Φ a diferentes profundidades. Su utilización es particularmente importante en áreas de deslizamientos activos en donde es muy difícil obtener muestras para ensayo de laboratorio.

2.8.7 Corte directo de campo

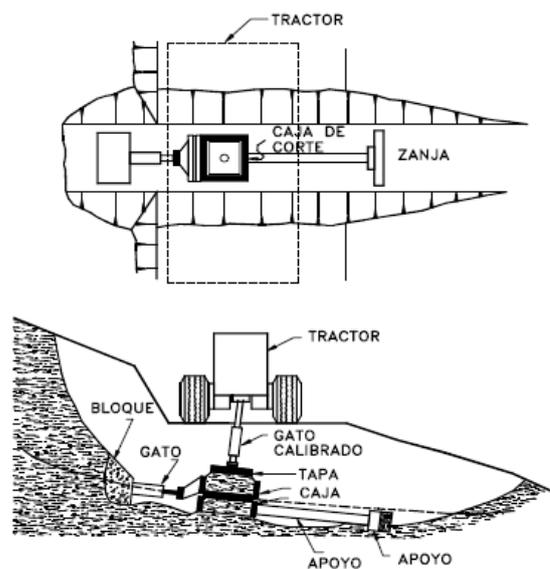
Se ejecuta dentro de una excavación al nivel del estrato débil y se recomienda se haga sobre el plano de falla real. Todo el suelo es excavado, a excepción del que será ensayado, ya que se deja como bloque aislado que puede moverse al ejercer una fuerza de corte. El tamaño del bloque depende del equipo y la resistencia del suelo. Se coloca una fuerza normal perpendicular al plano de rotura y luego se hace fallar al corte para determinar el valor de la resistencia del material (Figura 14).

Se coloca una caja doble alrededor del bloque. Si hay un plano definido de debilidad, los lados de la caja deben ser perpendiculares a ese plano y el plano de falla debe coincidir con el contacto entre las dos cajas.

No se cuenta con un sistema para incorporar los efectos de la presión de poros pero la experiencia con estos ensayos indica que se

han obtenido muy buenos resultados, especialmente si se realizan los ensayos en época de invierno.

Figura 14. Ensayo de corte directo *in situ*.



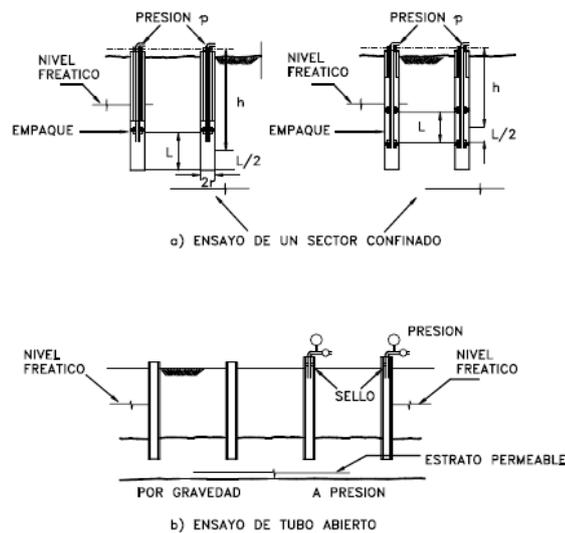
2.8.8 Ensayo de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad de laboratorio (ASTM D 5084-97) no siempre representan las situaciones en el campo y la ejecución de ensayos en el sitio permite obtener la influencia de las discontinuidades y la meteorización del material estudiado.

El coeficiente de permeabilidad (k) puede calcularse del resultado de ensayos de cabeza constante o variable dentro de la excavación de un sondeo. El procedimiento incluye la perforación y limpieza de una columna de suelo de diámetro $2r$ hasta una profundidad h .

La colocación de una cabeza constante de agua y la medición del volumen de percolación, por unidad de tiempo manteniendo una cabeza y flujo estables (Figura 15).

Figura 15. Ensayo de permeabilidad de campo (U.S. Bureau of Reclamation)



2.9 Ensayos de laboratorio

Es necesario realizar ensayos que permitan obtener las propiedades de los suelos para los análisis, de tal forma que sean lo más representativos de las situaciones reales en el campo. Los ensayos comúnmente utilizados para análisis de laderas y taludes son los siguientes:

- a. Humedad o contenido de agua
- b. Límites de Atterberg o plasticidad
- c. Gravedad específica

- d. Distribución granulométrica
- e. Compactación
- f. Permeabilidad
- g. Consolidación
- h. Resistencia al cortante

2.10 Instrumentación

Los instrumentos de campo son de gran utilidad ya que permiten obtener información del comportamiento del talud a lo largo de períodos de tiempo y el poder medir ciertos parámetros geotécnicos.

El primer paso en la planeación de un programa de instrumentación es determinar:

- a. Qué tipos de medición se requieren.
- b. Seleccionar el tipo específico de instrumento que mejor se adapta a las necesidades del talud estudiado.
- c. Planear la localización, número y profundidad de la instrumentación.
- d. Escoger la metodología de lectura de las mediciones.
- e. Decisiones sobre el manejo y presentación de los datos obtenidos.

En este punto, ya se requiere haber estudiado por completo el talud, sus causas de deslizamiento, límites probables del movimiento en cuanto a profundidad y extensión en planta.

Adicionalmente, se requiere conocer la geología, sistema de lluvias, etc. Esto equivale a tener avanzado el estudio del deslizamiento en un 70% como

mínimo. Previamente a la instalación de instrumentos, se deben haber planteado los probables mecanismos de falla y lo que se pretende es corroborar la validez o no de las teorías propuestas y la cuantificación de ciertos parámetros y procesos.

Las situaciones típicas en las cuales se requiere instrumentación son las siguientes:

- a. Determinación de la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- b. Determinación de los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- c. Determinación de la velocidad de deslizamiento y el establecimiento de mecanismos de alarma.
- d. Monitoreo de la actividad de cortes naturales e identificación de los efectos de una determinada construcción.
- e. Monitoreo de los niveles de agua subterránea o presiones de poro y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- f. Colocación de medidores y comunicación a un sistema de alarma.
- g. Monitoreo y evaluación de la efectividad de diferentes sistemas de estabilización o control.

Los instrumentos más empleados son los siguientes:

2.10.1 Equipos convencionales de topografía

Se pueden utilizar equipos ópticos o electrónicos para determinar los movimientos laterales y verticales de los deslizamientos, para ello se colocan BMs en sitios estables y una serie de puntos de medición en la zona deslizada. Se puede realizar mediciones diarias utilizando tubos que se insertan dentro del deslizamiento, en esta forma se pueden medir las deformaciones relativas, movimientos de grietas, etc.

2.10.2 GPS diferencial

El DGPS se está utilizando últimamente con frecuencia para monitorear los movimientos superficiales de deslizamientos. Una estación base en un sitio conocido se utiliza para hacer las correcciones y refinamientos de una o varias estaciones móviles. Todas las estaciones utilizan el mismo sistema satelital. El DGPS relaciona observaciones a estaciones móviles desconocidas con observaciones simultáneas en la estación base conocida. A medida que las señales son monitoreadas, los errores pueden sugerir que la estación base se está moviendo, pero lo que realmente está ocurriendo son movimientos en las estaciones móviles. Todas las mediciones se relacionan a la estación base. Mientras la posición sea definida en forma relativamente precisa,

los otros movimientos internos serán consistentes. Un valor asumido de latitud y longitud puede ser utilizado sin afectar la calidad de las mediciones internas. En condiciones favorables se consigue una precisión mejor que un centímetro. Sin embargo, la precisión de DGPS puede deteriorarse considerablemente donde la superficie del terreno está cubierta de árboles o en épocas de malas condiciones de clima.

3. ESTABILIDAD DE TALUDES

El concepto de estabilidad se refiere a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Como primer punto se deben definir los criterios de estabilidad de taludes, pudiendo ser uno de ellos en algún momento el decidir cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; teniendo como objetivo que el talud se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el punto principal y la razón de estudio.

Los problemas que se relacionan con la estabilidad de laderas naturales se diferencian radicalmente de los que se presentan en taludes construidos por el ingeniero. Dentro de éstos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes de laderas y los de los terraplenes. Las diferencias más significativas son, la naturaleza de los materiales involucrados, además de un conjunto de circunstancias que dependen de la formación del talud y su historia geológica, las condiciones climáticas que intervinieron en lo largo de su formación y la influencia que la actividad humana haya ejercido en el pasado o en la actualidad.

Esta historia y génesis de formación de laderas y taludes, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas, o en general, ambientales, definen aspectos de suma importancia como la configuración de los suelos y las rocas, o el flujo de las aguas subterráneas a través de los suelos que forman la ladera o el talud, el cual influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad.

Una combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y produce que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados primordialmente por factores geológicos y geométricos.

Como factores condicionantes para un talud tenemos los geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos, siendo intrínsecos a los materiales naturales. En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad.

El modelo que se escoja debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad, tales como la geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no se puede cuantificar de manera exacta y precisa todos los factores que afectan la estabilidad de un talud para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, calcular el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

3.1 Equilibrio límite y factor de seguridad

Los métodos de cálculo, para definir la estabilidad, establecen un mecanismo cinemático de falla, extraído naturalmente de la experiencia, con base en el cual se analizan las fuerzas que originan el movimiento, tales como la fuerza de gravedad, filtración, presión de agua, etc., las cuales se han de comparar por algún procedimiento con las fuerzas que son capaces de desarrollarse y que tienden a que el mecanismo de falla no se produzca como resistencia del terreno, raíces y otras fuerzas resistentes. Es decir que la estabilidad se entiende como la seguridad de una masa de tierra contra la falla o el movimiento.

Los análisis de estabilidad de taludes se basan en el concepto de equilibrio límite, el cual supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real.

Para aplicar el concepto de equilibrio límite es imprescindible tener una información detallada sobre el suelo que se está estudiando, pero no es necesario conocer el estado de tensiones y deformaciones en el interior del talud. En general se puede decir que en todos los análisis se considera la falla

de un talud como la plastificación de una cierta superficie, la superficie de falla, la cual hace de frontera de contacto entre la masa que desplaza y la masa que queda en el talud. A esta superficie límite se le asigna algún tipo de función conocida, ya sea un plano, una parábola o un círculo. Es necesario establecer adecuadamente qué tipo de rotura genérica tendrá el talud, y a partir de eso comenzar el análisis de plastificación. Normalmente se asume una superficie cilíndrica, con lo cual la proyección sobre la sección es un desplazamiento de tipo circular. Este tipo de desplazamiento se conoce como círculo crítico.

Después, se compara la resistencia que puede proveer el suelo con la que efectivamente está resistiendo, y, dividiendo, se puede obtener un factor de seguridad, que sería un indicador de cuánto nos acercamos al borde de falla. Si uno está diseñando un talud, este factor puede fijarlo, mientras que si se está evaluando un talud existente, el mismo será dado por el talud en sí. Se puede decir que este factor de seguridad es un factor de diseño en el primero de los casos, mientras que en el segundo es un factor de evaluación de estado, el cual debería compararse a los factores de diseño para casos similares.

Los métodos de equilibrio límite que más se utilizan, analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y comparan las fuerzas tendientes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Existen tres aspectos fundamentales en los cuales se basan:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb

- Definición del factor de seguridad

Los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, por lo que para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partidas diferentes, según los métodos. Además, se asumen las siguientes condiciones:

- La superficie de rotura debe ser postulada con una geometría tal que permita que ocurra el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de las fuerzas actuando en la superficie de rotura podrá ser computada utilizando datos conocidos (peso específico del material, presión de agua, etc.).
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Los métodos de rebanadas más comunes son el de Bishop modificado y el de Janbú, válidos para el análisis de roturas de curvas el primero y de roturas curvas, planas y poligonales el segundo. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de ellos posee un cierto grado de precisión.

El Factor de Seguridad es empleado para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. En el año 1927, Fellenius presentó el factor de

seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

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

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

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

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico. La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de equilibrio límite donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie.

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una

vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$F.S. = \frac{\Sigma \text{Resistencias al corte}}{\Sigma \text{Esfuerzos al cortante}}$$

3.2 Métodos de análisis

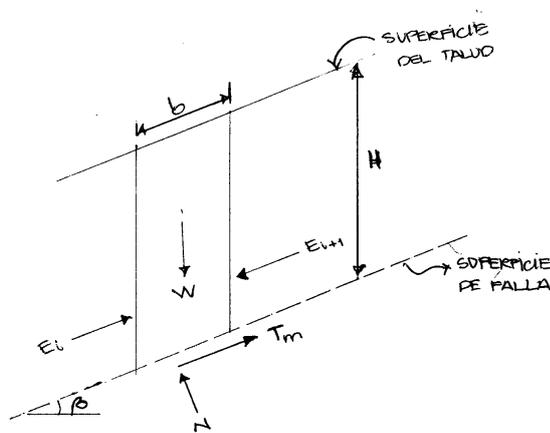
A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad de un talud.

3.2.1 Método del talud infinito

La falla de taludes infinitos corresponde a un deslizamiento por traslación de una masa de suelo sobre un plano paralelo a la superficie del talud y de poca profundidad. Generalmente, este tipo de fallas ocurre en suelos de baja o nula cohesión. Sin embargo, pueden originarse en suelos cohesivos cuando se presentan discontinuidades paralelas al talud. Este tipo de análisis, se basa en la hipótesis de que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud puede considerarse infinita con respecto al espesor deslizado, asumiendo que los parámetros de resistencia al corte son constantes a lo largo de la superficie de deslizamientos.

Es un sistema muy rápido y sencillo para determinar el factor de seguridad de un talud, suponiendo un talud largo con una capa delgada de suelo, en el cual cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud, el análisis se hace independientemente de la altura, por lo que se puede analizar el equilibrio de cualquier elemento (Figura 16).

Figura 16. Diagrama de análisis método del talud infinito



Donde:

W = Peso del elemento

N = Fuerza total, normal a la base del elemento

T_m = Fuerza de corte resistente para mantener el equilibrio

E = Empuje lateral en la cara vertical del elemento

γ = Peso específico total del material

U = Presión de poros

Suposiciones:

- Suelo isotrópico y homogéneo
- Talud infinitamente largo
- Superficie de falla paralela al talud

Siguiendo el criterio que la resistencia al corte del suelo sigue los principios de Mohr Coulomb, tenemos:

$$S = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

El peso del elemento es:

$$W = \gamma H b \cos \beta$$

Sumatoria de fuerzas en sentido perpendicular al talud:

$$N = W \cos \beta$$

Sumatoria de fuerzas en sentido paralelo al talud:

$$T_m = W \sin \beta$$

El esfuerzo normal es:

$$\sigma_n = \frac{N}{b} = \gamma H \cos^2 \beta$$

El esfuerzo de corte es:

$$\tau_m = \frac{T_m}{b} = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

El factor de seguridad del talud es:

$$F.S = \frac{c' + \gamma H \cos^2 \beta \tan \varphi' - u_b \tan \varphi'}{\gamma H \cos \beta \sin \beta}$$

Si no existe cohesión y flujo de agua, el coeficiente de seguridad viene dado por:

$$F.S = \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}$$

Si existe cohesión en el terreno, sin presión o flujo de agua, el factor de seguridad es:

$$F.S = \frac{c' + \gamma H \cos^2 \beta \tan \varphi'}{\gamma H \cos \beta \sin \beta}$$

Para este caso hay una profundidad crítica H_{crit} a la cual ocurrirá la falla, siendo:

$$H_{crit} = \frac{c' \sec^2 \beta}{\gamma [\tan \beta - \tan \varphi']}$$

El ángulo para el factor de seguridad igual a 1.0 se le denomina ángulo de reposo.

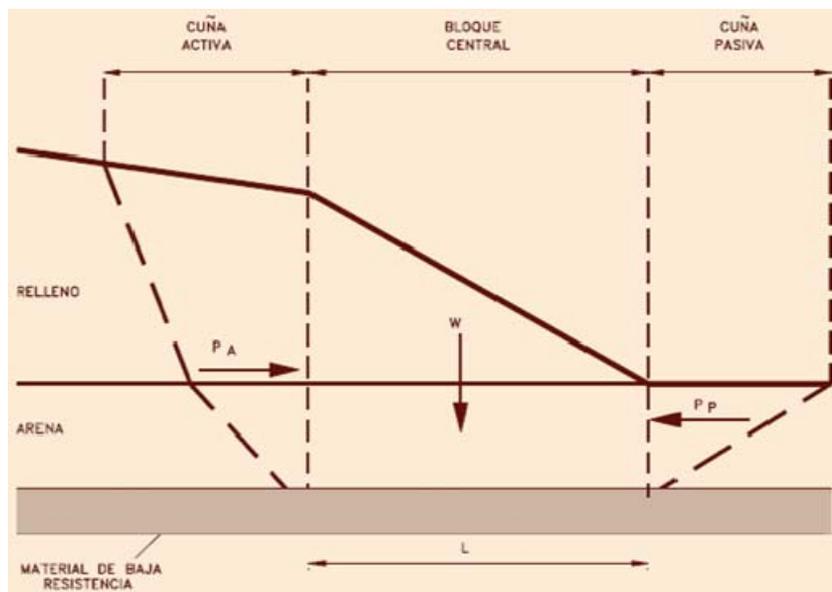
3.2.2 Método del bloque deslizante

El análisis de bloque o cuñas puede utilizarse cuando existe a una determinada profundidad, una superficie de debilidad relativamente recta y delgada. Para este tipo de análisis la masa deslizante se divide en varios bloques mediante líneas verticales, para los que establece el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales, como se muestra en la Figura 17. El coeficiente de seguridad es la relación entre la resistencia tangencial disponible y la requerida para el equilibrio.

Se deben tomar algunos factores en cuenta para la aplicación del método, tales como:

- Suponer una superficie de rotura
- Dividir la masa deslizante en dos o más cuñas
- Calcular el peso de cada cuña

Figura 17. Esquema del método del bloque deslizante o de cuñas



En el caso de tres bloques, la cuña superior se le llama cuña activa y las otras dos, cuña central y pasiva, respectivamente. El factor de seguridad puede calcularse sumando las fuerzas horizontales así:

$$F.S = \frac{P_p + c'_m L + (W - u) \tan \theta_m}{P_a}$$

Donde:

P_p = Fuerza pasiva producida por la cuña inferior

P_a = Fuerza activa producida por la cuña superior

c'_m = Cohesión efectiva del suelo blando en la base del bloque central.

L = Longitud del fondo del bloque central.

W = Peso total del bloque central.

u = Fuerza total de poros en el fondo del bloque central.

θ_m = Fricción del suelo en el fondo del bloque

Si se utiliza las teorías de presión de tierras de Rankine o de Coulomb, se puede obtener los valores de las presiones activas y pasivas, teniendo en cuenta el valor de la cohesión movilizada.

3.2.3. Método ordinario o de Fellenius

El método de Fellenius fue el primer método de dovelas en ser ampliamente aceptado. Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad. Este método supone que las fuerzas de interacción entre rebanadas no influyen de manera significativa en la sección de cálculo ya que son de pequeña magnitud o bien se anulan casi totalmente entre ellas a fin de convertir el problema en estáticamente determinado.

La condición de equilibrio de cada rebanada vendrá dada por la superioridad de las fuerzas estabilizadoras que están compuestas por las fuerzas de cohesión y rozamiento interno del terreno sobre las desestabilizadoras que se identifican con la componente tangencial de las cargas sobre la superficie de rotura en la superficie del terreno.

Es el más simple de todos los métodos de dovelas y a la vez el más conservador, proporciona el factor de seguridad (F.S) más bajo.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son (Figura 18):

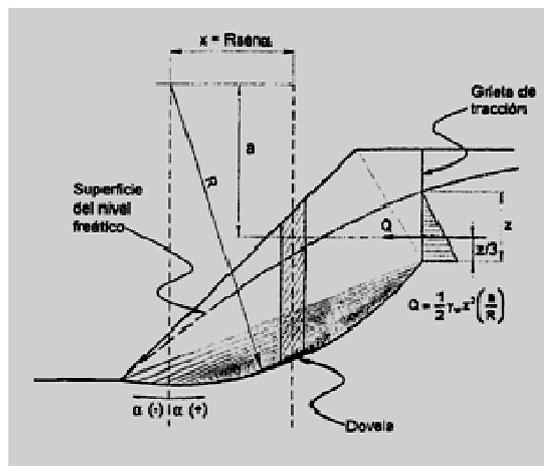
- a. El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- b. Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- c. Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados.

La evaluación del grado de estabilidad de cada rebanada se realiza aplicando el concepto de coeficiente de seguridad al deslizamiento, definido como el cociente entre las fuerzas a favor y en contra del deslizamiento.

Un factor que puede afectar negativamente a la estabilidad de un talud es la presión intersticial (u) producida por la presencia de agua infiltrada en el terreno. La influencia se hace patente en la disminución de las fuerzas estabilizadoras.

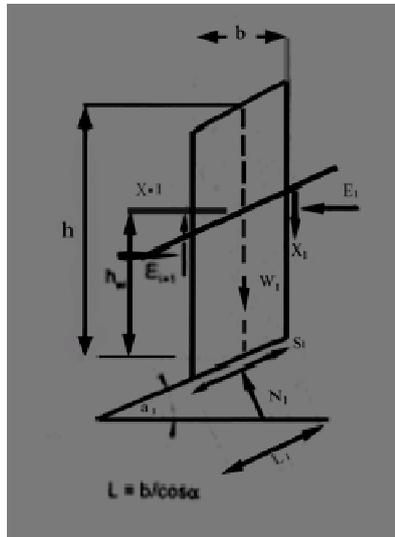
Es normal adoptar valores mínimos del Factor de Seguridad entre 1.25 y 1.80, siendo 1.50 el valor más habitual. De este modo, cualquier talud cuyo círculo crítico presente un valor inferior del Factor de Seguridad al mínimo exigido será considerado inestable.

Figura 18. Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.



El diagrama de cuerpo libre de la dovela se ilustra en la figura 19.

Figura 19. Fuerzas involucradas en la dovela



El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

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

α = Angulo 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 = $\gamma_w h_w$

b = Ancho de la tajada

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

Los momentos estabilizadores son generados por la resistencia al cizallamiento en la superficie de rotura.

Los momentos desestabilizadores son generados por el peso del terreno incluyendo el peso del agua.

3.2.4. Método de Bishop

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

Aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop, las diferencias de los factores de seguridad calculados, no son grandes. La principal restricción del método de Bishop simplificado, es que solamente considera las superficies circulares.

Bishop desarrolló en 1955 un método de rebanadas o dovelas, teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las mismas (Figura 20), asumiendo que las fuerzas entre dovelas son horizontales; es decir, que

no tiene en cuenta las fuerzas de cortante. El método es aplicable sólo a superficies circulares, con las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de rotura circular.
- La masa deslizante se divide en n rebanadas o fajas verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.
- De la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas normales a la superficie de rotura y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos.
- La solución es indeterminada, por lo tanto, se requiere un proceso iterativo.

El factor de seguridad, se calcula con la siguiente expresión:

$$F.S = \frac{\sum [cA \cos \alpha + (W - u \cos \alpha) \tan \phi] [1 / M_i(\alpha)]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

$$M_i(\alpha) = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F.S} \right)$$

A = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

C' , Φ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \cdot h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Para el cálculo de $M_i(\alpha)$ se puede utilizar el ábaco de la Figura 21.

Figura 20. Fuerzas que actúan en una rebanada

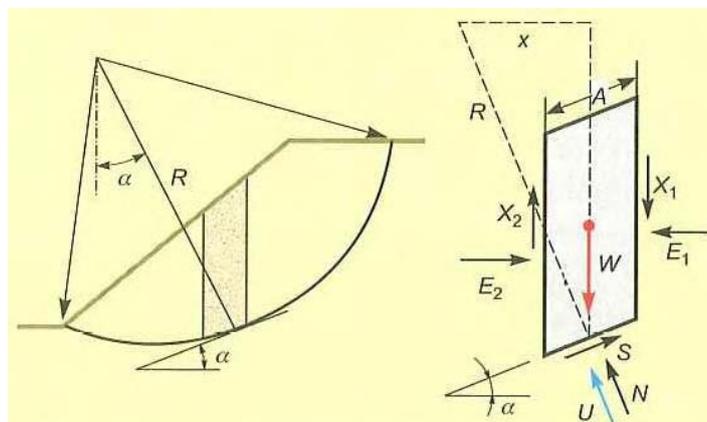
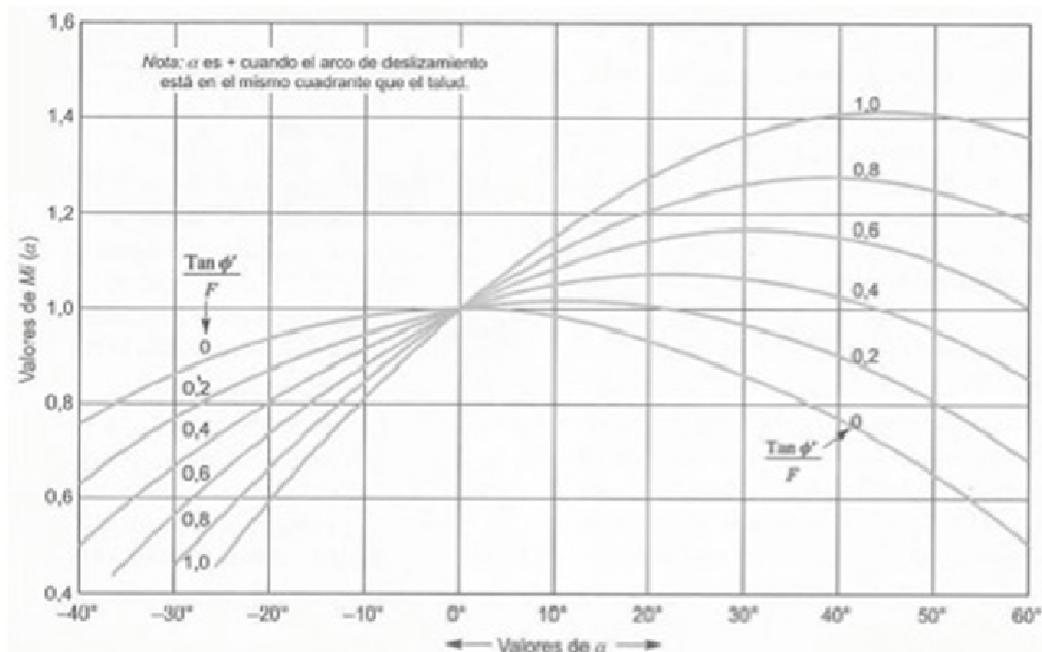


Figura 21. Gráfico para la determinación de $M_i(\alpha)$



Es necesario realizar varias iteraciones para obtener el valor de FS, y la convergencia acostumbra a determinarse rápidamente.

Una vez se obtiene el valor del Factor de Seguridad de la superficie considerada, se supone una segunda superficie circular y se determina un nuevo valor de FS; y así sucesivamente hasta obtener un mínimo. Normalmente, las ecuaciones se programan y se analizan círculos con diferentes radios y centros, hasta que se consigue el que proporciona un valor del Factor de Seguridad mínimo.

El método de Bishop puede ser aplicado también a superficies no circulares adoptando un centro de rotación virtual.

Es un método adecuado para los cálculos a mano y obtener la convergencia de forma rápida.

3.2.5 Método de Janbú

El método de Janbu simplificado se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante.

El diagrama de fuerzas actuante en una rebanada es el mismo que el diagrama para el caso de Bishop (Figura 20). El método es una de las primeras rutinas para el análisis de superficies de rotura no circulares, suponiendo que las fuerzas entre elementos son nulas; por lo tanto la expresión obtenida por la fuerza normal a las rebanadas es la misma que para el método de Bishop. En este caso, el equilibrio de las fuerzas horizontales proporciona un Factor de Seguridad de equilibrio de fuerzas sin considerar las fuerzas entre elementos. Para incluir el efecto de las fuerzas entre elementos al cálculo se puede aplicar un factor de

corrección de tal manera que el Factor de Seguridad del equilibrio de Fuerzas horizontales es el siguiente:

$$F.S = \frac{f_o \sum [cb + (W - ub) \tan \phi] [1 / \cos \alpha M_i(\alpha)]}{\sum W \tan \alpha}$$

Donde:

$$M_i(\alpha) = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F.S} \right)$$

b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

c, ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w * h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

f_o = Factor de corrección empírico

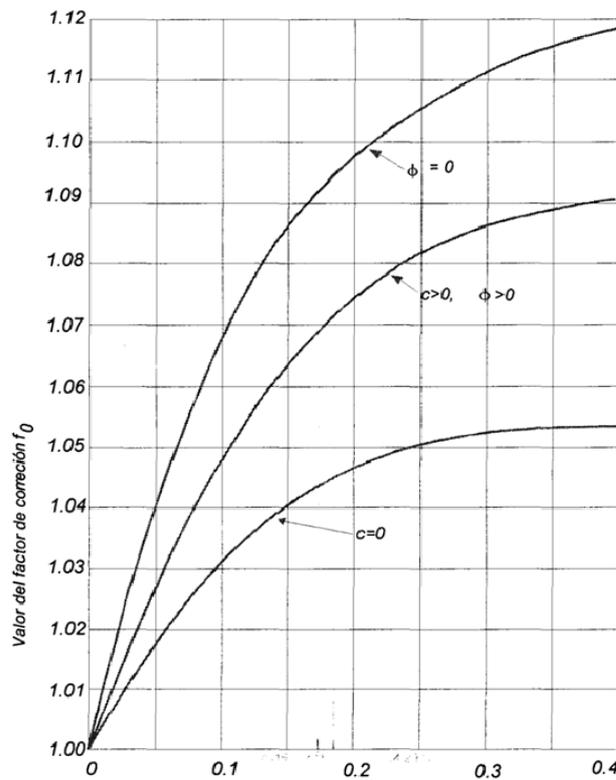
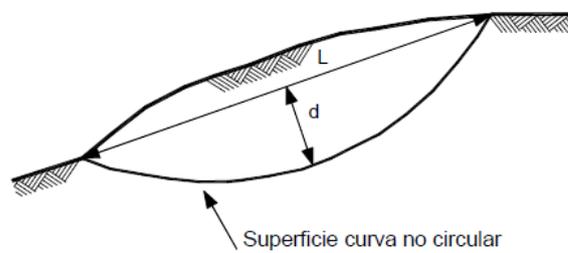
Para la obtención de este factor (f_o), se calibró el análisis con el método de Janbú Riguroso y comprobaron que este factor sólo dependía de la geometría del problema y de las características del suelo, y se puede encontrar en el ábaco de la figura 22.

Como en el caso anterior, el problema está sobredeterminado y el momento global de equilibrio no se satisface. Pero al igual que en el

método de Bishop, el cálculo también puede realizarse a mano, siendo muy práctico.

El método de Janbú solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos.

Figura 22. Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú.



3.3 Métodos numéricos y aplicaciones del computador

El desarrollo de la tecnología en los últimos años, específicamente en la utilización de computadoras y software, ha obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Los programas desarrollados en la actualidad han permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite analizar situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales.

Actualmente se conocen programas comerciales de software para computador, tales como SLOPE/W, STABLE y TALREN, los cuales permiten de una forma rápida y sencilla obtener los factores de seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cualquiera de los métodos de análisis. Algunos métodos emplean los elementos finitos, con muy poco éxito en la estabilidad de taludes específicos, y otros emplean análisis de equilibrio por interacción, siendo este último sistema muy empleado universalmente.

GeoStudio 2007 es un programa de ordenador, desarrollado por *GeoSlope Ltd.*, de modelización para cálculos geotécnicos. Se puede descargar de forma gratuita desde <http://www.rocscience.com>. El paquete *SLOPE/W 2007*, permite realizar análisis de estabilidad mediante equilibrio limite, tanto para rocas como para suelos, utilizando los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y de Hoek&Brown.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

4.1 Síntesis general del proyecto

El proyecto que se desarrolla es de tipo urbanístico, propiedad de la empresa DISEÑO EJECUCIÓN Y URBANIZACIÓN, S.A., el cual se localiza en la carretera CA-1 kilómetro 20, Mixco Guatemala.

El terreno en donde se desarrolla el proyecto anteriormente no tenía ningún uso por lo que se encontraba baldío.

En términos generales el proyecto consiste, el desarrollo urbanístico y la construcción de casas, en un terreno de 5,058 metros cuadrados, en forma de polígono y de topografía mayoritariamente plana, con una leve fracción inclinada (menor al 20%). El proyecto consiste en la construcción de la infraestructura necesaria para poner a disposición 21 lotes de aproximadamente 7.20 metros por 16.50 metros (un área total de 118.8 metros debidamente urbanizados y con una vivienda construida para uso habitacional).

4.1.1 Ubicación geográfica y área de influencia del proyecto

El proyecto se encuentra ubicado en la carretera CA-1 kilómetro 20, Mixco Guatemala. Las coordenadas UTM en las cuales se encuentra ubicado el proyecto son las siguientes: 756749 y 1617347, NAD 27.

Figura 23. Ubicación del proyecto



4.1.2 Ubicación político-administrativa

A continuación se presenta la Tabla 1 en donde se describe la ubicación político-administrativa del proyecto:

Tabla I. Ubicación político administrativa del proyecto

Departamento	Guatemala
Municipio	Mixco
Dirección	Carretera CA-1 kilómetro 20

4.2 Descripción del ambiente físico

Las características geológicas, geotécnicas, climáticas e hidrológicas del área donde se desarrollará el proyecto, son las siguientes:

4.2.1 Geología regional

El sistema tectónico de América Central está definido por la conjunción de las placas de Norteamérica, Caribe y la de Cocos. Las placas de Norteamérica y del Caribe que se desplazan en el sentido horizontal una con respecto a la otra, definen en Guatemala dos terrenos geológicos distintos: al norte las rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, y al sur principalmente rocas ígneas recientes del Terciario y Cuaternario. Estas dos placas están separadas por la ocurrencia de los principales sistemas de fallas transcurrentes con desplazamiento sinistral (con orientación aproximada este-oeste), conocido como el sistema de fallas de Motagua, Chixoy-Polochic, Jocotán y de Jalpatagua, correspondiendo esta región, al cinturón plegado metamórfico.

En Guatemala destacan dos rasgos estructurales, el primero, es un arco Este—Oeste convexo hacia el Sur, que se extiende desde Chiapas hasta el mar Caribe y que está constituido por rocas cristalinas y sedimentarias de edades Paleozoicas y Mesozoicas. El segundo, es un alineamiento de orientación Noroeste—Sureste, que está constituido por rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias, sobresaliendo una fila de conos volcánicos.

Nuestro país se encuentra ubicada dentro un marco geotectónico regional muy complicado y los estudios que hasta la fecha se han realizado permiten definir de forma general cuatro provincias fisiográficas: a) La planicie costera del Pacífico, b) La cadena volcánica, c) Las tierras altas cristalinas y d) La región sedimentaria septentrional.

4.2.2 Panorama geotectónico de Guatemala

Desde el punto de vista tectónico, Guatemala está ubicada dentro de la zona de convergencia de las placas tectónicas de Norteamérica, del Caribe y de Cocos, (figura 24).

Figura 24. Evaluación de la amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala, reinterpretado del modelo de Plafker, 1976



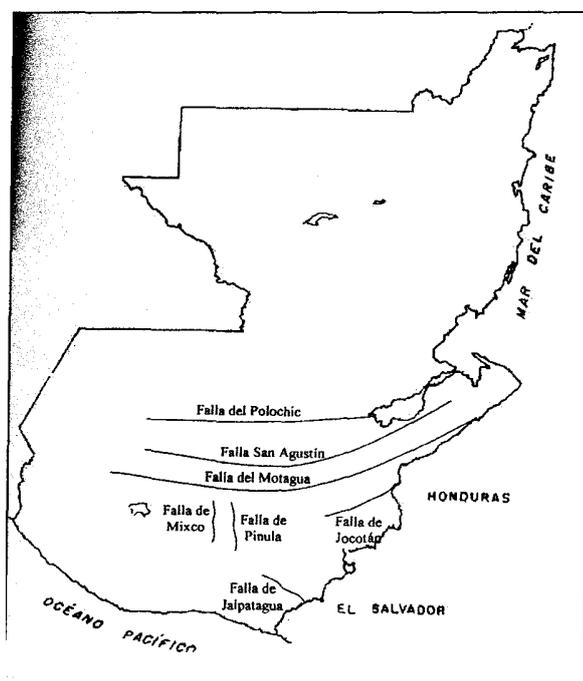
De acuerdo con el conocimiento actual sobre la interacción de las placas, la del Caribe se desplaza hacia el Este de la placa norteamericana en forma transcurrente, lo cual está evidenciado por el gran sistema de fallas de Polochíc-Motagua, el volcanismo y la sismicidad característicos de esta zona. Hacia el Sur, la Placa de Cocos se dispone en forma paralela frente a las costas del Océano Pacífico, entre los 110 a 150 kilómetros de distancia de la línea de costa y define la fosa Mesoamericana, conocida como la zona de subducción, que es el lugar de choque de una placa oceánica (Placa de Cocos) con una continental (porción oeste de la Placa del Caribe), donde la Placa de Cocos se introduce debajo de la Placa del Caribe, alcanzando frente a la costa de Guatemala la mayor profundidad (6,700 m) y una sismicidad intermedia, lo cual ha dado lugar a la fosa Mesoamericana, el volcanismo y la sismicidad, tanto marina como continental; la subducción de la placa de Cocos no ocurre de manera uniforme sino en segmentos, habiéndose estimado que frente a las costas de Guatemala, la subducción ocurre en tres segmentos.

Conjuntamente con el sistema de fallas Motagua-San Agustín, se desarrollaron otros sistemas de gran importancia a nivel regional, tal el caso de la falla de Jocotán y el de la falla de Jalpatagua. (Figura 25).

La interacción de las tres placas tectónicas ha generado dentro de la placa del Caribe, esfuerzos tensionales, los cuales han provocado grandes sistemas de fallas normales de orientación Norte-Sur aproximadamente, estos sistemas de fallas han desarrollado estructuras escalonadas del tipo graben-horst, entre estos sistemas estructurales

están el valle de Guatemala, limitado al Este y Oeste por los sistemas de fallas de Santa Catarina Pinula y Mixco, respectivamente, el valle de San José Pinula y el graben de Ipala. (Figura 25).

Figura 25. Principales fallas geológicas, simplificado del mapa geológico de Guatemala, IGN año 1970



4.2.3 Geología del área de estudio

El valle de la ciudad de Guatemala está localizado en la parte central del cinturón volcánico, constituido por rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias, todas ellas subyacidas por rocas cristalinas intrusivas y

metamórficas, así como por rocas sedimentarias. Adicionalmente, el valle está definido por la estructura tectónica regional y específicamente, a partir de las fallas más prominentes de la región.

4.2.3.1 Geomorfología

El valle de Guatemala es una depresión de forma alargada, constituida por dos cuencas hidrográficas, drenadas hacia el Norte y el Sur. La red de drenaje se puede considerar como joven y dendrítica por su desarrollo, guardando estrecha relación con la orientación de los bloques levantados (montañas) que limitan las cuencas del Este y Oeste, con los rasgos tectónicos y con los contrastes de los materiales del subsuelo.

Estructuralmente la depresión está condicionada por un sistema de fallas normales de orientación NNE a NNO, las cuales forman un conjunto de bloques hundidos y levanta dos de inclinación variable, constituyendo el graben del valle de Guatemala. Hacia el Sur del valle, destaca la depresión vulcanotectónica de Amatitlán que se cruza hacia el Norte con las fallas que limitan el valle en sentido E-O, en la parte Sur de la depresión sobresale el complejo eruptivo del volcán Pacaya.

Dentro del propio valle, la morfología es predominantemente plana con suaves pendientes hacia el Sur y

Norte, sobresaliendo algunas zonas levantadas como el cerro El Naranjo, el cerro del Carmen y la zona 8. En diversos lugares se observaron valles profundos y barrancos con laderas de diferentes pendientes, pero predominando las laderas casi verticales. (Figura 27 y 28).

4.2.3.2 Estratigrafía

Lavas y cenizas volcánicas cuaternarias, con algunas intercalaciones locales relativamente delgadas de sedimentos fluviales, lacustres y paleosuelos, forman una cubierta casi continua sobre las rocas terciarias, cretácicas y paleozoicas en el valle de Guatemala. A continuación, se describen las rocas, desde las más antiguas a las más recientes, (ver figura 26).

Figura 26. Columna geológica generalizada del área de estudio, elaborado en el CESEM

UNIDAD No.	TIPO DE ROCA	COLUMNA GRAFICA	ERA	PERIODO
6	ROCAS VOLCANICAS; POMEZ, ESCORIA, CENIZAS; PALEOSUELOS, ARENAS		CENOZOICO	CUATERNARIO
5	ROCAS VOLCANICAS TOBAS, RIOLITAS, DACITAS, ANDESITAS Y BASALTOS			TERCIARIO
4	ROCAS INTRUSIVAS GRAUWACKAS ARCILLAS		MESOZOICO	CRETACICO SUPERIOR
3	ARCILLAS CALIZAS DOLOMIAS			CRETACICO INFERIOR
	HIATO			JURASICO
2	ROCAS INTRUSIVAS		PALEOZOICO	TRIASICO
1	ROCAS METAMORFICAS			PERMICO
				CARBONIFERO
				DEVONICO

4.2.3.2.1 Rocas metamórficas del Paleozoico

Se encuentran en el Norte del valle de la ciudad y están fuertemente tectonizadas y meteorizadas, su grado de afloramiento es bajo Se observan diferentes tipos de rocas metamórficas, tales como filitas, esquistos, capas de cuarcitas y gneises.

4.2.3.2.2 Rocas intrusivas Paleozoicas

Constituidas por granitos, granodioritas y dioritas, que se encuentran en la parte Norte del valle.

4.2.3.2.3 Rocas carbonáticas del Cretácico Inferior

Estas rocas afloran en los límites Noreste y Noroeste del valle de Guatemala y también en unos cerros bajos al Norte del valle. Al Norte de la ciudad en la Pedrera, afloran calizas y dolomías con una estratificación muy gruesa e irregular.

4.2.3.2.4 Rocas del Cretácico Superior

Están constituidas por rocas intrusivas que van desde granitos a dioritas, además, las rocas argillíticas y grauwackas que yacen sobre las antes mencionadas.

En el borde oriental del lago de Amatitlán, aflora una parte del intrusivo granítico. Se considera que algunas intrusiones se produjeron a principios del período Terciario.

4.2.3.2.5 Rocas volcánicas Terciarias

Estas forman una imponente acumulación de productos volcánicos de composición y formación muy variada los bloques levantados que limitan el valle de la ciudad tanto hacia el Este como el Oeste, presentan los más extensos afloramientos de este conjunto de rocas. Estas rocas han sido fuertemente afectadas por la tectónica distensiva en la región. Gran parte de estas rocas están cubiertas por materiales piroclásticos cuaternarios.

Los principales tipos de rocas que se pueden distinguir son: tobas, ignimbritas, lavas desde básicas a ácidas y lahares. Es de hacer notar que en algunas partes se encuentran intercalados sedimentos lacustres diatomáceos.

4.2.3.2.6 Rocas volcánicas Cuaternarias

Están representadas por una inmensa cantidad de depósitos piroclásticos que forman una vasta y gruesa cubierta, sobre las rocas precuaternarias. Estos materiales están constituidos por una alternancia de depósitos de caída y flujos de piroclásticos, estando separados unos de otros muchas veces por paleosuelos.

Los depósitos de caída presentan una buena graduación y se han adaptado al relieve preexistente manteniendo su espesor casi constante, no así su tamaño de partículas, el cual se hace más pequeño a medida que se aleja del centro de emisión.

Los depósitos de flujo se encuentran en las depresiones y se caracterizan por no presentar ninguna graduación en sus partículas.

En algunos de los fondos de los barrancos se encuentran depósitos aluvionales, consistentes de fragmentos de pómez, andesita y basaltos, formando lentes elongados de espesores hasta de 25 metros.

4.2.3.3 Cuadro tectónico

El valle de Guatemala, es uno de los muchos grabens que se encuentran entre el sistema de fallas del Motagua y la cadena de estrato volcanes cuaternarios.

El graben de Guatemala está delimitado al Oeste por el sistema fallas de Mixco, que representan una zona de 4 a 6

kilómetros de ancho. El espaciamiento de las fallas varía entre 200 y 700 metros. La expresión morfológica del rechazo de esta falla es de 400 a 500 metros, hacia el Sur y al Oeste del lago de Amatitlán, la falla aparece como una sola y no un sistema y con un rechazo de más de 500 metros. Este escarpe está menos afectado por la erosión que la parte más al Norte, lo cual indica actividad tectónica más reciente en el Sur que en la parte Norte de la falla.

El rumbo del sistema de fallas de Mixco es variable, a la altura de Mixco el rumbo es de N20°E, hacia el Norte el rumbo cambia entre N25°E a N30°E. Siguiendo la falla hacia el Sur, ésta cambia su rumbo a N25°W, intersectándose con el complejo volcánico de Pacaya.

El sistema de fallas al Este del Valle de Guatemala, denominado de Santa Catarina Pínula, presenta muchas similitudes con el sistema de fallas de Mixco.

El escarpe es mayor hacia el Sur que en el Norte. Al Sureste de la ciudad el escarpe está formado por unas cinco fallas paralelas de rumbo Norte, con distancias de 0.5 a 1 kilómetros entre ellas. Hacia el Sur estas fallas cambian su rumbo a N35°E intersectándose con el complejo del volcán Pacaya y formando el borde Este del lago de Amatitlán.

Se considera que el hundimiento total acumulado del graben varía entre 500 y 1000 m, pero el hundimiento no ha sido igual en todas partes del valle.

Como se ha mencionado antes, los sistemas de fallas de Mixco y Santa Catarina Pinula, a ambos lados del graben, convergen hacia el volcán Pacaya, intersectándose con el sistema de fallas de Jalpatagua que tiene un rumbo de $N70^\circ$ y que constituye el borde del lago de Amatitlán hacia el Norte. El rechazo de esta falla con hundimiento al Sur es de más de 370 metros.

Es probable que los bloques al Norte del lago de Amatitlán, hayan basculado hacia el Norte. El eje de giro puede ubicarse en el área de Villa Nueva y Villa Canales, con rumbo aproximado $N60^\circ$.

Fallas de rumbo $N40^\circ E$ se pueden observar en el área de Ojo de Agua, al Sur, al Este y al Norte de la capital.

Estas fallas están relacionadas con una componente del mismo rumbo del sistema de fallas de Mixco.

En el horst que bordea el graben de Guatemala en el Este, hay fallas de rumbo aproximado de $N40^\circ E$. Otras indicaciones de fallamiento dentro del graben son el cerro el Naranjo, el cerro del

Teatro Nacional, el cerro del Carmen, el cerro de Ojo de Agua y los bloques al Norte del lago de Amatitlán, los cuales representan zonas elevadas del basamento. El cerro Naranjo está probablemente delimitado al Sur por una falla de rumbo Este-Oeste aproximadamente. (Figuras 27 y 28 y 29).

Figura 27. Evaluación de la amenaza sísmica, ciudad de Guatemala elaborado por el CESEM

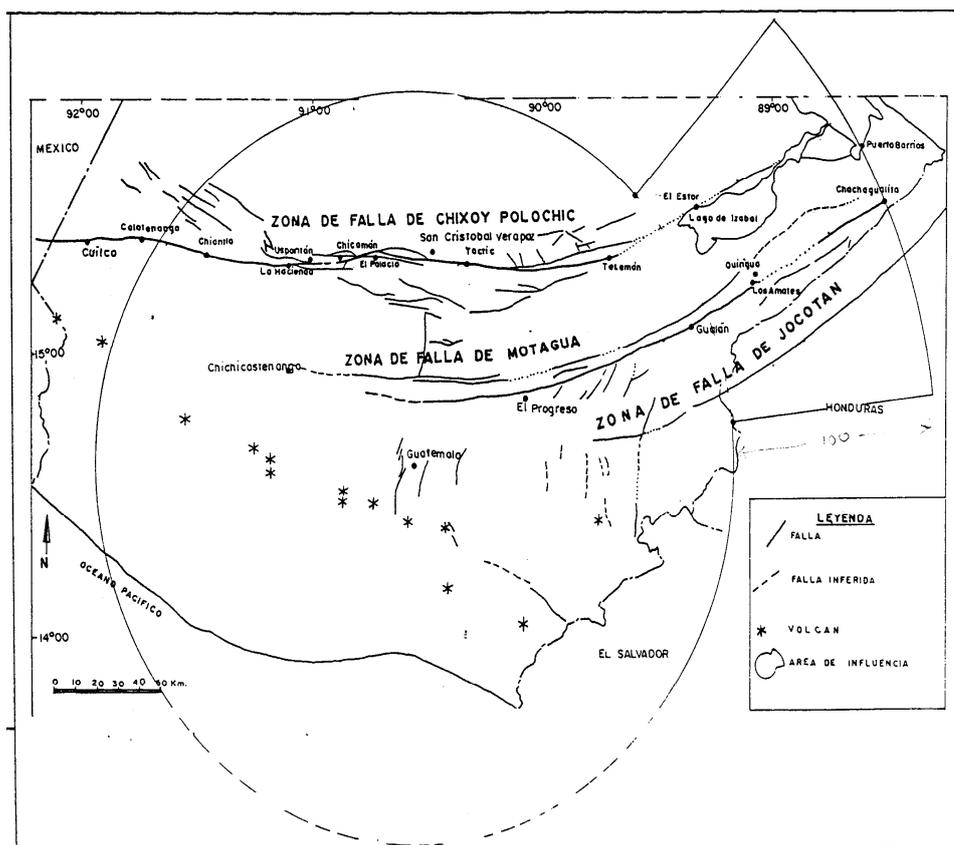


Figura 28. Evaluación de la amenaza sísmica para la ciudad de Guatemala, elaborado por el CESEM

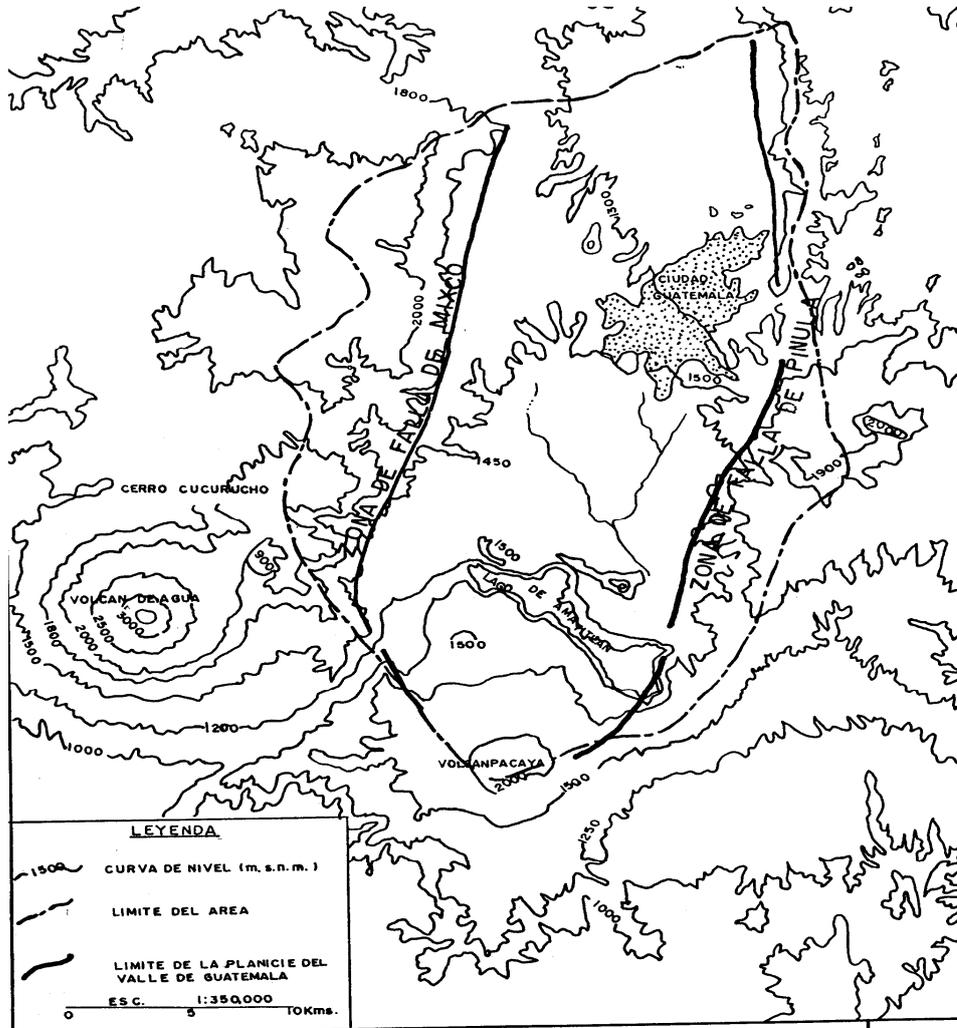
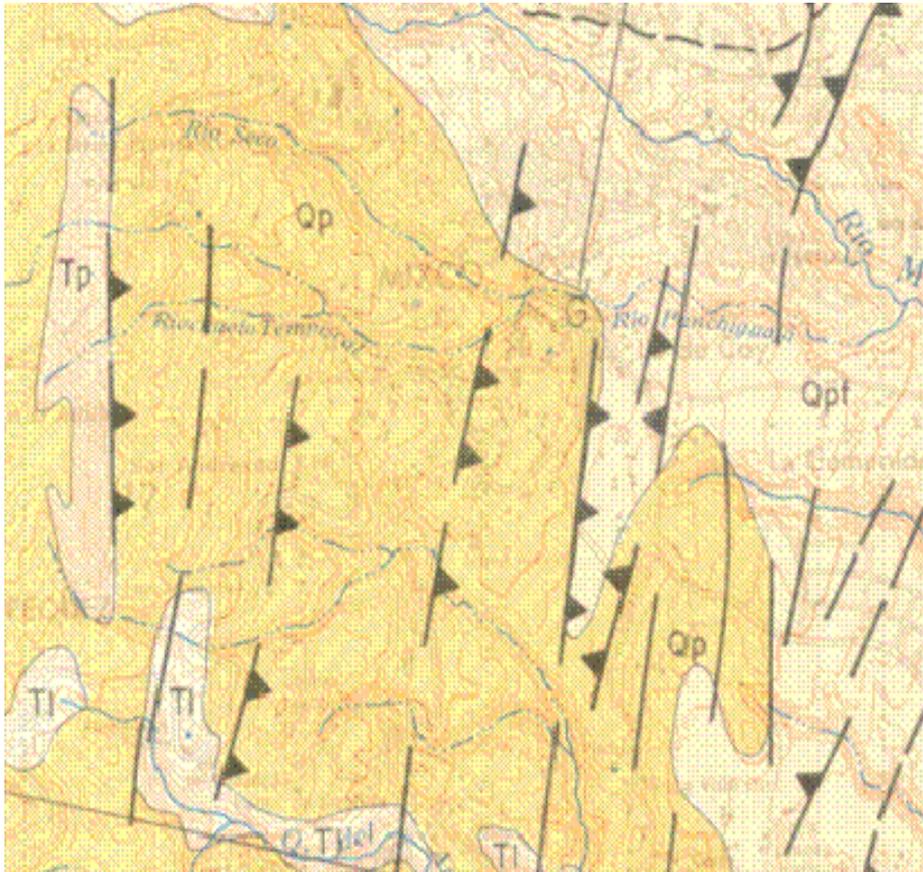
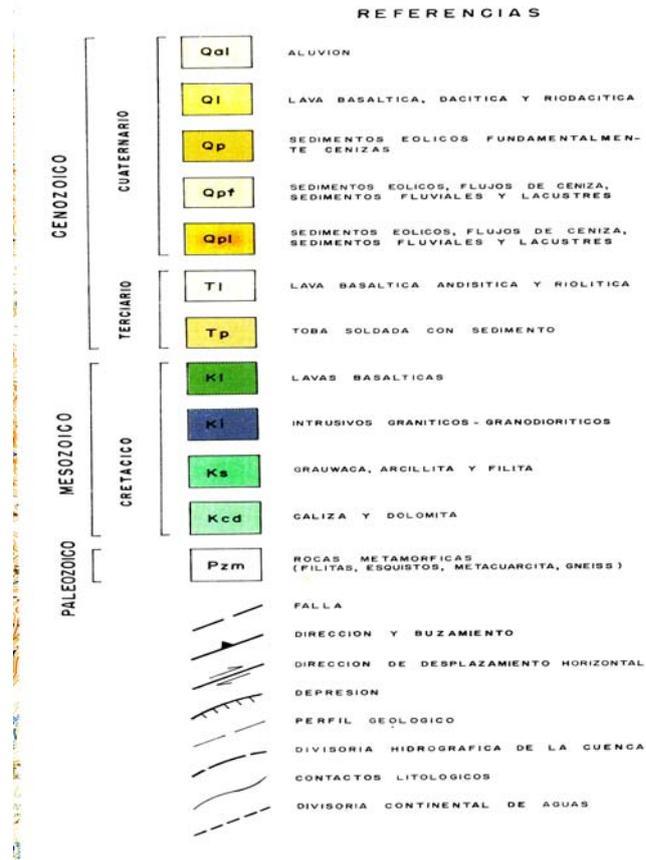


Figura 30. Geología local proyecto, recorte del Mapa de Geología General, Estudio de aguas subterráneas cuenca del valle de la ciudad de Guatemala, MICIVI, INSIVUMEH, IGN



La nomenclatura de la simbología utilizada en el mapa anterior se ilustra en la figura No. 31.

Figura 31. Nomenclatura mapa geológico



4.2.4 Suelos

De acuerdo a la clasificación de suelos según Simmons, estos suelos se clasifican como suelos del tipo Guatemala (Gt), que son suelos profundos bien drenados desarrollados- sobre ceniza volcánica débilmente cementada, en un clima húmedo- seco. Ocupan un relieve casi plano a altitudes medianas en la parte sur central de Guatemala.

Están asociados con los suelos tipo Cauqué, Fraijanes y Morán pero se distinguen de éstos porque los suelos Guatemala se encuentran en planicies y los otros en relieve de ondulado a inclinado y además porque los Guatemala son más profundos que los Cauqué y Fraijanes. Típicamente ocupan un valle o un bolsón intramontañoso que es casi plano pero algunas partes son de unduladas a suavemente onduladas.

Taxonómicamente estos suelos pertenecen al orden de los inceptisoles, identificándose también pequeñas porciones de suelos del orden de los entisoles.

4.2.5 Clima

La ciudad de Guatemala se caracteriza por tener un clima templado agradable, tomándose más frío en los meses de Diciembre, Enero y Febrero. El período de lluvias es de Mayo a Octubre.

Tabla II. Variables climáticas zona de estudio, INSIVUMEH 2008

MES	TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA	TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA	LLUVIA EN mm
Enero	23.5	2.5	1.3
Febrero	24.5	2.5	5.4
Marzo	25	4	4
Abril	26.5	5	9.5
Mayo	27.5	7	108
Junio	25	9	432.8
Julio	25	7	367.9
Agosto	26	8	171.7
Septiembre	26	7.5	282.7
Octubre	23	6	124.5
Noviembre	24.5	2	0
Diciembre	24	3	0
Anual	27.5	2.5	1507.8

4.2.6 Hidrología

4.2.6.1 Aguas superficiales y subterráneas

El proyecto se encuentra ubicado dentro de la cuenca del río Motagua, y dentro de la subcuenca del río Plátanos, y en la microcuenca del río Las Cañas, entre los ríos que se encuentran

cerca del proyecto se puede mencionar el río Méndez, río Canalitos y el río las Vacas, todos estos afluentes al río Motagua.

4.2.7 Amenazas naturales

4.2.7.1 Amenaza sísmica

En Guatemala se identifican cuatro regiones sísmicas importantes, asociadas a la interacción de las placas y a fallas geológicas internas. Merecen especial mención las fallas Motagua, Polochic y Jocotán-Chamelecón, que atraviesan importantes regiones del país, asociadas por la frecuencia y magnitud que alcanza la actividad sísmica. En términos de intervalos de recurrencia, existe la probabilidad de que cada treinta años ocurra un terremoto de magnitud 8.0, pero en períodos más cortos (de uno a quince años) existen probabilidades que se generen sismos desde 5.5 a 7.5 en la escala de Richter.

En su expresión territorial, casi todos los departamentos de Guatemala están expuestos a las amenazas sísmicas, aunque con diferentes niveles de riesgos, siendo las regiones del altiplano central (incluyendo la capital) y la costa sur, las de mayor potencial

sísmico, estimándose una población expuesta de aproximadamente 7.5 millones de personas.

El primer nivel de potencial sísmico se concentra en las regiones central, suroccidental, suroriental y metropolitana. El segundo nivel está en la región nororiental y parcialmente la región noroccidental.

El riesgo es serio. La tabla No 3 que se muestra a continuación, define doce lugares en América Central y América del Sur con una probabilidad de 50 por ciento o mayor de que ocurra un terremoto de magnitud 7+ dentro de los próximos 20 años. La ocurrencia de temblores destructivos en Costa Rica y Ecuador es casi un hecho (tienen más del 90 por ciento de probabilidades).

Tabla III. Actividad sísmica en Latinoamérica, Nishenko, S.P. Circulum-Pacific Seismic Potencial 1989-1999

UBICACIÓN	MAGNITUD (RICHTER)	PROBABILIDAD (PORCENTAJE)
Ometepec, México	7.3	74
Oaxaca Central, México	7.8	(72)a/
Oaxaca Zona Este, México	7.8	70
Oaxaca Zona Oeste, México	7.4	64
Colima, México	7.5	66
Guerrero Central, México	7.8	(52)a/
Sudeste de Guatemala	7.5	79
Guatemala Central	7.9	50
Nicoya, Costa Rica	7.4	93
Papagayo, Costa Rica	7.5	55
Jama, Ecuador	7.7	90
Sur de Valparaíso, Chile	7.5	61

a/ Los valores de probabilidad expresados entre paréntesis reflejan estimativas menos confiables.

4.2.7.2 Movimientos en masa

Para este proyecto no se identifican áreas con riesgos de movimiento de masas, en las zonas donde existe una pendiente pronunciada, hay vegetación.

4.2.7.3 Erosión

Para este proyecto no se identifican áreas con riesgos de movimiento de masas.

4.2.7.4 Inundación

Se estima que no existirá este riesgo, en el área donde se plantea desarrollar el proyecto, pues según los registros y análisis post MITCH, los problemas de esta índole suelen darse alejados de esta área.

5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE BISHOP MODIFICADO, JANBÚ Y FELLENIUS

5.1 Consideraciones

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de equilibrio límite. Este sistema supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius en 1936. Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados. Los métodos de Bishop y Janbú, desarrollados en los años 1955 y 1954 respectivamente, han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price en 1965 y Spencer en 1967, ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión.

Un análisis de equilibrio límite, desarrollado con cualquiera de los tres métodos que se utilizarán en el ejemplo que se planteará al final de este capítulo, permiten obtener un factor de seguridad a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla.

Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

La mayoría de los métodos de límite de equilibrio tienen en común, la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla. Las variaciones principales de los diversos métodos son, el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla.

Las técnicas de equilibrio límite se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación sobre superficies de falla determinadas. Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de éstas. En los últimos años, se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica.

El talud es considerado estable si el factor de seguridad es mayor que uno. La no determinación del factor de seguridad puede ser causa de probables desplazamientos en taludes estables o fallados.

Debido a la complejidad de la naturaleza, ningún método de análisis, ni criterio de solución, puede ser considerado como suficiente. Requiriéndose primeramente, el conocimiento más detallado posible del medio geológico, la geodinámica natural; las actividades y acciones antrópicas del pasado y del presente y el medio en el cual se desarrolla el proyecto.

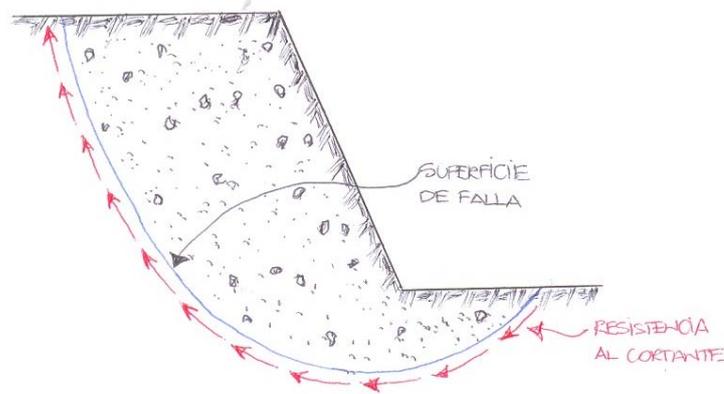
La identificación o estimación de zonas de ruptura potencial, generalmente se basa en análisis de los factores intrínsecos, que describen la estructura, la litología y el comportamiento geotécnico del macizo rocoso (fracturación, rumbo, buzamiento, espaciado, rugosidad de las fracturas, abertura, etc.); de los procesos de evolución, donde actúan mutuamente los procesos físicos y químicos en la estabilidad de los macizos (meteorización, alteración, presencia de agua, temperatura, sismicidad, etc.); y de los factores activantes o procesos físicos que intervienen como el clima, la sismicidad, presión hidráulica en las fisuras que pueden provocar la ruptura repentina de la roca, presencia de vegetación arbórea. Todos estos datos deben ser recolectados en el campo.

5.2 Definiciones

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (Figura 22); sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente. En los métodos de equilibrio límite, el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla.

Generalmente, se asume un gran número de superficies de falla para encontrar la superficie de falla con el valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina “superficie crítica de falla”. Esta superficie crítica de falla es la superficie más probable para que se produzca el deslizamiento; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, los cuales también se requiere tener en cuenta para el análisis.

Figura 32. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante



Probablemente muchas de las dificultades asociadas en la actualidad a los problemas de estabilidad de taludes radican en que se involucra en tal denominación a demasiados temas diferentes, a veces radicalmente distintos, de manera que el estudio directo del problema sin diferenciar en forma clara tales variantes tiende a conducir a cierta confusión. Es indudable que en lo anterior está contenida la afirmación de que los taludes son estructuras muy complejas, que prestan muchos puntos de vista dignos de estudio y a través de los cuales la naturaleza se manifiesta de formas diversas. Esto hará que su estudio sea siempre complicado, pero parece cierto también, que una parte de las dificultades presentes se debe a una falta de correcto deslinde de las diferentes variantes con que el problema de estabilidad se puede presentar y se debe afrontar.

El estudio detallado y análisis de los riesgos geológicos es una herramienta fundamental para prevenir posibles catástrofes naturales, máxime cuando existen proyectos de obras públicas (carreteras, pasos a desnivel,

puentes, etc.), que pueden ser afectados por determinados fenómenos que influyan en su estabilidad y resistencia. Entre estos riesgos se incluyen como de primer orden el riesgo de inundaciones y la sismicidad.

La metodología histórica y geológica, junto con el análisis de estabilidad por métodos matemáticos basados en modelos geotécnicos de las masas con susceptibilidad de sufrir deslizamientos son las herramientas básicas de todo estudio de riesgos asociados a movimientos de ladera.

Una vez estudiado el talud, definidos los niveles de amenaza y riesgo, el mecanismo de falla y analizados los factores de equilibrio, se puede pasar al objetivo final que es el diseño del sistema de prevención, control o estabilización.

Los deslizamientos en taludes ocurren de muchas maneras y existe cierto grado de incertidumbre en su predicción. Sin embargo, conocer los deslizamientos que han ocurrido en el área de interés, constituye un buen punto para la detención y evaluación de potenciales deslizamientos futuros.

Algunos de los procesos constructivos que comúnmente causan más problemas, en la estabilidad de los taludes o laderas son los siguientes:

1. Modificación de las condiciones naturales del flujo interno del agua al colocar rellenos o hacer excavaciones.

2. Sobrecarga de estratos débiles por relleno, a veces desperdicios.
3. Sobrecarga de terrenos con planos de estratificación desfavorable por relleno.
4. Remoción por corte, de algún estrato delgado de material permeable que funciona como un manto natural drenante de estratos de arcillas suaves.
5. Aumento de presiones de filtración u orientación desfavorable de fuerzas de filtración al producir cambios en la dirección del flujo interno del agua por haber practicado corte o construido relleno.
6. Remoción de capas superficiales de suelo por corte lo que puede causar el deslizamiento de capas del mismo estrato ladera arriba sobre mantos subyacentes del suelo más duro o roca.
7. Incremento de carga hidrostática o niveles piezométricos bajo la superficie de un corte al cubrir la capa del mismo con una capa impermeable.

En general las causas de los deslizamientos pueden ser externas o internas. Las externas producen aumentos en los esfuerzos cortantes actuantes sin modificar la resistencia al esfuerzo cortante del material. El aumento en la altura del talud, hacerlo más escarpado, la colocación de cualquier tipo de sobrecarga en la corona del talud o la ocurrencia de sismos son otras causas externas que influyen en los deslizamientos.

Las internas son las que ocurren sin cambio en las condiciones exteriores del talud. Deben ligarse siempre a una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo constitutivo. El aumento de presión de poro o la disipación de la cohesión son causa de esta clase.

5.3 Coeficiente de seguridad

Se define el factor de seguridad (F.S), como el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones reales que presenta el talud, y las condiciones que llevan a su rotura. El factor de seguridad es el coeficiente mínimo de todos los coeficientes de seguridad asociados a todas las superficies de deslizamiento posibles.

El uso de un factor de seguridad en los análisis de estabilidad proporciona dos previsiones importantes; considera el margen de error entre parámetros empleados en el diseño y aquellos que pueden existir realmente en el campo, y limita las deformaciones. Si la resistencia final es empleada en el diseño, un factor de seguridad mayor que la unidad asume que mantendrá las deformaciones dentro de límites tolerables.

Como regla general, es preferible introducir en el análisis de estabilidad las combinaciones de condiciones más adversas que son realistas para los factores relacionados con la estabilidad, de modo que su significado pueda ser evaluado.

Se debería considerar un análisis de estabilidad para cualquier zona débil dentro del talud, particularmente si es orientado a lo largo de la dirección de la falla potencial.

El factor de seguridad mínimo contra la falla por capacidad de carga de un terraplén, talud o muro sobre un suelo blando, a corto plazo, debe ser mayor que uno ($F.S \geq 1$). Para estratos potentes, el colocarle una capa de refuerzo no aumentará el factor de seguridad más allá del calculado para un talud sin refuerzo.

Para el caso en donde se encuentren factores de seguridad menores que uno, será necesario llevar un procedimiento de construcción muy cuidadoso, ejecutarlo por pasos, con bermas laterales, particularmente en el caso de turbas o rellenos suaves.

Otras estrategias podrían ser la pre consolidación, con o sin drenes verticales, la remoción de esos suelos blandos y su sustitución o bien la compactación in situ, pudieran ser adecuadas, sin embargo, los beneficios del uso de los refuerzos podría venir en el permitir la circulación sin problemas de la maquinaria de construcción, para levantar o construir el terraplén, empujando las capas de suelo sobre la capa o capas de refuerzo. La pérdida de material, por incrustación, al comenzar un relleno sobre suelos blandos es muy alta, y el refuerzo permite dichos ahorros, además de permitir el iniciar adecuadamente el relleno.

También deberá notarse que la compresión y la consolidación de los suelos blandos, una vez que el terraplén haya sido construido, aumentará el factor de seguridad contra la falla por capacidad de carga al paso del tiempo, por lo cual, la parte más crítica en la construcción de un terraplén sobre suelos blandos, será el final de la fase de construcción.

5.4 Aplicación de los métodos de Fellenius, Bishop Modificado y Janbú en el proyecto estudiado

El siguiente ejemplo tiene como finalidad presentar una guía básica para la utilización de los métodos de Fellenius, Bishop Modificado y Janbú. En el capítulo 4 se encuentra la descripción técnica del proyecto, donde se detalla la información geológica, geotécnica, climática e hidrológica del área.

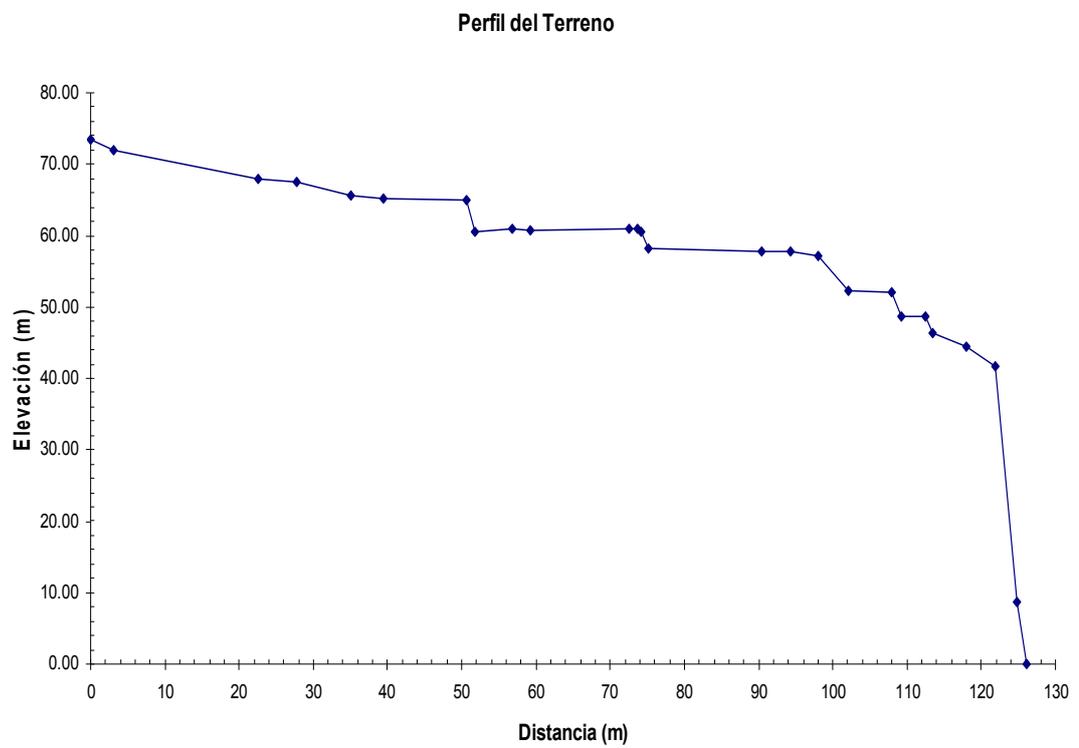
Los ensayos que se realizaron a las 2 muestras inalteradas extraídas a 4.50 y 8.00 metros de profundidad fueron: Corte directo, Límites de Atterberg, Granulometría y Perfil Estratigráfico. Los ensayos se realizaron en el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En los anexos I y II se muestran los resultados de laboratorio obtenidos derivado del análisis de cada muestra, las fotografías del lugar y los ensayos. El anexo III contiene el perfil topográfico original del eje 3 del terreno estudiado.

Perfil del Terreno

El perfil del terreno es el siguiente:

Figura 33. Perfil del terreno



Las coordenadas del terreno son las siguientes:

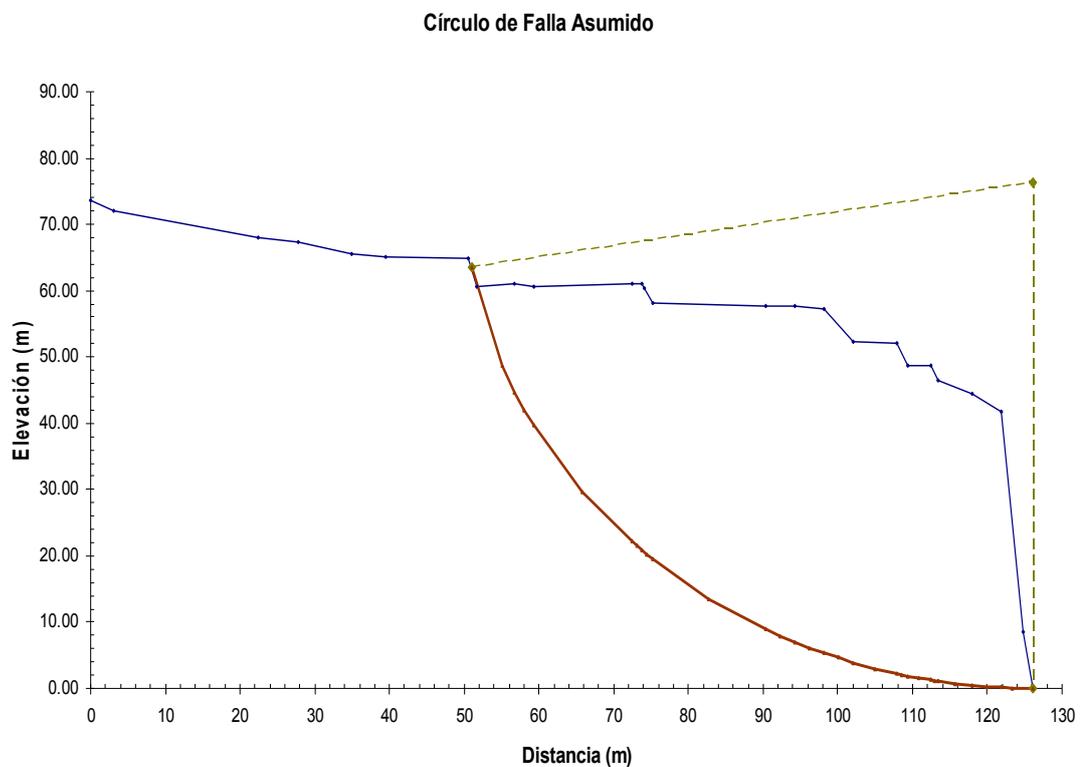
Tabla IV. Coordenadas del perfil del terreno

PUNTO	X	Y
1	0.00	73.52
2	3.10	72.05
3	22.49	67.98
4	27.78	67.44
5	34.98	65.60
6	39.46	65.13
7	50.62	64.97
8	51.70	60.63
9	56.77	61.05
10	59.27	60.68
11	72.48	60.95
12	73.70	61.02
13	74.18	60.48
14	75.20	58.23
15	90.32	57.70
16	94.25	57.69
17	98.07	57.13
18	102.06	52.22
19	107.90	51.99
20	109.28	48.61
21	112.51	48.76
22	113.44	46.45
23	117.97	44.43
24	121.88	41.71
25	124.87	8.63
26	126.16	0.00

Los datos del perfil del terreno son la base para realizar cualquier cálculo, ya que nos ayuda a definir el número y ancho de las dovelas para los tres métodos. La metodología inicial consiste en asumir una superficie de falla donde se crea que puede existir un posible deslizamiento, se calculan las coordenadas del círculo de falla, determinando su radio y origen. La base, altura, ubicación del centroide y el ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada, rebanada o dovela es igual tanto para el método de Fellenius, Bishop Modificado o Janbú.

Lo primero que se debe hacer es asumir una superficie de falla en el terreno, se debe probar con varios círculos para encontrar los puntos críticos del terreno. El círculo de falla que se asumió para este primer cálculo es el siguiente:

Figura 34. Círculo de falla 1 asumido



Las coordenadas del círculo de falla son las siguientes:

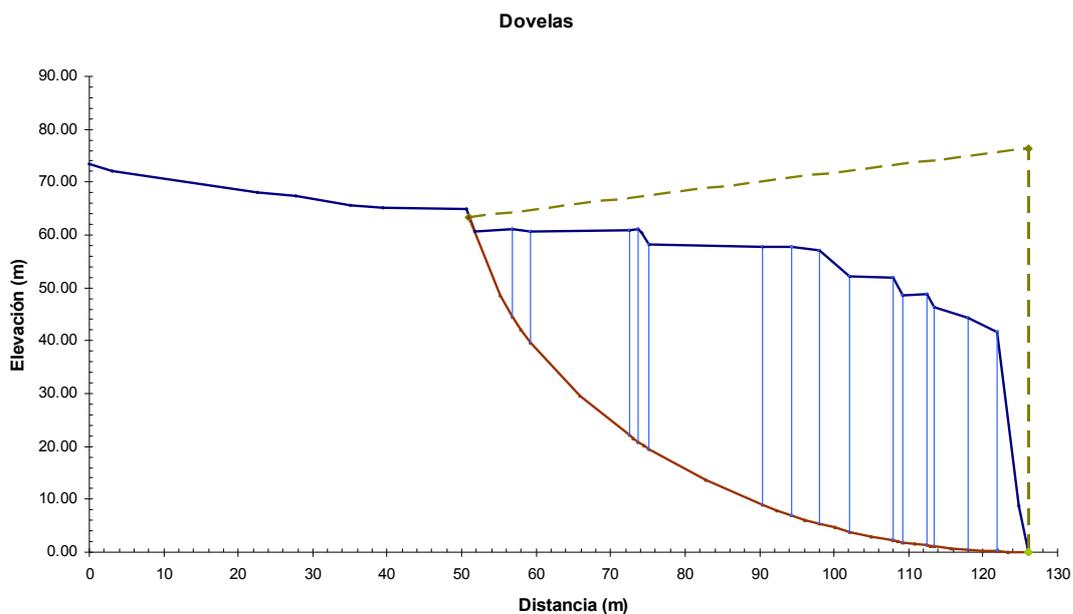
Centro del círculo (126.16, 76.246)

Punto 1 (51.005, 63.41)

Punto 2 (126.16, 0)

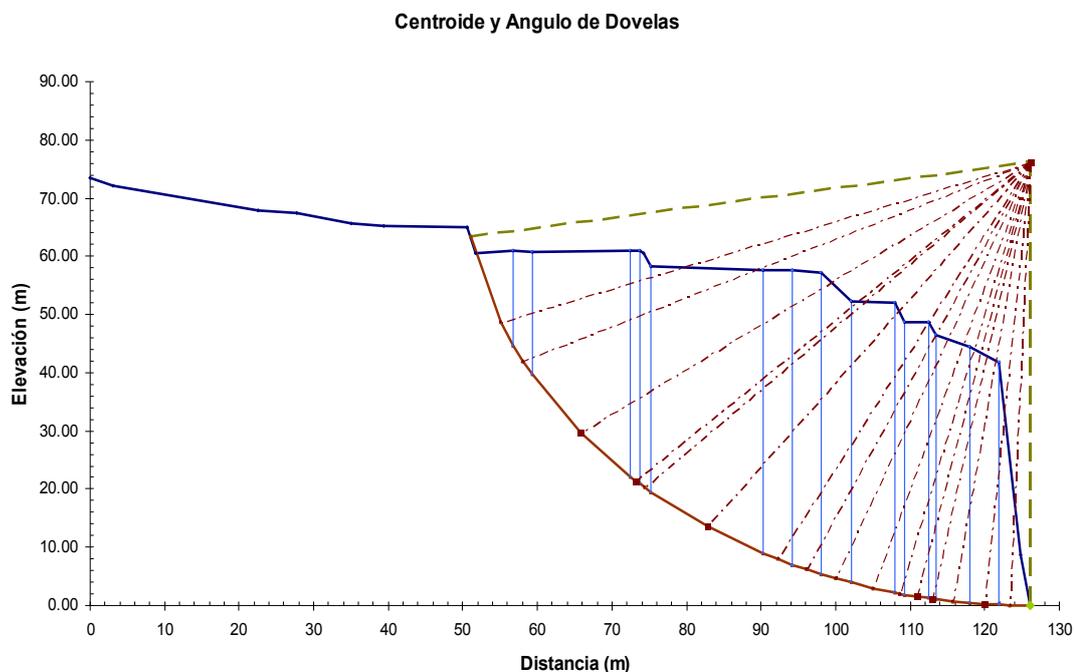
Para determinar el número y ancho de las dovelas no existe ningún tipo de fórmula ni parámetro establecido, esto va relacionado con la topografía del terreno, lo que se debe tomar en cuenta es que se buscan formar trapecios siguiendo la línea natural del terreno, el ancho de las dovelas no debe ser necesariamente el mismo, Para nuestro primer cálculo se dividió el terreno en 16 dovelas, quedando la distribución de las mismas de la siguiente manera:

Figura 35. Dovelas asumidas con el círculo de falla 1



Ya que se tiene definido el ancho y número de dovelas, se procede a encontrar el ángulo (α) de cada una de ellas, dibujando líneas que parten del centro del círculo de falla y finalizan con la vertical bajo el centroide en cada dovela.

Figura 36. Radiaciones del centro del círculo de falla al centroide de las dovelas



Las coordenadas de las dovelas son las siguientes:

Tabla V. Coordenadas de las dovelas

DOVELA No.	CENTRO DOVELA				EXTREMO DOVELA				α (°)
	X	Y terreno	Y círculo	ALTURA (m)	X	Y terreno	Y círculo	ALTURA (m)	
1	55.10	60.91	48.62	12.29	56.77	61.05	44.66	16.39	68.76
2	58.02	60.87	42.05	18.81	59.27	60.68	39.67	21.01	63.35
3	65.87	60.82	29.60	31.22	72.48	60.95	22.11	38.84	52.25
4	73.09	58.99	21.51	37.48	73.70	61.02	20.92	40.10	44.11
5	74.45	59.88	20.22	39.66	75.20	58.23	19.54	38.69	42.71
6	82.76	57.60	13.56	44.04	90.32	57.70	8.96	48.74	34.70
7	92.29	57.70	7.94	49.75	94.25	57.69	7.00	50.69	26.38
8	96.16	57.60	6.15	51.45	98.07	57.13	5.37	51.77	23.17
9	100.07	54.68	4.61	50.07	102.06	52.22	3.91	48.31	20.02
10	104.98	52.10	3.01	49.10	107.90	51.99	2.22	49.77	16.13
11	108.59	50.30	2.05	48.24	109.28	48.61	1.90	46.72	13.32
12	110.90	48.69	1.55	47.14	112.51	48.76	1.24	47.53	11.55
13	112.98	47.60	1.15	46.45	113.44	46.45	1.07	45.38	9.96
14	115.70	45.44	0.72	44.72	117.97	44.43	0.44	43.99	7.89
15	119.92	43.07	0.26	42.81	121.88	41.71	0.12	41.59	4.70
16	123.30	25.94	0.05	25.89	126.16	0.00	0.00	0.00	2.15

Con estos datos ya establecidos, se puede comenzar a calcular el Factor de Seguridad (F.S) por cualquiera de los tres métodos propuestos, en este caso se iniciará con el Ordinario o de Fellenius.

Resolución por el método ordinario o de Fellenius

La fórmula para el método de Fellenius es:

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

En el capítulo 3 se dio la descripción del diagrama cuerpo libre de cada dovela y el significado de cada variable de la fórmula.

Los datos del terreno son los siguientes:

Estrato 1, para las dovelas 1 a 5

$$\gamma = 1.4 \text{ T/m}^3$$

$$C' = 4.08 \text{ T/m}^2$$

$$\Phi = 48.8^\circ$$

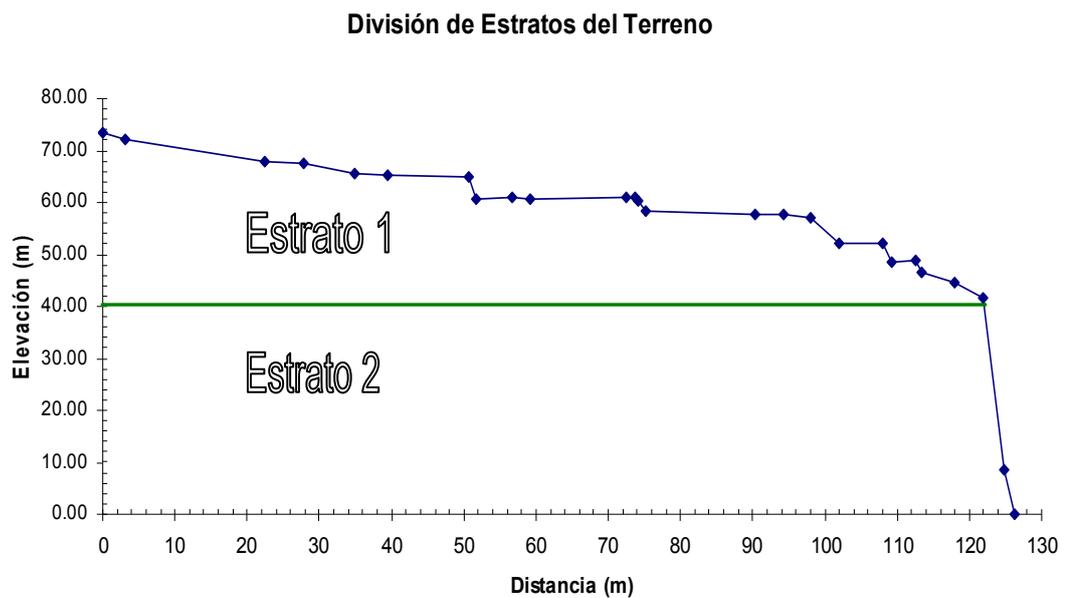
Estrato 2, para las dovelas 6 a 16

$$\gamma = 1.52 \text{ T/m}^3$$

$$C' = 5.35 \text{ T/m}^2$$

$$\Phi = 25.1^\circ$$

Figura 37. División de estratos del terreno



Con estos datos que se obtuvieron mediante las pruebas de laboratorio, se procede al cálculo del Factor de Seguridad, cabe destacar que las dovelas 1 y 16 son triangulares, esto se toma en cuenta al momento de calcular el área, ya que se utilizó la altura del extremo de la dovela. Para el resto de dovelas la

altura que se tomó fue la del centro El cuadro con los datos quedaría de la siguiente forma.

Tabla VI. Solución por el Metodo de Fellenius

DOVELA	b (m)	h (m)	$\alpha(^{\circ})$	Área (m2)	W= γ *A	Sec α	Sen α	Cos α	Tan ϕ	C'bSec α +(Wcos α -ubSec α)Tan ϕ	Wsen α
				A	(T/m)						
1	5.76	16.39	68.76	47.24129	66.138	2.75992	0.93205	0.36233	1.14229	92.29006	61.64374
2	2.50	18.81	63.35	46.93594	65.71	2.22974	0.89379	0.44848	1.14229	56.36109	58.73134
3	13.21	31.22	52.25	412.457	577.44	1.63338	0.79068	0.61223	1.14229	491.88225	456.57064
4	1.23	37.48	44.11	45.94803	64.327	1.39286	0.69610	0.71795	1.14229	59.72237	44.77791
5	1.50	39.66	42.71	59.44584	83.224	1.36082	0.67823	0.73485	1.14229	78.18215	56.44504
6	15.12	44.04	34.70	665.7362	1011.9	1.21631	0.56926	0.82216	0.46843	488.09493	576.04121
7	3.93	49.75	26.38	195.6249	297.35	1.11623	0.44432	0.89587	0.46843	148.26588	132.11789
8	3.82	51.45	23.17	196.3141	298.4	1.08776	0.39350	0.91932	0.46843	150.70977	117.42068
9	3.99	50.07	20.02	199.9716	303.96	1.06429	0.34229	0.93960	0.46843	156.52475	104.04046
10	5.84	49.10	16.13	286.5909	435.62	1.04098	0.27781	0.96064	0.46843	228.53350	121.01877
11	1.38	48.24	13.32	66.72145	101.42	1.02766	0.23046	0.97308	0.46843	53.83195	23.37236
12	3.23	47.14	11.55	152.0736	231.15	1.02067	0.20024	0.97975	0.46843	123.70244	46.28483
13	0.93	46.45	9.96	43.10374	65.518	1.01530	0.17294	0.98493	0.46843	35.26904	11.33076
14	4.53	44.72	7.89	202.6127	307.97	1.00955	0.13719	0.99054	0.46843	167.37253	42.25011
15	3.91	42.81	4.70	167.2743	254.26	1.00337	0.08185	0.99664	0.46843	139.67582	20.81153
16	4.29	41.59	2.15	89.14602	135.5	1.00070	0.03749	0.99930	0.46843	86.38072	5.07992
Total sumatoria										2470.41853	1872.85727
F.S										1.31906	

El factor de seguridad por el Método de Fellenius da un valor de 1.31906.

Resolución por método de Bishop Modificado

La fórmula del método es la siguiente:

$$F.S = \frac{\sum [cA \cos \alpha + (W - u \cos \alpha) \tan \phi] [1 / M_i(\alpha)]}{\sum W \sin \alpha}$$

$$M_i(\alpha) = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F.S} \right)$$

Debido a que el F.S se encuentra en ambos lados de la ecuación, se debe asumir un F.S para iniciar el cálculo, por lo que en este caso, el valor inicial de F.S que se asumirá fue el que se obtuvo con el método de Fellenius.

Tabla VII. Solución por el método de Bishop Modificado

DOVELA	b (m) =	h (m)	α (°)	Área (m ²) A	W=y*A (T/m)	Sec α	Sen α	Cos α	Tan ϕ	Tan α	Wsen α	cAcos α +Wtan ϕ
	Acos α											
1	5.76	16.39	68.76	47.24129	66.14	2.75992	0.93205	0.36233	1.14229	2.57238	61.64374	99.06981
2	2.50	18.81	63.35	46.93594	65.71	2.22974	0.89379	0.44848	1.14229	1.99293	58.73134	85.23989
3	13.21	31.22	52.25	412.457	577.44	1.63338	0.79068	0.61223	1.14229	1.29148	456.57064	713.51322
4	1.23	37.48	44.11	45.94803	64.33	1.39286	0.69610	0.71795	1.14229	0.96956	44.77791	78.48249
5	1.50	39.66	42.71	59.44584	83.22	1.36082	0.67823	0.73485	1.14229	0.92295	56.44504	101.18214
6	15.12	44.04	34.70	665.7362	1011.92	1.21631	0.56926	0.82216	0.46843	0.69239	576.04121	554.89884
7	3.93	49.75	26.38	195.6249	297.35	1.11623	0.44432	0.89587	0.46843	0.49596	132.11789	160.32502
8	3.82	51.45	23.17	196.3141	298.40	1.08776	0.39350	0.91932	0.46843	0.42804	117.42068	160.19519
9	3.99	50.07	20.02	199.9716	303.96	1.06429	0.34229	0.93960	0.46843	0.36429	104.04046	163.75168
10	5.84	49.10	16.13	286.5909	435.62	1.04098	0.27781	0.96064	0.46843	0.28919	121.01877	235.28638
11	1.38	48.24	13.32	66.72145	101.42	1.02766	0.23046	0.97308	0.46843	0.23683	23.37236	54.90606
12	3.23	47.14	11.55	152.0736	231.15	1.02067	0.20024	0.97975	0.46843	0.20437	46.28483	125.53858
13	0.93	46.45	9.96	43.10374	65.52	1.01530	0.17294	0.98493	0.46843	0.17559	11.33076	35.65553
14	4.53	44.72	7.89	202.6127	307.97	1.00955	0.13719	0.99054	0.46843	0.13850	42.25011	168.50517
15	3.91	42.81	4.70	167.2743	254.26	1.00337	0.08185	0.99664	0.46843	0.08213	20.81153	140.00510
16	4.29	41.59	2.15	89.14602	135.50	1.00070	0.03749	0.99930	0.46843	0.03752	5.07992	86.40920
											1877.93719	2962.96430

Tabla VIII. Solución por el método de Bishop Modificado iteraciones 1 a 3

	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
	Mi(α)= Cosα(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosα+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosα(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosα+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosα(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosα+WtanΦ][1/Mi(α)]
	1.16947	84.71329	1.11634	88.74513	1.10368	88.74513
	1.22249	69.72627	1.17154	72.75865	1.15940	72.75865
	1.29695	550.14833	1.25187	569.95583	1.24113	569.95583
	1.32076	59.42231	1.28108	61.26288	1.27162	61.26288
	1.32219	76.52632	1.28353	78.83143	1.27431	78.83143
	1.02432	541.72516	1.01101	548.85554	1.00784	548.85554
	1.05366	152.16038	1.04327	153.67527	1.04080	153.67527
	1.05907	151.26075	1.04987	152.58607	1.04768	152.58607
	1.06115	154.31522	1.05315	155.48766	1.05124	155.48766
	1.05929	222.11631	1.05280	223.48644	1.05125	223.48644
	1.05492	52.04740	1.04954	52.31457	1.04825	52.31457
	1.05086	119.46308	1.04618	119.99759	1.04506	119.99759
	1.04635	34.07616	1.04231	34.20833	1.04134	34.20833
	1.03926	162.13892	1.03606	162.64080	1.03529	162.64080
	1.02571	136.49548	1.02380	136.75058	1.02334	136.75058
	1.01261	85.33310	1.01173	85.40702	1.01153	85.40702
		2651.66847		2696.96378		2696.96378
F.S asumido	1.31906		1.41201		1.43613	
F.S calculado	1.41201		1.43613		1.43613	

El factor de seguridad converge en la tercera iteración, dando como resultado 1.43615.

Resolución por el Método de Janbú

La fórmula del método es la siguiente:

$$F.S = \frac{f_o \sum [cb + (W - ub) \tan \phi][1 / \cos \alpha M_i(\alpha)]}{\sum W \tan \alpha}$$

$$M_i(\alpha) = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F.S} \right)$$

El factor de corrección f_0 se encuentra utilizando el ábaco de la figura No. 21 que se encuentra en el capítulo 3, los resultados son los siguientes:

$$L = 98.281$$

$$D = 17.947$$

$$f_0 = 1.07$$

Tabla IX. Solución método Janbú

SOLUCIÓN POR JANBÚ	DOVELA	b (m)	h (m)	α (°)	Área (m ²) A	W= γ *A (T/m)	Cos α	Tan ϕ	Tan α	Wtan α	cb+ Wtan ϕ
	1	5.76	16.39	68.76	47.24129	66.14	0.36233	1.14229	2.57238	170.13157	99.06981
	2	2.50	18.81	63.35	46.93594	65.71	0.44848	1.14229	1.99293	130.95582	85.23989
	3	13.21	31.22	52.25	412.457	577.44	0.61223	1.14229	1.29148	745.75205	713.51322
	4	1.23	37.48	44.11	45.94803	64.33	0.71795	1.14229	0.96956	62.36920	78.48249
	5	1.50	39.66	42.71	59.44584	83.22	0.73485	1.14229	0.92295	76.81158	101.18214
	6	15.12	44.04	34.70	665.7362	1011.92	0.82216	0.46843	0.69239	700.64351	554.89884
	7	3.93	49.75	26.38	195.6249	297.35	0.89587	0.46843	0.49596	147.47455	160.32502
	8	3.82	51.45	23.17	196.3141	298.40	0.91932	0.46843	0.42804	127.72520	160.19519
	9	3.99	50.07	20.02	199.9716	303.96	0.93960	0.46843	0.36429	110.72900	163.75168
	10	5.84	49.10	16.13	286.5909	435.62	0.96064	0.46843	0.28919	125.97772	235.28638
	11	1.38	48.24	13.32	66.72145	101.42	0.97308	0.46843	0.23683	24.01890	54.90606
	12	3.23	47.14	11.55	152.0736	231.15	0.97975	0.46843	0.20437	47.24157	125.53858
	13	0.93	46.45	9.96	43.10374	65.52	0.98493	0.46843	0.17559	11.50410	35.65553
	14	4.53	44.72	7.89	202.6127	307.97	0.99054	0.46843	0.13850	42.65340	168.50517
	15	3.91	42.81	4.70	167.2743	254.26	0.99664	0.46843	0.08213	20.88160	140.00510
	16	4.29	41.59	2.15	89.14602	135.50	0.99930	0.46843	0.03752	5.08349	86.40920
									2549.953261	2962.964304	

Tabla X. Solución método Janbú iteraciones 1 a 3

	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
Mi(α)=			Mi(α)=		Mi(α)=	
$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$		$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$	$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$
1.10368	265.08120		1.07711	271.61889	1.06945	273.56616
1.15940	175.40764		1.13392	179.34829	1.12657	180.51876
1.24113	1004.74161		1.21860	1023.32236	1.21209	1028.81351
1.27162	91.98260		1.25178	93.44045	1.24605	93.86984
1.27431	115.61476		1.25498	117.39558	1.24940	117.91980
1.00784	716.55575		1.00119	721.31767	0.99927	722.70383
1.04080	183.98185		1.03560	184.90445	1.03410	185.17245
1.04768	177.96662		1.04308	178.75134	1.04175	178.97910
1.05124	177.38870		1.04724	178.06636	1.04609	178.26290
1.05125	249.29581		1.04800	250.06820	1.04707	250.29201
1.04825	57.59551		1.04556	57.74389	1.04478	57.78685
1.04506	131.19140		1.04272	131.48586	1.04204	131.57109
1.04134	37.19727		1.03932	37.26961	1.03874	37.29055
1.03529	175.81649		1.03369	176.08922	1.03323	176.16809
1.02334	146.88119		1.02239	147.01864	1.02211	147.05835
1.01153	91.46868		1.01109	91.50832	1.01096	91.51977
	3798.167096			3839.349135		3851.493064
F.S asumido	1.43613		1.48950		1.50565	
F.S calculado	1.48950		1.50565		1.51042	

Tabla XI. Solución método Janbú iteraciones 4 a 6

	Iteración 4		Iteración 5		Iteración 6	
Mi(α)=			Mi(α)=		Mi(α)=	
$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$		$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$	$\text{Cosa}(1+(\tan\phi\tan\alpha)/F.S)$	$\text{fo}[cb+W\tan\phi][1/\text{cosaMi}(\alpha)]$
1.06722	274.13768		1.06657	274.30469	1.06638	274.35344
1.12443	180.86200		1.12381	180.96228	1.12363	180.99155
1.21020	1030.42142		1.20965	1030.89098	1.20949	1031.02800
1.24439	93.99545		1.24390	94.03212	1.24376	94.04282
1.24778	118.07312		1.24731	118.11788	1.24717	118.13094
0.99871	723.10792		0.99854	723.22578	0.99850	723.26016
1.03367	185.25053		1.03354	185.27330	1.03350	185.27994
1.04136	179.04545		1.04125	179.06479	1.04122	179.07043
1.04575	178.32014		1.04565	178.33683	1.04562	178.34170
1.04679	250.35718		1.04672	250.37617	1.04669	250.38171
1.04456	57.79936		1.04449	57.80301	1.04447	57.80407
1.04185	131.59589		1.04179	131.60312	1.04177	131.60523
1.03857	37.29664		1.03852	37.29841	1.03850	37.29893
1.03309	176.19104		1.03305	176.19773	1.03304	176.19968
1.02203	147.06991		1.02201	147.07327	1.02200	147.07426
1.01092	91.52310		1.01091	91.52407	1.01091	91.52435
	3855.046825			3856.084456		3856.387226
F.S asumido	1.51042		1.51181		1.51222	
F.S calculado	1.51181		1.51222		1.51234	

Tabla XII. Solución método Janbú iteraciones 7 a 9

	Iteración 7		Iteración 8		Iteración 9	
	$M_i(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + (\tan \Phi \tan \alpha))}{F.S}$	$f_o [cb + W \tan \Phi] [1 / \cos \alpha M_i(\alpha)]$	$M_i(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + (\tan \Phi \tan \alpha))}{F.S}$	$f_o [cb + W \tan \Phi] [1 / \cos \alpha M_i(\alpha)]$	$M_i(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + (\tan \Phi \tan \alpha))}{F.S}$	$f_o [cb + W \tan \Phi] [1 / \cos \alpha M_i(\alpha)]$
	1.06632	274.36766	1.06631	274.37181	1.06630	274.37302
	1.12358	181.00009	1.12356	181.00258	1.12356	181.00331
	1.20944	1031.06798	1.20943	1031.07964	1.20942	1031.08304
	1.24372	94.04594	1.24371	94.04685	1.24371	94.04712
	1.24713	118.13475	1.24712	118.13587	1.24711	118.13619
	0.99848	723.27018	0.99848	723.27311	0.99848	723.27396
	1.03349	185.28188	1.03349	185.28244	1.03349	185.28261
	1.04121	179.07208	1.04120	179.07256	1.04120	179.07270
	1.04562	178.34312	1.04561	178.34353	1.04561	178.34365
	1.04669	250.38333	1.04668	250.38380	1.04668	250.38394
	1.04446	57.80438	1.04446	57.80447	1.04446	57.80450
	1.04177	131.60585	1.04177	131.60603	1.04177	131.60608
	1.03850	37.29908	1.03850	37.29913	1.03850	37.29914
	1.03304	176.20025	1.03304	176.20041	1.03304	176.20046
	1.02200	147.07454	1.02200	147.07463	1.02200	147.07465
	1.01091	91.52444	1.01091	91.52446	1.01091	91.52447
		3856.475555		3856.501321		3856.508838
F.S asumido	1.51234		1.51237		1.51238	
F.S calculado	1.51237		1.51238		1.51238	

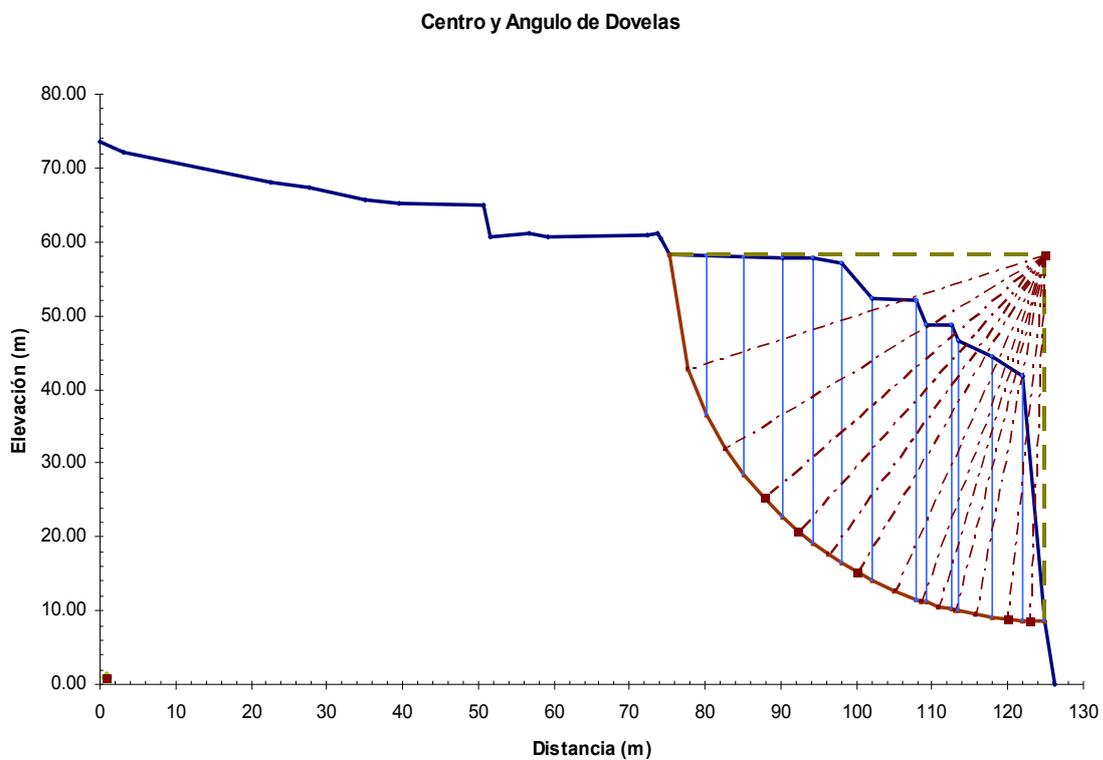
El factor de seguridad calculado con el método de Janbú da un valor de 1.51238.

Los resultados del Factor de Seguridad obtenidos por los tres métodos, con el círculo de falla que se asumió son:

Método	F.S
Ordinario o de Fellenius	1.31906
Bishop Modificado	1.43613
Janbú	1.51238

Ya establecidos los datos del primer círculo de falla que se asumió, se hará el mismo procedimiento para otra superficie de rotura que se planteará. Los datos son los siguientes:

Figura 38. Círculo de falla 2 con sus dovelas y ángulos respectivos



Las coordenadas del círculo de falla son las siguientes:

Centro del círculo (124.87, 58.296)

Punto 1 (75.203, 23)

Punto 2 (124.87, 8.626)

Las coordenadas del perfil del terreno siguen siendo las mismas, lo que varía es la ubicación del centro de falla y por consiguiente el número de las dovelas.

Los datos de las 13 dovelas que se tomaron son los siguientes:

Tabla XIII. Coordenadas de las dovelas en círculo de falla 2

DOVELA	CENTRO DOVELA				EXTREMO DOVELA				α (°)
	X	Y terreno	Y círculo	ALTURA (m)	X	Y terreno	Y círculo	ALTURA (m)	
1	77.70	58.14	42.67	15.47	80.20	58.05	36.49	21.56	71.67026
2	82.70	57.97	31.99	25.97	85.20	57.88	28.33	29.55	58.04757
3	87.70	57.79	25.28	32.51	90.20	57.70	22.66	35.04	48.38626
4	92.15	57.70	20.87	36.83	94.25	57.69	19.13	38.56	41.15835
5	96.16	57.41	17.71	39.70	98.07	57.13	16.43	40.71	35.27746
6	100.07	54.68	15.22	39.46	102.06	52.22	14.13	38.09	29.93547
7	104.98	52.10	12.74	39.36	107.90	51.99	11.58	40.41	23.58958
8	108.59	50.30	11.34	38.96	109.28	48.61	11.11	37.51	19.12240
9	110.90	48.69	10.61	38.08	112.51	48.76	10.16	38.60	16.33450
10	112.97	47.61	10.05	37.56	113.44	46.45	9.94	36.51	13.85502
11	115.70	45.44	9.46	35.98	117.97	44.43	9.09	35.34	10.63507
12	119.92	43.07	8.86	34.21	121.88	41.71	8.71	33.00	5.71966
13	122.88	30.68	8.70	21.98	124.87	8.63	8.63	0.00	2.30676

Para las dovelas 1 a 4 se tomaron los datos del estrato 1, de la dovela 5 a la 13 se utilizan los que corresponden al estrato 2. Las dovelas 1 y 13 son triangulares. Los resultados por cada método son:

Fellenius

Tabla XIV. Resolución método de Fellenius círculo de falla 2

DOVELA	b (m)	h (m)	$\alpha(^{\circ})$	Área (m ²)	W= γ *A	Seca	Sena	Cosa	Tan ϕ	C'bSeca+(Wcosa-ubSeca)Tan ϕ	Wsen α
				A	(kN/m)						
1	5.00	21.56	71.67	53.9075	75.471	3.17980	0.94926	0.31449	1.14229	91.97945	71.64131
2	5.00	25.97	58.05	129.86	181.8	1.88959	0.84849	0.52922	1.14229	148.45135	154.25846
3	5.00	32.51	48.39	162.56	227.58	1.50578	0.74764	0.66411	1.14229	203.36360	170.15064
4	4.05	36.83	41.16	149.1615	208.83	1.32821	0.65814	0.75289	1.14229	201.54265	137.43729
5	3.82	39.70	35.28	151.5028	230.28	1.22494	0.57754	0.81636	0.46843	113.07170	132.99759
6	3.99	39.46	29.94	157.6032	239.56	1.15395	0.49902	0.86659	0.46843	121.90312	119.54474
7	5.84	39.36	23.59	229.7443	349.21	1.09118	0.40018	0.91644	0.46843	183.98832	139.74821
8	1.38	38.96	19.12	53.88306	81.902	1.05840	0.32759	0.94482	0.46843	44.08000	26.83014
9	3.23	38.08	16.33	122.8525	186.74	1.04206	0.28124	0.95964	0.46843	101.92774	52.51845
10	0.93	37.56	13.86	34.85382	52.978	1.02997	0.23947	0.97090	0.46843	29.20816	12.68638
11	4.53	35.98	10.64	163.0208	247.79	1.01748	0.18455	0.98282	0.46843	138.74478	45.73069
12	3.91	34.21	5.72	133.6507	203.15	1.00500	0.09966	0.99502	0.46843	115.69521	20.24608
13	3.00	33.00	2.31	49.4685	75.192	1.00081	0.04025	0.99919	0.46843	51.24633	3.02645
										1545.202403	1086.816
F.S										1.42177	

Bishop modificado

Tabla XV. Resolución método de Bishop modificado círculo de falla 2

DOVELA	b (m)	h (m)	$\alpha(^{\circ})$	Área (m ²)	W= γ *A	Sena	Cosa	Tan ϕ	Tan α	Wsen α	cAcosa+Wtan ϕ
	= Acosa			A	(kN/m)						
1	5.00	21.56	71.67	53.9075	75.471	0.949262363	0.31448524	1.1422908	3.018463958	71.64130516	106.6092577
2	5.00	25.97	58.05	129.86	181.8	0.848487727	0.52921506	1.1422908	1.603294758	154.2584627	228.0730362
3	5.00	32.51	48.39	162.56	227.58	0.74763886	0.66410551	1.1422908	1.125783243	170.1506424	280.3671089
4	4.05	36.83	41.16	149.1615	208.83	0.658142315	0.75289355	1.1422908	0.874150559	137.4372929	255.0641324
5	3.82	39.70	35.28	151.5028	230.28	0.577536498	0.81636487	0.46843423	0.707448988	132.9975908	128.2886508
6	3.99	39.46	29.94	157.6032	239.56	0.499024348	0.86658796	0.46843423	0.575849618	119.5447382	133.5845635
7	5.84	39.36	23.59	229.7443	349.21	0.400182297	0.91643556	0.46843423	0.4366726	139.7482068	194.8105074
8	1.38	38.96	19.12	53.88306	81.902	0.327587309	0.94482091	0.46843423	0.346718945	26.83013959	45.76487008
9	3.23	38.08	16.33	122.8525	186.74	0.281244585	0.95963612	0.46843423	0.293074197	52.51844624	104.7325634
10	0.93	37.56	13.86	34.85382	52.978	0.239465899	0.97090478	0.46843423	0.246642003	12.68637947	29.78142078
11	4.53	35.98	10.64	163.0208	247.79	0.18455298	0.98282257	0.46843423	0.187778533	45.73069481	140.3149596
12	3.91	34.21	5.72	133.6507	203.15	0.099661221	0.99502143	0.46843423	0.100159874	20.24607711	116.064394
13	3.00	33.00	2.31	49.4685	75.192	0.0402496	0.99918966	0.46843423	0.040282243	3.02645272	51.26186209
Total Sumatoria										1086.816429	1814.717327

Tabla XVI. Método de Bishop modificado círculo de falla 2 iteraciones 1 a 3

	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]
	1.077150142	98.97344254	1.041839186	102.3279399	1.032223048	103.2812219
	1.210914695	188.3477318	1.179352385	193.3883706	1.170757106	194.8081588
	1.264780249	221.6725863	1.236969347	226.6564726	1.229395678	228.0527855
	1.281664162	199.010115	1.257182381	202.8855449	1.250515322	203.9672188
	1.006647378	127.441499	0.997837405	128.5666885	0.995438208	128.8765588
	1.031002867	129.5675966	1.023390549	130.5313632	1.021317507	130.7963122
	1.048284701	185.837404	1.04218016	186.9259414	1.040517726	187.2245926
	1.052751989	43.47165389	1.047754841	43.67898702	1.046393981	43.73579257
	1.052298535	99.52742491	1.048008317	99.934859	1.046839974	100.046393
	1.049802253	28.36860055	1.046149344	28.46765707	1.045154558	28.49475282
	1.043627736	134.4492435	1.040812491	134.812909	1.040045823	134.9122861
	1.02785708	112.9188058	1.026336807	113.086068	1.025922796	113.1317039
	1.012450801	50.63145985	1.011836818	50.66218307	1.011669613	50.6705563
		1620.217564		1641.924984		1647.998334
F.S asumido	1.42177		1.49079		1.51077	
F.S calculado	1.49079		1.51077		1.51635	

Tabla XVII. Método de Bishop modificado círculo de falla 2 iteraciones 4 a 6

	Iteración 4		Iteración 5		Iteración 6	
	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]	Mi(α)= Cosa(1+(tanΦtanα)/F.S)	[cAcosa+WtanΦ][1/Mi(α)]
	1.029577977	103.5465599	1.028848383	103.6199885	1.028646984	103.6402763
	1.168392838	195.2023572	1.167740699	195.3113704	1.167560681	195.3414842
	1.227312421	228.4398855	1.226737793	228.5468912	1.226579171	228.576447
	1.248681442	204.2667759	1.248175601	204.349558	1.248035967	204.3724213
	0.994778272	128.9620557	0.99459624	128.9856584	0.994545992	128.9921752
	1.020747284	130.8693793	1.020589999	130.8895479	1.020546581	130.8951164
	1.040060448	187.3069088	1.039934316	187.3296269	1.039899498	187.3358991
	1.046019654	43.75144376	1.045916404	43.75576282	1.045887902	43.75695521
	1.046518602	100.0771159	1.046429958	100.0855935	1.046405488	100.087934
	1.044880926	28.50221499	1.044805449	28.50427397	1.044784615	28.50484239
	1.039834939	134.9396471	1.03977677	134.947196	1.039760713	134.94928
	1.025808915	113.1442633	1.025777503	113.147728	1.025768832	113.1486845
	1.011623621	50.67285998	1.011610935	50.67349544	1.011607433	50.67367086
		1649.681467		1650.146691		1650.275186
F.S asumido	1.51635		1.51790		1.51833	
F.S calculado	1.51790		1.51833		1.51845	

Janbú

$$L= 70.197$$

$$D= 14.571$$

$$f_0= 1.074$$

Tabla XVIII. Método de Janbú círculo de falla 2

DOVELA	b (m) =			Área (m ²)	W=γ*A					
	Acosα	h (m)	α(°)	A	(kN/m)	Cosα	Tanφ	Tanα	Wtanα	cb+ Wtanφ
1	5.00	21.56	71.67	53.9075	75.47	0.31449	1.14229	3.01846	227.80498	106.60926
2	5.00	25.97	58.05	129.86	181.80	0.52922	1.14229	1.60329	291.48540	228.07304
3	5.00	32.51	48.39	162.56	227.58	0.66411	1.14229	1.12578	256.21025	280.36711
4	4.05	36.83	41.16	149.1615	208.83	0.75289	1.14229	0.87415	182.54545	255.06413
5	3.82	39.70	35.28	151.5028	230.28	0.81636	0.46843	0.70745	162.91440	128.28865
6	3.99	39.46	29.94	157.6032	239.56	0.86659	0.46843	0.57585	137.94876	133.58456
7	5.84	39.36	23.59	229.7443	349.21	0.91644	0.46843	0.43667	152.49104	194.81051
8	1.38	38.96	19.12	53.88306	81.90	0.94482	0.46843	0.34672	28.39706	45.76487
9	3.23	38.08	16.33	122.8525	186.74	0.95964	0.46843	0.29307	54.72746	104.73256
10	0.93	37.56	13.86	34.85382	52.98	0.97090	0.46843	0.24664	13.06655	29.78142
11	4.53	35.98	10.64	163.0208	247.79	0.98282	0.46843	0.18778	46.52996	140.31496
12	3.91	34.21	5.72	133.6507	203.15	0.99502	0.46843	0.10016	20.34738	116.06439
13	3.00	33.00	2.31	49.4685	75.19	0.99919	0.46843	0.04028	3.02891	51.26186
Total sumatoria									1577.49761	1814.71733

Tabla XIX. Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 1 a 3

	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$
	1.02857	353.96878	1.00408	362.60126	0.99587	365.59293
	1.16749	396.45333	1.14560	404.02788	1.13826	406.63472
	1.22652	369.67498	1.20723	375.58073	1.20076	377.60486
	1.24798	291.54896	1.23101	295.56988	1.22531	296.94403
	0.99453	169.70385	0.98842	170.75281	0.98637	171.10768
	1.02053	162.22662	1.01525	163.07014	1.01348	163.35514
	1.03989	219.54770	1.03565	220.44513	1.03423	220.74790
	1.04588	49.74007	1.04241	49.90543	1.04125	49.96116
	1.04640	112.01683	1.04342	112.33623	1.04242	112.44381
	1.04478	31.53186	1.04224	31.60850	1.04139	31.63430
	1.03975	147.46953	1.03780	147.74695	1.03715	147.84026
	1.02577	122.13011	1.02471	122.25577	1.02436	122.29798
	1.01161	54.46773	1.01118	54.49067	1.01104	54.49837
		2480.480357		2510.39136		2520.663147
F.S asumido	1.51849		1.57241		1.59138	
F.S calculado	1.57241		1.59138		1.59789	

Tabla XX. Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 4 a 6

	Iteración 4		Iteración 5		Iteración 6	
	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$	$M(\alpha) = \frac{\cos \alpha (1 + \tan \Phi \tan \alpha)}{F.S}$	$fo[cb+W \tan \Phi][1/c \cos \alpha M(\alpha)]$
	0.99309	366.61512	0.99215	366.96269	0.99183	367.08068
	1.13578	407.52329	1.13494	407.82519	1.13465	407.92764
	1.19857	378.29383	1.19783	378.52779	1.19758	378.60718
	1.22338	297.41130	1.22273	297.56992	1.22251	297.62374
	0.98567	171.22794	0.98544	171.26872	0.98536	171.28255
	1.01288	163.45168	1.01268	163.48441	1.01261	163.49551
	1.03375	220.85040	1.03359	220.88515	1.03353	220.89693
	1.04086	49.98002	1.04072	49.98641	1.04068	49.98858
	1.04209	112.48021	1.04197	112.49255	1.04193	112.49673
	1.04111	31.64303	1.04101	31.64598	1.04098	31.64699
	1.03693	147.87183	1.03685	147.88252	1.03683	147.88615
	1.02424	122.31226	1.02420	122.31710	1.02418	122.31873
	1.01099	54.50097	1.01097	54.50185	1.01097	54.50215
		2524.161877		2525.350279		2525.753558
F.S asumido	1.59789		1.60011		1.60086	
F.S calculado	1.60011		1.60086		1.60111	

Tabla XXI. Método de Janbú círculo de falla 2 iteraciones 7 a 9

Iteración 7		Iteración 8		Iteración 9		Iteración 9	
M(α)= Cosa(1+(tanΦtana)/F.S)	fo[cb+WtanΦ][1/cosaM(α)]	M(α)= Cosa(1+(tanΦtana)/F.S)	fo[cb+WtanΦ][1/cosaM(α)]	M(α)= Cosa(1+(tanΦtana)/F.S)	fo[cb+WtanΦ][1/cosaM(α)]	M(α)= Cosa(1+(tanΦtana)/F.S)	fo[cb+WtanΦ][1/cosaM(α)]
0.99172	367.12071	0.99169	367.13429	0.99167	367.13889	0.99167	367.14045
1.13456	407.96240	1.13452	407.97419	1.13451	407.97818	1.13451	407.97954
1.19750	378.63411	1.19747	378.64324	1.19746	378.64634	1.19746	378.64739
1.22244	297.64200	1.22241	297.64819	1.22240	297.65029	1.22240	297.65100
0.98533	171.28724	0.98532	171.28883	0.98532	171.28937	0.98532	171.28956
1.01259	163.49927	1.01258	163.50055	1.01258	163.50098	1.01257	163.50113
1.03352	220.90093	1.03351	220.90228	1.03351	220.90274	1.03351	220.90290
1.04066	49.98931	1.04066	49.98956	1.04066	49.98965	1.04065	49.98968
1.04192	112.49815	1.04191	112.49863	1.04191	112.49880	1.04191	112.49885
1.04096	31.64733	1.04096	31.64744	1.04096	31.64748	1.04096	31.64749
1.03682	147.88738	1.03681	147.88780	1.03681	147.88794	1.03681	147.88798
1.02418	122.31929	1.02418	122.31948	1.02418	122.31954	1.02418	122.31957
1.01097	54.50225	1.01096	54.50229	1.01096	54.50230	1.01096	54.50230
	2525.890364		2525.936769		2525.952508		2525.957847
F.S asumido	1.60111	1.60120		1.60123		1.60124	
F.S calculado	1.60120	1.60123		1.60124		1.60124	

El resultado del factor de seguridad calculado por los 3 métodos es el siguiente:

Método	F.S
Ordinario o de Fellenius	1.42177
Bishop Modificado	1.51849
Janbú	1.60124

La empresa Geoslope Internacional, comercializa un software llamado Slope/W, el cual se puede descargar de la página www.geo-slope.com. Es uno de los programas de cálculo de estabilidad de taludes más usado en el ámbito de la ingeniería geotécnica. Existe una versión estudiantil que es gratis con

algunas limitaciones de uso, pero efectivo para las personas interesadas en aprender a enfrentarse a problemas de estabilidad de taludes.

El programa tiene las siguientes características:

1. Métodos de cálculo. Permite realizar los cálculos de estabilidad a través de una gran variedad de métodos como, Ordinario o de Fellenius, Bishop modificado, Janbú simplificado, Spencer, Sarma, Métodos de equilibrio límite generalizados, métodos de los elementos finitos y otros más.
2. Geometría y estratigrafía. La introducción de las condiciones geométricas son adaptables a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones.
3. Superficie de deslizamiento. Dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura, tales como: Malla de centros y límites de radios, superficies de rotura poligonales, con o sin centro, por bloques, zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura y búsqueda automática de superficies de rotura.
4. Presión hidrostática. Se puede modelizar las acciones del agua en el terreno a través de: La superficie piezométrica, presión hidrostática para cada punto, contornos de presiones hidrostáticas y coeficiente de presión de agua.

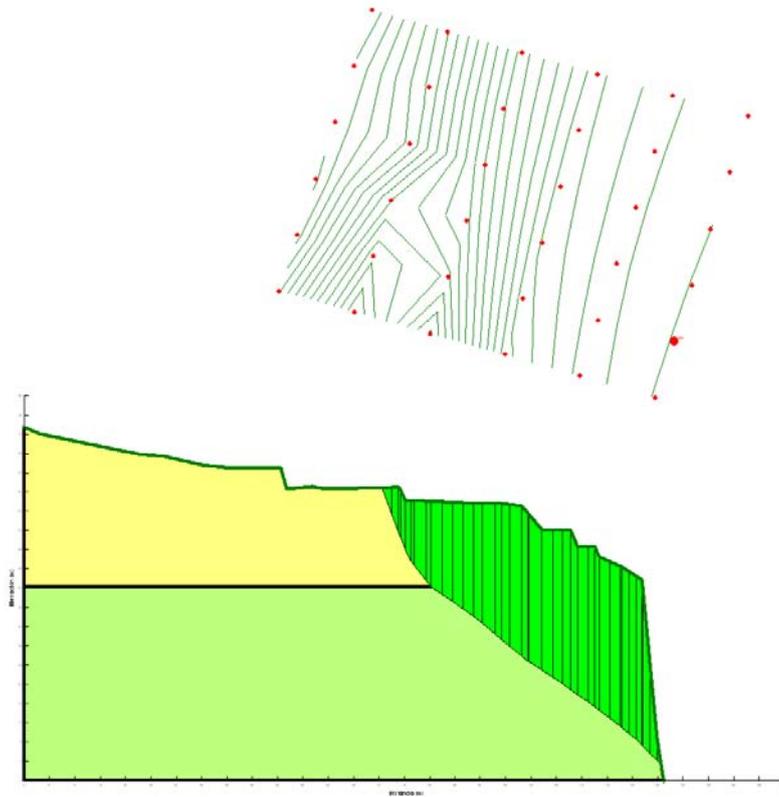
5. Propiedades de los suelos. El programa dispone de varios modelos de comportamiento con el objeto de modelizar el comportamiento de los suelos, tales como: Tensiones totales y efectivas, resistencia al corte sin drenaje, resistencia al corte cero, materiales impenetrables, criterios de rotura bilineales e incrementos de la cohesión con la profundidad.

6. Tipos de carga. Las cargas que se pueden ingresar son: Cargas superficiales, lineales, sísmicas, anclajes y suelo reforzado.

Se procedió a ingresar al programa las coordenadas del perfil del terreno, división de los estratos y los ángulos de fricción interna, cohesión y peso específico de cada uno de ellos.

La superficie crítica de falla del talud estudiado que se genera después de la tabulación de los datos respectivos en el programa GeoSlope se ilustra en la gráfica 39.

Figura 39. Superficie crítica de falla con programa Geo Slope



La versión estudiantil del GeoSlope es de manejo muy práctico y amigable, siendo una herramienta didáctica muy buena para la introducción al estudio de taludes.

Los resultados que se obtuvieron realizando los cálculos de manera manual y con el programa determinan que el talud es estable.

CONCLUSIONES

- 1.- Los mapas geológicos, topográficos e hidrológicos son fuentes de información primarias para el estudio de cualquier talud. Instituciones como el INSIVUMEH e I.G.N, son las entidades que poseen información al respecto. Además, consultar con los pobladores del lugar, para recopilar datos históricos sobre deslizamientos, derrumbes en zonas aledañas, crecidas de ríos, precipitación pluvial, etc., son de gran utilidad para plasmar dentro del estudio los datos más exactos y certeros posibles, con el fin de realizar un análisis realista del lugar.
- 2.- La ubicación geográfica, topografía de los terrenos y la convergencia de tres placas tectónicas en nuestro país, nos ubican en un punto vulnerable a un sismo, debido a la diversa cantidad de fallas que existen en el territorio nacional. Por lo anterior, un estudio profundo y detallado del área donde se piense ejecutar cualquier tipo de proyecto en el que esté involucrada la estabilidad de un talud es de suma importancia para tomar las medidas correctivas necesarias en el terreno, y evitar cualquier tipo de catástrofe.
- 3.- Para el cálculo de estabilidad de taludes, los datos mínimos que se deben obtener del estudio de suelos que se realice del lugar son: El ángulo de fricción interna (Φ), la cohesión (C') y el peso específico del terreno (γ). El tipo de ensayo que se realice en campo para obtener las

muestras que se analizarán en laboratorio, está en función de la topografía del terreno, accesibilidad al proyecto y disponibilidad de recursos económicos.

- 4.- Los ensayos de resistencia tienen por finalidad estimar la resistencia del suelo. Para estimar la resistencia no drenada del suelo se utilizan ensayos como el penetrómetro y la veleta de bolsillo (también pueden ser realizados en campo) y los ensayos no drenados con y sin confinamiento en la cámara triaxial (más costosos). En el caso de la resistencia drenada del suelo también se puede utilizar la cámara triaxial con velocidades más bajas de aplicación de las cargas y el ensayo de corte directo. Este último generalmente se reserva para los materiales granulares.
- 5.- El Método Ordinario o de Fellenius, ignora las fuerzas entre dovelas, a fin de convertir el problema en estáticamente determinado. Es el más simple de todos los métodos de dovelas y a la vez el más conservador, proporcionando el Factor de Seguridad (F.S) más bajo. Este método sólo es aplicable a superficies de falla circulares.
- 6.- El Método simplificado de Bishop sólo es aplicable a superficies de rotura circulares. Considera el equilibrio de fuerzas en la dirección vertical. La solución es indeterminada debido a que el Factor de Seguridad (F.S) aparece en ambos lados de la igualdad, por lo que se requiere un proceso iterativo para resolverlo. La convergencia de los datos es rápida.

Es considerado uno de los métodos más precisos de equilibrio límite, comparado con los llamados rigurosos o precisos.

7.- El Método simplificado de Janbú se aplica a cualquier tipo de superficie de rotura. No cumple con el equilibrio de momentos pero si con el de fuerzas. De la misma manera que ocurre con el Método de Bishop, la solución requiere un proceso iterativo, ya que, la ecuación es indeterminada.

8.- Los métodos de equilibrio límite que se utilizaron para la resolución de la estabilidad del talud estudiado son de fácil comprensión y uso. Se pueden diseñar hojas electrónicas en Excel para la resolución de los mismos. Cabe destacar que los Métodos de Bishop modificado y Janbú son los más precisos, en comparación con los llamados métodos rigurosos o exactos, tales como Spencer, Morgenstern y Price, y el de Sarma. Además que no presentan una complejidad matemática y dificultad en el planteamiento del problema, como pasa con los métodos rigurosos.

9.- Existen diferentes formas de enfocar y resolver cada problema en específico, en lo que se refiere a la estabilidad de masas de tierra, ya que la metodología que se requiera emplear en los taludes estudiados, depende de una serie de factores técnicos, sociales, económicos y políticos. Algunas de las metodologías utilizadas para disminuir o eliminar el riesgo de los deslizamientos de tierra son: Prevención, Elusión

de la Amenaza, Control y Estabilización. Por lo que se recomienda investigar en cada una de estas posibilidades propuestas, para implementar las que mejor se adecuen a la zona estudiada.

RECOMENDACIONES

- 1.- El resultado del deslizamiento de un talud puede ser a menudo catastrófico, con la pérdida de considerables bienes y muchas vidas. Por otro lado, el costo de rebajar un talud para alcanzar mayor estabilidad suele ser muy grande. Es por esto que la estabilidad se debe asegurar de la mejor manera posible, realizando diseños económicamente factibles y ejecutables, ya que un conservadurismo extremo sería antieconómico.
- 2.- Para el análisis de estabilidad de taludes, los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos del factor de seguridad. Por lo anterior, se recomienda el uso de cualquiera de los métodos de equilibrio límite planteados en este trabajo de investigación, ya que son más prácticos y fáciles de aplicar.
- 3.- Se debe evitar trabajar con valores de α que tiendan a cero, ya que podrían ocasionar que el problema se convierta en indefinido por los resultados que se obtendrían.

- 4.- Se debe tomar en cuenta que, el valor del ángulo α de cada dovela, es positivo cuando la pendiente del arco está en el mismo cuadrante que el talud del terreno.

- 5.- Se recomienda el uso del programa GeoSlope 2007, para la mejor comprensión de las superficies de falla que puede tener el talud que se esté analizando. El software es de fácil uso y se puede descargar la versión estudiantil de manera gratuita de su página.

- 6.- Los ensayos de clasificación más frecuentemente utilizados para clasificar los suelos son: Granulometría por tamizado, hidrómetro, límites de Atterberg, peso unitario y gravedad específica. El costo de estos ensayos no es elevado, y proporcionan información básica y elemental que se necesita para el análisis detallado del terreno estudiado.

- 7.- Los objetivos principales de las perforaciones son definir la litología del área de estudio y tomar muestras para su posterior análisis en el laboratorio. El muestreo en las perforaciones depende del material que se consiga y del grado de precisión de los datos geotécnicos. Derivado de lo anterior se recomienda hacer una exploración del terreno, mediante los ensayos S.P.T, C.P.T ó la perforación de pozos, según sea la necesidad, capacidad económica, accesibilidad al lugar, alcance y magnitud del proyecto a trabajar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rock Slope Engineering, Civil and Mining, Duncan C. Wyllie and Crisptopher W. Mah, Spon Press, 4th Edition, 2004.
2. Slope Stability Analysis and Stabilization, New Methods and Insight, Y.M Cheng and C.K Lau, 1st Edition 2008.
3. Foundation Engineering Handbook, Hans F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang, Van Nostrand Remhold, 1975.
4. Soil Mechanics in Foundation Engineering, Volume 2 Theory and Practice, Zenon Wilun and Krzystof Starzewshi, John Wiley, 1972.
5. Slope Stability and Stabilization Methods, Abramson, Lee, Sharma and Boyce, Second Edition, John Wiley, Inc. 2002.
6. Geología Aplicada, Oscar Plaza Diez, Universidad Politécnica de Madrid, Ingeniería de Obras Públicas.
7. Principios de Ingenieria de Cimentaciones, Braja M. Das, Editorial Thomson, Quinta Edición, 2006.
8. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das, Editorial Thomson, Cuarta Edición, 2006.
9. Manual de Protección de Taludes, Asociación de Carreteras del Japón, Mayo 1984.

10. Topografía plana, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Vías, Leonardo Cassanova Matera, Mérida 2002.
11. Geotecnia y Cimientos II y III, J.A Jiménez Salas y otros, Editorial Rueda, Madrid, 1976 y 1980.

Referencia electrónica

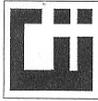
www.aimecuador.com (abril, 2009)

<http://www.ingecim.com> (abril, 2009)

<http://www.geo-slope.com> (junio, 2009)

ANEXO 1

Resultados de Laboratorio del ensayo de las 2 muestras obtenidas



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

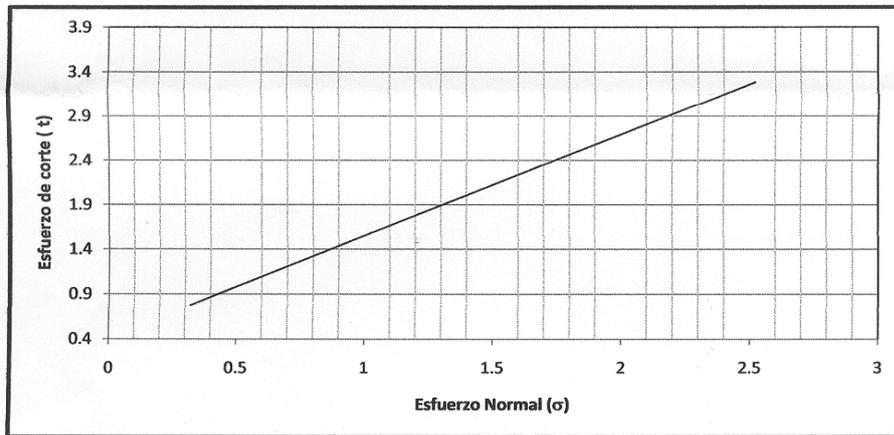


Nº 008717

ENSAYO DE CORTE DIRECTO NORMA ASTM 3080/79

INFORME No.: 342 S.S. O.T.No.: 25,845

INTERESADO: Diego Bernabé Morales Alvarado
PROYECTO: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes
Profundidad: 4.50m Muestra: 1
Fecha: 26 de agosto de 2009



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 48.8^\circ$ COHESIÓN: $C_u = 4.08 \text{ T/m}^2$

DESCRIPCION DEL SUELO: Arena limosa color café claro
DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"
OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/m ²)	0.32	0.63	1.26	2.52
ESFUERZO DE CORTE (kg/m ²)	0.30	1.20	2.57	2.97
DENSIDAD SECA (T/m ³)	1.10	1.10	1.10	1.10
DENSIDAD HUMEDA (T/m ³)	1.40	1.40	1.40	1.40
HUMEDAD (%H)	19.9	19.9	19.9	19.9



Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Atentamente,
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9500 Ext. 1502. FAX: 2476-3993
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 008718

INFORME No.: 343 S.S.

O.T. No. 25,845

Interesado: Diego Bernabé Morales Alvarado

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.

Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11

Proyecto: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop

Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes

Fecha: 26 de agosto de 2009

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	100.00
3/4"	19.00	100.00
4	4.76	75.23
10	2.00	63.17
40	0.42	50.57
200	0.074	22.37

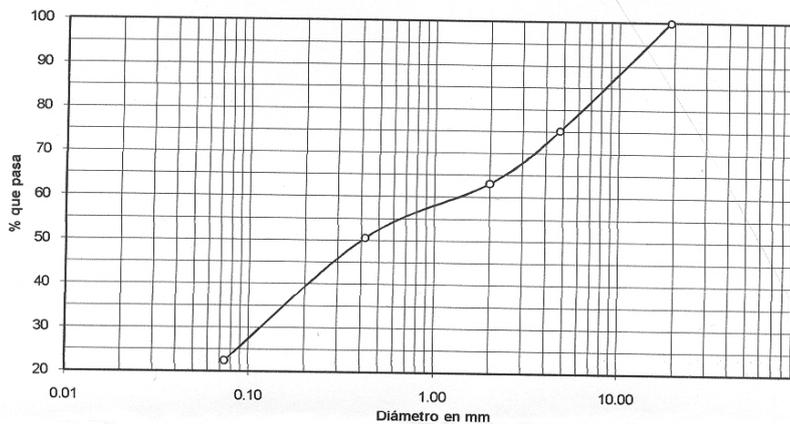
% de Grava: 24.77

% de Arena: 52.86

% de Finos: 22.37

Profundidad: 4.50m

Muestra: 1.00



Descripción del suelo: Arena limosa color café claro

Clasificación: S.C.U.: SM P.R.A.: A-2-4

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 008719

INFORME No. 344 S. S. O.T.: 25,845

Interesado: Diego Bernabé Morales Alvarado
Proyecto: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
Norma: AASHTO T-89 Y T-90

FECHA: 26 de agosto de 2009

RESULTADOS: Profundidad: 4,50m Muestra: 1

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U. *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	0	0	SM	Arena limosa color café claro

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9500 Ext. 1502. FAX: 2476-3993
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



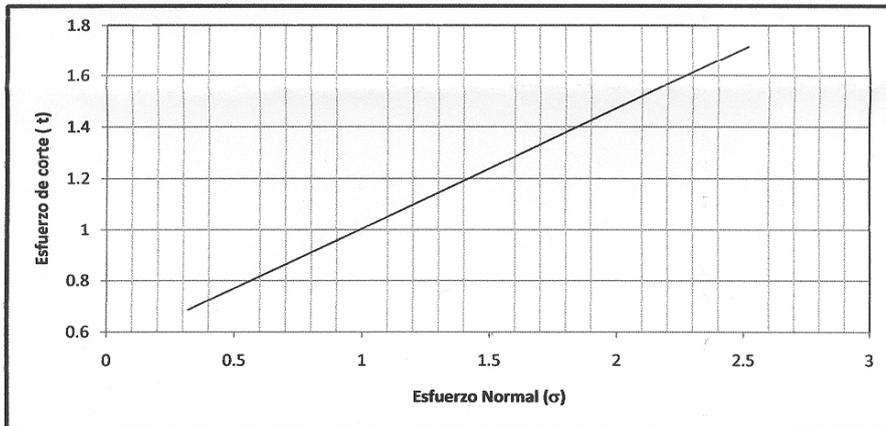
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 008721

ENSAYO DE CORTE DIRECTO NORMA ASTM 3080/79

INFORME No.: 345 S.S. O.T.No.: 25,845
 INTERESADO: Diego Bernabé Morales Alvarado
 PROYECTO: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes
 Profundidad: 8.00m Muestra: 2
 Fecha: 26 de agosto de 2009



PARAMETROS DE CORTE:

ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA : $\phi = 25.1^\circ$	COHESIÓN: $C_u = 5.35 \text{ T/m}^2$
--	--------------------------------------

DESCRIPCION DEL SUELO: Limo arenoso color café

DIMENSION Y TIPO DE LA PROBETA: 2.5" X 5.0"

OBSERVACIONES: Muestra proporcionada por el interesado.

PROBETA No.	1	2	3	4
ESFUERZO NORMAL (kg/m^2)	0.32	0.63	1.26	2.52
ESFUERZO DE CORTE (Kg/m^2)	0.65	0.81	1.22	1.68
DENSIDAD SECA (T/m^3)	1.26	1.26	1.26	1.26
DENSIDAD HUMEDA (T/m^3)	1.52	1.52	1.52	1.52
HUMEDAD (%H)	10.6	10.6	10.6	10.6

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Nº 008722

INFORME No.: 346 S.S.

O.T. No. 25,845

Interesado: Diego Bernabé Morales Alvarado

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices y lavado previo.

Norma: A.A.S.H.T.O. T-27, T-11

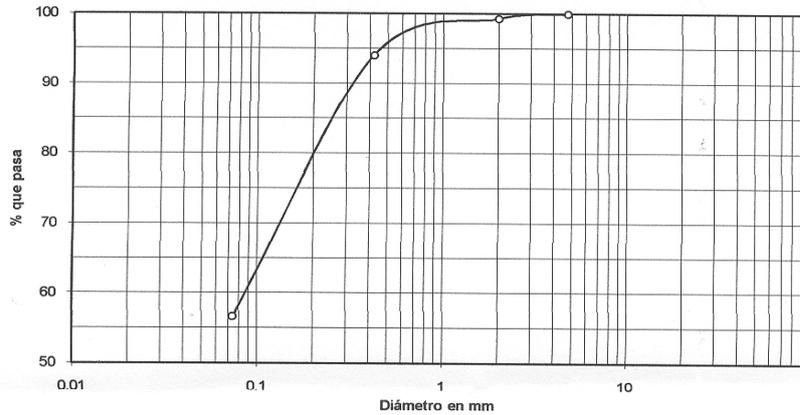
Proyecto: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes)

Profundidad: 8.00m Muestra: 2

Fecha: 26 de agosto de 2009

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
2"	50.8	100.00
3/4"	19.00	100.00
4	4.76	100.00
10	2.00	99.34
40	0.42	94.04
200	0.074	56.61

% de Grava: 0.00
% de Arena: 43.39
% de Finos: 56.61



Descripción del suelo: Limo arenoso color café
Clasificación: S.C.U.: ML P.R.A.: A-4
Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 008723

INFORME No. 347 S. S. O.T.: 25,845

Interesado: Diego Bernabé Morales Alvarado
Proyecto: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbu y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes)

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
Norma: AASHTO T-89 Y T-90

FECHA: 26 de agosto de 2009 Profundidad: 8.00m Muestra: 2

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U. *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	0	0	ML	Limo arenoso color café

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,



Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



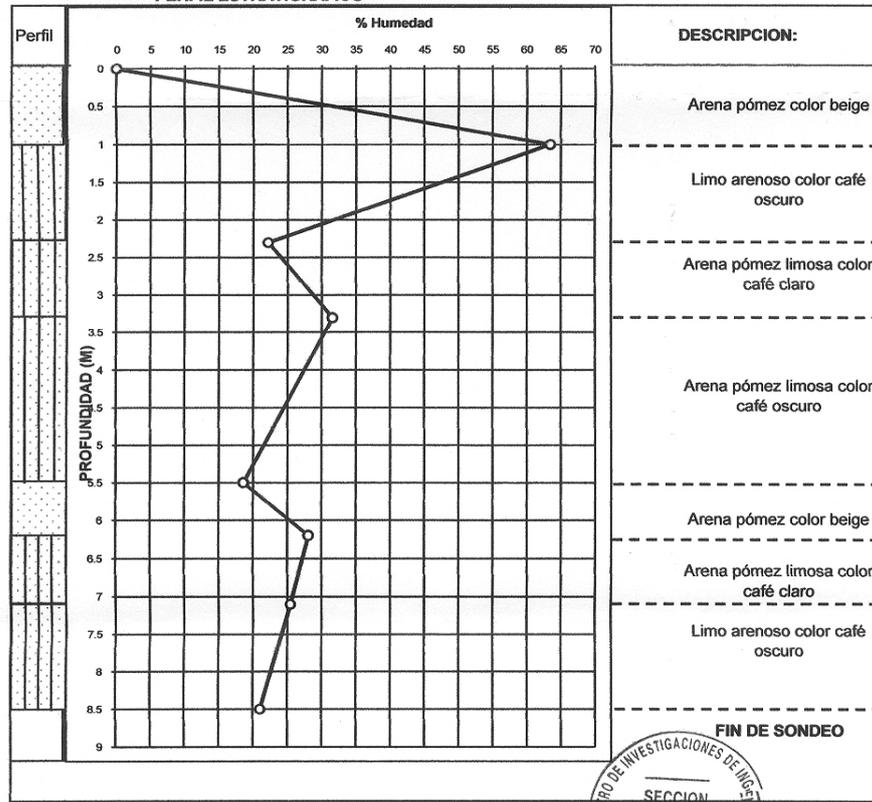
Nº 008724

INFORME No.: 348 S.S. O.T. No.: 25,845

INTERESADO: Diego Bernabé Morales
PROYECTO: Tesis (Procedimientos de Investigación y Comparación de Los Métodos de Bishop Modificado, Janbú y Fellenius para El Cálculo de Estabilidad de Taludes
Norma: AASHTO T-206

Sondeo No.: 1 Fecha: 26 de agosto de 2009

PERFIL ESTRATIGRAFICO



Atentamente,

Vo. Bo.

Ing. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
JEFE SECCION MECANICA DE SUELOS

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9500 Ext. 1502. FAX: 2476-3993
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

ANEXO II

Fotografías del proyecto y ensayos de laboratorio



Vegetación del talud en su zona más empinada



Rampa para área de descanso



Colindancia del proyecto



Obtención de muestra inalterada del pozo



Muestra inalterada



Tallado de muestra para ensayo corte directo



Colocación de anillo en base para ensayo de corte directo



Máquina de corte directo



Muestra ensayada por medio de corte directo



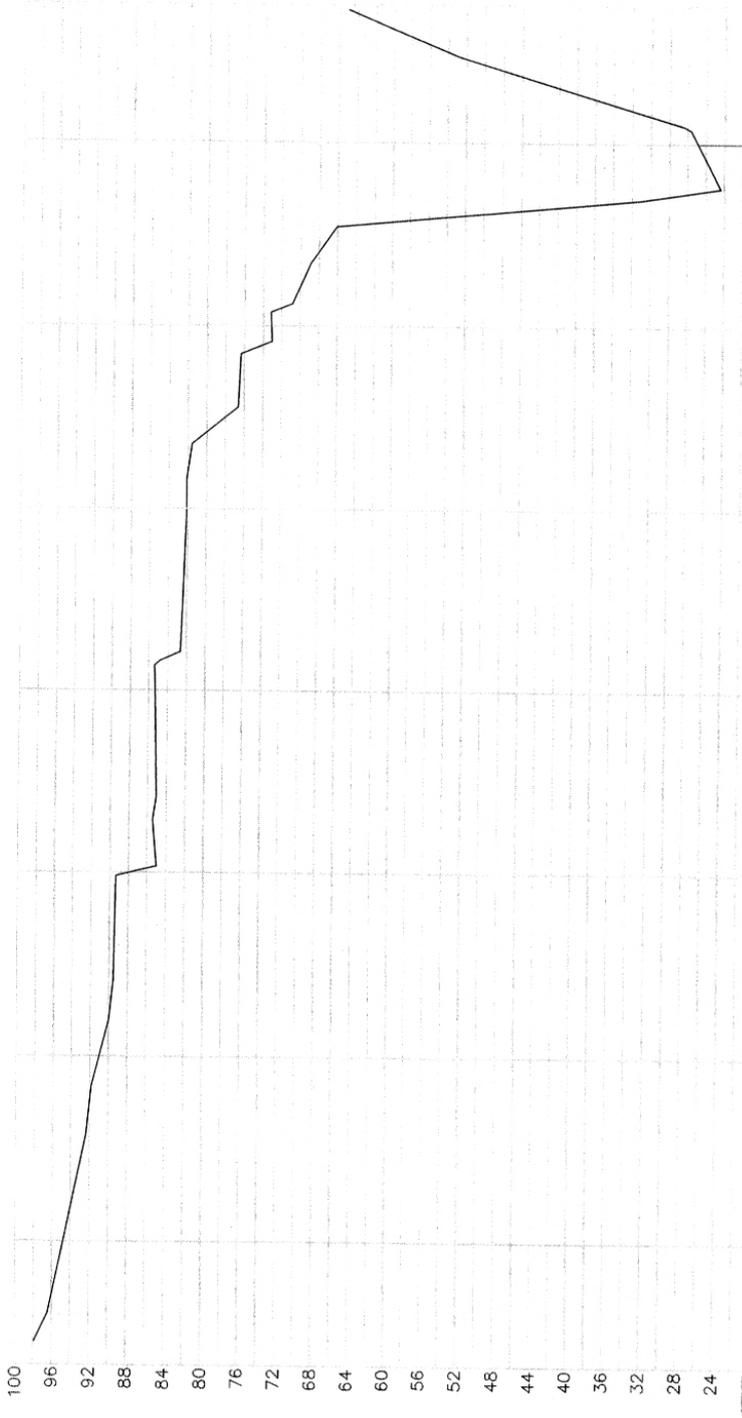
Equipo utilizando para los límites de Atterberg



Límites de Atterberg

ANEXO III

Perfil topográfico del Eje No. 3 del Proyecto estudiado



94.79	91.01	87.81	85.322	82.10	73.09	26.88
0+040			0+080		0+120	

	DEPARTAMENTO TECNICO INGENIERIA	PROYECTO: URBANIZACIÓN PINOS Y ENCINOS	ESCALA: 1:600	DIBUJO: DEURSA	FECHA: 14.04.09
		PLANO DE: PLANTA-PERFIL PINOS Y ENCINOS	DIRECCION DE LA OBRA: CARRETERA A SAN LUCAS		1 / 7