



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

**INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES
ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA**

Luis Ángel Mencos Mejía

Asesorado por el Ing. José Julio Pantoja Prera

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES
ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ÁNGEL MENCOS MEJÍA

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ JULIO PANTOJA PRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pablo de León Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Renzo Ricardo Grazioso Sierra
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordoñez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivóne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha junio de 2011.



Luis Ángel Mencos Mejía

Guatemala, 28 de enero de 2014.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

Director de Escuela Ingeniería Civil

Escuela de Ingeniería Civil

Edificio T-3, Ciudad Universitaria,

Zona 12.

Estimados señores:

Por este medio hago constar que el estudiante **LUIS ANGEL MENCOS MEJIA**, con número de carné 2002-12504; quién presentó ante mi persona el proyecto de tesis, "**INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA DE TALUDES ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA**", cumpliendo con los procesos de revisiones y contando con la aprobación de mi parte para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, se despide muy atentamente



Ing. José Julio Pantoja Prera

JOSE JULIO PANTOJA PRERA
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 9068

Col. No. 9068



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
10 de junio de 2014

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Luis Angel Mencos Mejía, quien contó con la asesoría del Ing. José Julio Pantoja Prera.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

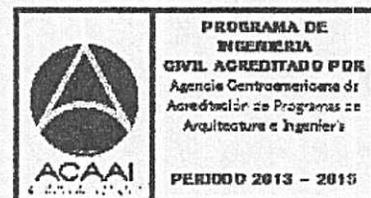


Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles

FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





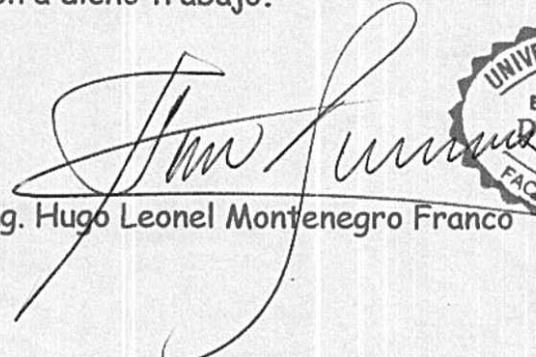
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. José Julio Pantoja Prera y el Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Luis Angel Mencos Mejía, titulado INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre 2014.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

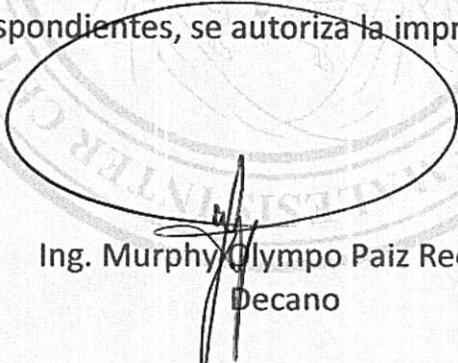




DTG. 474.2014

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: **IMPLEMENTACIÓN GEOTÉCNICA Y MONITOREO DE TALUDES ESTABILIZADOS CON ANCLAJES, APLICADOS EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Luis Ángel Mencos Mejía**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 17 de septiembre de 2014

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Porque no hay nada que no se mueva si no es la voluntad de Él e indudablemente me ha llenado de miles de bendiciones

Universidad de San Carlos de Guatemala

Alma mater, me abriste tus puertas y me acogiste en tus brazos, hoy digo que es un honor para mí egresar de una de tus facultades.

Mi papá

Luis Adolfo Mencos, por ser mi mejor amigo, mi guía, mi más grande ejemplo, el mejor de los padres y quién me inculcó que todos los sueños se alcanzan trabajando por ellos. Sé que siempre estás apoyándome.

Mi mamá

Eloyda Mejía, por enseñarme que siempre se debe luchar para superarse a uno mismo.

Mis hermanas

Andrea y Mónica Mencos Mejía, por ser siempre mis amigas, consejeras, y sobre todo por mostrarse siempre dispuestas a apoyarme.

Mi hermano

Rodolfo Mencos y su esposa Gabriela Morales, por su apoyo, amistad y disposición de siempre colaborarme.

Mis amigos

Porque todos llegaron a mi vida por una razón y permanecen en ella por un propósito, gracias a todos.

Los ingenieros

José Pantoja, por brindarme su apoyo para la realización de este trabajo de graduación y por su amistad y consejo en mi vida profesional. Rodolfo Semrau, por ser un ejemplo de profesionalismo, dedicación humanismo a lo largo de mi vida profesional y ser el primero en abrirme las puertas de este maravilloso mundo de la ingeniería civil.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1 . CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE TALUDES	1
1.1. Definición de talud o ladera	1
1.2. Características de los procesos de movimiento	2
1.3. Procesos de deterioro de los taludes.....	3
1.3.1. Caída de granos	4
1.3.2. Descascaramiento	4
1.3.3. Formación, inclinación y caída de losas de roca	5
1.3.4. Caídas de bloques.....	5
1.3.5. Desmoronamiento del talud	6
1.3.6. Caídas de roca	6
1.3.7. Lavado superficial o erosión	6
1.4. Clasificación de los movimientos en masa	6
1.4.1 Caído o desprendimiento.....	7
1.4.2 Inclinación o volteo	7
1.4.3 Reptación.....	8
1.4.4 Deslizamiento	8
1.4.4.1 Deslizamiento rotacional.....	9

	1.4.4.2	Deslizamiento de traslación	10
	1.4.4.3	Flujo	11
1.5.		Caracterización del movimiento	12
	1.5.1.	Velocidad de movimiento.....	12
2 .		ZONIFICACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO.....	13
	2.1.	Susceptibilidad.....	14
	2.1.1.	Sistema con base en experiencia	14
	2.1.2.	Sistema teórico	14
	2.2.	Amenaza.....	15
	2.2.1.	Análisis de probabilidad de deslizamientos.....	16
	2.2.2.	Métodos de cálculo de probabilidad de ocurrencia	16
	2.3.	Vulnerabilidad	17
	2.4.	Riesgo.....	18
3 .		MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	19
	3.1.	Métodos determinísticos	20
	3.2.	Métodos probabilísticos	20
	3.3.	Equilibrio límite y factor de seguridad	21
	3.4.	Métodos de análisis	23
	3.4.1.	Método Ordinario o de Fellenius	23
	3.4.2.	Método Bishop Simplificado.....	23
	3.4.3.	Método Jambú Simplificado	23
	3.4.4.	Método Elementos Finitos.....	24
	3.4.5.	Método Espiral Logarítmica.....	24
	3.5.	Métodos numéricos y aplicaciones de computador	24
	3.5.1.	Análisis por elementos finitos.....	25
	3.5.2.	Análisis en tres dimensiones.....	27

3.6.	Análisis de estabilidad de taludes en roca.....	27
3.7.	Evaluación análisis sísmico	28
3.7.1.	Método Seudoestático	29
3.7.2.	Método del desplazamiento o las deformaciones	29
3.7.3	Método de la estabilidad después del sismo	29
3.7.4	Método de análisis dinámico por elementos finitos.	29
4 .	PREVENCIÓN, ESTABILIZACIÓN Y DISEÑO	31
4.1.	Métodos para disminuir o eliminar riesgos	31
4.1.1.	Prevención.....	31
4.1.2.	Elusión de la amenaza	33
4.1.3.	Control	33
4.1.4.	Estabilización.....	33
4.2.	Restricciones al desarrollo del área en riesgo	34
4.3.	Métodos de elusión de amenazas	35
4.4.	Mejoramiento del suelo.....	36
4.4.1	Condiciones iniciales del terreno	36
4.4.2	Elección del procedimiento de mejora o refuerzo del terreno	37
4.5.	Control de la mejora del terreno	37
4.6.	Métodos de estructuras de control de movimientos	38
4.6.1.	Protección de la superficie del talud	38
4.6.2.	Concreto lanzado.....	39
4.6.3.	Mampostería.....	39
4.6.4.	Rip-Rap.....	39
4.7.	Modificación de la topografía.....	40
4.7.1.	Abatimiento de la pendiente del talud.....	40

4.7.2.	Remoción de materiales en la cabeza	40
4.7.3.	Terrazas o bermas intermedias.....	40
4.8.	Diseños semiempíricos	41
4.9.	Diseño de terraplenes	42
5 .	ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN O ANCLAJE	45
5.1.	Muros masivos rígidos	46
5.1.1.	Muro reforzado.....	46
5.1.2.	Muro de concreto simple	47
5.1.3.	Muro de concreto ciclópeo	47
5.2.	Presiones de tierra en condiciones estables.....	47
5.2.1.	Presión en reposo	48
5.2.2.	Presión activa y presión pasiva.....	48
5.2.3.	Presión de tierra en reposo	49
5.3.	Muros flexibles	49
5.4.	Tierra reforzada	50
5.5.	Estructuras ancladas	50
5.6.	Estructuras enterradas.....	50
6 .	INSTRUMENTACIÓN DE TALUDES	51
6.1.	Topografía.....	55
6.1.1.	Método geodésico.....	56
6.1.2.	Nivelación.....	56
6.1.3.	Colimación	56
6.2.	Medidor superficial de inclinación	57
6.2.1.	Equipos con sistema de lectura mecánico	57
6.2.2.	Equipos con sistema de lectura eléctrico	58
6.3.	GPS diferencial	59
6.3.1.	Postprocesado	59

6.3.2.	Tiempo real.....	59
6.4.	Inclinómetros	60
6.5.	Extensómetros.....	63
6.6.	Tubos piezométricos.....	65
6.6.1.	Tubería piezométrica ranurada.....	65
6.6.2.	Piezómetro abierto.....	65
6.6.3.	Piezómetro cerrado	66
6.7.	Medida de presión en taludes.....	68
6.7.1.	Células de presión total	68
6.7.2.	Células de carga.....	68
7 .	APLICACIÓN.....	71
7.1.	Estudio geotécnico	71
7.1.1.	Ubicación del sitio del muro monitoreado	71
7.1.2.	Perforación geotécnica	72
7.1.3.	Marco geológico	75
7.1.3.1.	Estructura del valle de Guatemala.....	76
7.1.4.	Descripción del sondeo SBM-1.....	77
7.1.5.	Ensayos de laboratorio	79
7.1.5.1.	Muestra M-1 A.....	80
7.1.5.2.	Muestra M-2 A.....	81
7.1.5.3.	Muestra M-3 A.....	82
7.1.5.4.	Muestra M-1 B.....	85
7.1.5.5.	Muestra M-2 B.....	88
7.2.	Instrumentación geotécnica.....	91
7.2.1.	Celdas de carga.....	92
7.2.2.	Inclinómetro	94
7.2.2.1.	Tubería inclinométrica	96

7.2.2.2.	Sonda inclinométrica.....	97
7.2.2.3.	Caja lectora de mediciones.....	98
7.2.3.	Ubicación de la instrumentación	99
7.2.4.	Monitoreos realizados.....	99
CONCLUSIONES.....		111
RECOMENDACIONES		113
BIBLIOGRAFÍA		114

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Características del talud y la ladera.....	2
2.	Características de los desplazamientos de tierra	3
3.	Fases de evolución de un deslizamiento y predicción teórica de la rotura final	52
4.	Cinta extensométrica.....	57
5.	Medidores de desplazamiento, mecánicos y eléctricos.....	58
6.	Esquema de inclinómetro	61
7.	Lecturas inclinométricas	62
8.	Sonda inclinométrica y caja de toma de datos	63
9.	Extensómetro de varillas	63
10.	Esquema de instalación de extensómetro de varilla de tres anclajes	64
11.	Piezómetros cerrados con transductores de cuerda vibrante.....	66
12.	Tipos de piezómetro	67
13.	Célula de presión total.....	69
14.	Esquema de célula de presión total	69
15.	Célula de carga de cuerda vibrante.....	70
16.	Ubicación del proyecto	72
17.	Camión perforador en ejecución de sondeo.....	73
18.	Ubicación del sondeo en el área del talud.....	74
19.	Provincias fisiográficas de la República de Guatemala.....	75
20.	Mapa geológico regional	76
21.	Ubicación de la muestra 1A y 2A al noreste del talud	79

22.	Análisis granulométrico por tamices, M-1 A.....	80
23.	Análisis granulométrico por tamices, M-2 A.....	81
24.	Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-2 A.....	82
25.	Ubicación de la muestra 3 en talud.....	83
26.	Análisis granulométrico por tamices, M-3 A.....	84
27.	Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-3 A.....	85
28.	Ubicación de la muestra 4 en el talud.....	86
29.	Análisis granulométrico por tamices, M-1 B.....	87
30.	Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-1 B.....	88
31.	Ubicación de la muestra 5 en el talud	89
32.	Análisis granulométrico por tamices, M-2 B	90
33.	Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-2 B.....	91
34.	Celdas de carga utilizadas	93
35.	Tubería inclinométrica	96
36.	Esquema de sonda eléctrica utilizada	97
37.	Caja lectora utilizada	98
38.	Esquema de ubicación de instrumentación	99
39.	Esquema de la orientación del inclinómetro	101
40.	Monitoreo de inclinómetro BDM 01.....	102
41.	Monitoreo de inclinómetro BDM 02.....	103
42.	Monitoreo de inclinómetro BDM 1B	104
43.	Monitoreo de inclinómetro BDM 2B	105
44.	Lectura celda de carga B7	106
45.	Lectura celda de carga B13.....	106
46.	Lectura celda de carga B21	107
47.	Lectura celda de carga F7	107
48.	Lectura celda de carga F13	108
49.	Lectura celda de carga F21	108
50.	Lectura celda de carga J13.....	109

51.	Lectura celda de carga J18	109
-----	----------------------------------	-----

TABLAS

I.	Técnicas y métodos de instrumentación geotécnica.....	53
II.	Longitudes de los anclajes monitoreados.....	94
III.	Inclinómetros instalados en el proyecto.....	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
CT	Cota del terreno
Ø, D	Diámetro
DH	Distancia horizontal
FS	Factor de seguridad
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
km²	Kilómetros cuadrados
kph	Kilómetros por hora
L	Longitud
m	Metros
m²	Metros cuadrados (área)
m³/s	Metros cúbicos por segundo (caudal)
m/s	Metros por segundo (velocidad)
mm	Milímetros
min	Minutos
Hw	Nivel freático
<i>m</i>	Pendiente del terreno
S	Pendiente del terreno en porcentaje
pulg	Pulgadas
s	Segundos

GLOSARIO

Activo	Deslizamiento que se está moviendo en momentos actuales.
Aguas negras	En general, se llama así, a las aguas de desechos provenientes de usos domésticos, comerciales e industriales.
Ampliándose	La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales.
Alargándose	La superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término alargándose puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.
Altura	Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
Altura de nivel freático	Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

Base	El área cubierta por el material perturbado, abajo del pie de la superficie falla.
Cabeza	Las partes superiores del material en movimiento a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
Cabeza o escarpe	Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
Cima	El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
Confinado	Se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.
Corona	El material prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
Costado o franco	Un lado (perfil lateral) del movimiento.
Disminuyendo	El volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo.
Dormido	Deslizamiento inactivo pero que las causas del movimiento aparentemente permanecen.

Escarpe principal	Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
Escarpe secundario	Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
Estabilizado	Movimiento suspendido por obras artificiales de ingeniería.
Húmedo	Suelo que contiene algo de agua pero no existe flujo libre de la misma y puede comportarse como un sólido plástico pero no como un líquido.
Inactivo	Deslizamiento que lleva varios ciclos estacionales sin actividad.
Mojado	Suelo que contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material.
Pendiente	Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m / 1$, en la cual metro es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: Pendiente: 45 o, 100 por ciento, o 1H:1V.

Pie	Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
Pie de la superficie de la falla	La línea de intercepción entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
Progresivo	La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.
Punta o uña	El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
Reactivado	Movimiento que está nuevamente activo, después de haber estado inactivo.
Residuos	Se denomina con el nombre de residuos o detritos al suelo que contiene una significativa proporción de material grueso. Se considera que si más del 20 por ciento del material en peso es mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente, debe llamarse residuo o detrito.
Retrogresivo	La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.
Saturado	Suelo que contiene agua suficiente para fluir como líquido aun en bajas pendientes.

Seco	Suelo que no contiene humedad aparente, o es muy baja.
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.
Superficie original del terreno	La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
Suspendido	Deslizamientos que han estado activos durante los últimos ciclos estacionales pero que no se está moviendo en la actualidad.
Roca	Se denominará así a la roca dura y firme que estaba intacta en su lugar antes de la iniciación del movimiento.

RESUMEN

Cada vez son más el número de obras que en alguna de sus partes y en diferentes tiempos, la instrumentación geotécnica está presente. Se puede citar, las excavaciones para cimentaciones de edificios, estructuras subterráneas (túneles y cavernas), grandes taludes, presas de materiales sueltos, escombreras y balsas mineras.

El uso de la instrumentación geotécnica se debe a la necesidad que los proyectistas y constructores tienen de comprobar que las condiciones geotécnicas y el dimensionamiento de las obras y estructuras están acorde a lo preestablecido, es decir, los parámetros geotécnicos de cálculo son los que se tienen en el campo. El monitoreo y la instrumentación geotécnica no se centra únicamente en la etapa de ejecución de una obra, sino que está presente en la etapa de diseño, de construcción y de garantía de la misma.

La instrumentación y monitoreo durante la etapa de diseño tiene importancia, ya que ayuda enormemente a la hora de definir el modelo geotécnico que mejor se adapta a la realidad. Durante la etapa constructiva, aquella que comprende el tiempo de la construcción de la obra, la instrumentación geotécnica es importante ya que puede comprobarse si el comportamiento del terreno se ajusta a lo planteado en el modelo geotécnico del proyecto. De no ser así, puede modificarse y adecuarse a lo observado.

La instrumentación y el monitoreo utilizada antes, durante y después de la construcción de un proyecto es: extensometría para medida de asientos en terraplenes, inclinometría en taludes, convergencias en túneles, piezómetros

para el control de subpresiones en presas o taludes, células de carga en bulones y anclajes, entre otros.

OBJETIVOS

General

Proporcionar aspectos generales sobre la instrumentación y monitoreo geotécnico de taludes, y su implementación en proyectos en Guatemala.

Específicos

1. Determinar que es la instrumentación y monitoreo geotécnico.
2. Describir los tipos de instrumentos geotécnicos disponible para el monitoreo de taludes.
3. Indicar el funcionamiento de la instrumentación geotécnica.
4. Conocer la importancia de un adecuado monitoreo de la instrumentación geotécnica.
5. Presentar un ejemplo de aplicación de instrumentación y monitoreo geotécnico de taludes.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación muestra la importancia de la instrumentación y monitoreo geotécnico de taludes. Esto debido a la conformación geológica, clima, topografía y la falta de planificación en los aspectos de crecimiento poblacional de Guatemala. Con una adecuada implementación de sistema de auscultación de taludes, se podrían evitar miles o millones de pérdidas materiales y humanas cada año. Por esta razón se presenta a continuación, la forma recomendada de identificar y caracterizar taludes en movimiento, las formas de afrontar los riesgos y amenazas que puedan presentar los mismos.

Luego se presentan las maneras más utilizadas para el diseño de la estabilización de taludes, y los distintos métodos que se pueden emplear para dicha estabilización.

El presente trabajo consta de 7 capítulos, el primero muestra los conceptos y definiciones de los movimientos de los taludes, el segundo provee las definiciones necesarias para determinar y zonificar áreas en amenaza o riesgo a movimiento de taludes, el tercer capítulo brinda los conceptos básicos para analizar la estabilidad de un talud, el capítulo cuatro muestra que es muy importante prevenir los movimientos de los taludes, mediante un diseño de la estabilización del mismo, en el quinto capítulo se puede encontrar los diferentes tipos de estructuras que pueden servir para contener o anclar los movimientos de los taludes.

El capítulo seis muestra la importancia de la instrumentación geotécnica, y las diferentes tipos de herramientas que se puede utilizar para llevar a cabo esta actividad. En el capítulo siete, se muestra un ejemplo de aplicación de la instrumentación geotécnica que se realizó en el muro del kilómetro 10+500 de la ruta departamental Gua-1, carretera que conduce de la ciudad hacia Boca del Monte.

1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE TALUDES

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los guatemaltecos, han causado miles de muertes y daño en las propiedades por valores muy elevados de quetzales; sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90 por ciento 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 tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

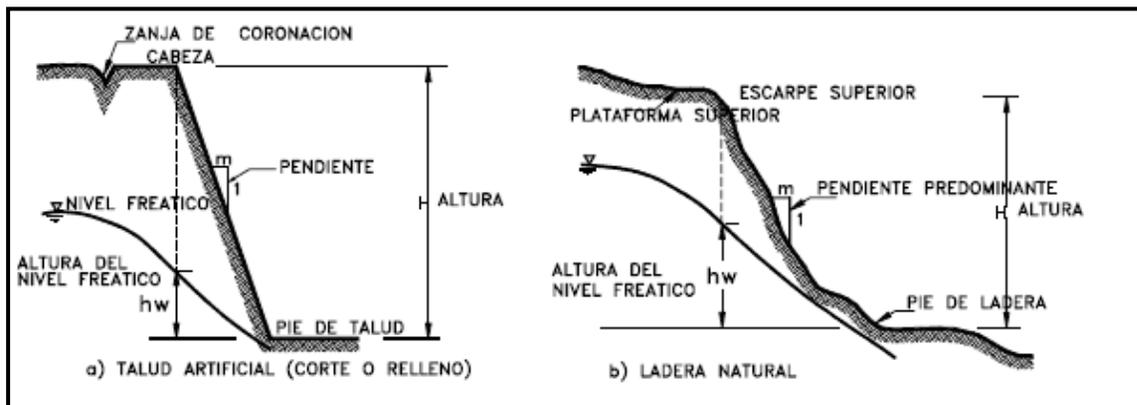
1.1. Definición de talud o ladera

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (figura 1).

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 antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

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

Figura 1. **Características del talud y la ladera**



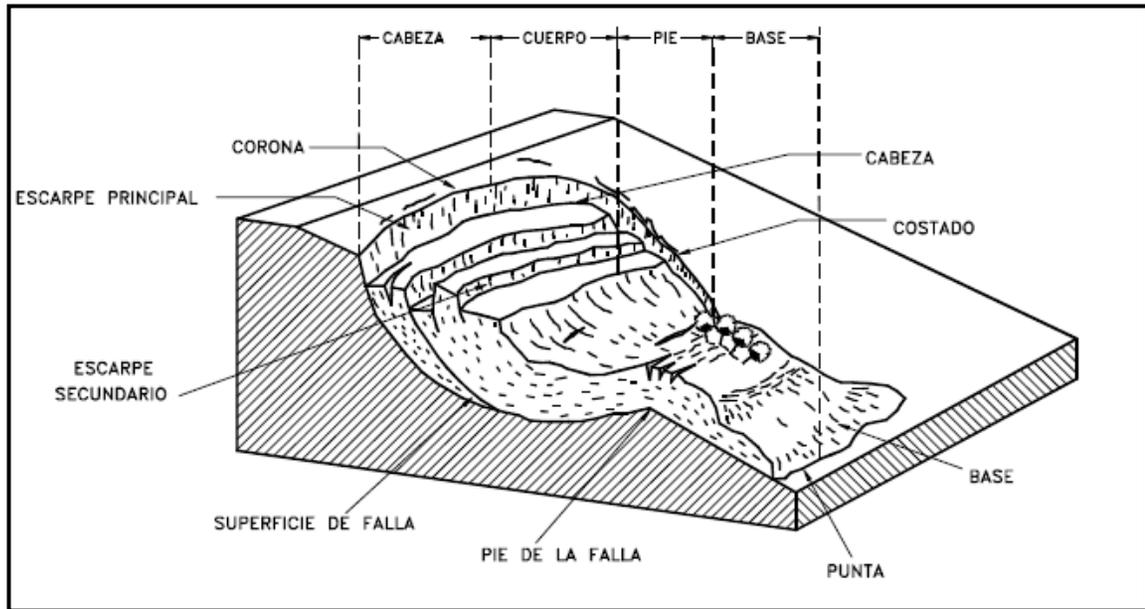
Fuente: DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos en zonas tropicales*. p. 23.

1.2. Características de los procesos de movimiento

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otras se mueven hacia abajo.

Un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes se muestra en la figura 2:

Figura 2. **Características de los deslizamientos de tierra**



Fuente: DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos en zonas tropicales*.

1.3. **Procesos de deterioro de los taludes**

Con el paso del tiempo se puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. Al deterioro, sin embargo, 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 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 significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídas de roca o colapso del talud.

Entre las etapas de deterioro se encuentra:

1.3.1. Caída de granos

Se le llama así a la caída de granos individuales de la masa de roca con desintegración física a granos. Esta depende de la resistencia de las uniones intergranulares y las microgrietas relacionadas con los granos.

Causa un debilitamiento general del material de roca. No representa una amenaza en sí misma pero puede conducir a la pérdida de soporte y subsecuente colapso en pequeña escala. Los finos pueden sedimentarse y producir depósitos dentro de las estructuras de drenaje.

1.3.2. Descascaramiento

Se llama así a la caída de cáscaras de material de la masa de roca. Las cáscaras tienen forma de láminas con una dimensión significativamente menor respecto a las otras dos dimensiones que se tratará más adelante.

Puede reflejar la litología, fisilidad, o puede reflejar la penetración de la meteorización.

Los fragmentos en forma de láminas no son grandes y no constituyen una amenaza significativa, sin embargo, se produce un depósito de sedimentos en el pie del talud.

1.3.3. Formación, inclinación y caída de losas de roca

Se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 milímetros, pudiendo existir deslizamiento y rotación o pandeo. Generalmente, las fracturas a tensión paralelas a la superficie del talud son prerequisite para su ocurrencia, seguidas por la pérdida de soporte.

Pueden caer grandes bloques de material y pueden significar una amenaza importante, causando daño a los canales de drenaje, cercas, pavimentos o puede crear taludes negativos. Las inclinaciones pueden considerarse como un proceso de deterioro o como un movimiento del talud.

Como tratamiento se sugiere la construcción de gradas o escaleras, bermas intermedias, refuerzo con pernos o estructuras de contención.

1.3.4. Caídas de bloques

Pueden caer por gravedad, en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la estructura del talud.

La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños que pueden caer y especialmente los bloques grandes pueden causar daño estructural. En ocasiones bajan saltando y rodando y pueden caminar grandes distancias. Estos caídos corresponden a los caídos de roca en la clasificación general de movimientos en taludes.

1.3.5. Desmoronamiento del talud

El desmoronamiento general del talud produce la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semicontinua. Puede causar una amenaza significativa y crear grandes acumulaciones de detritos en el pie del talud.

1.3.6. Caídas de roca

La caída de muchos bloques de roca en un solo evento requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento varios planos (falla en escalera).

1.3.7. Lavado superficial o erosión

La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos.

1.4. Clasificación de los movimientos en masa

La velocidad del movimiento, tamaño y forma, son parámetros que sirven para la clasificación de los movimientos en masa, por lo que se pueden citar de la siguiente manera:

1.4.1. Caído o desprendimiento

En los caídos o desprendimientos, una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando.

El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material.

La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse como un movimiento en caída libre cuando la pendiente superficial es cercana a 90 grados. En taludes de ángulo menor generalmente, los materiales rebotan y en los caídos de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas de suelo o masas blandas.

1.4.2. Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia delante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en formaciones rocosas.

Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos.

Dependiendo de las características geométricas y de la estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes.

1.4.3. Reptación

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados.

La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.

1.4.4. Deslizamiento

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

Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a la desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, entre otros.

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y traslacionales o planares. Esta

diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.

1.4.4.1. Deslizamiento rotacional

Es cuando la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento.

En muchos deslizamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de cuchara. Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser semivertical, lo cual facilita la ocurrencia de los movimientos retrogresivos.

El movimiento aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparente semivertical y tiene muy poca rotación, sin embargo, se puede observar que generalmente, la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

Frecuentemente la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad.

Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren usualmente, en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y por su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura. En zonas tropicales este tipo de suelos no es común y cuando existe rotación, la superficie de falla es usualmente curva pero no circular; sin embargo, en zonas de meteorización muy profunda y en rellenos de altura significativa algunas superficies de falla pueden asimilarse a círculos.

Dentro del deslizamiento comúnmente, ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente ocurren varios deslizamientos sucesivos en su origen porque conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes.

1.4.4.2. Deslizamiento de traslación

En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo.

Los movimientos traslacionales tiene generalmente, una relación D_r/L_r de menos de 0,1. la diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización.

Sin embargo, un movimiento de rotación trata de autoestabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo. Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de

estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios de resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo.

Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se les conoce como deslizamiento de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera.

1.4.4.3. Flujo

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos, de suelo o tierra.

Flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento

inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo. Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensibles tales como sedimentos no consolidados.

1.5. Caracterización del movimiento

Adicionalmente al tipo de movimiento es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, estilo, velocidad, humedad y material.

1.5.1. Velocidad de movimiento

La velocidad del movimiento tiene gran influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. Generalmente, los deslizamientos extremadamente rápidos corresponden a catástrofes de gran violencia, ocasionalmente con muchos muertos y cuyo escape es poco probable.

Por otro lado los movimientos extremadamente lentos son imperceptibles sin instrumentos y representan, en general un riesgo muy bajo de pérdida de vidas humanas.

2. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA Y RIESGO

La ocurrencia de deslizamientos es un fenómeno sujeto a muchos grados de incertidumbre debido a que los deslizamientos incluyen diferentes tipos de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas, entre otros.

Cuando existe incertidumbre de la posibilidad o no de la ocurrencia de un fenómeno, generalmente, se toman decisiones equivocadas de diseño. El costo de un proyecto puede resultar muy alto o se tienen que asumir riesgos de características y magnitudes no determinadas.

La zonificación de amenazas y riesgos es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, especialmente en las primeras etapas de planeación de un proyecto.

La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la calificación de cada una de estas áreas, de acuerdo al grado real o potencial de amenaza o de riesgo.

El mapeo puede realizarse sobre un área donde se tiene información de la ocurrencia de deslizamientos o se tiene un inventario de estos eventos, o sobre áreas en las cuales no se tiene conocimiento de deslizamientos en el pasado, pero se requiere predecir la posibilidad de amenazas hacia el futuro. En el primer caso se trabaja con una metodología de mapeo directo con base en la experiencia y en el segundo una de mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a su ocurrencia.

Se debe diferenciar entre técnicas de análisis relativo y técnicas de análisis absoluto. El análisis relativo presenta la posibilidad diferencial de ocurrencia de deslizamientos sin dar valores exactos y en el análisis absoluto se presentan factores de seguridad o probabilidad real de ocurrencia de movimientos.

2.1. Susceptibilidad

La susceptibilidad generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como la lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad.

La susceptibilidad se puede evaluar de dos formas diferentes:

2.1.1. Sistema con base en experiencia

Se utiliza la observación directa de la mayor cantidad de deslizamientos ocurridos en el área estudiada y se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.

2.1.2. Sistema teórico

Se mapea el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores.

2.2. Amenaza

La amenaza natural es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor en un área específica dentro de un determinado período de tiempo. La amenaza a los deslizamientos generalmente, se muestra en planos que indican la distribución espacial de los diversos tipos de amenaza.

La zonificación de amenazas requiere tener en cuenta varios elementos:

- Un inventario detallado de los deslizamientos y procesos de inestabilidad que han ocurrido en el pasado.
- Un conocimiento detallado de los procesos y de los factores que los producen.
- El análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de estos fenómenos, relacionada con las condiciones ambientales existentes.
- El estudio de las probabilidades reales de que se presenten, las condiciones para la ocurrencia de los fenómenos. Por ejemplo, que ocurra una lluvia o un sismo de tal magnitud que pueda activar los posibles deslizamientos de tierra.

La zonificación es el resultado de la aplicación de un modelo en el que se involucren todos los factores que intervienen en el fenómeno.

2.2.1. Análisis de probabilidad de deslizamientos

Reuniendo la información histórica sobre deslizamientos, en conjunto con las características mecánicas del suelo y las condiciones a las que esté sometida una ladera o un talud, la probabilidad de la ocurrencia de deslizamientos puede expresarse en los siguientes términos:

- El número de deslizamientos de ciertas características que puede ocurrir en un área por año.
- La probabilidad de que una ladera o talud particular presente deslizamientos en un determinado tiempo.
- Las fuerzas actuantes que exceden las fuerzas resistentes en términos de probabilidad sin tener en cuenta su frecuencia anual. (Factor de Seguridad).

2.2.2. Métodos de cálculo de probabilidad de ocurrencia

Es importante unir la información subjetiva con la información medida, lo cual puede hacerse formal o informalmente. Debe anotarse que existe una serie de datos importantes, los cuales no están disponibles para el análisis y cualquier valoración puede resultar incorrecta si no se tienen en cuenta. Por lo que existen varias formas de calcular la probabilidad de ocurrencia:

- Datos históricos en el área de estudio o en áreas de características similares.

- Métodos empíricos basados en correlaciones de acuerdo con sistemas de clasificación en estabilidad de taludes.
- Uso de evidencia geomorfológica junto con datos históricos o basada en criterio de los profesionales o expertos.
- Relación con la frecuencia e intensidad con eventos detonantes, por ejemplo, lluvias o sismos.

2.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un determinado elemento o grupo de elementos en riesgo, como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud determinada.

El análisis de vulnerabilidad requiere de un conocimiento detallado de la densidad de población, infraestructura, actividades económicas y los efectos de un determinado fenómeno sobre estos elementos en riesgo. Este tipo de trabajos es realizado generalmente por profesionales de disciplinas diferentes a las ciencias de la tierra.

La vulnerabilidad es afectada por la naturaleza del sitio, por su ubicación respecto del deslizamiento, y la naturaleza del elemento en riesgo. La velocidad del movimiento también afecta la vulnerabilidad.

2.4. Riesgo

Riesgo es el número esperado de vidas humanas perdidas, personas heridas, daño a la propiedad y pérdidas económicas relacionadas con la ocurrencia de un determinado fenómeno.

Para la implementación de medidas de prevención y control es conveniente identificar los niveles de riesgo. El análisis de riesgos se fundamenta en la observación y registro de los indicadores tanto naturales como los producidos por acción antrópica, analizados desde el punto de vista de las consecuencias resultantes en el caso de formación o progreso de procesos de deslizamiento. Estas consecuencias deben analizarse no solamente para las áreas urbanizadas sino teniendo en cuenta la posibilidad de ocupación o urbanización de las áreas aledañas.

Para el análisis de riesgo es importante que sean definidos los tipos y procesos, sus parámetros de formación y progreso y la previsión de las consecuencias resultantes. A partir de este procedimiento es posible caracterizar las situaciones de riesgo incluyendo sus dimensiones.

En este sentido se puede concluir que se trata de varias situaciones de riesgo localizado, afectando solamente a algunos sitios específicos del área ocupada o una situación de riesgo generalizado que afecta a toda el área ocupada. Esta caracterización es fundamental para definir la mejor forma de enfrentar un problema de deslizamientos.

3. MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costos de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su falla.

Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones puede adoptarse valores inferiores.

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad.

3.1. Métodos determinísticos

Conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformacionales.

3.2. Métodos probabilísticos

Consideran la probabilidad de la rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis (lo que supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas los cálculos de factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de estabilidad del talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

- La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de:
- Las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos rocosos).
- Los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos,

- geomecánicos, hidrogeológicos, y otros).
- Alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

3.3. Equilibrio límite y factor de seguridad

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1,0.

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.

El Factor de Seguridad (FS) es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius en 1927 presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia 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 la altura crítica y la 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 momentos.

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

3.4. Métodos de análisis

Para el análisis de taludes o laderas existen varios métodos, algunos toman en cuenta el equilibrio de fuerzas, otros reducen a cero los valores de cortantes, hasta los programas computacionales que permiten un análisis más exacto, entre los métodos más utilizados, se tienen:

3.4.1. Método Ordinario o de Fellenius

Utilizado mayormente para superficies de falla circulares, buscando un equilibrio de fuerzas. Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.

3.4.2. Método Bishop Simplificado

Utilizado en superficies de falla circulares, busca un equilibrio de momentos. Este método asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.

3.4.3. Método Jambú Simplificado

Se utiliza en cualquier forma de superficie de falla, buscando un equilibrio de fuerzas. Este método al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface

completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Jambú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.

3.4.4. Método Elementos Finitos

Utilizado para cualquier forma de la superficie de falla, analiza esfuerzo y deformaciones. Satisface todas las condiciones de esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.

3.4.5. Método Espiral Logarítmica

Aplicable para espiral logarítmica, trabaja equilibrios de momentos y fuerzas. Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.

3.5. Métodos numéricos y aplicaciones de computador

El auge que ha tomado en los últimos años el uso del computador prácticamente, han obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Este sistema ha 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 de obtener los factores de seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cuales quiera 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.

3.5.1. Análisis por elementos finitos

El método de elementos finitos resuelve muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite, este método fue introducido por Clough y Woodward en 1967. El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales.

La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Aunque es una herramienta muy poderosa su utilización es muy compleja y su uso muy limitado para resolver problemas prácticos. Wong en 1984 menciona la dificultad de obtener factores de seguridad a la falla.

Aunque su utilización no está muy expandida existen algunos programas de análisis de estabilidad de taludes utilizando métodos numéricos. De estos se conocen los programas FLAC, UDEC, PLAXIS, entre otros.

En el método FLAC los materiales son representados por zonas para formar una malla de acuerdo a la geometría y se puede seleccionar una variedad de relaciones esfuerzo/deformación.

En el método UDEC el talud se divide en bloques de acuerdo al sistema de juntas o grietas los cuales pueden ser rígidos o deformables.

Un análisis por elementos finitos debe satisfacer las siguientes características:

- Debe mantenerse el equilibrio de esfuerzos en cada punto, el cual es realizado empleando la teoría elástica para describir los esfuerzos y deformaciones. Para predecir el nivel de esfuerzos se requiere conocer la relación esfuerzo – deformación.
- Las condiciones de esfuerzos de frontera deben satisfacerse.

Existe dificultad en la mayoría de los casos prácticos reales para definir la relación esfuerzo – deformación. Otra limitante es el poco conocimiento de los esfuerzos reales *in situ* que se requieren para incorporar en el modelo.

Solamente en casos de proyectos de grandes presas y cortes en roca objetivos mineros, se han desarrollado programas exitosos de estudio de aludes por elementos finitos. Generalmente, se utiliza un análisis en dos direcciones por la facilidad de su aplicación, de acuerdo a la capacidad de los computadores sencillos.

El análisis planar o en dos direcciones asume cero esfuerzo o cero deformación en las superficies laterales del modelo, por lo tanto para que se simulen las condiciones de campo se requiere que existan esas condiciones.

El empleo de análisis en dos direcciones se puede ampliar aplicando al modelo una carga hidrostática lateral.

El tamaño y forma de los elementos influye en forma importante sobre los resultados obtenidos. Es común que entre más pequeños sean los elementos se obtienen mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud.

La altura del elemento es tal vez el factor más importante y se recomiendan por lo menos diez niveles de elementos entre el pié y la cabeza del talud para simular en forma precisa el comportamiento del talud.

3.5.2. Análisis en tres dimensiones

La mayoría de los deslizamientos posee una geometría en tres dimensiones; varios autores han presentado métodos de análisis. De los cuales merece especial interés el de Yamagami y Jiag en 1996. Este método utiliza las ecuaciones de factor de seguridad de Jambú, junto con un esquema de minimización basado en programación dinámica. Con este programa se obtiene la superficie de falla crítica en tres dimensiones, sin restricción de la forma de la falla, su respectivo factor de seguridad y la dirección del movimiento.

3.6. Análisis de estabilidad de taludes en roca

Con excepción de los casos de rocas sanas completamente sin fracturas, los cuales son muy raros, la mayoría de las masas de roca deben ser consideradas como un ensamble de bloques de roca intacta, delimitados en tres dimensiones por un sistema o sistemas de discontinuidades.

Estas discontinuidades pueden ocurrir de una forma errática o en forma repetitiva como grupos de discontinuidades. Este sistema de discontinuidades usualmente, se le conoce como fábrica estructural de la masa de roca y puede consistir de orientación de granos, estratificación, juntas, foliaciones y otras discontinuidades de la roca. La resistencia de la roca a lo largo de la estratificación es diferente a la resistencia normal a la estratificación.

En la mayoría de los casos las propiedades ingenieriles de la roca fracturada, tales como resistencia, permeabilidad y deformabilidad, dependen más de la naturaleza de la fábrica estructural, que de las propiedades de la roca intacta.

3.7. Evaluación análisis sísmico

Los eventos sísmicos son capaces de inducir fuerzas de gran magnitud, de naturaleza cíclica, las cuales pueden producir la falla rápida de taludes y laderas. Además, la resistencia al corte de un suelo puede reducirse a causa de cargas oscilatorias que generan deformaciones cíclicas, o debido a la generación de presiones altas de poros. La combinación entre la acción de las cargas sísmicas y la disminución de la resistencia pueden producir una disminución general de la estabilidad. El caso más crítico es el de materiales no plásticos de grano fino como son los limos o las arenas finas.

En el análisis de estabilidad se requiere analizar los factores que se indican a continuación:

3.7.1. Método Seudoestático

En el método Seudoestático, las cargas del sismo son simuladas como cargas estáticas horizontales y verticales. Lo que permite generar parámetros diferentes y otro enfoque de factor de seguridad.

3.7.2. Método del desplazamiento o las deformaciones

El cual se basa en el concepto de que las aceleraciones reales pueden superar la aceleración límite permitida, produciendo desplazamientos permanentes.

3.7.3. Método de la estabilidad después del sismo

La cual es calculada utilizando las resistencias no drenadas, en muestras de suelo representativas que han sido sometidas previamente a fuerzas cíclicas comparables a las del sismo esperado.

3.7.4. Método de análisis dinámico por elementos finitos

Por medio de un análisis en dos o tres dimensiones, utilizando un modelo específico se pueden obtener detalles relacionados con esfuerzos, deformaciones cíclicas o permanentes.

Los dos primeros métodos son los más utilizados en la práctica de la geotécnica debido, especialmente a su facilidad de implementación.

4. PREVENCIÓN, ESTABILIZACIÓN Y DISEÑO

La estabilización de deslizamientos activos o potencialmente inestables es un trabajo relativamente complejo, el cual requiere de metodologías de diseño y construcción.

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.

4.1. Métodos para disminuir o eliminar riesgos

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.

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.

4.1.1. Prevención

La prevención incluye el manejo de la vulnerabilidad, evitando la posibilidad de que se presenten riesgos o amenazas. La prevención debe ser

un programa del estado, en todos sus niveles mediante una legislación y un sistema de manejo de amenazas que permita disminuir los riesgos a deslizamiento en un área determinada.

Los riesgos debidos a deslizamientos de tierra se pueden reducir utilizando cuatro estrategias:

- Restricciones al desarrollo en áreas susceptibles a deslizamientos.
- Códigos para excavaciones, explanaciones, paisajismo y construcción.
- Medidas físicas tales como drenajes, modificación de la geometría y estructuras para prevenir o controlar los deslizamientos o los fenómenos que los pueden producir realizado empleando la teoría.
- Desarrollo de sistemas de aviso o alarma.

Los métodos de mitigación o prevención de amenaza pueden reducir en forma importante la ocurrencia de deslizamientos.

La prevención permite el manejo de áreas relativamente grandes, teniendo en cuenta que los procesos naturales pueden ocurrir en diversos sectores dentro de un área de susceptibilidad similar, en forma repetitiva o múltiple. La mejor estrategia para la reducción de amenaza de deslizamiento, generalmente, envuelve una mezcla de varias técnicas o sistemas en donde se requiere la cooperación de geólogos, ingenieros, planeadores, propietarios de la tierra, constructores, organizaciones financieras y de seguros y entidades del Estado.

Entonces se puede decir que son necesarios dos elementos principales: una base técnica completa y confiable sobre las amenazas y riesgos, un Estado y comunidad conscientes de los problemas y del beneficio de los programas de prevención.

4.1.2. Elusión de la amenaza

Esto consiste en evitar que los elementos en riesgo sean expuestos a la amenaza de deslizamiento, y con ello prevenir las consecuencias que el deslizamiento pudiera ocasionar.

4.1.3. Control

Generalmente, consisten en estructuras que retienen la masa en movimiento. Este tipo de obras se construyen abajo del deslizamiento para detenerlo después que se ha iniciado.

4.1.4. Estabilización

Reuniendo toda la información acerca del deslizamiento, se procede a determinar el tipo de estabilización que se debe implementar. Por lo que la estabilización de un talud comprende los siguientes factores:

- Determinar el sistema o combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta todas las circunstancias del talud estudiado.
- Diseñar en detalle el sistema a emplear, incluyendo planos y especificaciones de diseño.

- Instrumentación y control, antes, durante y después de la estabilización.

Debe tenerse en cuenta que en taludes, nunca existen diseños detallados inmodificables y que las observaciones que se hacen durante el proceso de construcción tienden generalmente, a introducir modificaciones al diseño inicial y esto debe preverse en las cláusulas contractuales de construcción.

4.2. Restricciones al desarrollo del área en riesgo

Uno de los métodos más efectivos y económicos de reducir pérdidas por deslizamientos, es la planificación adecuada del uso de la tierra, dedicando áreas susceptibles a deslizamientos como áreas abiertas o verdes o de baja intensidad de uso. La mayoría de los países y ciudades tienen legislación que permite la planificación mediante códigos de urbanismo y/o ambientales.

En ocasiones se requiere recurrir a evacuar áreas ya utilizadas o urbanizadas, mediante adquisición de la tierra y propiedades por parte del Estado y relocalización de los habitantes y sus viviendas. Sin embargo, el método más efectivo es el de evitar desarrollos de áreas susceptibles.

Este fue elaborado en base al cómputo métrico de materiales y mano de obra a emplear. Para los diferentes renglones de que consta este proyecto se presupuestó por separado y en forma detallada los costos unitarios de: materiales, mano de obra, gastos administrativos e imprevistos, esto es, gastos directos e indirectos.

4.3. Métodos de elusión de amenazas

Previamente a la aplicación de un método de elusión debe estudiarse la posibilidad de aplicación de sistemas de estabilización en los aspectos técnicos y económicos. No es una buena práctica de ingeniería el tratar de eludir los problemas antes de intentar resolverlos.

La presencia de deslizamientos de gran magnitud difíciles de estabilizar es un argumento de gran peso para sustentar un proceso de elusión. Debe tenerse en cuenta que en ocasiones estos deslizamientos son movimientos antiguos, los cuales han sido disfrazados por procesos nuevos de meteorización, erosión o por vegetación o por actividades humanas. La no detección de estos grandes deslizamientos en la fase de planeación del proyecto puede acarrear costos muy altos en el momento de la construcción.

Los métodos para eludir amenazas de deslizamientos son los siguientes:

- Variantes o relocalización del proyecto, su aplicación se recomienda cuando existe el riesgo de activar grandes deslizamientos difíciles de estabilizar o existen deslizamientos antiguos de gran magnitud. Puede ser el mejor de los métodos si es económico hacerlo. Su limitación es que puede resultar costoso y el nuevo sitio o alineamiento puede estar amenazado por deslizamientos.
- Remoción total de deslizamientos, esto se aplica cuando se trata de volúmenes pequeños de excavación. Su limitación es que la remoción de deslizamientos puede producir nuevos movimientos.

- Remoción parcial de materiales inestables, esto se realiza para remover los suelos subsuperficiales inestables cuando sus espesores no son muy grandes. La limitante se da cuando el nivel freático se encuentra subsuperficial y se dificulta el proceso de excavación.
- Modificación del nivel del proyecto o subrasante de una vía, se realiza mediante la disminución de la altura de los cortes en un alineamiento de gran longitud puede resolver la viabilidad técnica de un proyecto. Esto se limita generalmente, ya que al disminuir la altura de los cortes se desmejoran las características del proyecto.
- Puentes o viaductos sobre los movimientos, su aplicación es muy útil en terrenos de pendientes muy altas, pero esto se limita debido a que se requiere cimentar los puentes sobre suelo estable y las pilas deben ser capaces de resistir las fuerzas laterales del material inestable.

4.4. Mejoramiento del suelo

Se entiende por mejora o refuerzo del terreno el incremento de sus propiedades resistentes o de rigidez a efectos de poder apoyar sobre él adecuadamente estructuras o permitir servicios.

4.4.1. Condiciones iniciales del terreno

Antes de decidir o implementar cualquier tipo de mejora o refuerzo del terreno deben establecerse adecuadamente las condiciones iniciales del terreno mediante un adecuado estudio geotécnico.

4.4.2. Elección del procedimiento de mejora o refuerzo del terreno

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales del terreno, y las características del suelo. Los siguientes factores, según proceda, deben tomarse en consideración para elegir el proceso más adecuado de mejora o refuerzo del terreno:

- Espesor y propiedades del suelo o relleno a mejorar.
- Presiones intersticiales en los diferentes estratos.
- Naturaleza, tamaño y posición de la estructura a apoyar en el terreno.
- Prevención de daños a las estructuras o servicios adyacentes.
- Determinar si será mejora provisional o permanente del suelo.
- Determinar la relación entre el método de mejora del terreno y la secuencia constructiva en términos de las deformaciones permisibles.
- Los efectos en el entorno.
- La degradación de materiales a largo plazo.

4.5. Control de la mejora del terreno

Una vez elegido el método de mejora del terreno en conjunto con las características iniciales y las propiedades del suelo, se debe prestar atención a los siguientes elementos.

Los criterios de aceptación, fijados en proyecto para el método que pueda adoptarse de mejora del terreno, consistirán en unos valores mínimos de determinadas propiedades del terreno tras su mejora. La consecución de estos valores superiores a los mínimos, tras el proceso de mejora debe ser adecuadamente contrastada.

4.6. Métodos de estructuras de control de movimientos

Los métodos de protección están dirigidos a la construcción de estructuras para evitar que la amenaza genere riesgos.

Un método efectivo de minimizar la amenaza provocada por deslizamientos, es permitir que estos ocurran pero controlarlos adecuadamente utilizando sistemas de control en el pie del talud.

4.6.1. Protección de la superficie del talud

La protección de un talud se ejecuta para proteger los taludes de la erosión o intemperismo, cubriéndolos con vegetación o estructuras y estabilizándolos con drenaje o estructuras de contención.

El trabajo de vegetación se ejecuta para prevenir la erosión por agua de lluvia, al crecer plantas en las caras del talud y amarrar las caras con las raíces de las plantas, aliviar el cambio de temperatura en la superficie del terreno, proporcionar una bella vista y otros. Se emplea vegetación donde esta es posible, también debido a los costos relativamente bajos.

Los trabajos de protección de taludes con estructuras se emplean en taludes no adecuados a la vegetación, taludes cuya estabilidad no pueda asegurarse por un largo tiempo con vegetaciones solamente, o taludes que requieren protección contra fallas, caída de rocas o expansiones del terreno.

Por aparte donde existe agua de infiltración en la cara del talud, debe emplearse además obras de drenaje, para prevenir la socavación del talud y como aporte a su estabilización.

4.6.2. Concreto lanzado

El concreto lanzado es una mezcla de cemento y agregados, los cuales se pueden colocar en seco o por vía húmeda. Generalmente se coloca una malla de refuerzo previamente al lanzado del concreto. Se debe tener especial cuidado en las consecuencias de procesos de expansión y contracción, los cuales pueden destruir por agrietamiento la superficie de los taludes. Para facilitar el drenaje, se deben construir perforaciones subhorizontales que atraviesen la superficie de recubrimiento y, en esta forma evitar las presiones de poro por represamiento de agua subterránea.

4.6.3. Mampostería

La mampostería puede consistir en bloques de concreto o en piedra pegada con concreto o mortero. Las juntas entre bloques adyacentes generalmente, se rellenan con un mortero 3 a 1 o se utiliza vegetación. En el caso de recubrimiento utilizando concreto o mortero se deben dejar lloraderos para evitar la acumulación de aguas subterráneas.

4.6.4. Rip-Rap

La solución consiste en colocar sobre la superficie del talud piedra suelta acumulada una sobre otra con el objeto específico de proteger contra la erosión. Usualmente por debajo del Rip-Rap se coloca un geotextil no tejido como elemento de protección adicional. El Rip-Rap puede colocarse a mano o al volteo. Generalmente, al colocarse al volteo el espesor de la capa es menor pero en cualquier caso no debe ser inferior a 12 pulgadas. El tamaño de las piedras depende de la pendiente del talud, pudiéndose colocar piedras de mayor tamaño en pendientes menores.

4.7. Modificación de la topografía

En algunos casos el proyecto permite la modificación de la topografía, como método de prevención, cuando esto es posible, se pueden realizar algunas de las siguientes opciones:

4.7.1. Abatimiento de la pendiente del talud

Al disminuir la pendiente del talud, el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo para el caso de un talud estable, aumentándose en esta forma el factor de seguridad. El abatimiento se puede lograr por corte o por relleno. El abatimiento de la pendiente del talud es económicamente posible en taludes de poca altura, pero no ocurre lo mismo en taludes de gran altura, debido al aumento exagerado de volumen de tierra de corte con el aumento de la altura. El abatimiento por relleno en ocasiones no es posible por falta de espacio en el pie del talud.

4.7.2. Remoción de materiales en la cabeza

La remoción de una suficiente cantidad de materiales en la parte superior del talud puede resultar en un equilibrio de fuerzas que mejore la estabilidad del talud. En la práctica este método es muy útil en fallas activas. La cantidad de material que se requiere depende del tamaño y características del movimiento y de la geotecnia del sitio.

4.7.3. Terrazas o bermas intermedias

La construcción de terrazas en la parte alta de un deslizamiento de rotación tiende a reducir el momento actuante y controlar el movimiento. Si el

proceso se hace en la parte inferior se puede lograr el proceso inverso de disminuir el factor de seguridad. En deslizamientos de traslación y en ciertos flujos o deslizamientos de residuos generalmente no es efectivo emplear métodos de remoción de materiales.

El efecto es el de disminuir las fuerzas actuantes, en la zona más crítica para la generación de momentos desestabilizantes. En esta forma el círculo crítico de falla se hace más profundo y más largo aumentándose el factor de seguridad. Al construir las terrazas el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, los cuales a su vez deben ser estables. El terráceo se le puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación.

La altura de las gradas es generalmente, de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial. El sistema de cunetas a su vez debe conducir a una estructura de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía.

En suelos residuales generalmente, la grada más alta debe tener una pendiente menor, teniendo en cuenta que el suelo subsuperficial es usualmente el menos resistente. Las terrazas generalmente, son muy útiles para control de aguas de escorrentía. En todos los casos debe considerarse el efecto que se puede tener sobre los taludes arriba y abajo de la terraza a excavar.

4.8. Diseños semiempíricos

Debido a las dificultades que existen para la utilización de diseños empleando el sistema tradicional clásico en taludes de zonas tropicales, se ha intentado formular reglas de diseño con base en la experiencia conocida. El

uso de este sistema semiempírico requiere de mucho cuidado, si la experiencia no proviene de la misma formación geológica en las mismas condiciones topográficas, climáticas y geotécnicas.

4.9. Diseño de terraplenes

Los terraplenes son estructuras muy susceptibles a problemas de deslizamientos y erosión debido a su bajo grado de cementación y a que generalmente su colocación genera una disminución del factor de seguridad del talud pre-existente, por aumento de los esfuerzos actuantes. Adicionalmente, se modifican las condiciones de humedad, la posición del nivel freático y se induce una superficie de debilidad en el contacto entre el terraplén y el suelo natural subyacente.

Para el diseño de terraplenes se deben tener en cuenta varios criterios:

- La pendiente y altura debe producir un talud topográficamente estable. Si esto no es posible se deben construir estructuras de contención para el terraplén.
- La compactación debe garantizar una resistencia interna suficiente.
- No deben bloquearse nacimientos de agua o zonas de humedad sin construir previamente un sistema de subdrenaje eficiente.
- El contacto entre el suelo subyacente y el terraplén debe ser discontinuo para impedir la formación de una superficie de debilidad. Si persiste la posibilidad de movimiento se deben diseñar y construir llaves de cortante debajo del terraplén.

- El peso del terraplén no debe superar la capacidad de soporte del suelo sobre el cual se coloca, ni producir deslizamiento del suelo subyacente. Para disminuir el peso del terraplén se puede requerir la utilización de materiales livianos para el relleno.

5. ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN O ANCLAJE

El propósito de una estructura de contención es el resistir las fuerzas ejercidas por la tierra contenida, y transmitir esas fuerzas en forma segura a la fundación o a un sitio por fuera de la masa analizada de movimiento. En el caso de un deslizamiento de tierra el muro ejerce una fuerza para contener la masa inestable y transmite esa fuerza hacia una cimentación o zona de anclaje por fuera de la masa susceptible de moverse. Las deformaciones excesivas o movimientos de la estructura de contención o del suelo a su alrededor deben evitarse para garantizar su estabilidad.

Deben diferenciarse dos condiciones de diseño de una estructuras de contención totalmente diferentes así:

La condición de talud estable, es el caso típico de muro de contención analizado en los textos de mecánica de suelos y fundaciones. Se supone que el suelo es homogéneo y se genera una presión de tierras de acuerdo a las teorías de Rankine o Coulomb y la fuerza activa tiene una distribución de presiones en forma triangular.

La condición de deslizamiento es en caso de que exista la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento o se trate de la estabilización de un movimiento activo, la teoría de presión de tierras de Rankine o de Coulomb no representa la realidad de las fuerzas que actúan sobre el muro y generalmente el valor de las fuerzas actuantes es muy superior a las fuerzas activas calculadas por teorías tradicionales. El hecho de que exista un deslizamiento o un factor de seguridad

bajo, equivale a que se han generado en el talud deformaciones que producen un aumento muy grande de fuerzas sobre la estructura a diseñar.

Es común que los muros o estructuras de contención fallen en el caso de deslizamientos a pesar de que fueron diseñados de acuerdo a un procedimiento universalmente aceptado.

El costo de construir una estructuras de contención es generalmente, mayor que el de conformar un talud, por lo tanto debe estudiarse con mucho cuidado su efectividad como método de estabilización y durante el diseño debe hacerse todo el esfuerzo por mantener su altura lo más baja posible. Existen varios tipos generales de estructura, y cada una de ellas tiene un sistema diferente de transmitir las cargas.

5.1. Muros masivos rígidos

Son estructuras rígidas, generalmente de concreto, las cuales no permiten deformaciones importantes sin romperse. Se apoyan sobre suelos competentes para transmitir fuerzas de su cimentación al cuerdo del muro y de esta forma generar fuerzas de contención.

5.1.1. Muro reforzado

Estos pueden emplearse en alturas grandes (superiores a diez metros), previo diseño estructural y estabilidad. Se utilizan métodos convencionales de construcción, en los cuales la mayoría de los maestros de construcción tienen experiencia. Requieren de buen suelo para la cimentación. Son antieconómicos en alturas muy grandes y requieren de formaletas especiales. Su poco peso los

hace inefectivos en muchos casos de estabilización de deslizamientos de masas grandes de suelo.

5.1.2. Muro de concreto simple

Relativamente simple de construir y mantener, pueden construirse en curvas y diferentes formas para propósitos arquitectónicos. Se requiere una muy buena fundación y no permite deformaciones importantes, se necesitan cantidades grandes de concreto y un tiempo de curado, antes de que puedan trabajar efectivamente. Son antieconómicos para alturas de más de tres metros.

5.1.3. Muro de concreto ciclópeo

Similares a los de concreto simple. Utilizan bloques o cantos de roca como material embebido, disminuyendo los volúmenes de concreto, tienen la deficiencia de no poder soportar esfuerzos de flexión grandes.

5.2. Presiones de tierra en condiciones estables

En el caso de un corte o terraplén donde no existe posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento grande masivo se acostumbra construir muros de contención para resistir las presiones generadas por la existencia de un talud de gran pendiente o semivertical. La necesidad del muro se debe a que dentro del suelo se generan unas presiones horizontales que puede inducir a la ocurrencia del derrumbamiento o deslizamiento de una cuña de suelo relativamente subsuperficial.

La presión lateral que actúa sobre un muro en condiciones de talud estable son una función de los materiales y las sobrecargas que la estructura

soportan, el nivel de agua freática, las condiciones de cimentación y el modo y magnitud del movimiento relativo del muro. Los esfuerzos que actúan sobre un elemento de suelo dentro de una masa pueden ser representados gráficamente por el sistema de Mohr, en el cual el estado de esfuerzo es indicado por un círculo y las combinaciones críticas del diagrama de Mohr representan la envolvente de falla. En general la envolvente de falla es curvilínea pero para minimizar los esfuerzos de cálculo se supone aproximada a una línea recta.

Existen tres tipos de presión de acuerdo a las características de deformación supuestas en la interacción suelo-estructura:

5.2.1. Presión en reposo

La presión en reposo se supone que ocurre cuando el suelo no se ha movido detrás del muro y se le ha prevenido de expandirse o contraerse. Es el caso por ejemplo, de un muro de concreto armado rígido o un muro rígido detrás del cual se ha colocado un relleno compactado. La Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong recomienda que todos los muros rígidos deben diseñarse para presiones de reposo.

5.2.2. Presión activa y presión pasiva

Los términos presión activa y presión pasiva son utilizados para describir las condiciones límite de las presiones de tierra contra la estructura. La presión activa es la presión lateral ejercida por el suelo detrás de la estructura cuando la pared se mueve suficientemente hacia fuera para alcanzar un valor mínimo. La presión pasiva es la presión lateral ejercida sobre la pared cuando el muro se mueve suficientemente hacia el suelo hasta que la presión alcanza un valor máximo.

Una condición especial de equilibrio es el estado de reposo en el cual el suelo no ha soportado ninguna deformación lateral. Dependiendo en la magnitud de la deformación que haya ocurrido el estado final de esfuerzo, la presión de reposo puede ser un valor intermedio entre la presión pasiva y la presión activa.

5.2.3. Presión de tierra en reposo

La presión de tierra en reposo es una función de la resistencia al cortante del suelo, su historia esfuerzo -deformación y su historia de meteorización. El valor de la presión de reposo solamente debe aplicarse para aquellas situaciones de diseño donde el muro no puede moverse lateralmente por ningún motivo. Para una superficie de tierra horizontal el coeficiente de presión de reposo se define como la relación entre el esfuerzo horizontal y el vertical efectivo, en el suelo bajo condiciones cero deformaciones.

5.3. Muros flexibles

Los muros flexibles son estructuras que se deforman fácilmente por las presiones de la tierra sobre ellas o que se acomodan a los movimientos del suelo. Los muros flexibles se diseñan generalmente, para resistir presiones activas en lo que se refiere a su estabilidad intrínseca y actúan como masas de gravedad para la estabilización de deslizamientos de tierra. Existen varios tipos de muros flexibles y entre ellos los más populares son los muros con gaviones.

5.4. Tierra reforzada

Los muros también pueden ser de tierra armada, que consisten en un relleno de suelo granular con láminas de refuerzo, que pueden ser metálicas o de elementos plásticos. Los muros en tierra armada consisten en la colocación de tiras o capas de refuerzo en el proceso de compactación de terraplenes con taludes de alta pendiente. El concepto fue introducido por Vidal en 1960.

5.5. Estructuras ancladas

El uso de anclajes de acero en la estabilización de taludes se ha vuelto muy popular en los últimos años. Las estructuras ancladas incluyen los pernos metálicos utilizados para sostener bloques de roca, las estructuras con tendones pretensionados, anclados en el suelo y los tendones pasivos no pretensionados.

Por lo tanto las estructuras ancladas más utilizadas son los muros de concreto armado con refuerzo del suelo mediante anclajes pasivos y en los muros de concreto armado con refuerzo del suelo mediante anclajes activos.

5.6. Estructuras enterradas

Las estructuras enterradas son elementos capaces de resistir esfuerzos a flexión que se colocan dentro del suelo atravesando la posible superficie de falla. Estas estructuras trabajan empotradas en el suelo por debajo de la falla. Tales como las tablestacas, muros de pilotes y otros.

6. INSTRUMENTACIÓN DE TALUDES

Cuando se presentan signos de inestabilidad en un talud; grietas o roturas en la parte superior, abultamientos y levantamientos en la zona del pie, entre otros; o cuando se precisa controlar el comportamiento de un talud frente a la estabilidad, se recurre a la instrumentación o auscultación del talud y su entorno, a fin de obtener información sobre el comportamiento del mismo y las características del movimiento: velocidad, pautas en los desplazamientos, situación de las superficies de rotura, presiones de agua, entre otros.

El control de la velocidad del movimiento permite conocer el modelo de estabilización; en ocasiones se puede predecir aproximadamente cuándo tendrá lugar la falla del talud, en base al registro de la curva de desplazamiento-tiempo y su extrapolación en el tiempo tal como se muestra en la figura 3.

En general, debido fundamentalmente al costo que suponen los trabajos de auscultación y la instrumentación necesaria para ello, estos trabajos se suelen limitar a casos en los que la inestabilidad puede afectar a infraestructuras o edificaciones.

Para llevar a cabo la auscultación de un talud es necesaria la selección de las magnitudes a medir, de los puntos de medida y de los instrumentos adecuados, además de una correcta instalación, registro e interpretación de las medidas obtenidas.

La instrumentación permite comprobar el comportamiento del talud y verificar los modelos y análisis de estabilidad realizados. Previamente a los

trabajos de instrumentación, es necesario conocer las características y propiedades de los materiales que forman el talud, mediante un estudio previo con observaciones de campo, toma de datos, realización de ensayos de laboratorio, análisis de estabilidad, y otros.

Figura 3. **Fases de evolución de un deslizamiento y predicción teórica de la rotura final**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*. p. 7.

Las magnitudes que habitualmente se miden en los trabajos de auscultación son:

- Movimientos superficiales.
- Movimientos en el interior del terreno.
- Movimientos de apertura de grietas y entre bloques.
- Presiones intersticiales y sus variaciones.
- Empujes del terreno sobre elementos de construcción.

Tabla I. **Técnicas y métodos de instrumentación geotécnica**

Magnitud medida	Métodos	Equipos
Desplazamiento entre puntos próximos	Con sistema de lectura mecánico	Cinta de convergencia
		Cinta métrica
		Calibre
		Flexiómetro
	Con sistema de lectura eléctrico	Potenciómetro
		LVDT
Cuerda vibrante		
Desplazamientos superficiales	Métodos geodésicos, nivelación y colimación	Topográficos y DGPS
Desplazamientos en profundidad	Inclinómetro	Cuerda vibrante y otros
	Extensómetro	De hilos o varillas
		De lectura mecánica
Presión intersticial	Piezómetros abiertos	Tubería aislada
	Piezómetros cerrados	Cuerda vibrante y otros
	Tubería piezométrica ranurada	Tubería abierta
Presiones	Células de presión total	Transductor de presión neumático
		Transductor de presión hidráulico
		Transductor de presión eléctrico
	Células de carga	Mecánicas
		Hidráulicas
		Eléctricas

Fuente: elaboración propia.

La medida de desplazamientos en superficie y en el interior del terreno permite detectar el movimiento de una zona determinada del talud o de todo él en conjunto, y conocer la dirección y velocidad del mismo. Cada problema a controlar tiene sus particularidades, y por lo tanto la elección del método más adecuado y la ubicación de los equipos de medida en los taludes se deberán tratar de forma individual y ser definidos por personal especializado. Los sistemas de desplazamientos en superficie estarán condicionados por la precisión que se pretenda y por la magnitud de los movimientos.

Los movimientos en el interior del terreno se miden con inclinómetros y extensómetros. Además de ser útiles para la medida de la velocidad y dirección del movimiento, estos sistemas permiten localizar las superficies de falla. Otros métodos válidos para definir los planos de falla son los pozos de revestimiento discontinuo (para permitir su deformación) y la introducción de testigos en sondeos entubados, con la finalidad de localizar el punto de atranque de los mismos en la zona de rotura. La utilización de diagráfias radiactivas permite la obtención de registros de zonas con diferentes características, como la densidad o el contenido en agua de las formaciones, que pueden ayudar a la definición de los planos de falla.

Otras técnicas geofísicas también pueden ser de ayuda para la localización de zonas de debilidad y discontinuidad en el interior de los taludes.

La medida de movimientos de apertura de grietas y entre bloques rocosos se suele realizar mediante elementos mecánicos (calibre, cinta métrica, hilos, y otros) o mediante transductores eléctricos; para desplazamientos grandes se emplea cinta de convergencia.

La medida de presiones intersticiales en el interior de un talud se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetros o de tuberías ranuradas en sondeos o pozos de reconocimiento; el control de las presiones sobre muros de contención y fuerzas de anclaje se realiza instalando células de carga en el contacto entre estos elementos y el talud.

La frecuencia en las lecturas y la recogida de datos depende de las magnitudes a medir y la velocidad del proceso a controlar. Las lecturas pueden ser manuales o automáticas. Las primeras están indicadas en los casos en que el número de sensores o puntos de registro sea pequeño, la periodicidad en la toma de datos sea semanal o mayor y los puntos de lectura sean fácilmente accesibles.

La elección del sistema de toma de datos viene condicionada por el número de sensores y características de los mismos, frecuencia de lecturas, número de datos a tratar, rapidez con la que ha de realizarse el tratamiento e interpretación, situación y accesibilidad del lugar y ubicación de los sensores.

6.1. Topografía

La topografía, siempre ha sido una herramienta muy útil en la ingeniería, más aún si permite determinar la posición exacta de las estructuras con el paso del tiempo, para así poder determinar con exactitud algún tipo de movimiento, o bien deslizamiento, a tiempo o poder garantizar que no ha existido alguno.

6.1.1. Método geodésico

Este tipo de método permite medir movimientos horizontales y verticales, obteniendo una precisión media del orden del centímetro. Se pueden utilizar tres sistemas:

- Triangulación, es la medida de ángulos desde dos o más bases fijas.
- Trilateración, se refiere a la medida de distancias desde tres o más bases fijas.
- Poligonación, es la medida de ángulos y distancias desde al menos tres bases fijas.

6.1.2. Nivelación

Este método mide movimientos verticales, obteniendo precisiones de hasta 1 milímetro en itinerarios de 1 kilómetro. La medida de dichos movimientos se efectúa respecto a bases de referencia fijas, y el procedimiento de lectura y tratamiento de datos es rápido y sencillo.

6.1.3. Colimación

Con este método se miden movimientos horizontales perpendiculares al plano de colimación. La medida de movimientos horizontales de los puntos de control se realiza respecto a un plano vertical de colimación fijo. La precisión obtenida es alta, de orden milimétrico, y el procedimiento de lectura y tratamiento de datos es rápido y sencillo.

En cualquiera de los tres sistemas es importante asegurar que las bases topográficas o de referencia sean fijas y estén fuera de zonas inestables.

6.2. Medidor superficial de inclinación

En algunos casos para el control de movimientos entre puntos próximos situados en superficie o sobre la corona de un talud. Siempre y cuando sean de puntos de fácil acceso. Se pueden utilizar los siguientes métodos:

6.2.1. Equipos con sistema de lectura mecánico

Los sensores empleados son los siguientes: cinta de convergencia, cinta métrica, calibre y flexiómetro. La cinta de convergencia es recomendable para distancias mayores de 2 metros. Para distancias inferiores se utilizan los otros sistemas en función de la precisión que se necesite; para poca precisión, la cinta métrica; para precisión media, el calibre; para precisión alta el flexiómetro.

Figura 4. **Cinta extensométrica**



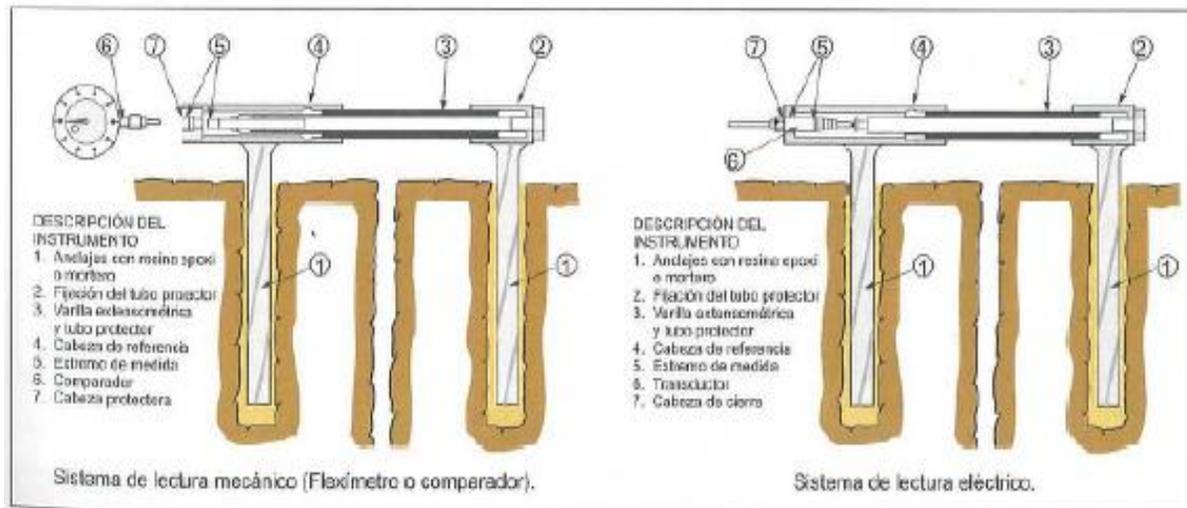
Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*. p. 28.

6.2.2. Equipos con sistema de lectura eléctrico

Son indispensables para automatizar el proceso de registro de datos o cuando los puntos a controlar no sean accesibles. En la figura 5 se muestra un esquema del equipo. Los sensores de medida pueden ser los siguientes: potenciómetro, LVDT y cuerda vibrante.

Para rangos de varios centímetros serán preferibles los potenciómetros, para rangos de pocos milímetros, los potenciómetros o LVDT, y para rangos de décimas de milímetro, los sensores de cuerda vibrante.

Figura 5. Medidores de desplazamiento, mecánicos y eléctricos



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

6.3. GPS diferencial

El GPS diferencial consiste en la utilización de un receptor móvil y una o varias estaciones, de referencia situadas en coordenadas conocidas con gran exactitud. La estación de referencia comprueba todas las medidas a los satélites en una referencia local sólida, y obtiene en tiempo real las coordenadas de ese punto, cuyos valores ya se conocían con exactitud a priori. Compara resultados y a partir de ello calcula los errores del sistema en tiempo real y transmite por algún sistema (satélite, radio, TCP/IP, GSM o UMTS) dichas correcciones al receptor móvil, que deberá de disponer de un módulo con la capacidad de captar estas correcciones y recalcular su posición.

Existen dos formas básicas de aplicar las correcciones diferenciales:

6.3.1. Postprocesado

El GPS debe ir conectado a un ordenador que contenga un software capaz de capturar la información del receptor. Esta información es almacenada y posteriormente debe ser procesada y comparada con los datos de la estación de referencia.

6.3.2. Tiempo real

Consiste en el uso de un enlace entre la estación base y el GPS. La corrección es aplicada a los datos que recibe el GPS en tiempo real. Los formatos actuales que se utilizan para enviar correcciones en tiempo real son: RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Service*) en sus formatos 2,3 o 3,0, CMR (*Compact Measurement Record*), o CMR+, de la empresa Trimble y Leica de la empresa del mismo nombre. También existe el protocolo NTRIP

(*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*), que se encarga de enviar las correcciones RTCM vía internet y ha sido desarrollado por el BKG junto con la universidad de Dortmund.

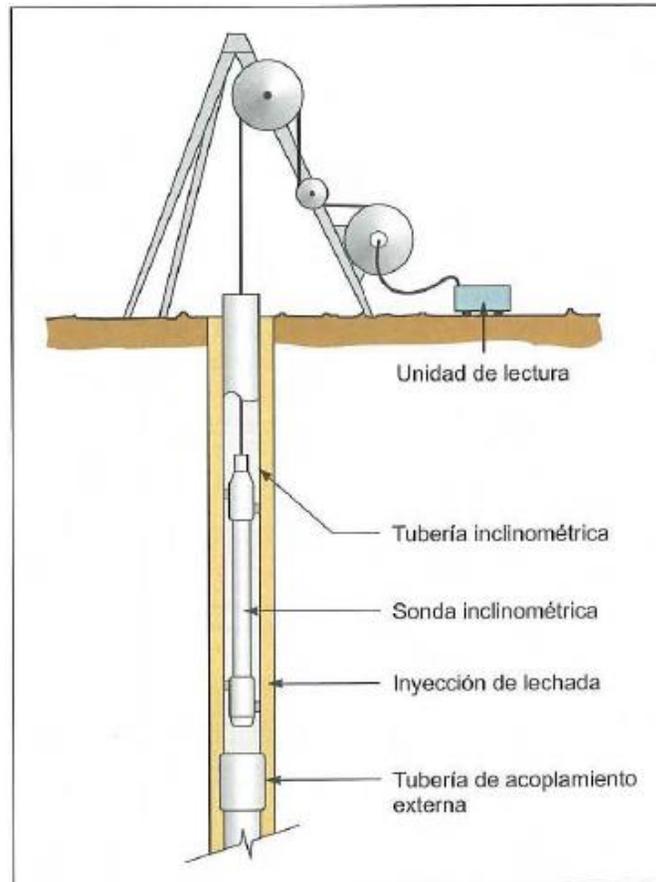
El empleo de este sistema en tiempo real es lo más empleado en la actualidad, no solo para posicionamientos, sino sobre todo en navegación.

Las correcciones son más precisas conforme más cerca este el receptor móvil a la estación de referencia, es lógico, porque ambas medidas estarán afectadas por los mismos errores atmosféricos y tendrán en vista los mismos satélites.

6.4. Inclínómetros

Los inclinómetros constituyen uno de los principales métodos de investigación de deslizamientos y, en general, de control de movimientos transversales de un talud. Consisten en la medida de inclinaciones en diversos puntos en el interior de un sondeo mediante una sonda que transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación. Las diferencias entre las medidas realizadas en diversos puntos y los tiempos que se toman las medidas, permiten conocer y cuantificar los movimientos transversales al sondeo. En la figura 7, se muestra un ejemplo de las lecturas tomadas por un inclinómetro, en las que se detectan dos superficies de rotura o de falla de un talud, situadas a los 7,5 y 17 metros de profundidad.

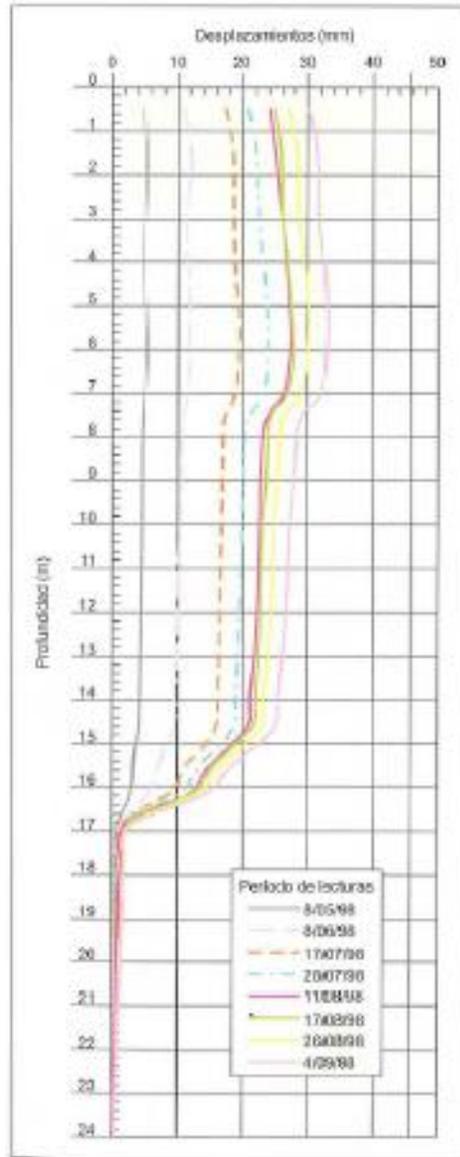
Figura 6. **Esquema de inclinómetro**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

Los inclinómetros pueden ser de resistencia eléctrica, de cuerda vibrante y servoacelerómetros, alcanzando este último una precisión en la medida de giros de 2×10^{-4} radianes. Es importante asegurarse que el inclinómetro se instale por debajo de la probable superficie de falla.

Figura 7. **Lecturas inclinométricas**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

Figura 8. **Sonda inclinométrica y caja de toma de datos**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

6.5. **Extensómetros**

Miden movimientos entre dos puntos, uno situado en la parte superior del sondeo y otro situado en su interior, al que se fija mediante un anclaje. Los desplazamientos de los puntos de anclaje se transmiten al emboquille del sondeo mediante hilos o varillas, midiéndose dichos desplazamientos por procedimientos mecánicos o eléctricos.

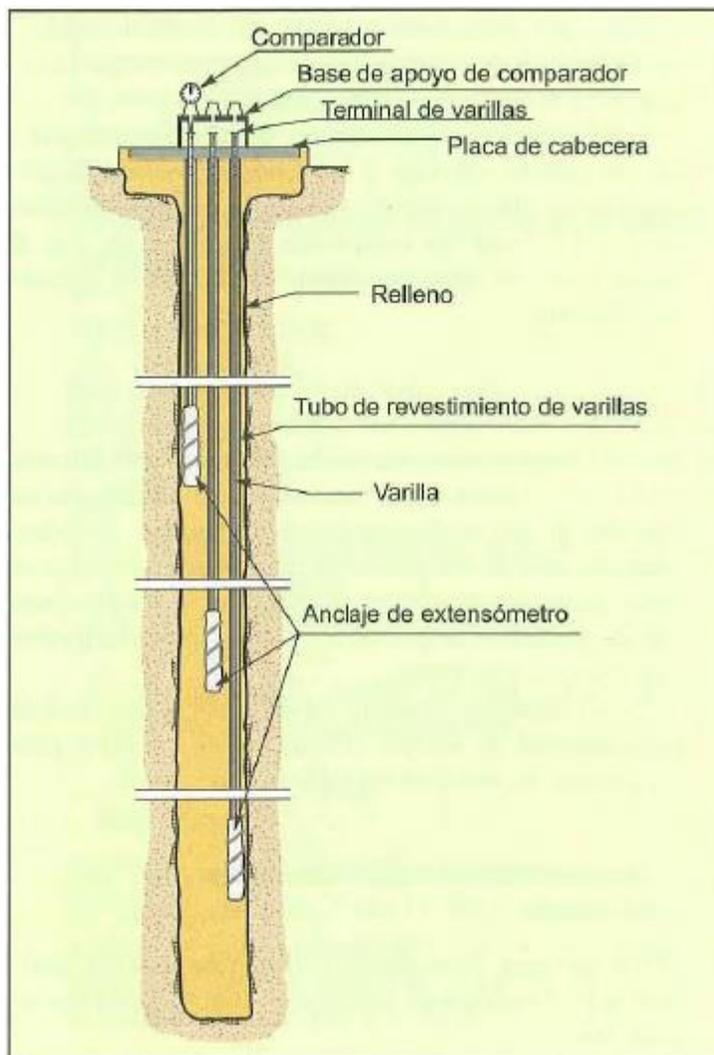
Figura 9. **Extensómetro de varillas**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

Para longitudes menores de 40 metros se utiliza el extensómetro de varillas y para longitudes mayores de 60 metros el de hilos.

Figura 10. **Esquema de instalación de extensómetro de varillas de tres anclajes**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

6.6. Tubos piezométricos

Como su nombre indica, un tubo en el que, estando conectado por uno de los lados a un recipiente en el cual se encuentra un fluido, el nivel se eleva hasta una altura equivalente a la presión del fluido en el punto de conexión u orificio piezométrico, es decir, hasta el nivel de carga del mismo.

6.6.1. Tubería piezométrica ranurada

Consiste en la instalación de una tubería de PVC, ranurada y abierta en sus dos extremos, colocada a lo largo de todo el sondeo. En el interior de la tubería se mide la altura que alcanza el agua, generalmente varias horas después de la perforación y a lo largo de días o períodos más largos. El control del nivel de agua en sondeos es de gran importancia y su medida, tanto durante la perforación como a lo largo del tiempo después de finalizada, permite obtener información muy significativa sobre el tipo de acuífero y sus implicaciones en la permeabilidad del terreno y otros problemas hidrogeológicos y geotécnicos.

La altura media representa la profundidad del nivel freático, que corresponderá a la altura piezométrica solo si el terreno atravesado es un acuífero libre, en régimen estacionario, de alta permeabilidad, homogéneo e isótropo. Deben tenerse en cuenta estas condiciones con el fin de no interpretar erróneamente niveles freáticos y piezométricos.

6.6.2. Piezómetro abierto

Consiste en aislar un tramo de sondeo, mediante tapones bentónicos, e instalar una tubería ranurada exclusivamente en el citado tramo y abierta en su

extremo superior, midiendo la altura del agua correspondiente a dicho tramo o altura piezométrica del mismo.

6.6.3. Piezómetro cerrado

El procedimiento consiste en instalar un sistema de lectura o transductor en un punto previamente aislado de un sondeo, registrándose la presión intersticial en dicho punto que se trasmite a una unidad de lectura situada en el exterior del sondeo.

Figura 11. **Piezómetros cerrados con transductores de cuerda vibrante**



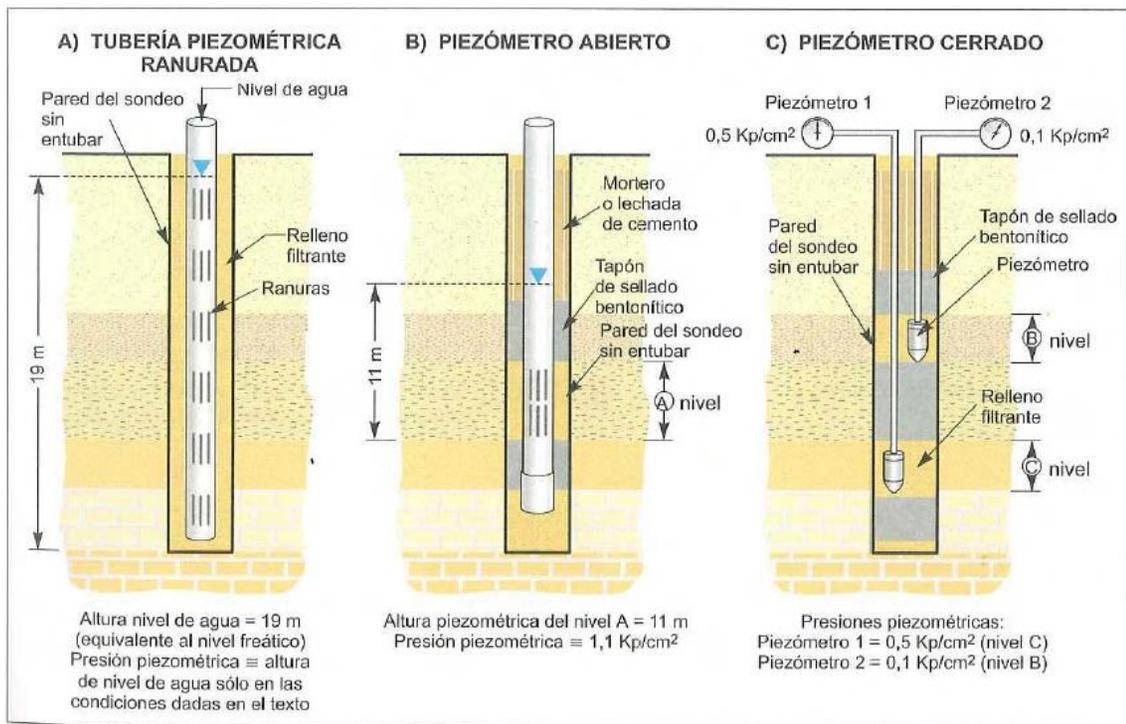
Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

El transductor puede ser neumático, de resistencia eléctrica o de cuerda vibrante. Los neumáticos, situados entre el sensor y la unidad de lectura están indicados para distancias menores de 200 metros siempre que no se requiera automatizar el proceso de medida. Los transductores de resistencia eléctrica pierden precisión con las variaciones de temperatura. Los de cuerda vibrante

permiten transmitir la señal a distancias de más de 1 000 metros sin pérdida de precisión.

Este tipo de piezómetros se utiliza en terrenos poco permeables debido a que su tiempo de respuesta es corto. Permiten, además, la lectura de las presiones intersticiales en varios tramos o niveles dentro del mismo sondeo. Tienen la ventaja de quedar menos afectados por los posibles movimientos del terreno. Sin embargo, suponen un mayor coste que los piezómetros abiertos.

Figura 12. Tipos de piezómetro



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

6.7. Medida de presión en taludes

La medida de presiones debidas a cargas o empujes, tanto del terreno como de las estructuras, se realiza mediante células de presión total. En el caso de medida de tensiones o cargas transmitidas a anclajes se utilizan células de carga.

6.7.1. Células de presión total

Consisten en dos placas de acero soldadas rellenas en su interior de un fluido de tipo aceite o mercurio. La presión que el terreno ejerce sobre las células, es transmitida por el fluido hasta un transductor de presión que puede ser neumático, hidráulico o eléctrico.

Las células de presión total se aplican en terraplenes experimentales para control de precargas, estructuras de contención y revestimiento en túneles.

6.7.2. Células de carga

Se instalan en anclajes para medir tensiones transmitidas al terreno así como la propia tensión de anclaje. Los puntos de medida se sitúan entre la cabeza del anclaje y el terreno. Estas células pueden ser de varios tipos:

- Mecánicas, en donde las deformaciones se miden directamente con una regla o comparador.
- Hidráulica en esta las deformaciones se miden con células que contienen una cámara de aceite y que transmiten la carga a un transductor.

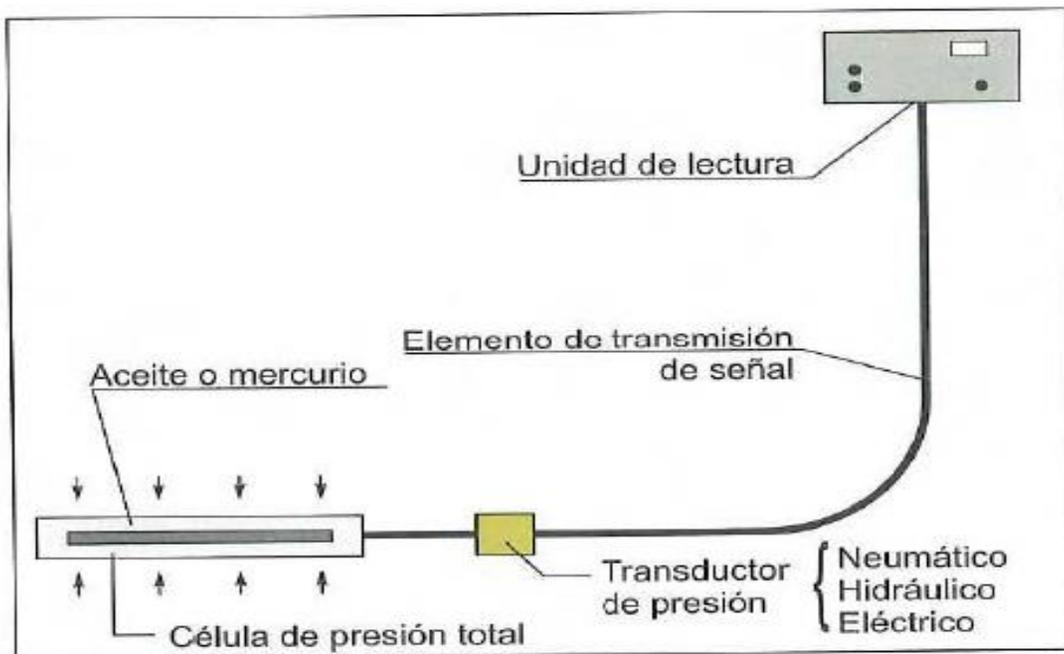
- Eléctricas las cuales son células cilíndricas metálicas cuya deformación se transmite a sensores eléctricos.

Figura 13. **Célula de presión total**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica.*

Figura 14. **Esquema de célula de presión total**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica.*

Figura 15. **Célula de carga de cuerda vibrante**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO. *Ingeniería Geológica*.

7. APLICACIÓN

Para demostrar la utilidad de los sistemas de instrumentación y monitoreo geotécnico, se presenta el caso del muro anclado en el kilómetro 10+500, de la ruta departamental GUA-1, que conduce de la ciudad de Guatemala hacia Boca del Monte, Villa Canales, Guatemala.

En este sector durante mucho tiempo, se han presentado problemas de inestabilidad en este tramo ya que es una de las rutas más transitadas de acceso a la ciudad de Guatemala.

7.1. Estudio geotécnico

El estudio se centró en la determinación de las características geotécnicas de los materiales del sitio por lo que se realizó una perforación con barrenas helicoidales hueca, realizando ensayos de penetración estándar y también se tomaron muestras inalteradas en el talud, todo esto con la finalidad de determinar la profundidad y condiciones de la roca existente, y la tipología del suelo, la determinación del nivel freático, así como también las características geomecánicas de toda el área a ser tratada.

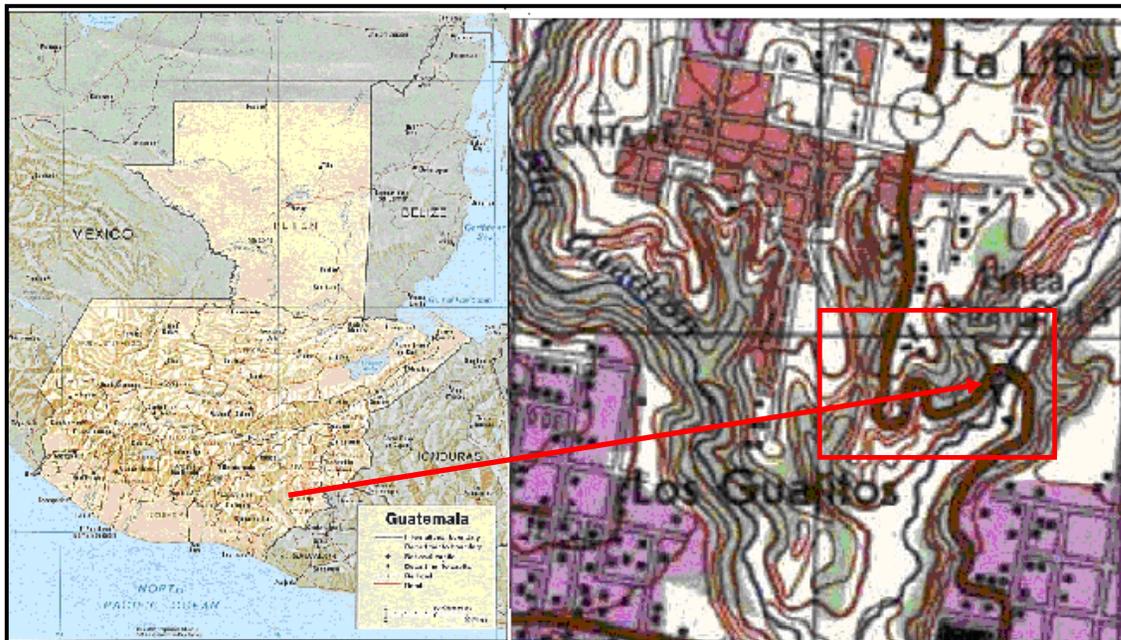
7.1.1. Ubicación del sitio del muro monitoreado

Este muro se ubica al SW de la República de Guatemala (aproximadamente al N 14° 33' 29" W 90° 31' 48" GEO y N1610200 y W 766154 UTM), en la ciudad Guatemala, departamento de Guatemala, al sur de la sierra de Los Cuchumatanes, en la parte central del cinturón volcánico. Para

acceder al sitio del proyecto se dispone de una vía asfaltada, se tiene acceso a ella a través de la avenida Hincapié. En ciudad de Guatemala zona 13 hasta el kilómetro 10,5. Lugar en donde se encuentra el proyecto, Talud en Boca del Monte.

La siguiente figura presenta un esquema de la localización del sitio del proyecto.

Figura 16. **Ubicación del proyecto**



Fuente: elaboración propia, con programa de Auto CAD 2012

7.1.2. **Perforación geotécnica**

El sondeo a rotación fue efectuado por Rodio - Swissboring Guatemala S. A. Para la ejecución de los mismos se utilizó una perforadora Mobil drill B-57 montada sobre camión de motor diesel. La perforadora está equipada con

barras para alcanzar profundidades de 30 metros. La perforación será realizada utilizando barrenos helicoidales huecos (*hollow stem augers*), (diámetro exterior 165 milímetros, diámetro interno 82 milímetros) el muestreo SPT se realiza a través de las barras garantizando estabilidad de los taladros.

Las muestras alteradas obtenidas de la cuchara partida del SPT, Son colocadas dentro de bolsas herméticas debidamente selladas y rotuladas.

Con las muestras obtenidas de los ensayos de penetración estándar, se realizó identificación visual de los materiales, caracterización geotécnica de suelo, profundidad, tipo y condiciones de roca.

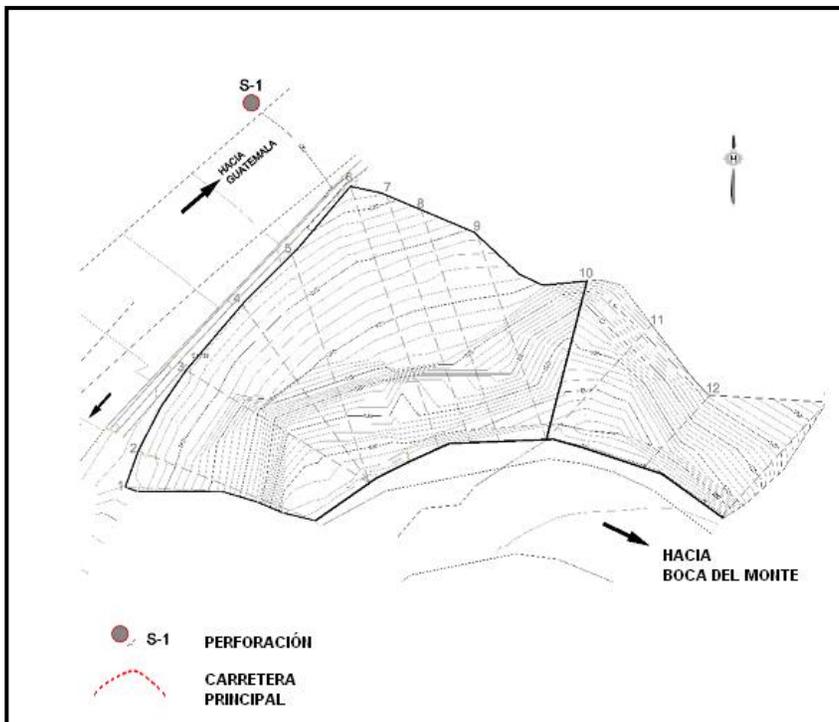
Figura 17. **Camión perforador en ejecución de sondeo**



Fuente: Kilómetro 10+500, ruta departamental, GUA-1.

El sondeo alcanzo profundidad de 27,81 metros, lineales de perforación. La ubicación de la perforación dentro del sitio se muestra en la figura 18. La ubicación y profundidad del sondeo fueron determinadas y condicionadas por las características del lugar y la disponibilidad de espacio, ya que por ser una carretera bastante transitada se tuvo que ubicar el camión en un sitio que no interrumpiera el tráfico. La figura siguiente muestra un esquema con la ubicación de los sondeos.

Figura 18. **Ubicación del sondeo en el área del talud**



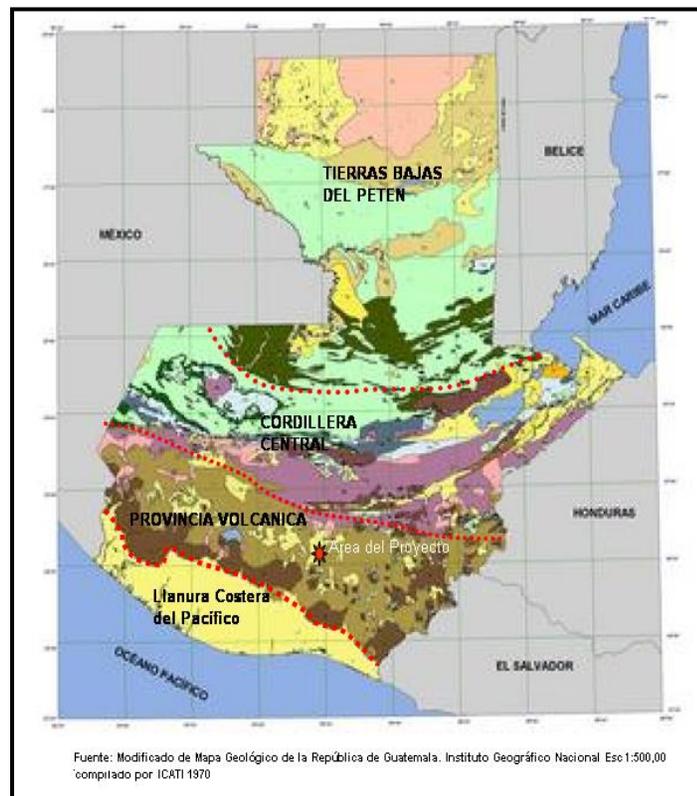
Fuente: elaboración propia.

7.1.3. Marco geológico

Guatemala está dividida en cuatro provincias fisiográficas, que caracterizan la disposición física de las formaciones geológicas con relación a la tectónica regional y al relieve topográfico, las provincias de sur a norte son:

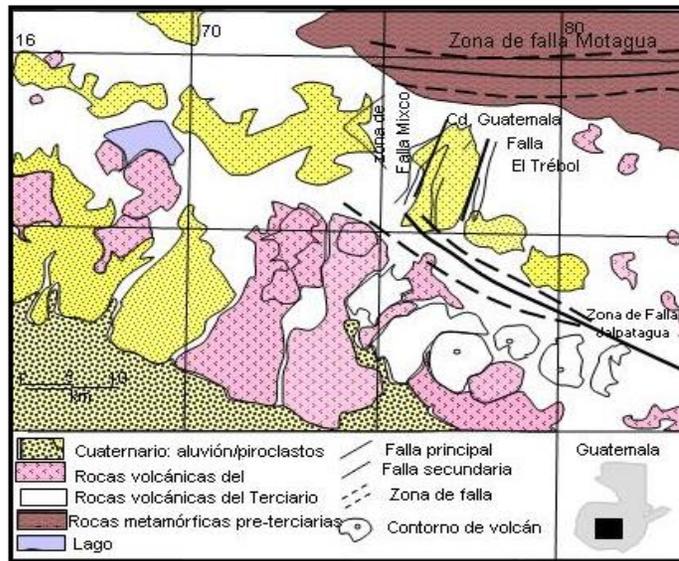
- Tierras bajas del Petén
- Cordillera central
- Provincia volcánica
- Llanura costera del pacífico

Figura 19. **Provincias fisiográficas de la República de Guatemala**



Fuente: ICATA, 1987.

Figura 20. **Mapa geológico regional**



Fuente: basado en el mapa geológico de Guatemala (escala 1 : 250 000).

7.1.3.1. **Estructura del valle de Guatemala**

Bajo el valle de la ciudad de Guatemala ha sido formado como una estructura tipo *pull apart basin*, delimitado al norte por la falla del Motagua, al sur por la falla de Jalpatagua y en el centro se ha generado la zona de distensión que formó la depresión en la que se encuentra la ciudad. La zona de distensión, primero fue aprovechada por la actividad volcánica representada por los volcanes Pinula y el Naranjo. Al continuar los movimientos tectónicos colapsaron las estructuras volcánicas formando el sistema de fallas de Mixco, cuyas trazas se evidenciaron en superficie durante el terremoto de 1976. Estas estructuras han sido cubiertas por un potente espesor de materiales piroclásticos que han encubierto y ocultado su origen.

7.1.4. Descripción del sondeo SBM-1

Posterior a la realización de sondeo SBM-1, y a la obtención de muestras alteradas, se analizan debidamente y se determinan las características físicas de la siguiente manera:

1,05-1,50 metros: limos y arcillas limosas, de coloración café claro, de baja plasticidad, humedad baja a media, muy firme.

2,55-3,00 metros: arenas bien gradadas de coloración beige, con fragmentos de grava de hasta 2 centímetros de espesor, bajo contenido de humedad, densa.

4,05-4,50 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava y limos, bajo contenido de humedad, densa.

5,55-6,00 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, mezcla de arena fina mal gradada, con gravas de color beige, con contenido bajo a moderada humedad, muy densa.

7,05-7,31 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, mezcla de arena fina mal gradada, con grava de hasta 5 centímetros de espesor, con contenido bajo de humedad, densa.

8,55-8,99 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava de hasta 2 centímetros, mal gradada, bajo contenido de humedad, muy densa.

10,05-10,22 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava de hasta 5 centímetros, mal gradada, bajo contenido de humedad, muy densa.

11,55-11,82 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava de hasta 2 centímetros de espesor, baja humedad, muy densa.

13,05-13,25 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava de hasta 2 centímetros de espesor, baja humedad, densa.

14,55-14,67 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, con fragmentos de grava de hasta 2 centímetros de espesor, baja humedad, densa.

16,05-16,07 metros: limos, arcillosos, finos de color marrón, de baja plasticidad, contenido bajo de humedad, muy blando.

17,55-17,65 metros: arena pomácea, finas, amarillenta a beige, con 5 por ciento de fragmentos de gravas, bajo contenido de humedad, muy suelta.

19,05-19,17 metros: arena pomácea, finas, amarillenta a beige, con 5 por ciento de fragmentos de gravas, bajo contenido de humedad, muy suelta.

20,55-20,67 metros: arena pomácea, amarillenta a beige, finas, con 5 por ciento de fragmentos de gravas, bajo contenido de humedad, muy suelta.

22,05-22,19 metros: arena pomácea, de color amarillento a beige, bajo contenido de humedad, mal gradada, densa.

24,55-24,80 metros: arena pomácea, de color amarillento a beige, bajo a moderado contenido de humedad, mal gradada, densa.

27,55-27,81 metros: arena pomácea, de color amarillento a beige, con fragmentos de Pumita tamaño grava de hasta 1 centímetro de espesor, de bajo contenido de humedad, densa.

7.1.5. Ensayos de laboratorio

Se obtuvieron 5 muestras inalteradas, en el área del talud, para realizarles ensayos de laboratorio, las cuales fueron seleccionadas por el consultor e incluyeron, resultados de análisis granulométrico por tamices, y de compresión triaxial TX/UU, Círculos de Mohr, con la finalidad de determinar la resistencia de la muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las características existirán en terreno producto de la aplicación de una carga.

Figura 21. Ubicación de la muestra 1A y 2A al noroeste del talud

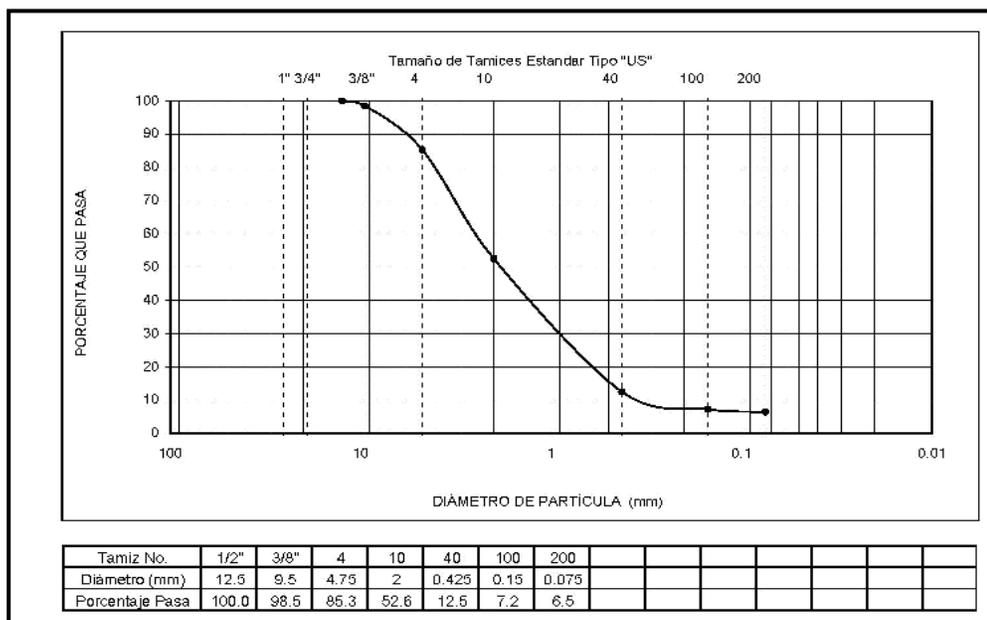


Fuente: Kilómetro 10+500, ruta departamental, GUA-1.

7.1.5.1. Muestra M-1 A

Muestra inalterada, obtenida a 6,00 metros de profundidad, se clasifica como arena pómez, café claro mal graduada con limo (SP-SM), además de la granulometría determinamos los siguientes valores; 15 por ciento de grava, 79 por ciento de arena y 6 por ciento de finos. El contenido de humedad es del 62,7 por ciento. Y según la clasificación mediante los límites de Atterberg es SP-SM, una arena limosa mal graduada con gravas.

Figura 22. Análisis granulométrico por tamices, M-1 A

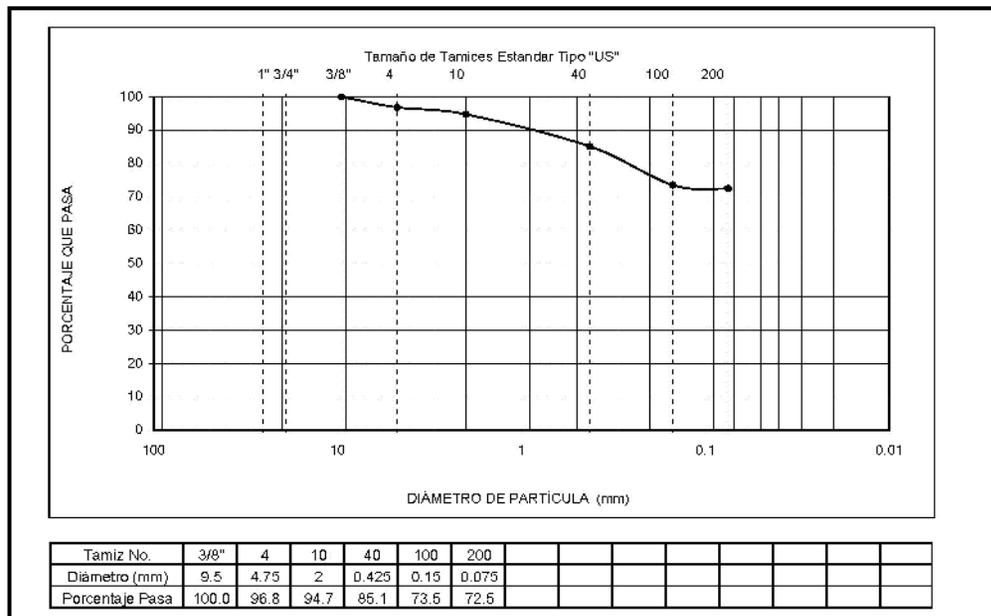


Fuente: elaboración propia.

7.1.5.2. Muestra M-2 A

Muestra inalterada, obtenida a una profundidad de 6,00 metros, clasificada como limo arenoso, café con pomez (ML), y cuya granulometría nos dice que está compuesta por 3 por ciento de grava, 24 por ciento de arena y 72 por ciento de finos. Asimismo, el contenido de humedad es de 28,7 por ciento y según los límites de Atterberg es ML, es decir, limos inorgánicos, o limos arenosos o limos arcillosos.

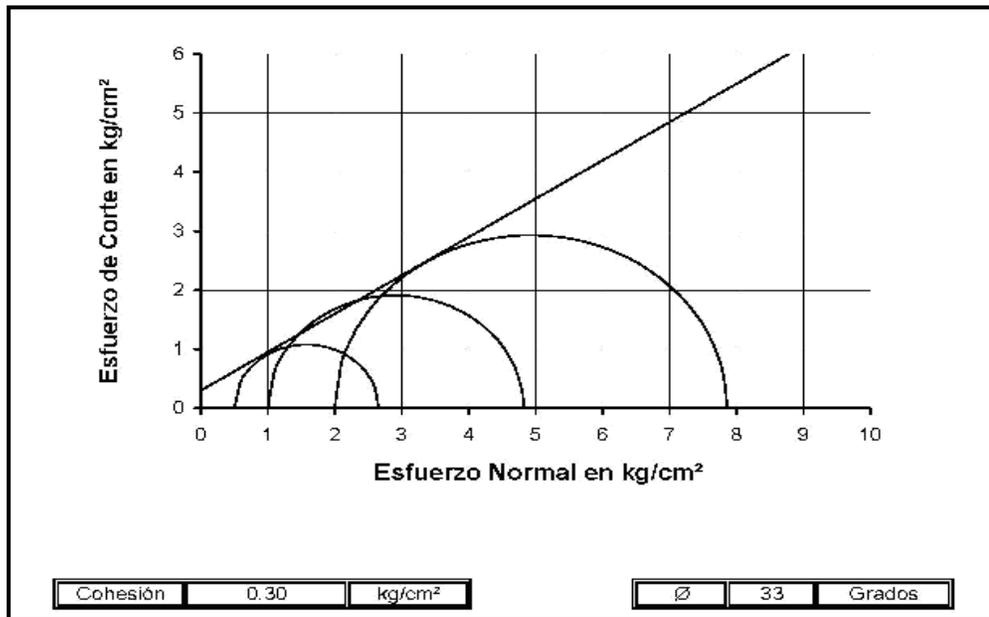
Figura 23. Análisis granulométrico por tamices, M-2 A



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado el ensayo de compresión triaxial, y la gráfica de círculos de Mohr, se puede observar el peso unitario húmedo de 1,47 toneladas por metro cúbico, en donde la cohesión es equivalente a 0,30 kilogramos por centímetro cuadrado con un ángulo de 33 grados.

Figura 24. **Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-2 A**



Fuente: elaboración propia.

7.1.5.3. **Muestra M-3 A**

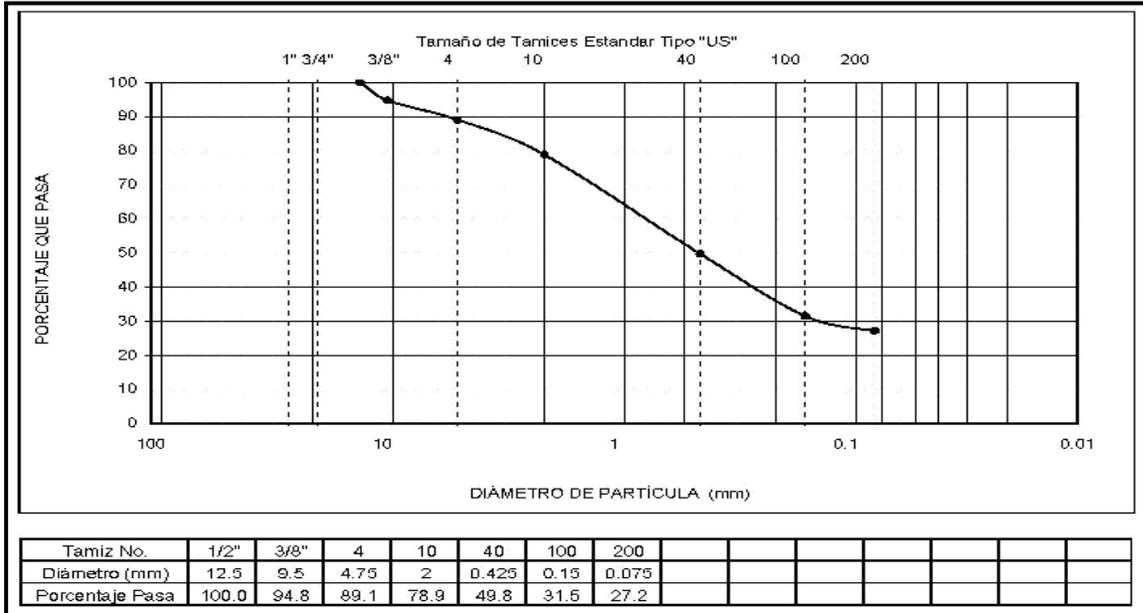
Muestra inalterada, obtenida a una profundidad de 18,00 metros. De esta se determinó que es una arena limosa, café claro con grava de pómez (SM), según la granulometría se determinó que el 11 por ciento es grava, 62 por ciento es de arena y 27 por ciento son finos. El contenido de humedad es del 18,2 por ciento y según la clasificación de suelos basado en los límites de Atterberg, este es un SM, que se encuentra en la clasificación de las arenas limosas, mezclas de arena y limo.

Figura 25. **Ubicación de la muestra 3 en talud**



Fuente: Kilómetro 10+500, ruta departamental, GUA-1.

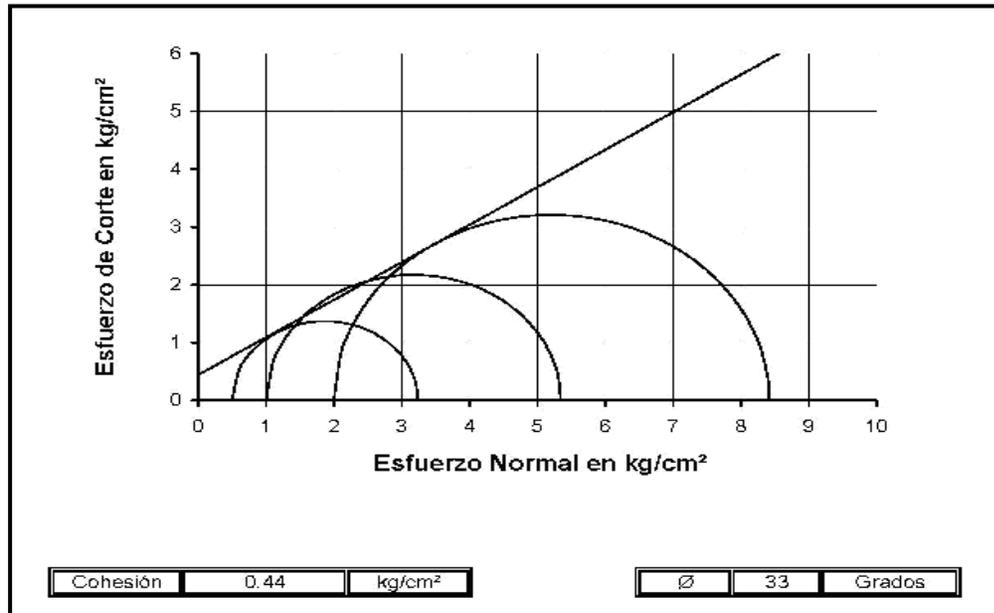
Figura 26. Análisis granulométrico por tamices, M-3 A



Fuente: elaboración propia.

En el ensayo de compresión triaxial, de círculos de Mohr, se puede observar el peso unitario húmedo de 1,33 toneladas por metro cúbico, en donde la cohesión es equivalente a 0,44 kilogramos por centímetro cuadrado con un ángulo de 33 grados.

Figura 27. **Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-3 A**



Fuente: elaboración propia.

7.1.5.4. **Muestra M-1 B**

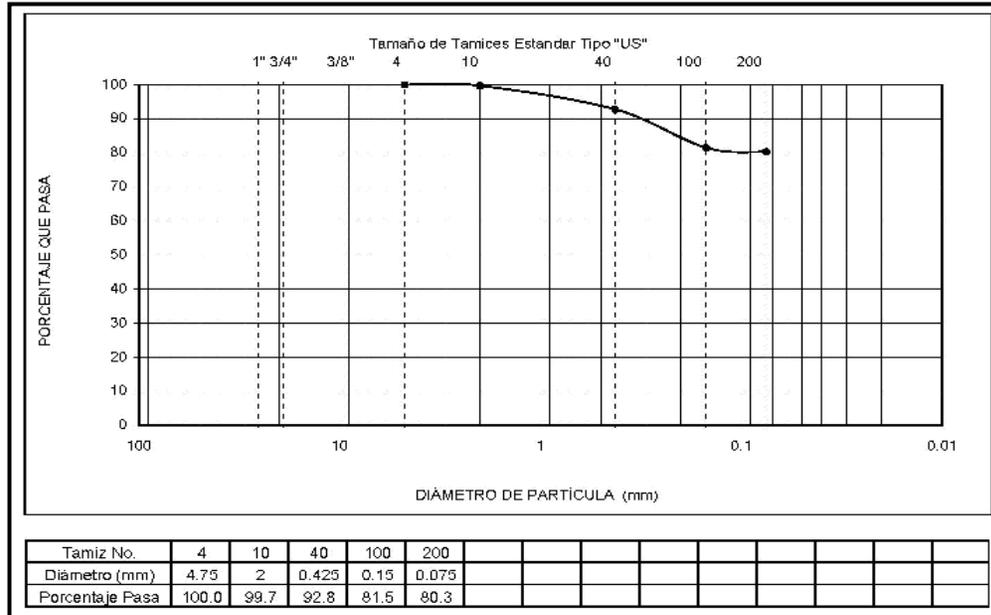
Muestra inalterada, obtenida a la profundidad de 4,50 metros, siendo caracterizada como limo arenoso, café (ML), con una granulometría que nos indica que contiene 0 por ciento de grava, 20 por ciento de arena y 80 por ciento de finos. La humedad se determinó en un 50 por ciento y las características según el sistema de clasificación de suelos basado en los límites de Atterberg, como ML que se encuentra en la clasificación de las de limos inorgánicos, limos arenosos o arcillosos.

Figura 28. **Ubicación de la muestra 4 en talud**



Fuente: Kilómetro 10+500, ruta departamental, GUA-1.

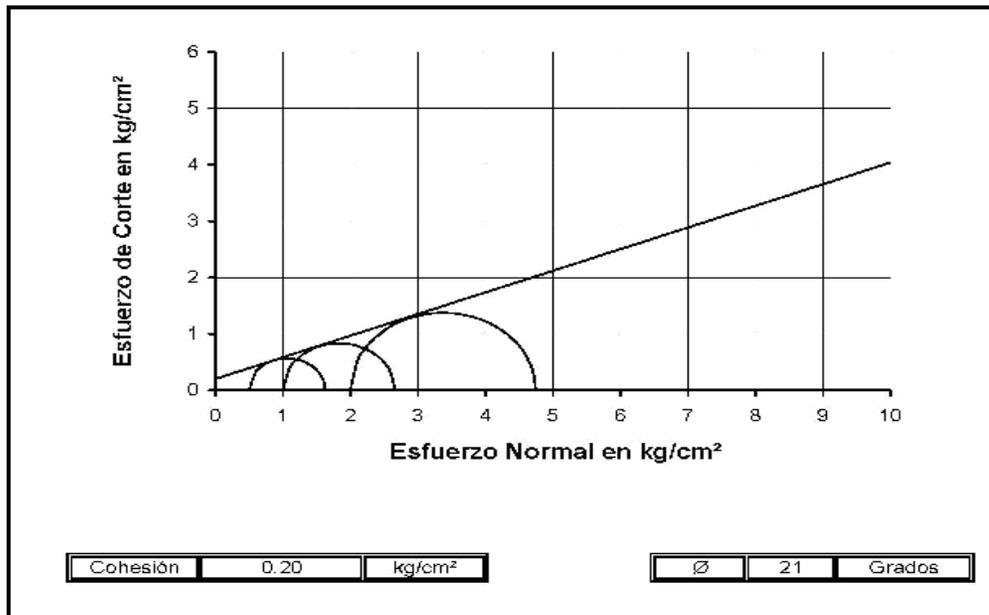
Figura 29. Análisis granulométrico por tamices, M-1 B



Fuente: elaboración propia.

En el ensayo de compresión triaxial, de círculos de Mohr, se puede observar el peso unitario húmedo de 1,51 toneladas por metros cúbicos, en donde la cohesión es equivalente a 0,20 kilogramos por centímetro cuadrado con un ángulo de 21 grados.

Figura 30. **Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-1 B**



Fuente: elaboración propia.

7.1.5.5 Muestra M-2 B

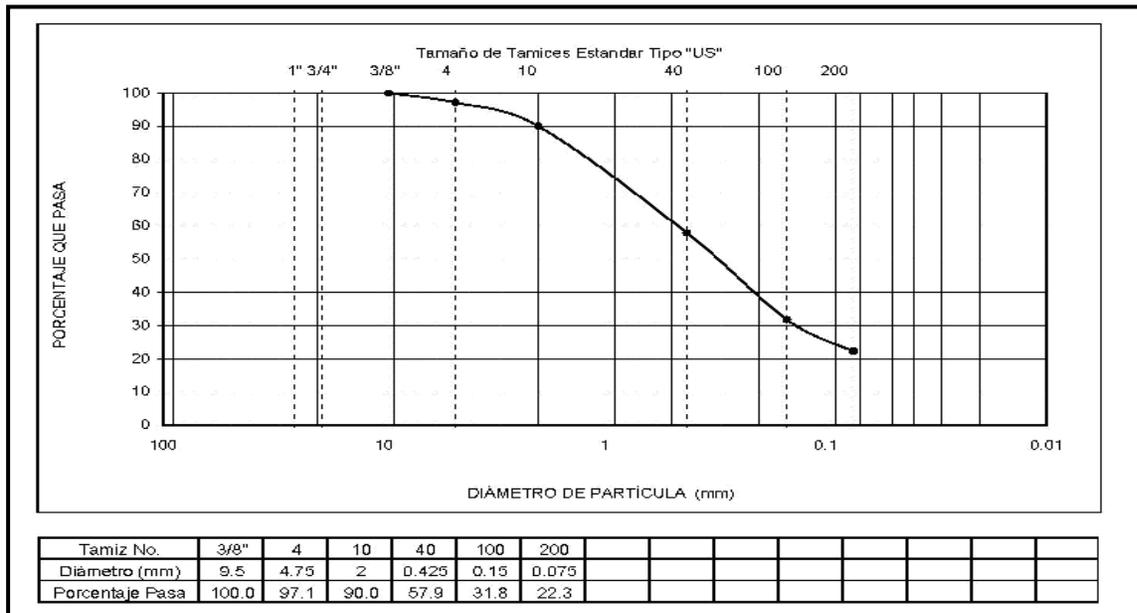
Muestra inalterada, esta se obtuvo a una altura de 1,40 metros de la base del talud. Se clasifica como un limo arenoso café, y según la granulometría está constituido por 3 por ciento de grava, 75 por ciento de arena y 22 por ciento de finos. La humedad de esta se determinó del 20,80 por ciento y según la clasificación de suelos basado en los límites de Atterberg, como SM que se encuentra en la clasificación de las arenas limosas, mezclas de arena y arcilla.

Figura 31. **Ubicación de la muestra 5 en el talud**



Fuente: Kilómetro 10+500, ruta departamental, GUA-1.

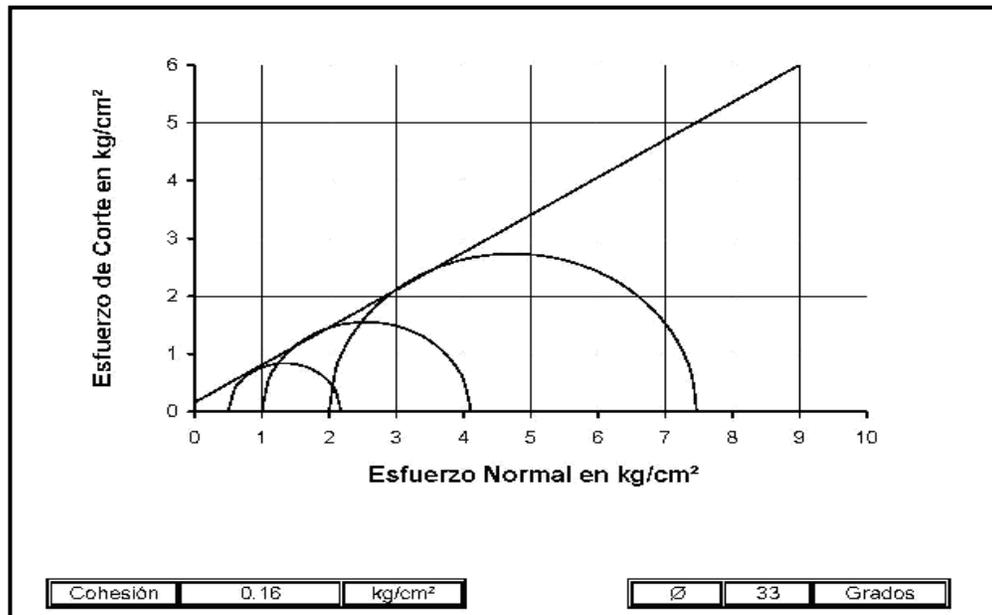
Figura 32. Análisis granulométrico por tamices, M-2 A



Fuente: elaboración propia.

En el ensayo de compresión triaxial, de círculos de Mohr, se puede observar el peso unitario húmedo de 1,17 toneladas por metro cúbico, en donde la cohesión es equivalente a 0,16 kilogramos por centímetro cuadrado con un ángulo de 33 grados.

Figura 33. **Ensayo de compresión triaxial TX/UU muestra M-2 B**



Fuente: elaboración propia.

7.2. Instrumentación geotécnica

Posterior al estudio realizado se propuso como medio de estabilización del talud la realización de una pantalla anclada de concreto armado y lanzado, comúnmente denominados muros shotcrete y anclados mediante anclajes de larga duración. Siendo la finalidad de dichos anclajes la de aportar un factor de seguridad global mínimo al talud en cada una de las situaciones a las cuales estará sometido el mismo. En este talud se instalan y monitorean tres inclinómetros y ocho celdas de carga.

Las celdas de carga colocadas en las cabezas de anclaje y los inclinómetros fueron instalados para monitorear los deslizamientos que se dieron previos a la construcción del muro anclado, así como el comportamiento del mismo en el transcurso de su ejecución. Como en toda obra de protección y estabilización de taludes de envergadura, era necesaria la instalación de instrumentación geotécnica para detectar posibles problemas y prevenir posibles derrumbes posteriores.

7.2.1. Celdas de carga

Consisten en una celda sellada compuesta de dos o más placas soldadas alrededor de la periferia y llenas de aceite. La celda está directamente conectada a una presión calibrada. La carga aplicada a las celdas induce una variación de presión del aceite, la cual es captada por la calibración. El tamaño compacto facilita su instalación y permite rápidas y simples lecturas.

Permite monitorear la carga instalada de los anclajes siguiendo a lo largo del tiempo cualquier variación acentuada de carga.

Estos aparatos son sensibles a los cambios climáticos por lo que hay que considerarlo a la hora de interpretar los resultados.

Figura 34. Celdas de carga utilizadas



Fuente: elaboración propia.

Los anclajes instrumentados fueron los identificados, según la distribución de los mismos en el muro del plano del proyecto, y tienen las longitudes mostradas en la tabla II.

Tabla II. **Longitudes de los anclajes monitoreados**

	B-7	B-13	B-21	B-7	F-13	F-21	F-13	J-13	J-18
Longitud de Bulbo	6 m	6 m	6 m	8 m	8 m	8 m	2 m	2 m	2 m
Longitud Libre	9 m	9 m	9 m	1 m	1 m	1 m	2 m	2 m	2 m
Longitud Total	15 m	15 m	15 m	9 m	9 m	9 m	4 m	4 m	4 m
Capacidad máxima de la celda	200 KN	200 KN	200 KN	900 KN					

Fuente: elaboración propia.

7.2.2. **Inclinómetro**

Los inclinómetros constituyen uno de los principales métodos de investigación de los deslizamientos y, en general, de control de movimientos transversales a un sondeo.

Son instrumentos mediante los cuales se llega a obtener datos de los desplazamientos laterales del terreno lo que es de extrema utilidad en obras de protección de taludes y de excavaciones.

Tabla III. **Inclinómetros instalados en el proyecto**

	Inclinómetro ro 1	Inclinómetro ro 2	Inclinómetro ro 3
Características	43,50 m	44,00 m	43,50 m

Fuente: elaboración propia.

Constituyen el conjunto del inclinómetro:

- Tubería inclinométrica, instalada en el interior de un sondeo, de una pantalla o de un pilote
- Una sonda inclinométrica
- Cable eléctrico de control inclinométrico
- Caja lectora

Los movimientos vienen determinados por la inclinación del eje de la sonda respecto a la vertical a diferentes profundidades (generalmente cada 0,5 milímetros).

Las medidas se realizan periódicamente y se refieren a una medida cero tomada al inicio, los desplazamientos se calculan a partir de un punto fijo situado en la parte inferior de la tubería.

7.2.2.1. Tubería inclinométrica

Está compuesta de tubos especialmente ranurados interiormente. Estos proporcionan acceso a la sonda inclinométrica permitiendo tomar lecturas de desplazamiento del suelo. Las ranuras dentro de la tubería controlan la orientación del sensor y proporcionan una superficie desde la cual se pueden obtener futuras mediciones del desplazamiento del suelo. La tubería es diseñada para deformarse con el movimiento del suelo adyacente al tubo o con la estructura. La vida útil del tubo termina cuando el continuo movimiento del suelo perfora o corta el tubo impidiendo de esta manera el pase del sensor.

Figura 35. Tubería inclinométrica

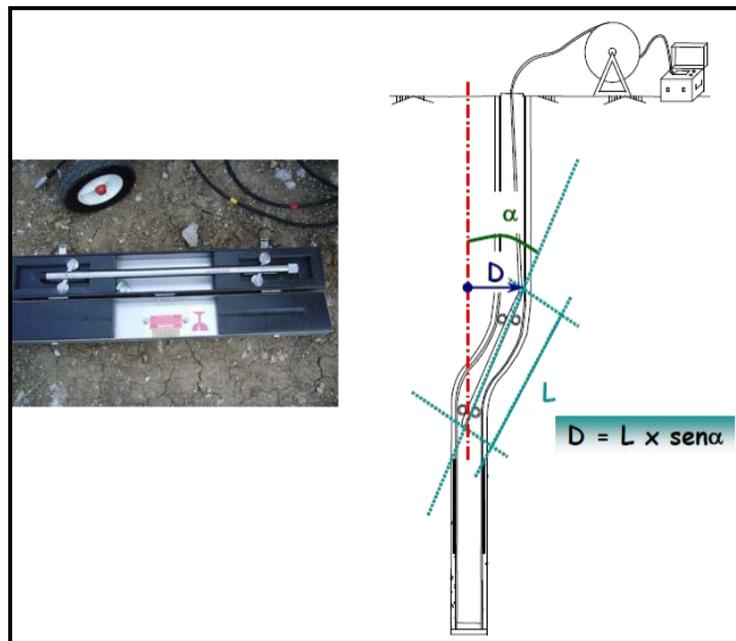


Fuente: elaboración propia.

7.2.2.2. Sonda inclinométrica

Es un dispositivo o instrumento adaptado para poder medir las variaciones de la inclinación de la tubería inclinométrica. El movimiento de la sonda se indica por medio de una señal eléctrica proporcional al seno del ángulo de inclinación de la tubería a partir de un eje vertical central. Un dispositivo eléctrico denominado servo-acelerómetro (cuenta con dos) indica las variaciones de las inclinaciones de la tubería en toda su profundidad y/o principalmente en los planos de deslizamiento activo.

Figura 36. Esquema de sonda eléctrica utilizada



Fuente: elaboración propia.

7.2.2.3. Caja lectora de mediciones

La caja lectora es un instrumento portátil que contiene una batería recargable, controles eléctricos y una pantalla de lecturas digital.

Las lecturas almacenadas son transferidas a una PC utilizando un programa de cómputo con el cual no solo se transfiere los datos sino que también se pueden manipular para hacer gráficos y reportes.

Figura 37. Caja lectora utilizada

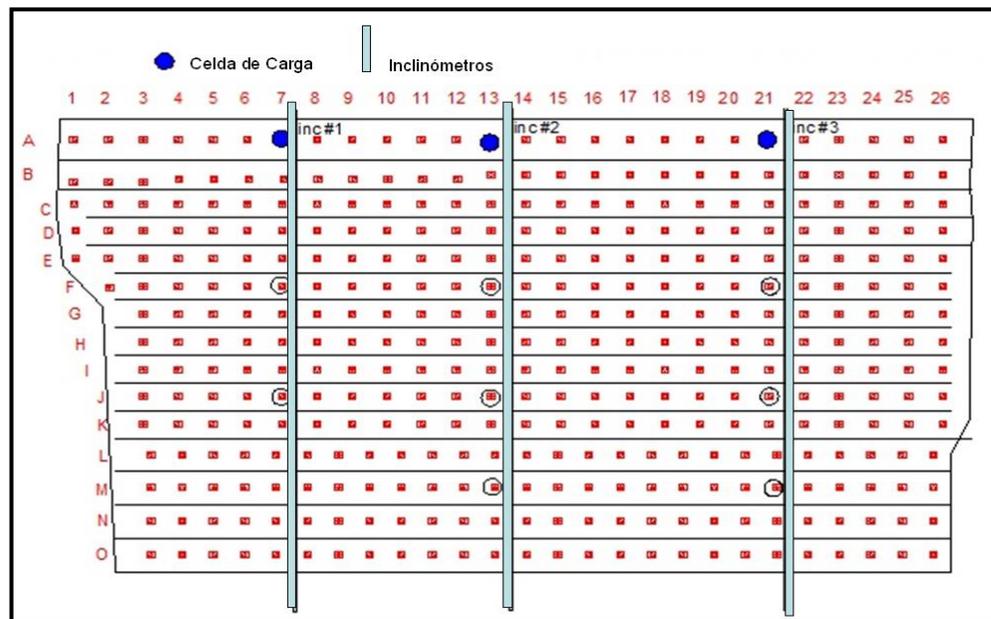


Fuente: elaboración propia.

7.2.3. Ubicación de la instrumentación

Debido a la geométrica y topografía del talud se escogieron 3 lugares para la instalación de los inclinómetros. De la misma manera se proyectó la profundidad de los mismos de manera que quedarán empotrado en suelo firme.

Figura 38. Esquema de ubicación de instrumentación



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

7.2.4. Monitoreos realizados

Desde la instalación de cada una de las celdas de carga, se estuvo monitoreando periódicamente el valor que las mismas indicaban. Estos valores se fueron registrando en una tabla para generar gráficos y comprender el comportamiento de las mismas.

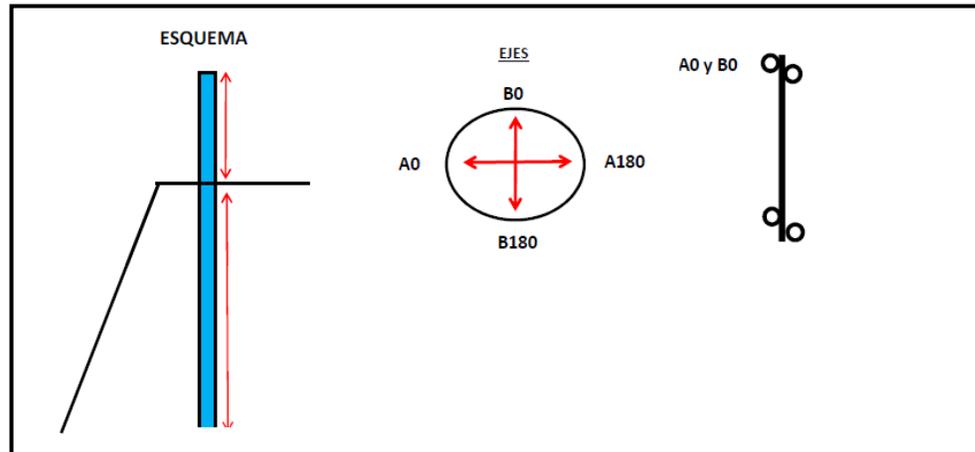
El inclinómetro identificado como inclinómetro 1, corresponde a las lecturas BDM#01 (Eje A0 A180), tiene una profundidad de 43,50 metros y está ubicado entre los ejes 7 y 8.

El inclinómetro identificado como inclinómetro 2, corresponde a las lecturas BDM#02 (Eje A0 A180), tiene una profundidad de 43,50 metros y está ubicado entre los ejes 13 y 14.

El inclinómetro identificado como inclinómetro 3, corresponde a las lecturas BDM#03 (Eje A0 A180), tiene una profundidad de 43,50 metros y está ubicado entre los ejes 21 y 22.

Los resultados obtenidos en las mediciones son lecturas de los ejes A0-A180 (BDM#01, BDM#02, BDM#03) con las correspondientes desviaciones, desplazamientos incrementales y desplazamientos acumulados medidos cada medio metro en toda la longitud del tubo inclinométrico.

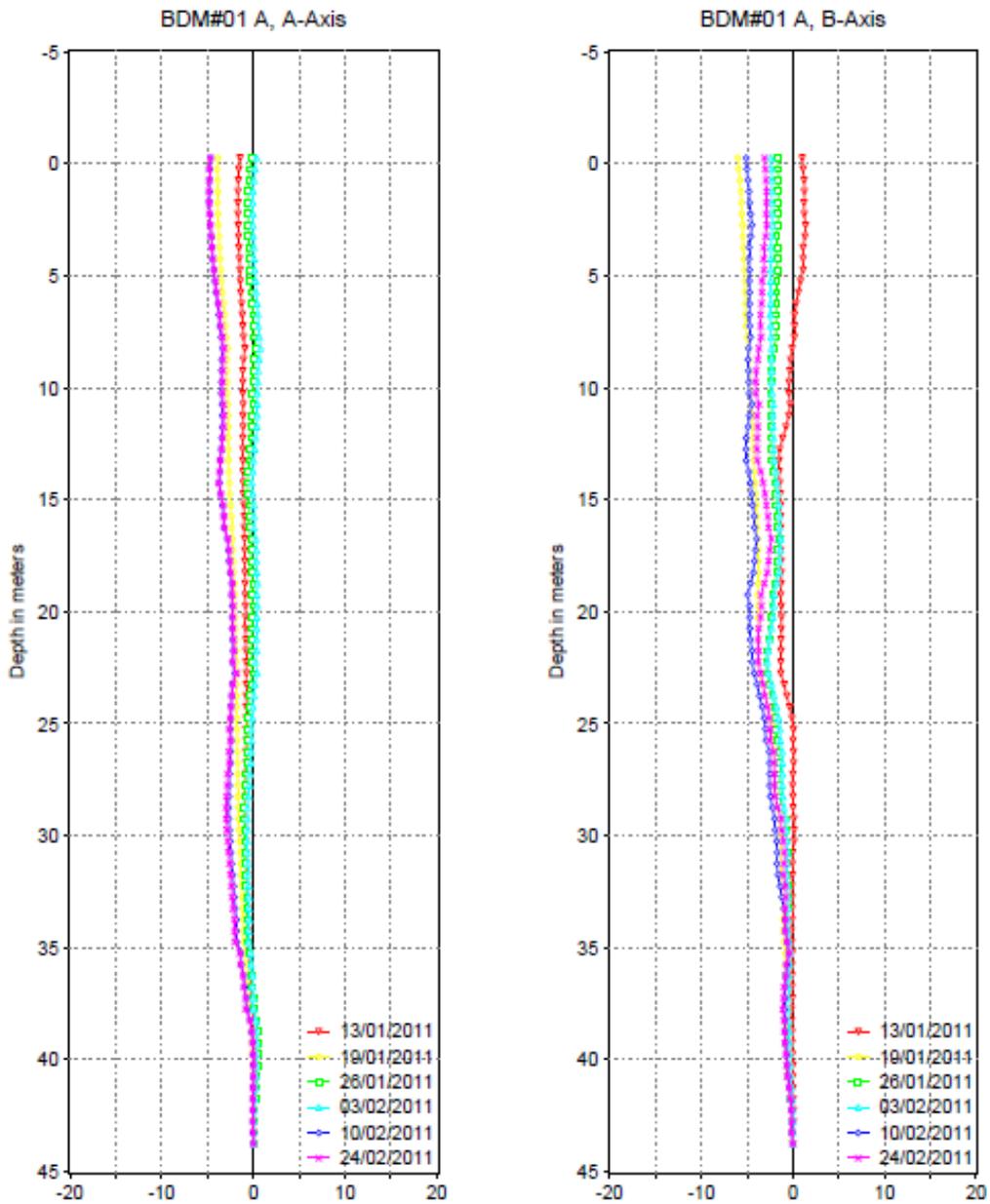
Figura 39. **Esquema de la orientación del inclinómetro**



Fuente: elaboración propia.

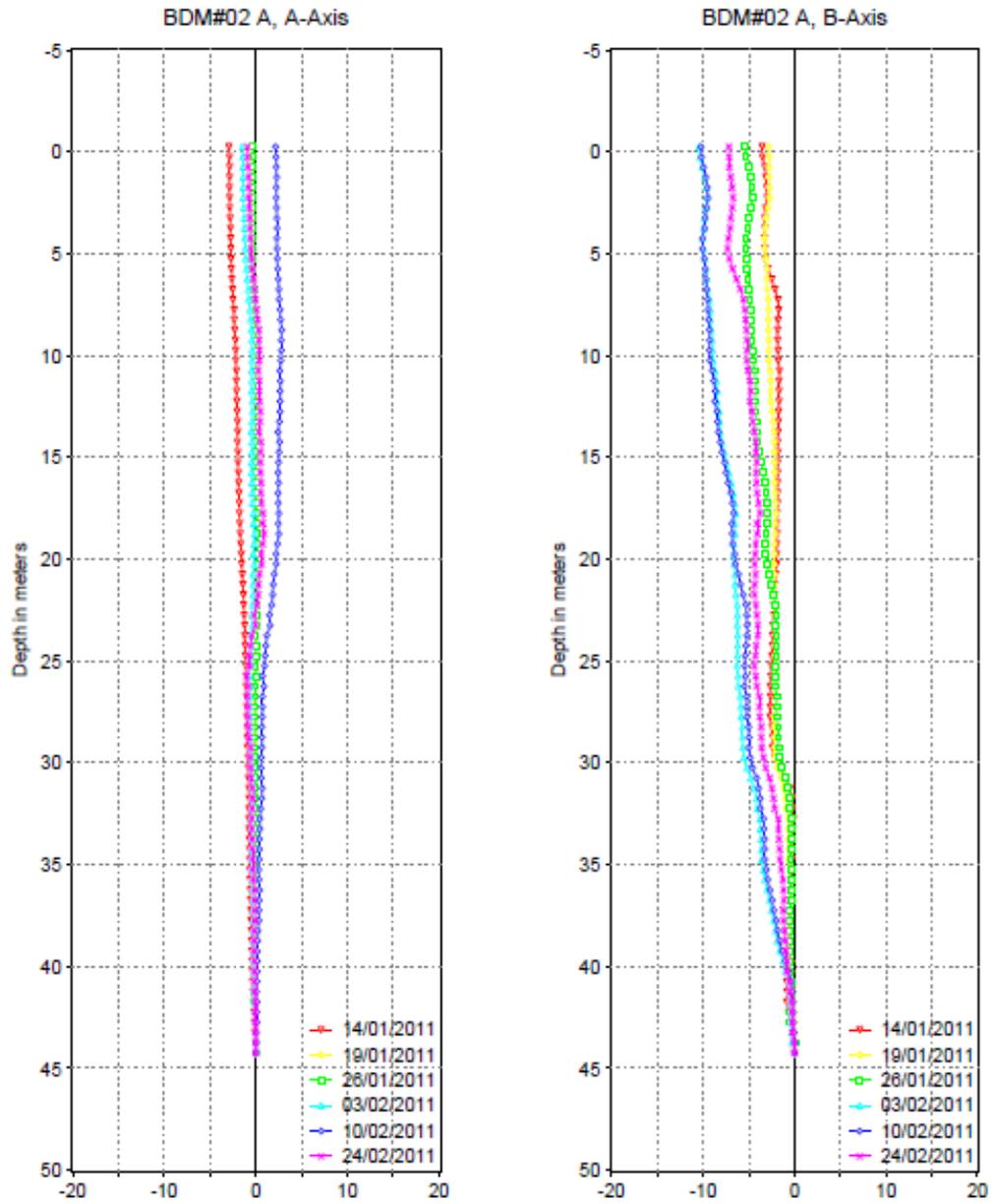
De la evaluación de estos resultados se obtienen los gráficos de los desplazamientos acumulados y desplazamientos incrementales en milímetros en toda la longitud del tubo inclinométrico medidos cada medio metro, comparados con una medición inicial tomada el 27 de diciembre de 2010 para BDM#01 y BDM#02.

Figura 40. **Monitoreo de inclinómetro BDM 01**



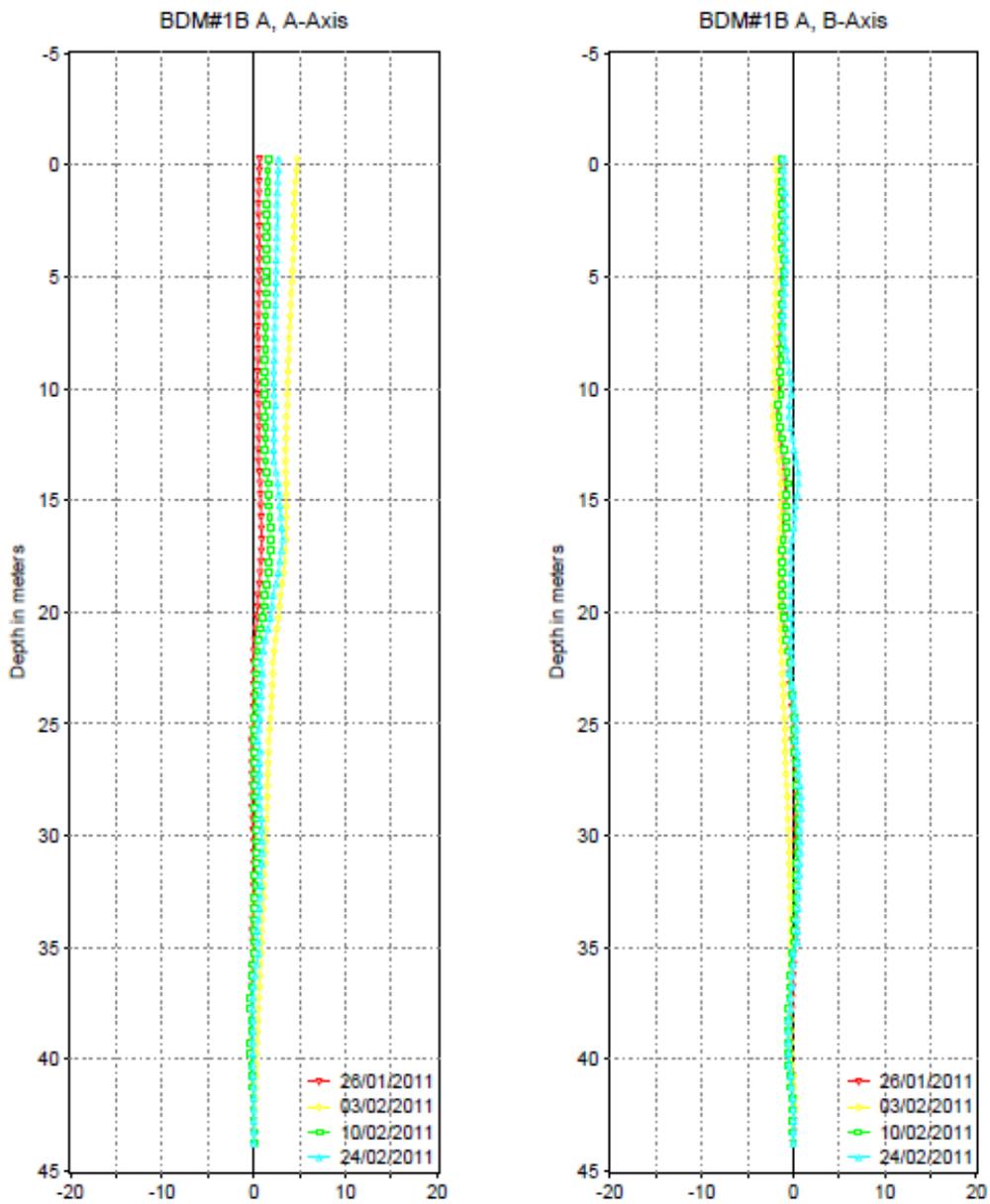
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 41. **Monitoreo inclinómetro BDM 02**



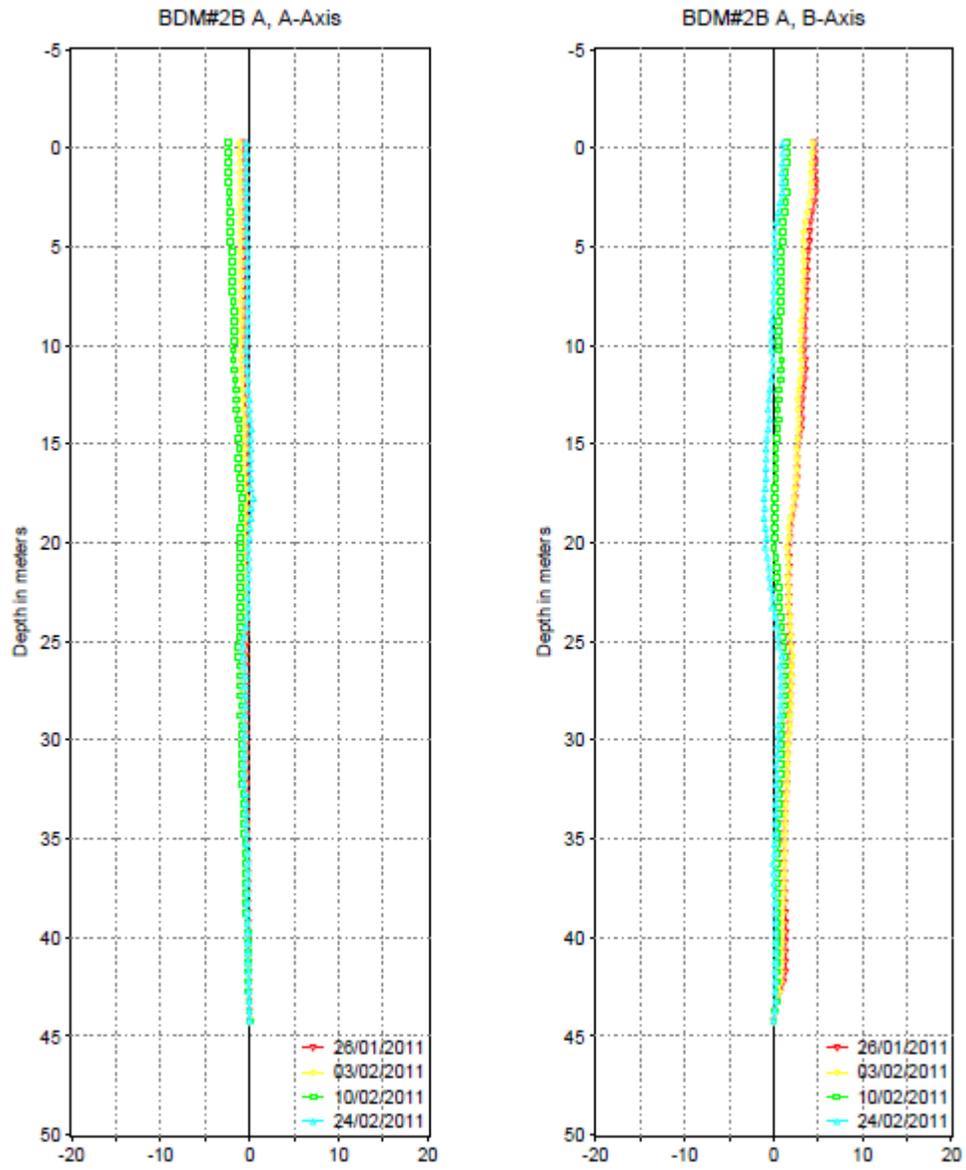
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 42. Monitoreo inclinómetro BDM 1B



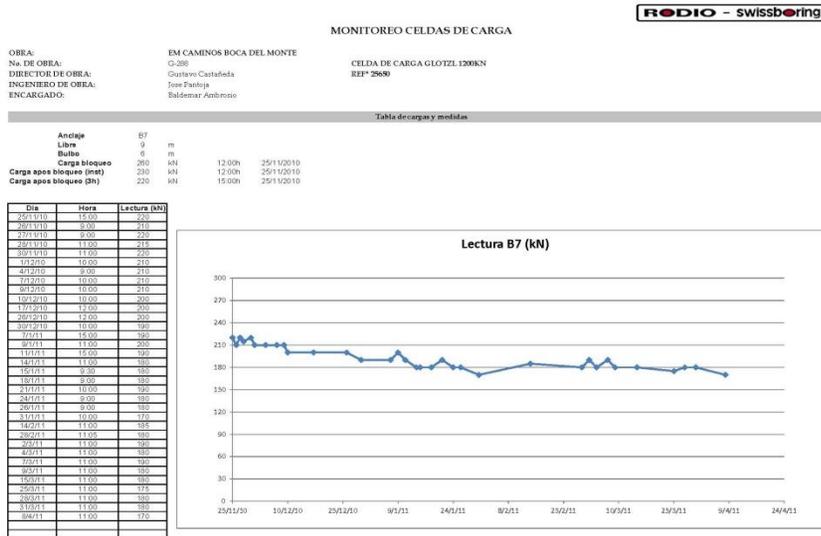
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 43. Monitoreo inclinómetro 2B



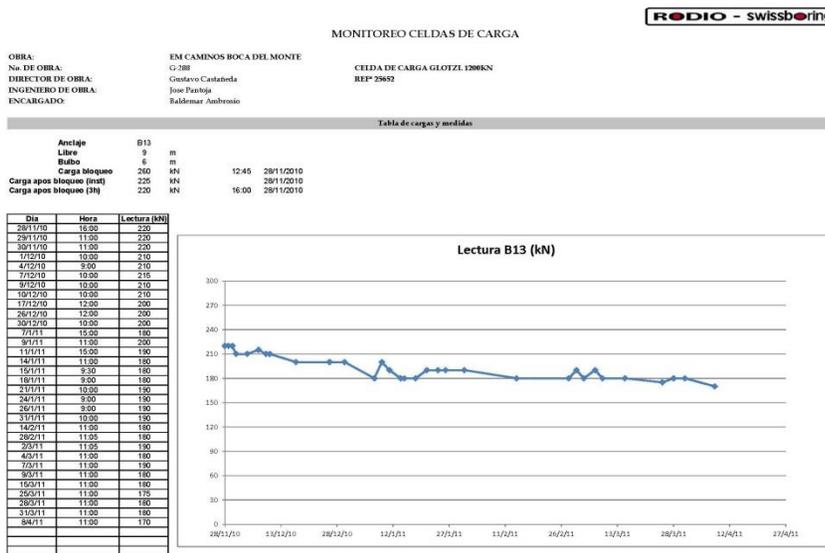
Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Figura 44. Lectura celda de carga B7



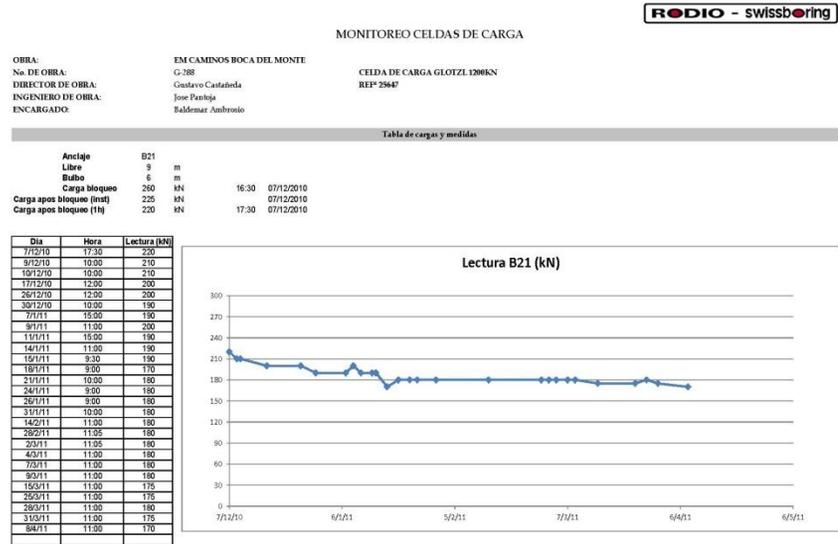
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Lectura celda de carga B13



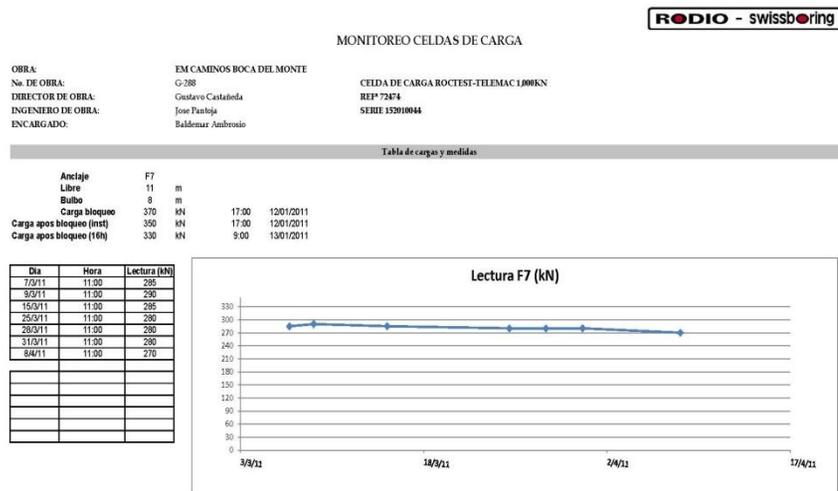
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Lectura celda de carga B21



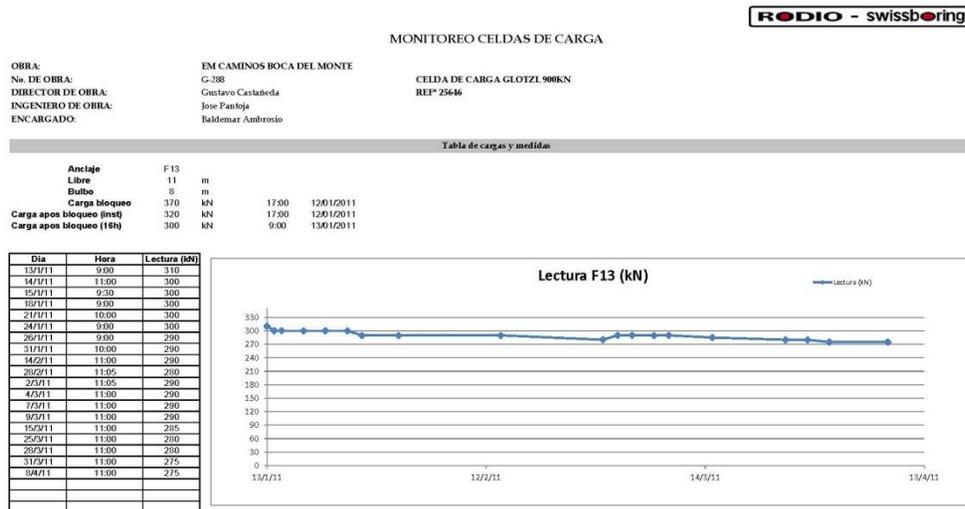
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Lectura celda de carga F7



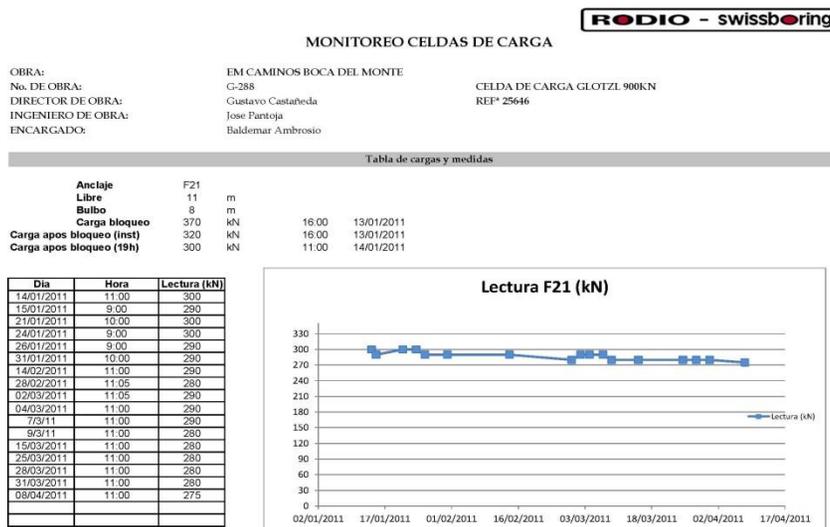
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Lectura celda de carga F13



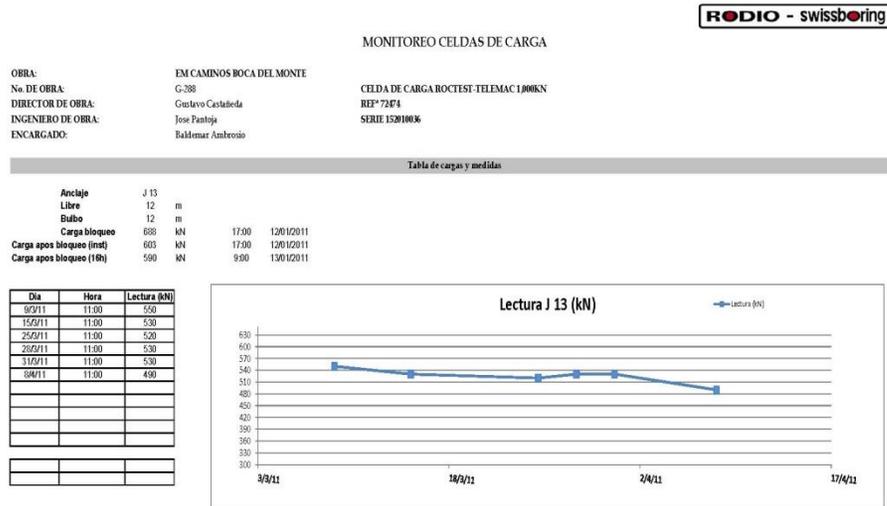
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Lectura celda de carga F21



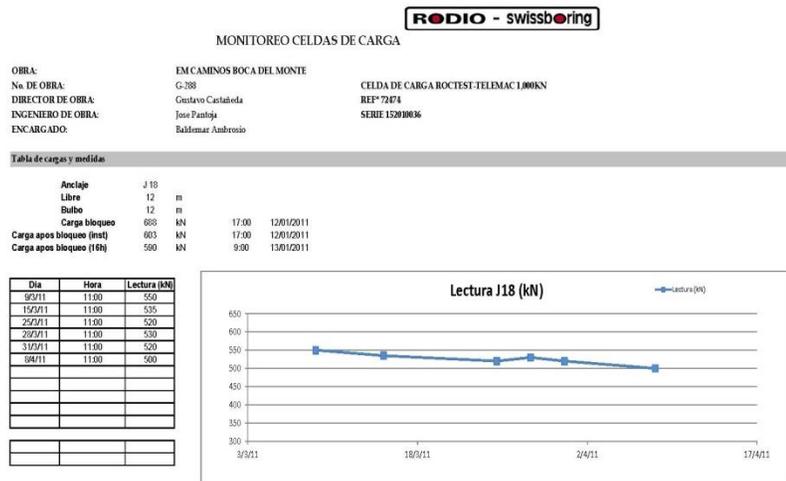
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Lectura celda de carga J13



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Lectura celda de carga J18



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La instrumentación y monitoreo geotécnico, se refiere a la instalación y registro de movimientos de taludes o estructuras mediante el uso instrumentos mecánicos o automatizados de una manera precisa, proporcionando información importante a cerca del comportamiento, permitiendo una mejor toma de decisiones.
2. Según los movimientos que se quiera monitorear, para cambios en superficie se tiene dispositivos topográficos los cuales se basan en estaciones totales, manuales y automatizadas, GPS diferencial. Para movimientos verticales y horizontales están los inclinómetros, y para controlar las presiones en los anclajes están las celdas de caga, explicados en el presente trabajo.
3. El funcionamiento de la instrumentación geotécnica se basa básicamente en la lectura constante de las condiciones del suelo, estructura o talud, en comparación a un parámetro inicial. Y con base en esta comparación se generan datos que inciden para una mejor toma de decisiones.
4. Con una adecuada implementación de la instrumentación y monitoreo geotécnico, se puede evitar pérdidas humanas, y grandes pérdidas económicas. Debido a que si este se emplea de una manera eficiente, se logrará obtener la suficiente información con el suficiente tiempo de antelación para promover evacuaciones, clausurar rutas y movilizar comunidades, o simplemente prohibir el crecimiento poblacional en zonas de riesgo.

5. Durante la ejecución del Muro Anclado en la RD GUA1, se mantuvo el monitoreo constante y se pudo observar los movimientos diferenciales y los comportamientos en los anclajes si bien se brinda una idea de lo que pasa internamente en el suelo, también como constructores brinda un mejor soporte acerca de la calidad constructiva y de la funcionalidad de las propuestas que se está ofreciendo al cliente.

RECOMENDACIONES

1. Apoyar e implementar las políticas nacionales de ordenamiento territorial, con el fin de disminuir los riesgos y amenazas para la población.
2. Promover la implementación de sistemas de instrumentación geotécnicos, con el fin de brindar seguridad antes, durante y después de los procesos constructivos.
3. Informar acerca de los beneficios de la instrumentación geotécnica de manera que poco a poco la población en general solicite la implementación de este tipo de tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

1. DAS, Braja. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. 5a. ed. México, D.F.: Thomson. 2004.743 p.
2. GONZÁLES DE VALLEJO. Luis. *Ingeniería geológica*. Madrid-España: Pearson Educación. 2006. 744 p.
3. PANTOJA PRERA, José Julio. *Protección de taludes utilizando el método de Soil Nailing*. Trabajo de graduación. De Ing. Civil Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008. 83 p.
4. TARBUCK, Edwar; LUTGENS, Frederick, *Ciencias de la tierra*. 8. Ed. Madrid-España: Pearson Educación. 2005. 736 p.

