

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Utilización del inclinómetro digital para
monitorear desplazamientos horizontales en
taludes

Andrés Hurtarte

Guatemala
2009

Utilización del inclinómetro digital para
monitorear desplazamientos horizontales
en taludes

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Utilización del inclinómetro digital para
monitorear desplazamientos horizontales en
taludes

Trabajo de investigación presentado por
Andrés Hurtarte para optar al grado académico
de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala
2009

Vo. Bo:

Ing. Fernando Rafael Callejas
Asesor

Ing. Roberto Godo
Director del Departamento de Ingeniería Civil

Tribunal:

Ing. Fernando Rafael Callejas

Ing. Roberto Godo

Ing. Jose Julio Pantoja

Fecha de aprobación:
29 de febrero 2009

PREFACIO

Este trabajo fue realizado con el afán de implementar el uso de las herramientas tecnológicas de monitoreo dentro del campo de la ingeniería civil en Guatemala, de manera que se implemente de forma exitosa este tipo de prácticas que se utilizan desde hace algunos años en países desarrollados.

Este trabajo solo se pudo realizar debido a la enorme apoyo proporcionado por la empresa Rodio-Swissboring Guatemala S.A. la cual facilitó la tecnología que tiene a su disposición para el monitoreo geotécnico. Además se les agradece a las siguientes personas por su asesoría y colaboración que brindaron durante el desarrollo del trabajo.

- Fernando Callejas
- Federico Rosenberg
- Rodolfo Alvarado
- Gustavo Castañeda
- Fernando Gandur
- José Pantoja.
- Rudy Saveedra.
- Ernesto Calzia

Además quiero agradecer infinitamente a mi familia, principalmente a mi padres Jorge Luis Hurtarte y Lucrecia Solís de Hurtarte por todo el apoyo que me brindaron durante toda la carrera, apoyo que fue indispensable para la obtención de mi grado académico y la publicación del presente trabajo.

ÍNDICE

Prefacio	v
Lista de tablas	viii
Lista de gráficos	ix
Lista de fotografías	xi
Resumen	xii
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1 Objetivos generales	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. Taludes	4
3.1 Consideraciones generales	4
3.2 Comportamiento del suelo	5
3.3 Comportamiento de Macizos Rocosos	6
3.4 Factores de estabilidad	8
3.5 Tipos de fallas	10
3.6 Investigación de deslizamientos	13
4. Instrumentación geotécnica	17
4.1 Consideraciones generales	17
4.2 Planificación de monitoreos usando instrumentación geotécnica	17
4.3 Diagrama de flujo para planificar un monitoreo geotécnico	24
5. Inclinómetro	25
5.1 Definición	25
5.2 Tipos de Inclinómetros	29
5.3 Factores que afectan la precisión	31
5.4 Tipos de tuberías inclinométrica	34
5.5 Selección de la tubería inclinométrica	35
5.6 Instalación de la tubería inclinométrica	36
5.7 Calibración	41
5.8 Mantenimiento	42
5.9 Recolección de datos	42
5.10 Procesamiento de datos	46
5.11 Interpretación de datos	47
6. Ejemplos de aplicación del inclinómetro	49
6.1 Deslizamiento Km. 7.5 carretera Santa Catarina Pinula, Guatemala	49
6.2 Talud Las Marías, la Col Lomas del Guijarro, Tegucigalpa, Departamento de Francisco Morazán	62

7. Conclusiones	80
8. Recomendaciones	81
9. Bibliografía	82
10. Apéndice A	83
Pasos para medición en campo	

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
3.6.1	Investigación de deslizamientos	13
3.6.2	Factores característicos para la identificación de movimientos de ladera.	14
3.6.3	Clasificación según de deslizamientos según las dimensiones del talud.	14
3.6.4	Guía cualitativa para inspección de taludes en campo	15
4.1	Ejemplo de un método cualitativo de alertas	19

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico		Página
3.1.1	Componentes de un talud	4
3.5.1	Falla de un talud	10
3.5.2	Desprendimientos.	12
5.1.1	Dibujo esquemático de los elementos del inclinómetro	26
5.1.2	Principio fundamental del inclinómetro	27
5.1.3	Esquema del proceso de recorrido del inclinómetro	28
5.1.4	Ejemplo de un grafico proporcionado por un programa de cómputo	29
5.2.1	Diagrama del Acelerómetro	30
5.2.2	Diagrama de la tecnología de cuerda vibrante	31
5.6.1	Ubicación del inclinómetro en campo	37
5.6.2	Monitoreo de un talud con dos inclinómetros	38
5.6.3	Monitoreo con un inclinómetro cerca de la pared de una excavación	38
5.6.4	Instalación de la tubería en sondeos estables	39
5.6.5	Instalación de la tubería en sondeos inestables	40
5.6.6	Orientación de la tubería inclinométrica	41
5.11.1	Instrumentación de un talud con una zona de deformación marcada	47
6.1.1	Perfil estratigráfico del terreno de Santa Catarina Pinula	52
6.1.2	Grafica de desplazamiento acumulativo en el tiempo de Santa Catarina Pinula	61
6.2.1	Terreno medio del talud Las Marías	65

Gráfico		Página
6.2.2	Estratigrafía y carga externas del talud Las Marías	66
6.2.3	Esquema del sistema escogido para el monitoreo en talud Las Marías	70
6.2.4	Gráfica sin modificaciones del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 1 del talud Las Marías	71
6.2.5	Gráfica final del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 1 talud Las Marías	73
6.2.6	Gráfica final del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 2 talud Las Marías	74
6.2.7	Gráfica final del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 2 talud Las Marías	76
6.2.8	Gráfica de desplazamiento incremental talud Las Marías	78
6.2.9	Geometría de la falla en el talud Las Marías	79

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografías	Página
6.1.1 Vista satelital de la ubicación del deslizamiento de Santa Catarina Pinula	49
6.1.2 Daños provocados por el deslizamiento de Santa Catarina Pinula.	50
6.1.3 Muestras del suelo de Santa Catarina Pinula de 10 a 12 metros de profundidad	51
6.1.4 Incremento del deslizamiento de Santa Catarina Pinula	53
6.1.5 Obra de Mitigación	54
6.1.6 Construcción del muro de arriba hacia abajo en Santa Catarina Pinula	55
6.1.7 Muro anclado terminado del deslizamiento de Santa Catarina Pinula	55
6.1.8 Toma de datos del Deslizamiento de Santa Catarina Pinula	60
6.2.1 Foto del talud Las Marías	63
6.2.2 Grietas en la calle en la corona del talud Las Marías	63
6.2.3 Formación Valle de Ángeles	64

RESUMEN

El monitoreo de taludes mediante el uso del inclinómetro es una herramienta potente para la detección de movimientos horizontales en las masas de suelo, de esta manera se pueda conocer la evolución de un talud inestable que mediante el desarrollo de un sistema efectivo de recolección de información pueda generar alertas tempranas y lograr tomar acciones correctivas o de emergencia evitando así grandes daños de infraestructura o pérdidas humanas.

Este trabajo proporciona información científica sobre el comportamiento de taludes y presenta una guía sobre la utilización del inclinómetro que va desde la selección del mismo como instrumento de medición hasta la interpretación de los datos obtenidos de manera que empatando el conocimiento científico de la mecánica de taludes con el conocimiento técnico del inclinómetro se puede hacer deducciones exitosas en la predicción del comportamiento de un talud.

La implementación de este tipo de prácticas puede proporcionar ventajas a los proyectos de obra civil de grandes y pequeñas envergaduras, tales como el ahorro en obras civiles donde son innecesarias, la justificación de la elaboración de una obra de estabilización, corroborar el comportamiento de un muro posterior a su construcción, protección de la vida de trabajadores y habitantes de una zona potencialmente inestable e información de mucho valor para una defensa de tipo legal, ampliación de los conocimientos teóricos en la rama de estabilidad de taludes.

1. Introducción

La mecánica de suelos y rocas constituyen uno de los principales pilares de la ingeniería civil. Toda obra que se intente construir tendrá siempre una interacción con el suelo.

Uno de los principales problemas que se enfrenta la geotecnia es el estudio de la estabilidad de taludes y la detección de taludes potencialmente inestables.

Generalmente el estudio de los taludes y laderas se enfoca en el diseño y estabilización de los mismos, sin embargo estos análisis suelen ser sumamente difíciles e inciertos, ya que dentro de los suelos y rocas interactúan una infinidad de variables que el ingeniero no puede controlar, por lo que los diseños se deben de modelar de una forma mas simple generando modelos con pocas variables controlables.

Con el adelanto de la tecnología, se han desarrollado aparatos aptos para monitorear el comportamiento real de los taludes y del suelo en general, proveyendo información más exacta y valiosa acerca de este tema y generando una rama nueva llamada instrumentación geotécnica.

La instrumentación geotécnica tiene como finalidad determinar el comportamiento y las características del terreno para predecir su evolución ante cargas, movimientos, empujes y demás acciones ya sean naturales o provocadas por la actividad humana.

El monitoreo geotécnico requiere de un conocimiento basto en la materia ya que requiere preparar un programa de instrumentación, en el cual se determinan las variables a medir, el instrumento a utilizar, la frecuencia de las lecturas, la recopilación e interpretación de datos y la velocidad del proceso a controlar.

Este trabajo se enfoca en el monitoreo geotécnico de taludes por medio de un inclinómetro digital. Se escogió la variable de desplazamiento horizontal respecto al tiempo para ser monitoreada, debido a que es la principal variable en la detección de taludes inestables. En efecto, el inclinómetro digital, en conjunto con la tubería inclinométrica, es un aparato que mide los desplazamientos horizontales en masas de suelo de forma muy precisa, por esta razón se escogió como instrumento de medición en el comportamiento de taludes de manera que realizando lecturas de forma periódica nos puede proporcionar información muy importante sobre la estabilidad de la masa de suelo.

Esta información puede ser utilizada en muchas aplicaciones de gran alcance como: generar alertas tempranas sobre deslizamientos peligrosos en poblaciones cercanas, justificar la realización de trabajos de estabilización de taludes, determinar el éxito del comportamiento de obras de contención, determinar la influencia de obras civiles sobre construcciones aledañas, evitar inversiones innecesarias de estabilización y incrementar los niveles de seguridad en obras potencialmente peligrosas

2. Objetivos

2.1 Generales:

- Determinar los aspectos principales sobre el monitoreo geotécnico y su aplicación específica al inclinómetro.
- Incentivar la instrumentación geotécnica como una herramienta de prevención y de alerta temprana.
- Proveer al lector un acercamiento al uso del inclinómetro como herramienta de recopilación de datos.
- Hacer uso efectivo de la recopilación de datos mediante la interpretación correcta de los mismos.

2.2 Específicos:

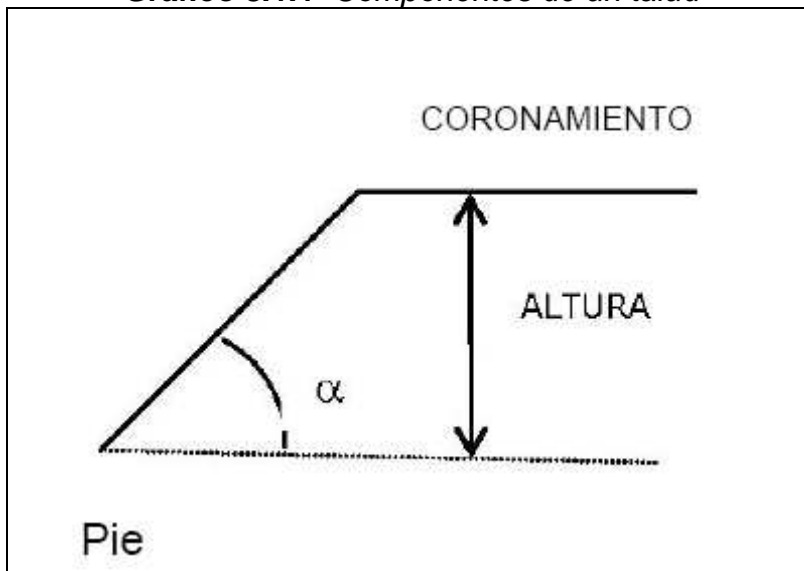
- Generar una guía para la planificación y monitoreo geotécnico de taludes con el inclinómetro.
- Analizar dos casos donde se ha utilizado el inclinómetro como herramienta de monitoreo de desplazamientos horizontales a modo de ejemplo.

3. Taludes

3.1 Consideraciones generales

Un talud es una superficie de terreno expuesta y situada a un ángulo con la horizontal. Este puede ser natural o construido. Debido al ángulo con respecto a la horizontal, la componente de la gravedad ocasionara que el suelo tienda a moverse hacia abajo. Si la componente de la gravedad es suficientemente grande ocurrirá una falla en el talud. Esto significa que la fuerza actuante vence a la fuerza resistente del suelo a lo largo de la superficie de rotura. Cada talud se comporta de forma particular dependiendo de sus características geométricas y las propiedades mecánicas del suelo que lo compone.

Gráfico 3.1.1 Componentes de un talud



El diseño de taludes es uno de los aspectos más importante de la ingeniería geológica, ya que está presente en la mayoría de actividades constructivas o extractivas.

Los taludes en ingeniería civil alcanzan alturas máximas de 40 ó 50 metros y se proyectan para ser estables a largo plazo. Sin embargo las exploraciones mineras pueden alcanzar profundidades de varios centenares.

Los taludes permanentes para la construcción de infraestructura o con fines de edificación se diseñan para ser estables a largo plazo. Precisando medidas de estabilización complementarias cuando no sea posible realizar excavaciones con las alturas y ángulos requeridos.

Para analizar la estabilidad de un talud es importante determinar las propiedades resistentes de los materiales, suelos o macizos rocosos, las cuales se obtienen mediante los ensayos in situ y de laboratorios adecuados y la aplicación

de criterios y correlaciones empíricas. Los ensayos de laboratorio más característicos para el estudio de taludes son los de clasificación, identificación, corte directo en suelos y discontinuidades y compresión simple entre otros.

3.2 Comportamiento de los suelos.

El suelo está compuesto por partes sólidas y espacios. Las partes sólidas corresponden a esqueletos minerales y los espacios corresponden a gases o líquidos que ocupan su lugar (aire, agua etc.).

Los suelos se pueden clasificar en dos tipos esenciales: Los cohesivos y los no cohesivos. Los cohesivos son consisten generalmente por arcillas que son formadas por partículas microscópicas o submicroscopicas derivadas de una descomposición química de fragmentos rocosos. Los suelos no cohesivos son aquellos formados por arenas y grava, los cuales consisten de rocas o minerales que no han sido alterados químicamente.

En los suelos existen cargas debido al peso propio del suelo como también a factores externos como sobrecargas y debido al agua. Estas cargas se pueden expresar en esfuerzos dentro de los suelos.

Los esfuerzos generados entre las partículas sólidas del suelo se le denominan: esfuerzos efectivos.

Cuando los espacios vacíos del suelo están saturados de agua, se crea una presión denominada presión de poro. Esta presión actúa en todas direcciones y con igual magnitud.

La suma de los esfuerzos efectivos y la presión de poro en un punto determinado del suelo, nos da como resultado el esfuerzo total en ese punto.

La expresión anterior corresponde a la siguiente ecuación

$$\sigma = \sigma' + u$$

Donde

σ es el esfuerzo total

σ' es el esfuerzo efectivo

u es la presión de poro.

Uno de los factores más importantes en la mecánica de suelos es el grado de consolidación del suelo.

La consolidación es el proceso gradual de expulsión del agua de un suelo, acompañado de la transferencia del esfuerzo total a esfuerzo efectivo mediante el decrecimiento de la presión de poro.

Es importante notar que cuando la consolidación progresa los esfuerzos efectivos aumentan. Esto genera un aumento entre la fricción de los esqueletos minerales, generando una mayor resistencia al deslizamiento entre partículas y por lo tanto una mayor resistencia al corte.

Cuando un suelo nunca ha sido sometido a un esfuerzo efectivo mayor que el que posee se le denomina como un suelo *normalmente consolidado*. En cambio, si el suelo anteriormente había sufrido un esfuerzo efectivo mayor que el actual se le denomina como un suelo *sobreconsolidado*.

3.3 Comportamiento de Macizos Rocosos

3.3.1 Aproximación geológica. La roca, por definición, es un material de aproximadamente un millón de años de edad.

Las rocas están clasificadas según su formación de la siguiente manera:

- *Rocas Ígneas:* Son aquellas formadas por la solidificación del magma que se genera en el centro de la tierra. En su vida geológica pueden ser disueltas en agua o separadas mediante la oscilación entre calor y frío, hielo y deshielo; o ataque químico, para formar el suelo.

Los granos que forman su microtextura son angulares e interconectados, presentan pequeñas rajaduras cerca de los límites de cada grano generando una baja porosidad.

- *Rocas Sedimentarias:* Son aquellas que se forman mediante un proceso de sedimentación combinado con cementación. Este proceso se debe al exceso de presión o por el depósito de materiales cementantes en el espacio intergranular de un suelo.

La porosidad de estas rocas depende del grado en que los poros entre granos fueron llenados en el proceso de cementación. Generalmente son más porosas que las rocas ígneas.

- *Rocas Metamórficas:* Están formadas por rocas ígneas o sedimentarias que por medio de un proceso geológico fuerte de presión o calentamiento la recristalización o formación de nuevos minerales.

Los granos de estas rocas se presentan de forma elongada, orientados de forma paralela debido al proceso de recristalización, esto las hace susceptibles a ser separadas a lo largo de la alineación de los granos.

Generalmente las rocas están formadas por dos tipos de estructuras:

- *Estructuras Primarias*: Son aquellas estructuras de las rocas formadas por la solidificación por los procesos de cementación sedimentarios o de formación ígnea. Las rocas sedimentarias son granos cementados que generalmente se presentan por capas separadas por planos continuos que generalmente son planos de debilidad.

Dentro de estas estructuras se generan uniones de tensión que en las rocas ígneas se da durante el proceso de contracción en el enfriamiento y en las rocas sedimentarias debido a la acumulación de las capas superiores.

- *Estructuras Secundarias*: Son aquellas estructuras formadas por el proceso metamórfico debido a la presión y al calor que generalmente endereza los planos que anteriormente eran horizontales.

Dentro de estas estructuras también se generan uniones de tensión pero además se crean las zonas de defecto, que se definen como zonas susceptibles al deslizamiento o al corte.

3.3.2 Aproximación técnica. La ingeniería se enfoca en el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y no tanto en el proceso mediante el cual se origina la roca.

Al analizar las rocas según su formación intergranular se puede determinar las rocas que presenta una mayor porosidad entre sus estructura son rocas menos resistentes y mas deformables que aquellas conformadas por estructuras más densas.

La composición mineral de las rocas tiene una fuerte influencia en el comportamiento de la deformación de la misma ante un esfuerzo dado.

Las rocas compuestas por minerales fuertes son generalmente elásticas ya que responden a un comportamiento lineal ante esfuerzos moderados; cuando la roca se deforma un poco y los esfuerzos aumentan, se da lugar a fallas repentinas y de forma abrupta.

Las rocas compuestas por minerales suaves generalmente presentan un comportamiento inelástico. La falla en estas rocas es dúctil. Toda roca que presente una configuración equidimensional, una estructura aleatoriamente orientada y una estructura de granos interconectada será una roca más fuerte que aquella que no presente estas características o se aleje de las mismas.

Existen dos tipos de roca a escalas macro. Unas son las rocas intactas y las otras son las masas de roca. Estas rocas se diferencian básicamente por la presencia de discontinuidades. Los macizos rocosos son más débiles debido a que presentan mayores discontinuidades que las rocas intactas.

La discontinuidad es un término que se utiliza para nombrar varios tipos de fractura y planos de debilidad como juntas, fallas, corte, zonas de contacto.

Generalmente el almacenaje y el flujo de agua dentro de las rocas se da en las discontinuidades, aunque en rocas muy porosas se puede dar dentro del bloque. El problema más común de inestabilidad en taludes rocosos se da por la presión que genera el agua en las discontinuidades generando fallas y dislocamientos de las rocas.

A diferencia del suelo, las rocas son rígidas por lo que permiten la transferencia y almacenaje de esfuerzos.

Se puede concluir que la inestabilidad en rocas se debe a cuatro factores principales.

- Las características de la roca intacta y de las discontinuidades.
- Las características del régimen del agua en la roca.
- La magnitud del esfuerzo presente en relación a la resistencia de la roca.
- Las características de las discontinuidades

3.4 Factores de estabilidad

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos (comportamiento mecánico del suelo; resistencia y deformabilidad)

En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. La naturaleza del material que conforma el talud esta directamente relacionada con el tipo de falla que este puede tener. Las propiedades físicas y resistentes de un material además de la presencia de agua, determinan su comportamiento esfuerzo-deformación influyendo en su estabilidad.

En el caso de macizos rocosos el principal factor es la estructura geológica: la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad, el grado de fracturación y el grado de alteración.

Existen factores desencadenantes que provocan la rotura de una vez se cumplan una serie de condiciones. Estos factores son externos que actúan sobre el suelo o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud. El conocimiento de estos factores desencadenantes, permitirá un correcto análisis de talud y la evaluación del estado de estabilidad del mismo.

Los factores desencadenantes son:

- Sobrecargas estáticas.
- Cargas dinámicas.
- Cambios en las condiciones hidrogeológicas.
- Factores climáticos (precipitación pluvial).
- Variación en la geometría.
- Reducción de parámetros resistentes.

La naturaleza del material que forma un talud esta íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que puede sufrir. Las propiedades físicas resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento tenso-deformacional determinando su estabilidad.

En suelos que generalmente se pueden considerar relativamente homogéneos en comparación con materiales rocosos, las diferencias en el grado de compactación, cimentación o granulometría predisponen zonas de debilidad y de circulación del agua, que pueden generar inestabilidades.

La mayor parte de las roturas se producen por los efectos del agua en el terreno, como la generación de presiones intersticiales, arrastres o erosión. El agua es el mayor enemigo de la estabilidad del talud.

La presencia de agua en un talud reduce su estabilidad al disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas tendentes a la inestabilidad. Los efectos son los siguientes.

- Reducción de la resistencia al corte de los planos de rotura al disminuir la tensión normal efectiva

$$\tau = c + (\sigma_n - u) * \tan(\varphi) = c + \sigma'_n \tan(\varphi)$$
- La presión ejercida sobre las grietas de tracción aumentan las fuerzas que tienden al deslizamiento.
- Aumento del peso del material por saturación.

$$\gamma = \gamma_d + S_n \gamma_w$$
- Erosión interna por flujo subsuperficial o subterráneo.

- Meteorización y cambios en la composición de materiales.
- Apertura de discontinuidades por agua congelada.

Donde

- τ es la resistencia al corte
- γ es el peso específico del suelo.
- γ_d es el peso específico seco.
- γ_w es el peso específico del agua

El nivel freático puede sufrir cambios estacionales o como consecuencia de dilatados periodos lluviosos o de sequía.

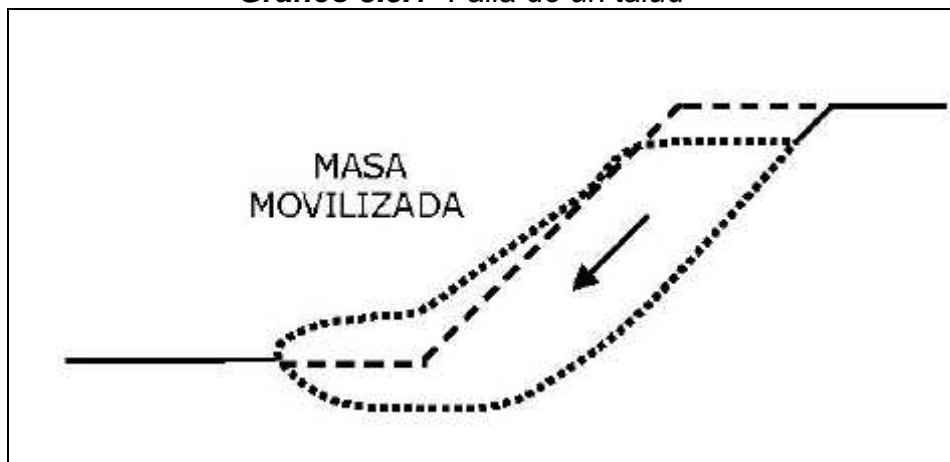
3.5 Tipos de Falla

Los taludes en los suelos fallan generalmente en superficies curvas, con formas diferentes influenciadas por la estratigrafía y morfología del talud.

Existen tres tipos fundamentales de falla.

1. Falla circular que pasa por el pie del talud (deslizamiento de pie).
2. Falla casi circular que pasa por debajo del pie del talud (deslizamiento profundo).
3. Falla plana.

Gráfico 3.5.1 Falla de un talud



Dependiendo de las condiciones del talud, la rotura puede ser a lo largo de una superficie plana o de una superficie poligonal.

La superficie poligonal está formada por varios tramos y se genera cuando el talud esta estratificado y no es homogéneo.

Los movimientos de taludes se clasifican según su proceso de falla.

3.5.1 Deslizamientos. Son movimientos de la masa de suelo o roca que se deslizan sobre planos de rotura cuando se supera la resistencia a cortante de estos planos. La masa inestable se desplaza como un conjunto. La mayoría de estos procesos son rápidos y de grandes volúmenes.

Existen dos tipos:

- a. Deslizamiento rotacional: Se dan en suelos cohesivos homogéneos. El plano de falla tiene lugar en superficies curvas. Una vez iniciada la inestabilidad la masa de suelo comienza a rotar. Esta se puede observar como varios bloques que se deslizan entre si y generan escalones. Las dimensiones de este proceso varían entre decenas a centenares de metros así en longitud como en anchura y se pueden dar de manera superficial o profunda. Después de ocurrida la falla se observa la masa deslizada en el pie del talud, formando un depósito con grietas de tracción transversales. En rocas, esta falla se da cuando el macizo es blando con un alto grado de fragmentación donde las discontinuidades no presentan debilidades preferentes.
- b. Deslizamiento trasnacional: El plano de falla se ubica en superficies planas débiles preexistentes (zonas de cambio de estrato). No son muy profundos, pero pueden ser extensos. Esta falla se da en suelos y rocas.

Las masas que se deslizan son bloques rectangulares previamente establecidos según la composición previa del talud. Estos deslizamientos son más rápidos que los rotacionales debido al mecanismo de falla.

3.5.2 Flujos. Los flujos son movimientos de masas de suelo o bloques de roca con un contenido alto de agua, el material esta suelto y la masa se comporta como un fluido, sufriendo una deformación permanente.

El agua es el principal desestabilizador debido a que provoca una perdida de resistencia en materiales con escasa cohesión. Se dan en laderas de pendiente baja y los movimientos alcanzan hasta varios kilómetros.

Existen cinco tipos de flujos

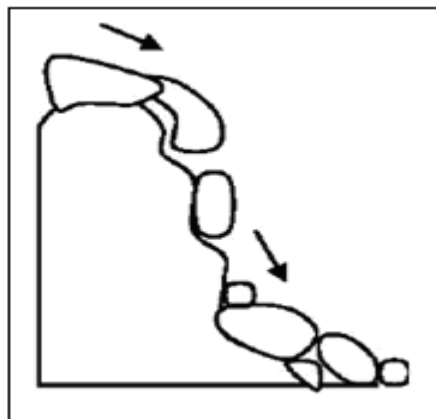
- *Coladas de barro*: Ocurren en taludes compuestos por materiales finos y homogéneos. La velocidad de este movimiento puede ser de hasta varios metros por segundo. Generalmente son pequeños movimientos. Todos los depósitos de material fino volcánico son vulnerables a este tipo de falla.
- *Golpes de arena*: Ocurren en taludes de arena seca y generalmente son inducidos por movimientos sísmicos o roturas por desecación que provocan colapsos en los enlaces entre partículas
- *Flujos de derrubios*: Son movimientos complejos que involucran a fragmentos rocosos, cantos, gravas, arenas, limos y arcillas. Se dan en laderas con materiales sueltos no consolidados. Estos son los más grandes debido a que involucran todo tipo de material.
- *Reptación*: Estos son movimientos superficiales de decímetros sumamente lentos e imperceptibles. Provoca deformaciones continuas que se manifiestan a largo plazo. Provoca el desfase e inclinación de árboles, postes etc.
- *Soliflucción*: Afecta a la zona superficial del talud provocado por el proceso de congelación y descongelación del agua en suelos finos.

3.5.3 Desprendimientos. Este proceso de falla se da mediante la caída de bloques o masas rocosas independientes debido a planos de discontinuidad previamente definidos. Son frecuentes en laderas de zonas montañosas, en acantilados y en paredes rocosas.

La rotura se da en forma de cuña y por bloques de varias familias de discontinuidades.

Son provocados por la erosión, pérdida de apoyo, presencia de agua o movimientos sísmicos.

Gráfico 3.5.2 Desprendimientos.



3.5.4 Desplazamientos Laterales. Este tipo de rotura se da cuando un bloque rocoso se desplaza horizontalmente sobre un material blando y deformable. Estos movimientos se dan a favor de pendientes suaves. Este movimiento es generado por la pérdida de resistencia del material blando. La parte superior del talud se fragmenta, generando grietas, desplazamientos diferenciales y vuelcos.

3.6 Investigación de deslizamientos

La investigación de las inestabilidades en taludes y zonas inestables requiere de cuatro fases indispensables.

- La identificación de los procesos.
- El estudio de las causas.
- El estudio de los factores que los controlan.
- El análisis de los movimientos.

La tabla 3.6.1 presenta un resumen de la metodología y sus procesos a seguir en la investigación de deslizamientos.

Tabla 3.6.1 Investigación de deslizamientos

Fases	Procesos	Objetivos
Revisión de información	Revisión de información Interpretación de la información	Identificación de los tipos de movimiento
Reconocimientos generales	Observaciones de campo Cartografía de los procesos Cartografía de los factores	Identificación de los factores condicionantes Evaluación general de la estabilidad de la zona
Estudio de los procesos y factores que los causan	Reconocimiento de campo Investigación preliminar del subsuelo Observaciones y medidas en afloramientos	Clasificación de los procesos y materiales Análisis de estabilidad según la presencia de procesos y concurrencia de factores condicionantes
Investigación a detalle	Sondos, ensayos en campo, muestreo Ensayos de laboratorio	Descripción y clasificación de los movimientos Datos morfológicos, geológicos y geomecánicos
Instrumentación	Inclinómetros, extensómetros, medidores de inclinación y piezómetros	Datos de velocidad, dirección, planos de rotura y presiones de agua.
Análisis de estabilidad	Equilibrio límite Modelos tenso-deformacionales	Definición de modelos y mecanismo de fallas Evaluación de la estabilidad

Gonzales de Vallejo, 2000

3.6.1 Reconocimientos generales. Para los reconocimientos de taludes se deben identificar y evaluar los siguientes factores.

- Relieve, geomorfología y pendientes.
- Litología y estratigrafía.
- Estructura de los materiales rocosos: Orientación de planos de discontinuidad.
- Aspectos hidrogeológicos.
- Vegetación en laderas y usos del suelo.

- Procesos actuantes (erosión, sismo, tectónicos).
- Modificaciones de los procesos naturales y antrópicos.
- Reconocimiento de movimientos actuales y antiguos.

La tabla 3.6.2 proporciona información importante para el reconocimiento los tipos de movimiento según sus características.

Tabla 3.6.2 Factores característicos para la identificación de movimientos de ladera.

Tipo de movimiento	Parte superior del talud	Zona baja del talud	Geometría
Desprendimientos	Laderas irregulares y rocosas de material suelto o derrubios en la parte superior. Bloques independizados por discontinuidades o fracturas. Grietas tras el talud y vegetación escasa	Acumulación de bloques y fragmentos rocosos	Pendientes elevadas (mayores a 50 grados)
Deslizamientos rotacionales	Grietas de tracción con curvas cóncavas hacia la ladera. Escarpes curvos con estrías. Superficies basculadas con encharcamientos. Contrastes de vegetación. Malas condiciones de drenaje con encharcamientos	Depósitos convexos, lobulados Desvío de cauces.	Pendientes entre 20 y 40 grados.
Deslizamientos traslacionales en rocas o suelos	Grietas de tracción verticales paralelas al talud. Escarpes verticales poco profundos. Material en bloques con grietas entre ellos Sin encharcamientos en cabecera Drenaje desordenado o ausencia del mismo.	Desvío de cauces. Acumulación de material con forma de lóbulos	Pendientes uniformes
Desplazamientos laterales	Bloques desplazados o basculados en varias direcciones. Pendientes suaves. Grandes grietas separando los bloques. Bloques con formas irregulares controladas por fracturas. Sistema de drenaje interrumpido, obstrucciones y valles asimétricos.	----	Pendientes suaves. A veces menor a 10 grados
Flujos de barro	Nichos cóncavos poco profundos. Pocas grietas Contrastes con la vegetación en zonas estables. Encharcamientos. Sin irregularidades importantes en el drenaje.	Lóbulos Morfología irregular ondulada	Pendientes de 15 a 20 grados
Flujos de tierra y derrubios	Varios escarpes. Depósitos con forma de corriente en valles. Ausencia de vegetación Drenaje irregular y perturbado en masa deslizada	Lóbulos, depósitos convexos. Morfología irregular	Pendientes mayores a 25 grados

Datos obtenidos de Soeters y Van Westen, 1996

El grado de inestabilidad de un talud también se puede clasificar según la pendiente que presente el talud según la tabla 3.6.3

Tabla 3.6.3 Clasificación según de deslizamientos según las dimensiones del talud.

Presencia de movimientos	Tipos de materiales	Pendiente		
		Menor a 10°	Entre 10° y 20°	Mayor a 20°
Sin movimientos	Sustrato estable	Estable	Estable	Estabilidad moderada
	Depositos superficiales no susceptibles	Estable	Generalmente estable	Estabilidad moderada
Con movimientos	Sustrato estable	Estable	Estabilidad moderada	
	Sustrato susceptible	Inestabilidad moderada		
	Depositos superficiales	Generalmente estable	Estabilidad moderada	Inestable

Datos de Nilsen, 1984

3.6.2 Análisis de los procesos de falla. El análisis de los procesos es una parte importante del estudio de deslizamientos. Este parte incluye los siguientes puntos.

- Identificación de los mecanismos, modelos y formas de rotura.
- Estudio de los factores que determinan los procesos de falla.
- Evaluación de la extensión, frecuencia y repetición de los desplazamientos.

Estos estudios se realizan en campo e intentan determinar los procesos, las causas y como afectan estas al movimiento. Estos estudios se hacen de manera cualitativa y pueden proporcionar mucha información acerca del deslizamiento.

A continuación se proporciona una lista de chequeo que puede servir como guía para la inspección de taludes en esta fase.

Tabla 3.6.4 Guía cualitativa para inspección de taludes en campo

	Reglón	Descripción
1	Tipo de movimiento	<i>Clasificar según tabla 3.6.2</i>
2	Material	<i>Características y estratificación</i>
3	Dimensiones	<i>Evaluar pendiente según Tabla 3.6.3</i>
4	Estado	<i>Activo o inactivo</i>
5	Contenido de agua	<i>Contenido de agua (seco, húmedo o saturado)</i>

Los factores más importantes que producen los efectos desencadenantes en un deslizamiento y a los cuales se les debe prestar mayor importancia en el análisis de procesos son los siguientes.

- Grado de meteorización o alteración.
- Distribución y orientación de planos y discontinuidades.
- Comportamiento geomecánico y propiedades de los materiales.
- Factores hidrogeológicos, niveles piezométricos.
- Condiciones climáticas.
- Factores antrópicos (provocados por la actividad humana).

Es importante saber que los factores que condicionan los procesos de inestabilidad son los que definen el mecanismo de falla y los tiempos de desplazamiento.

3.6.3 Investigación a detalle. Para conocer el mecanismo de falla de un talud se necesita realizar una investigación adecuada y un análisis de estabilidad. Los objetivos de esta investigación son: Determinar la propiedades geomecánicas y hidrogeológicas del suelo, determinar las características del movimiento, definir la

información para realizar el modelo matemático y efectuar el análisis de estabilidad.

Las propiedades de los materiales se pueden obtener mediante la utilización de métodos geofísicos, calicatas o trincheras, sondeos, ensayos de laboratorio, ensayos de campo. Esto nos da información acerca del comportamiento mecánico del suelo obteniendo así el tipo de suelo, su granulometría, su ángulo de fricción interna, cohesión, peso específico, relaciones volumétricas y todos los parámetros del mismo.

La situación de los planos de falla y la velocidad del movimiento representan un peso de suma importancia para la determinación de deslizamientos posibles.

Los planos de falla se pueden estudiar mediante la observación de campo, métodos eléctricos y sísmicos, excavaciones y calicatas, medidas en el interior de los sondeos, pruebas detalladas en sondeos, inclinómetros y extensómetros. La velocidad de los desplazamientos se puede evaluar mediante la observación de grietas, colocación de estacas, control topográfico, utilización de inclinómetros y extensómetros, utilización del GPS y mediante el uso de la interferometría.

Los reconocimientos geológicos a detalle podrían determinar de forma aproximada la posible posición de los planos de falla a partir de criterios meramente geológicos, estratigráficos o estructurales.

Uno de los métodos directos utilizados en el interior de los sondeos es la instalación de inclinómetros, estos deben introducirse más allá del plano de falla, el aparato mide la inclinación respecto a la vertical denotando curvas de desplazamiento cuyo punto de inflexión denota la ubicación y situación del plano de falla. El inclinómetro digital determina el perfil del sondeo y junto a la tubería inclinométrica son capaces de monitorear cualquier movimiento horizontal dentro de la misma.

4 Instrumentación Geotécnica

4.1 Consideraciones generales

La instrumentación geotécnica tiene como finalidad determinar el comportamiento del terreno. De esta manera que se pueda predecir el estado del mismo frente a cargas, empujes y otras acciones provocadas de forma natural o por obras civiles.

La implementación de un programa de instrumentación geotécnica requiere elegir las variables y sus magnitudes a medir y el tipo de instrumento que se utilizará.

La frecuencia de las lecturas depende de las magnitudes que se requieren medir y la velocidad en el que los procesos se dan en el terreno. Estas lecturas pueden ser manuales o automáticas. La elección entre un sistema automático o manual depende del número de sensores, las características de los aparatos, frecuencia de toma de datos, cantidad de datos a tomar, accesibilidad al sitio instrumentado, ubicación de los sensores y el tiempo que se tiene para el análisis, postproceso de datos, interpretación de datos y toma de decisiones.

4.2 Planificación del monitoreo usando instrumentación geotécnica.

La planificación de un monitoreo geotécnico lleva el mismo proceso que cualquier diseño de ingeniería, donde se comienza definiendo los objetivos, se prosigue a creando un algoritmo lógico de preparación de planes y especificaciones y concluye planificando como se implementara la medición de datos.

Es importante hacer énfasis que un plan de monitoreo es una cadena frágil y minuciosa de vínculos entre actividades sumamente susceptible a errores. También es importante mencionar que los instrumentos de medición son solamente un medio para obtener datos y no un fin en sí. A continuación se presentan los pasos ordenados que se deben de seguir antes de comenzar la instrumentación de campo. Una práctica que no es recomendable es basar el monitoreo en la utilización de un aparato específico, ya que la selección del aparato se define durante la planificación.

4.2.1 Definir las condiciones del proyecto: El ingeniero encargado de la planificación debe familiarizarse con las condiciones específicas del proyecto. Esto significa conocer el las características del proyecto, la estratigrafía del terreno, propiedades del suelo, condición de las aguas subterráneas, estado de las edificaciones aledañas, condiciones ambientales. Si el monitoreo geotécnico fue

solicitado para resolver alguna crisis, el ingeniero debe conocer los detalles de la problemática y todos los pormenores. Este paso se puede obviar solo cuando el ingeniero responsable de la planificación ya está familiarizado con el proyecto.

4.2.2 Estimar los mecanismos que controlan el comportamiento: Se debe formular una hipótesis sobre cuáles son los mecanismos que controlan el proceso a monitorear. Esta hipótesis debe basarse en conocimientos teóricos del comportamiento de suelo y rocas anteriormente mencionados. Esta hipótesis debe abarcar los mecanismos más probables.

4.2.3 Definir las preguntas geotécnicas que deben de ser resueltas: Todo instrumento de monitoreo debe ser colocado específicamente para resolver una pregunta. Si no existe pregunta no debería existir instrumentación. Por esto se deben listar una serie de preguntas a resolver para poder generar un plan.

4.2.4 Definir el propósito de la instrumentación: Luego de conocer las preguntas, la instrumentación se debe basar en un propósito, estas preguntas nos pueden dar el propósito o ayudar a definirlo, pero cuando la solución de las mismas no conlleven interés alguno para el proyecto o intereses de los involucrados, la instrumentación carece de propósito y se debe abortar la planificación e instrumentación.

4.2.5 Seleccionar los parámetros a ser monitoreados: Estos parámetros son las variables que se medirán, estas variables seleccionadas deben de estar determinadas según el mecanismo hipotético de falla, por ejemplo: Presión de poro, esfuerzo total, deformación, carga, temperatura, etc. Para determinar los parámetros se debe de identificar los más importantes. Generalmente la variación de un parámetro depende de la variación de otro, por lo que podemos monitorear uno e inferir el comportamiento del otro o monitorear ambos y establecer una relación. Los instrumentos generalmente miden un único parámetro, por lo que el parámetro a medir tiene que ser completamente representativo del proceso. Cuando se tiene que escoger un único aparato y, por lo tanto, una única variable se debe escoger aquella que presente menos ambigüedad y más certeza del fenómeno generalmente la variable menos ambigua es la de deformación.

4.2.6 Estimar las magnitudes de cambio: Las predicciones de las magnitudes de cambio son necesarias, solo así podemos definir la sensibilidad y la precisión del aparato requerido. Generalmente lo más importante para la selección de un aparato es determinar el valor máximo y mínimo posible o el máximo y mínimo valor de interés. Las estimaciones usualmente requieren un criterio amplio de ingeniería aunque en algunos casos no.

Existe una tendencia totalmente innecesaria a buscar aparatos con extremada precisión en las medidas, muchos de los procesos se pueden medir con poca precisión pero con alta confiabilidad. Generalmente los aparatos más caros y sofisticados son los más precisos y es por eso que la evaluación de la necesidad de precisión es muy importante.

Es importante hacer énfasis en que en la mayoría de casos las magnitudes a medir serán relativas y no absolutas, por lo que las precisiones de los aparatos deben de ser definida en función de los cambios de la variable y no las magnitudes absolutas.

En esta etapa de la planificación es muy importante definir un método cualitativo de observancia (advertencias) que indique una escala de cambios en las variables y sus riesgos inmediatos.

Uno de los conceptos mas utilizados es el de los semáforos, donde se utiliza el color verde para indicar que no existe riesgo alguno, el amarillo para indicar precaución y el rojo para indicar peligro inminente.

La tabla 4.1 muestra un ejemplo de lo anterior basado en un criterio de deformación.

Tabla 4.1 Ejemplo de un método cualitativo de alertas

Advertencia	Color	Criterio	Acción
1	Verde	Movimiento menor a 2 mm	Sin alarmas, continuar monitoreo
2	Amarillo	Movimiento entre 2 y 5 mm	Reportar y citar a los responsables
3	Rojo	Movimiento mayor a 5 mm	Activar plan de emergencia

4.2.7 Determinar las acciones a seguir según los escenarios probables:

Es indispensable que previamente al monitoreo se definan todos los posibles escenarios que puedan surgir de la observación de las variables y se propongan soluciones a cada escenario. Esto se debe hacer para luego determinar, con base al monitoreo, cuál de esas acciones previamente definidas hay que tomar. Con esto se ahorrará mucho tiempo en la respuesta.

Usualmente estas acciones se colocan dentro del método cualitativo de observancia en donde se ordenan las escalas de las magnitudes posibles de cambio de la variable, su riesgo o símbolo de advertencia (se puede utilizar el método del semáforo) y la acción a seguir (observar el ejemplo de la tabla 4.1)

4.2.8 Asignar a los responsables de las diferentes etapas del monitoreo:

Las etapas básicas son las siguientes: Planificación, calibración, instalación, mantenimiento, recolección de datos, procesamiento de datos, presentación de datos, interpretación, reporte, acciones a tomar. Estas etapas pueden ser asignadas al dueño, contratista, diseñador o a un especialista en instrumentación y deben de ser asignadas en función de los intereses de un monitoreo efectivo y exitoso. Se debe tratar de no generar choque de intereses entre las tareas del

monitoreo y los responsables de las mismas recordando siempre que los monitoreos geotécnicos buscan establecer cambios en el comportamiento de los suelos que algunas veces son provocados por obras civiles, por lo que pueden afectar distintos intereses.

4.2.9 Seleccionar de los instrumentos de medición: Solo después de haber completado correctamente los pasos anteriores se puede tomar una decisión acerca del aparato que se debe de utilizar para instrumentar el proceso. Uno de los factores más importantes que se presuponen al escoger el aparato es que la toma de datos sea siempre bajo las mismas condiciones y se de un manejo similar, de manera que los datos que se midan sean siempre bajo las mismas condiciones.

El costo de un aparato nunca debe ser el criterio a utilizar, es importante mencionar que el costo de la compra del aparato no significa que éste sea el más económico, ya que se deben tomar en cuenta otros costos como: calibración, instalación, mantenimiento, monitoreo, reutilización y procesamiento de datos.

El factor más importante en la decisión del aparato es que cumpla con la precisión definida previamente en la medición de la variable determinada.

Se debe investigar acerca del desenvolvimiento del aparato en el pasado y su durabilidad en el ambiente donde va a trabajar. Usualmente el ambiente donde trabajan los aparatos de instrumentación geotécnica son los mas agresivos y se debe de tomar en cuenta que estos estarán bajo las siguientes condiciones: Grandes deformaciones, altas presiones, corrosión, temperaturas extremas, golpes, vandalismo, polvo, suciedad, lodos, lluvia, agentes químicos, alta humedad, debajo de agua salada o sucia, corrientes discontinuas de energía, etc.

Se debe considerar la necesidad de sistemas automáticos de medición solo cuando sea necesario.

4.2.10 Seleccionar de la ubicación del instrumento en el sitio: La ubicación de los instrumentos debe darse en los puntos donde refleje el comportamiento del proceso y donde la ubicación sea congruente con el método de análisis en la interpretación de datos posterior.

Se debe buscar zonas importantes, que sean susceptibles al proceso y que sean representativas del mismo, donde se predigan altos esfuerzos, altas cargas, alto contenido de agua o movimientos. Usualmente se definen zonas principales, que se consideran primordiales y representativas, y luego se suelen colocar instrumentación en otras zonas secundarias que nos den redundancia y confirmen el proceso.

Debido a la variabilidad de los procesos de suelo y rocas no se recomienda ubicar un único aparato para determinar todo el proceso.

Es importante que las ubicaciones elegidas sean flexibles a cambios ya que puede pasar un tiempo considerable entre este paso y la instalación en campo, por lo que los procesos pueden indicar otras ubicaciones más relevantes.

4.2.11 Planificar la recolección, procesamiento, presentación, interpretación, reporte e implementación de datos: Esta etapa debe de ser planificada minuciosamente, ya que es la parte más importante en toda la planificación. Se debe definir el ente responsable de la toma de los datos y la persona que efectuara la toma, generalmente es un ingeniero junior supervisado por un ingeniero geotécnico de experiencia, esto se da de manera que el ingeniero junior se fije en los pormenores de la toma de datos y deja las decisiones complejas al ingeniero geotécnico con experiencia.

Se debe establecer un procedimiento escrito que mencione todo lo relacionado para la toma de datos en campo. Este documento debe llevar paso a paso los procedimientos de coordinación con las partes, la programación de los equipos y conexión de los mismos. Se deben adjuntar dibujos esquemáticos detallados y ejemplos. Se deben listar todos los componentes necesarios para realizar la toma.

En esta etapa se decide la frecuencia de la toma de datos, la cual dependerá de la magnitud, importancia y velocidad del proceso.

Se deben definir los programas de introducción y análisis de datos necesarios, conseguir los manuales de los mismos y el personal capacitado para manejarlos.

Esta parte de la planificación debe dejar en claro las responsabilidades del trabajo en conjunto de todas la partes.

Se debe determinar la forma en que se presentarán los datos, ya sean gráficas, tablas, dibujos, animaciones, etc.

En los monitoreos se generan una cantidad enorme de datos, todos los pasos anteriores se han realizado para que estos datos sean constantes y confiables, pero es de vital importancia que los datos sean interpretados de la forma correcta y que no se queden engavetados.

Se debe establecer el responsable de la interpretación, además en esta fase se debe de crear un procedimiento de interpretación de manera que busque el éxito de los objetivos propuestos por el plan de monitoreo.

La interpretación y reinterpretación es un proceso constante que se va dando durante la adquisición de datos, ya que estos datos deben ser estudiados durante un periodo considerable de tiempo.

Se debe establecer qué tipos de gráficas y reportes se quieren presentar con la finalidad de exponer claramente la finalidad del estudio.

Los responsables de la interpretación deben de crear procedimientos dentro de ellos mismos para llegar poco a poco a conclusiones. Además se debe definir los lineamientos del reporte final.

4.2.12 Planificar el control de los factores que pueden influenciar las mediciones del monitoreo: Las mediciones que surgen del monitoreo deben ser acompañadas de información extra que nos ayude a determinar conclusiones más certeras. Se deben mantener en observación todos los factores del ambiente geológico, controlar todos los cambios en los estratos y la vegetación, así como la temperatura y las condiciones atmosféricas. Además se debe tener un informe completo de la instalación del aparato dado que nos pueden proporcionar información acerca de factores que afectan la medición.

4.2.13 Establecer procedimientos de medición que garanticen lecturas correctas: Se deben establecer los procedimientos de medición de manera que se esté seguro que los aparatos de instrumentación nos están dando las medidas correctas. Una práctica común es crear un sistema de respaldo usando otros aparatos para medir un mismo proceso, de esta manera podemos certificar que la información brindada por un aparato es la correcta debido a que está respaldada por otro.

Se debe tomar en cuenta que generalmente los operarios de los instrumentos son seres humanos, por lo que regular un procedimiento puede hacer las mediciones sistemáticas y reducir el error.

Otra buena práctica es generar una lista de chequeo para el campo donde se especifique las prácticas a seguir para examinar el funcionamiento correcto del aparato.

4.2.14 Listar el objetivo de cada instrumento: A estas alturas de la planificación es importante generar una lista de instrumentos a utilizar, colocándole a cada uno el objetivo específico que desempeñará en el monitoreo. Si existe un aparato que no tenga un objetivo claro y conciso este deberá ser reevaluado y posiblemente eliminado. Esta parte nos sirve para crear un panorama con objetivos claros de todo el monitoreo que se va a realizar y generalmente nos ahorra dinero en prácticas sin fundamento.

4.2.15 Planificar la instalación: Se debe hacer una planificación de los procedimientos de instalación y generar una calendarización de los mismos. Se deben escribir los pasos a seguir durante la instalación, siempre usando los manuales de los aparatos y los conocimientos de los especialistas.

El documento debe llevar una lista de los materiales y herramientas necesarias. Se debe crear una hoja especial donde se anoten todas las observaciones durante la instalación que puedan afectar la toma de datos.

4.2.16 Planificar el mantenimiento y calibración: Las medidas de los instrumentos son útiles únicamente si se conoce la calibración de los mismos. Generalmente los aparatos traen una calibración de fábrica, pero ésta no es sumamente confiable ya que el fabricante no es el responsable de la calibración precisa, por lo que se recomienda que sean calibrados inicialmente por los responsables de la toma de datos.

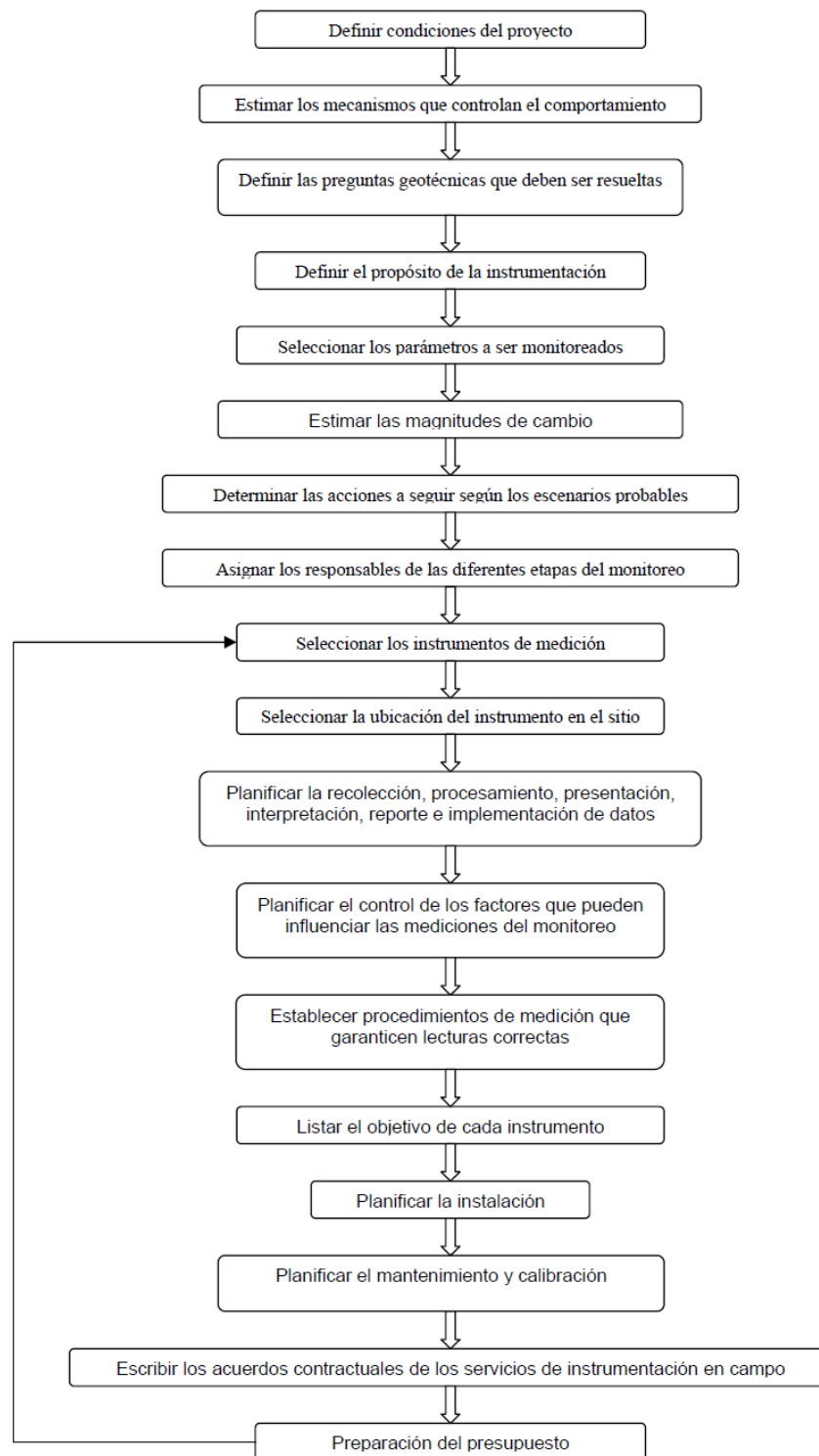
Luego de la puesta en marcha de los aparatos, estos deben ser calibrados durante su vida de servicio, más aun si los aparatos son portátiles. Una calibración frecuente puede ser de mucha ayuda en la interpretación de los datos, ya que aquí podemos hacer las correcciones necesarias. Por esto se debe hacer un plan sobre la calibración y el mantenimiento de los instrumentos. El mantenimiento del aparato es necesario para un buen funcionamiento, usualmente los manuales informan sobre como limpiar, secar, lubricar y desarmar cada uno de los componentes de los instrumentos.

4.2.17 Escribir los acuerdos contractuales de los servicios de instrumentación en campo: Los servicios de instrumentación incluyen instalación, calibración, mantenimiento y toma, procesamiento, presentación, interpretación y reporte de datos. Definir todos los aspectos legales sobre obligaciones y responsabilidades de manera formal puede inducir al éxito del monitoreo.

4.2.18 Preparación del presupuesto: Todo el proyecto de monitoreo geotécnico conlleva un costo. Ahora que ya se tiene el plan y que se divisa de manera clara los objetivos, aparatos y todos los servicios requeridos, se debe de preparar un presupuesto incluyendo el costo de cada una de las actividades. Es acá donde se deben reanalizar todos los pasos de la planificación para verificar si no existen gastos innecesarios que haga no factible el proyecto.

Si el presupuesto final se sale de lo previsto o de lo que se esta dispuesto a pagar se debe de buscar minimizar los costos en la selección del instrumento o cambiar la variable de medición, se debe de buscar una justificación para la implementación del plan resultante; se debe de tomar en cuenta que los programas de monitoreo generalmente son caros y que resultan en pocos resultados tangibles para los contratistas, pero la utilización de estos programas pueden ahorrar cantidades dinero y evitar problemas legales. Existen muchos beneficios económicos y no económicos de un buen monitoreo geotécnico.

4.3 Diagrama de flujo para planificar un monitoreo



5. Inclínómetro

5.1 Definición

Los inclinómetros son unos de los principales métodos de investigación de deslizamientos, estos monitorean los desplazamientos horizontales en un sondeo.

Este aparato contiene un transductor senso-gravitacional que al recorrer una tubería mide la inclinación de la misma respecto a la vertical, generalmente esta tubería se coloca verticalmente de manera que proporcione información que defina las superficies horizontales de deformación.

Las aplicaciones típicas del inclinómetro son:

- Determinar la zona de falla de un talud.
- Monitorear el movimiento horizontal de presas, taludes, excavaciones y túneles.
- Monitorear la deflexión en elementos estructurales.

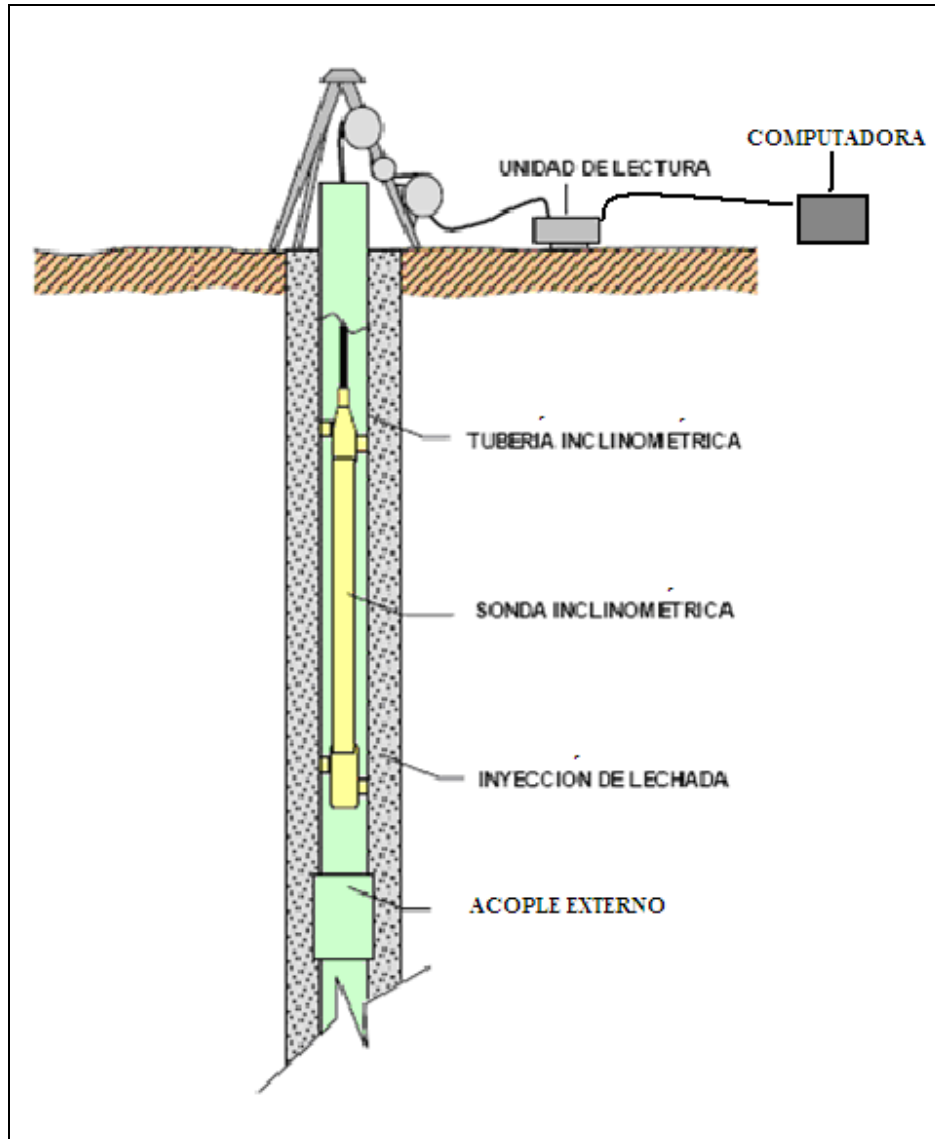
También se puede utilizar dentro de sondeos horizontales para determinar asentamientos bajo cimentaciones o deformaciones verticales en túneles. Otra aplicación es la instalación de forma inclinada, esto se da cuando se requiere conocer movimientos de caras inclinadas como por ejemplo alguna superficie de concreto que se presente de forma oblicua (presas).

Los inclinómetros generalmente se componen de cinco elementos.

- Una tubería de guía instalada de forma permanente.
- Una sonda inclinométrica que contiene un transductor senso-gravitacional.
- Una unidad de lectura con batería recargable, que indica la inclinación del sensor y almacena los datos.
- Un cable eléctrico graduado que comunica el sensor con la unidad de lectura.
- Programas de computo de procesamiento de datos

El gráfico 5.1.1 muestra un esquema de lo anteriormente descrito.

Gráfico 5.1.1 Dibujo esquemático de los elementos del inclinómetro



El principio fundamental del inclinómetro simple. La sonda inclinométrica tiene una longitud constante que está apoyada por dos ruedas en los extremos, las cuales son guiadas por unos carriles que posee la tubería inclinométrica, la sonda posee un sensor que mide el ángulo respecto a la vertical, ya que el inclinómetro utiliza esta única variable para determinar deformación horizontal que está en función del ángulo obtenido.

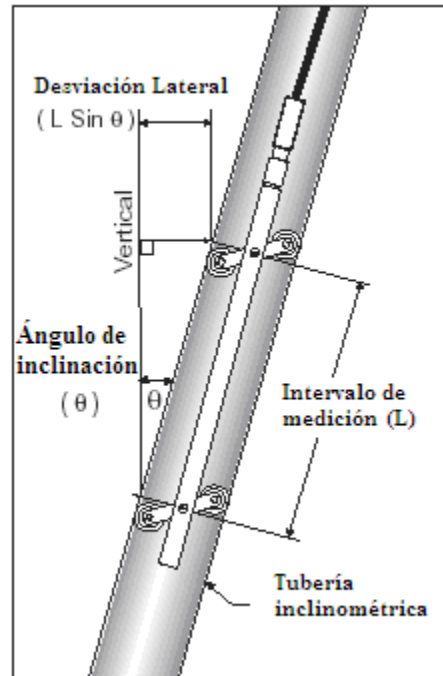
La deformación de la tubería provoca que la sonda se incline. Como se conoce la longitud de la sonda (L) y el ángulo respecto a la vertical (θ) se puede determinar el cateto horizontal mediante una ecuación trigonométrica sencilla.

$$\Delta x = L * \text{sen}(\theta)$$

La sonda recorre toda la tubería inclinométrica por intervalos de L , leyendo la deformación en cada punto, para luego procesar los datos en programas de computación que proporcionan graficas de la inclinación de la tubería.

El gráfico 5.1.2 esquematiza el principio fundamental del inclinómetro

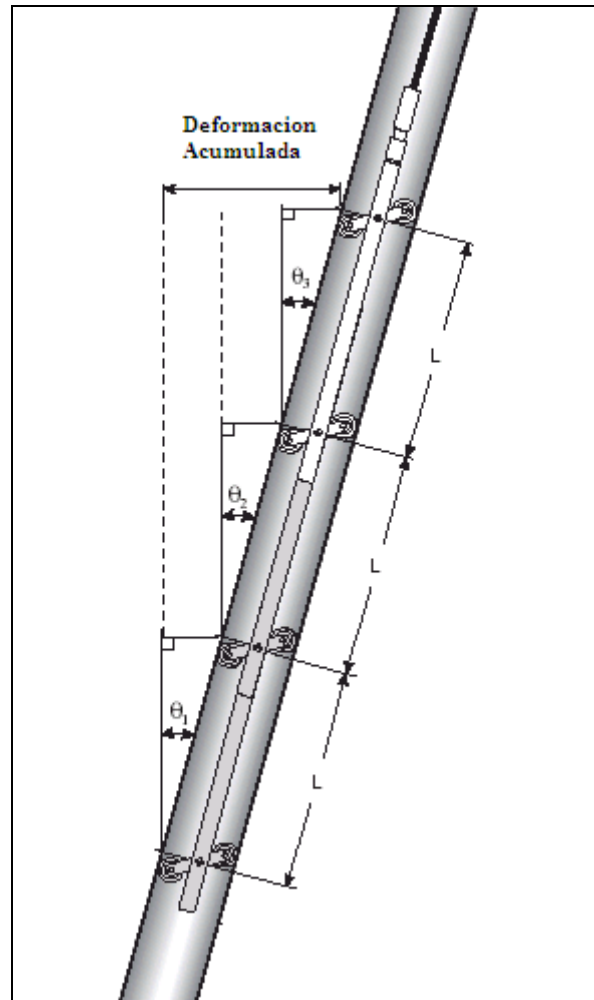
Gráfico 5.1.2 Principio fundamental del inclinómetro



Los movimientos laterales se determinan al comparar los datos de la lectura mas reciente con la lectura inicial (base), graficando los cambios acumulados en cada intervalo y produciendo un perfil muy detallado del movimiento. Los perfiles de desplazamientos sirven para determinar la magnitud, profundidad y magnitud del movimiento.

El gráfico 5.1.3 proporciona un esquema sobre el recorrido y las etapas de lectura durante una medición.

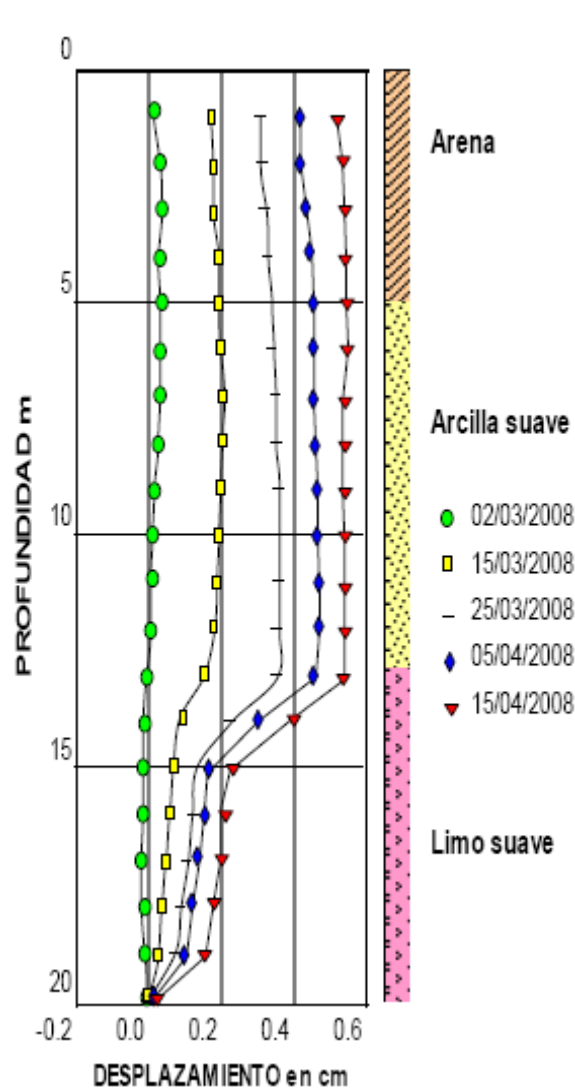
Gráfico 5.1.3 Esquema del proceso de recorrido del inclinómetro



La unidad de lectura almacena los datos en la memoria y mediante el seguimiento del plan de monitoreo se realizan las medidas periódicas y estas se ingresan a los programas de cómputo disponibles. Es importante mencionar que el análisis de datos debe ser relativo y no absoluto, es decir que se deben analizar los cambios entre una medición y otra para poder establecer lo que sucede en el proceso.

La siguiente gráfica muestra un ejemplo de las gráficas de post proceso de datos que nos dan los programas de cómputo.

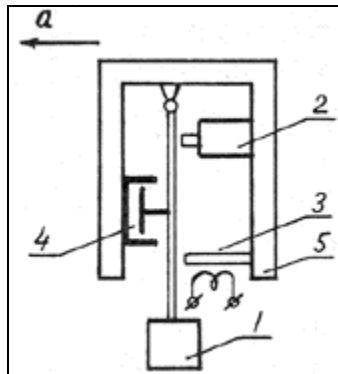
Gráfico 5.1.4 Ejemplo de un gráfico proporcionado por un programa de cómputo



5.2 Tipos de Inclinómetros

5.2.1 Inclinómetro con Transductor de Acelerómetro de Fuerza Balanceadora (Servo-Acelerómetro). Esta tecnología consiste en que la sonda contiene instalada una masa en forma de péndulo, teniendo alrededor del péndulo dos transductores que trabajan en planos separados a 90 grados. Cuando se inclina la sonda inclinométrica, la masa del péndulo se intenta mover pero se aplica una fuerza para mantenerla en su posición original. Esta fuerza aplicada demanda un voltaje necesario el cual es directamente proporcional al seno del ángulo.

A continuación se presenta un diagrama del acelerómetro.

Gráfico 5.2.1 Diagrama del Acelerómetro

a =aceleración, 1=masa, 2, sensor de posición, 3=servomecanismo, 4=controlador, 5=cubierta.

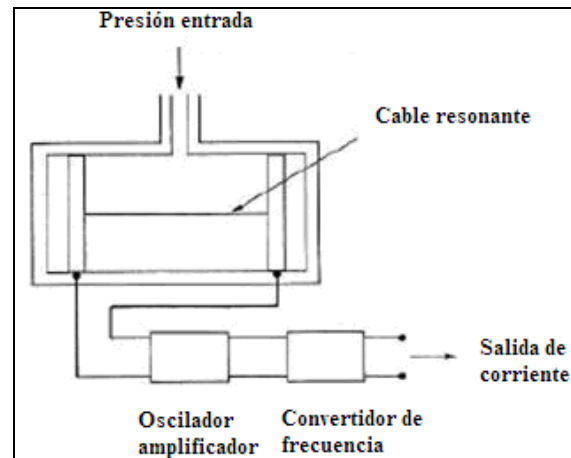
5.2.2 Inclinómetro con transductor de esfuerzos. Esta tecnología se basa en medidores de esfuerzos en un circuito colocado alrededor del péndulo, el cual no puede moverse. La inclinación provoca que se produzcan esfuerzos de pandeo en el péndulo provocando un cambio en el indicador de esfuerzos. Se utiliza un circuito de puente tipo Wheatstone.

5.2.3 Inclinómetro de cuerda vibrante. Este inclinómetro contiene un sensor de cuerda vibrante, esta tecnología es relativamente nueva que procede de los recientes avances en el campo de la Electrónica. Este dispositivo basa sus mediciones a partir de las deformaciones, las cuales producen voltajes o corrientes a partir de un esfuerzo mecánico, que produce vibraciones, midiendo la frecuencia vibratoria de un cable tensionado a una membrana y su tubo principal y se mide la variación por medio de una bobina electromagnética. Son precisos y fiables. Permiten transmitir la señal a distancias de más de 1000 metros sin perder la precisión.

Un dispositivo típico se muestra en la figura 5.2.2. El cable se tiende a lo largo de una cámara que contiene el fluido a una presión conocida y sometido a un campo magnético. El cable resuena a su frecuencia natural de acuerdo con su tensión, que varía con la presión. Esa frecuencia se mide por circuitos electrónicos integrados en el dispositivo. Tales dispositivos son muy precisos y son particularmente insensibles a los cambios en las condiciones ambientales.

La tensión de la cuerda varía en función de la fuerza que transmite el péndulo y esta relacionada de manera directa a la inclinación de la sonda.

Gráfico 5.2.2 Diagrama de la tecnología de cuerda vibrante



5.2.4 Inclinómetros con tecnología SMEM. Los avances en el campo de los semiconductores están dando lugar a circuitos integrados con características tridimensionales e incluso con piezas móviles. Estos dispositivos, llamados Sistemas Micro Electromecánicos (SMEM), pueden resolver muchos problemas que un microprocesador con su software no pueden. La tecnología MEMS puede aplicarse utilizando un sin número de diferentes materiales y técnicas de fabricación; la elección dependerá del tipo de dispositivo que se está creando y el sector comercial en el que tiene que operar.

Esta nueva tecnología a desarrollado micro mecanismos para la medición de los ángulos de inclinación de manera muy precisa y pequeña. Este desarrollo a logrado generar inclinómetros que leen 360 grados completos.

5.3 Factores que afectan la precisión del inclinómetro

5.3.1 Precisión del transductor de sensor de gravedad. Generalmente los fabricantes especifican la precisión de los transductores senso-gravitacionales pero es necesario un chequeo sistemático para asegurar que el transductor está funcionando de forma correcta.

Los errores de este tipo se pueden clasificar en tres grupos.

- **Escala:** Esta es la relación que posee el transductor entre lo que lo ingresa y lo que proporciona y esta define la pendiente de la curva de calibración.
- **Desfase del cero:** El cero del inclinómetro es la medida que proporciona cuando la sonda esta en una alineación vertical real. Si cambia el cero entre dos mediciones las comparaciones entre dos medidas no son validas debido a que no conservan el mismo punto de origen.

- **Rotación del Azimut:** Este error consiste en la diferencia de orientación entre el transductor y el ensamblaje de las ruedas de la sonda.

Estos tres tipos de errores se producen cuando el inclinómetro esta sujeto a tratos fuertes y no se cuida la sonda dejando que está se golpee bruscamente.

Es por esto que se recomienda que se calibre periódicamente el instrumento.

5.3.2 Diseño y estado de las ruedas. El ensamblaje de las ruedas no debe permitir holguras ni movimientos no deseados de las mismas, así como también debe tener un perfecto encaje entre las ruedas y las guías de la tubería inclinométrica.

El uso genera que las ruedas se desgasten y se produzca juego entre las mismas, por lo que se recomienda que se le de un buen mantenimiento al equipo y se reemplace cuando sea necesario.

Además es importante que los fabricantes de los inclinómetros provean de la tubería inclinométrica o nos indique que proveedor debe de proporcionarnos está, ya que generalmente las ruedas están diseñadas para ciertas tuberías específicas.

5.3.3 Alineación de la tubería inclinométrica. La precisión del instrumento disminuye en cuanto la alineación de la tubería se aleja de la verticalidad. Se debe tratar de tener perforaciones con perfiles lo más cercanos a la verticalidad posible.

Si el azimut de la tubería está 5 grados rotado, un cambio de 1 grado en la tubería puede provocar un error de 50 mm en 30 metros, por lo que se debe de tener mucha precaución en la instalación.

5.3.4 Diámetro de la tubería inclinométrica. La precisión aumenta en la medida que aumenta el diámetro de la tubería inclinométrica. Para un espesor fijo de rueda y un ancho fijo de carril, el movimiento rotacional de la sonda en torno a su eje longitudinal disminuye a medida que el diámetro de la tubería aumenta, provocando una disminución en el error de rotación del azimut.

5.3.5 Procedimiento del relleno de lechada exterior. Las lechadas pobres generalmente provocan alteraciones en las lecturas en el corto plazo pero suelen estabilizarse después de un periodo de tiempo.

Para maximizar la precisión se debe procurar hacer perforaciones que eviten la distorsión del suelo e inyectar una lechada que llene completamente todos los agujeros y cavernas posibles. Se pueden hacer inyecciones con arena fina, pero generalmente es mejor que sea relleno por inyecciones de agua-cemento.

No es práctico tratar de igualar las características del suelo con las de la lechada debido a que las propiedades del suelo y la lechada son diferentes. El diseño de la mezcla de lechada debe realizarse de manera que está presente un módulo de elasticidad parecido al del suelo y esto se logra con la relación de agua-cemento, donde mientras más cemento más rígida es la lechada. Si logramos que la lechada tenga un módulo de elasticidad parecido al del suelo los cambios dentro del suelo serán inmediatamente manifestados dentro del relleno y, por lo tanto, trasladados a la tubería de inclinación.

5.3.6 El efecto de espiral en la tubería. Al instalar la tubería inclinométrica dentro de la perforación los carriles de la tubería suelen desviarse conforme a la profundidad de la misma. Este efecto de espiral en los carriles es una causa de error en las lecturas y puede provocar errores en los datos.

Este fenómeno se puede reducir evitando que la tubería esté expuesta al sol o a altas temperaturas. La tubería se debe mantener bajo la sombra durante todo el tiempo de almacenaje previo a la instalación.

Es importante cuidar la tubería y almacenarla de manera que esté debidamente apoyada, esto es porque se deben evitar esfuerzos de pandeo que provoquen el efecto de espiral.

El efecto espiral se puede conocer antes de instalar la tubería, esto se hace armando la tubería en forma horizontal y tirando una plomada a lo largo de los carriles, de esta manera se puede conocer el daño de la tubería y considerar este error en los datos. Con esta prueba se puede analizar tramo por tramo de la tubería y determinar una secuencia de tubería que anule un espiral con el siguiente.

El efecto de espiral no se da en el tiempo, esto quiere decir que una vez instalada la tubería los carriles mantendrán su orientación durante su vida útil.

5.3.6 Repetitividad de la posición de lectura. Cualquier descuido en la repetición de la lectura a las mismas profundidades reducirá significativamente la precisión.

El cable debe estar marcado permanentemente a cada cierta distancia con gran precisión. Este cable no debe estar sujeto a tensión para evitar un desplazamiento de las marcas. Esta fuente de error aumenta a medida que la profundidad de la perforación a monitorear aumenta y se agrava cuando el perfil de la perforación se aleja de la verticalidad.

5.3.7 Intervalo de longitud entre lecturas. La precisión máxima de las lecturas se alcanza cuando la separación entre medidas es igual a la longitud entre ruedas de la sonda inclinométrica.

Esta fuente de error crece cuando se incrementa este intervalo y la deformación de la tubería no sigue curvas suaves o líneas continuas. Al incrementar estos intervalos se pueden perder zonas de corte de gran interés en la investigación. Se recomienda utilizar intervalos de medición más grandes que el óptimo únicamente cuando se conoce de antemano que no existirán zonas de cambios locales abruptos.

5.3.8 Efectos de temperatura. Los efectos de temperatura pueden afectar al transductor generando errores notables. Además el cambio de temperatura afecta la longitud de la sonda inclinométrica y a la unidad de lectura. Para reducir este error se recomienda, que luego de introducir la sonda, se espere 10 minutos en lo que se estabiliza la temperatura y se comienzan a hacer las lecturas.

Algunas veces se opta por llenar de agua la tubería inclinométrica y así lograr tener una temperatura constante a lo largo de la misma. Al igual que otras fuentes de error, ésta se reduce cuando el sondeo está cercano a la verticalidad.

5.3.9 Cuidado de la sonda inclinométrica. Los golpes a la sonda pueden producir traslaciones del cero y rotaciones del azimut. Se pueden reducir estos errores si se tiene un buen cuidado de la sonda, para esto se debe tratar de operar la sonda únicamente cuando la unidad de lectura está prendida y se debe verificar que la sonda tenga un amortiguador de hule en el extremo inferior. Nunca se debe dejar que la sonda toque abruptamente el fondo del sondeo.

5.4 Tipos de Tubería Inclinométrica

5.4.1 Tubería plástica. La tubería de ABS (Acrilonitrilo-butadienestiren) es la más usada y la que más se adapta a todas las aplicaciones. La tubería de PVC es también usada pero esta tiende a ser más quebradiza, sobre todo a bajas temperaturas. Estas tuberías se fabrican con diámetros de 48 a 89mm comúnmente.

Estas tuberías vienen con acoples rígidos y con carriles auto-alienables. Todas las tuberías inclinométricas deben de ser instaladas según las instrucciones provistas por el fabricante.

5.4.1 Tubería de aluminio. Las tuberías de aluminio son fabricadas con moldes que cuando se hace la extrusión, los carriles quedan marcados tanto dentro como fuera de la tubería. Los diámetros que se manejan en estas tuberías van de 61 a 86 milímetros siendo medidos entre las partes externas de la protuberancias de los carriles. Los moldes de la extrusión del diámetro mayor de la tubería son utilizados para fabricar los acoples que miden 150 milímetros.

El problema de este tipo de tubería es la temperatura y puede generar problemas durante las lecturas debido a que los cambios de temperatura

generaran una variación en la longitud de la tubería inclinométrica que puede ser una fuente de error.

5.4.1 Tubería de acero. Estas tuberías son de acero sin costura y son de forma cuadrada. La sonda inclinométrica se hace recorrer por las esquinas de la tubería.

Esta aplicación es utilizable cuando se requiere minimizar los costos, rapidez en la ejecución del monitoreo o cuando no se requiera de mediciones muy precisas. La tubería comúnmente usada tiene 50 milímetros afuera y 44 milímetros adentro pero se recomienda utilizar tuberías mas grandes cuando se esperan altas deformaciones. Los acoples son fabricados de manera que se ajusten perfectamente a la tubería

El problema de este tipo de tubería es la corrosión y puede generar problemas a largo plazo como el deterioro de los carriles o el deterioro de la tubería. Este problema se puede minimizar utilizando pinturas especiales pero siempre estará latente.

5.5 Selección de la tubería Inclinométrica.

La tubería de inclinación, los acoples y el método de instalación deben de ser elegidos de manera que se ajusten al movimiento esperado del suelo o de la roca.

Esta decisión dependerá de los siguientes factores:

- **Compresión y tensión en la tubería:** Si se determina que la fuerza axial en la tubería excede el 1% del especificado (la determinación de la fuerza axial estará en función de la forma de instalación y del proceso de inestabilidad que se este dando en el talud) se debe utilizar acoples telescópicos para prevenir el daño, probablemente aumentar el espesor de la tubería o usar el material más resistente.
- **Deformación horizontal prevista:** Se debe conocer el tipo de suelo y el proceso que se puede dar para así determinar cuales serán las deformaciones transversales posibles. Generalmente los suelos suaves presentan deformaciones altas, por lo que se debe tomar las consideraciones necesaria para que la tubería se deforme de la misma manera que el suelo y que no sufra daños la tubería en deformaciones esperadas en el monitoreo. Los fabricantes de las tuberías proporcionan los esfuerzos de pandeo máximos y pueden diseñar la tubería con los acoples de manera que se adecue a las necesidades del proyecto.
- **Precisión:** La precisión de las lecturas aumenta de manera que aumenta el diámetro de la tubería.

- **Condiciones climáticas durante la instalación:** Las tuberías de plástico son sensibles a altas temperaturas y pueden generar efectos de espiral y pandeo prematuro, por lo que se debe considerar su uso en calor, pero tomando las medidas adecuadas de almacenaje. De lo contrario existen otras opciones insensibles a la temperatura.
- **Limites del diámetro:** Los costos de instalación aumentan en relación al diámetro de perforación. Además se deben analizar los casos para determinar los límites máximos del diámetro.
- **Durabilidad:** Se deben determinar los factores ambientales agresivos, estos se presentan cuando las instalaciones pasan el nivel freático o cuando existen corrientes de agua. Se debe determinar la alcalinidad de las corrientes para decidir el tipo de tubería a utilizar.
- **Profundidad:** Se recomienda utilizar tuberías de aluminio cuando las profundidades son muy grandes. Las tuberías plásticas pueden ser dañadas debido a las altas presiones y a los esfuerzos axiales provocados durante la instalación; aunque si se tienen los cuidados adecuados las tuberías de plástico son viables.
- **Propiedades del relleno:** El problema del relleno es la intrusión del mismo dentro de la tubería, lo cual se da por los acoples. Los acoples de plástico son los que sellan mejor las uniones. Cuando se determina que el relleno será de lechada, se le debe dar gran atención a un alto sello en acoples siendo las tuberías de plástico las más apropiadas. Cuando el relleno es granular los acoples deben estar alineados para evitar filtraciones.
- **Costo:** Se deben analizar los costos de las diferentes alternativas y el presupuesto de la planificación.

5.6 Instalación de la tubería Inclinométrica.

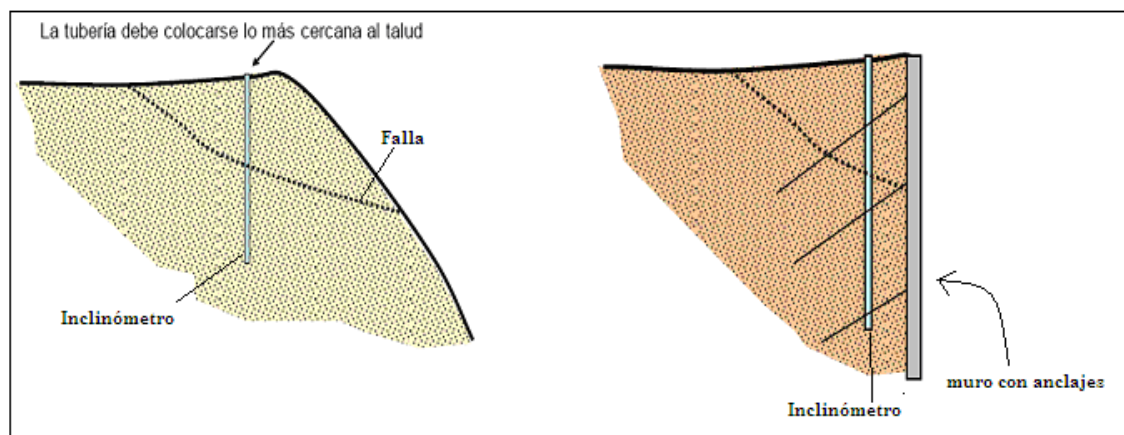
Se deben tener los cuidados necesarios para sellar los acoples y instalar una tubería de terminación al final de la tubería inclinométrica, ya que cuando la tubería empieza a ceder al movimiento, los acoples deben tener la suficiente rigidez para mantener alineada las tuberías. Algunos tipos de tubería traen sus propios adhesivos en las zonas de acople y otras deben ser puestas por el instalador. Nunca está demás que se proporcione un aseguramiento extra a las uniones siempre que se evite la obstrucción de los carriles.

El ensamblaje de la tubería se debe hacer cuidando que no se cree un espiral en los carriles. Se recomienda que las perforaciones sean del diámetro que establezca las especificaciones del aparato. Generalmente estas perforaciones se realizan con diámetros de 4 a 5 pulgadas.

La profundidad debe ser previamente definida y siempre perforar 50 cm. de más de la indicada, por ejemplo si piden un sondeo de 20 m, debe perforarse 20.50 m, esto se hace para garantizar que la sonda esté completamente en el aire durante todo el recorrido.

La perforación debe realizarse lo más cercana al borde del talud, siempre considerando la seguridad del personal y de los equipos, y que no se intercepte con los soil nailings, anclajes o alguna interferencia que pueda dañar la continuidad del sondeo.

Gráfico 5.6.1 Ubicación del inclinómetro en campo



La parte más profunda de la tubería de inclinación debe estar completamente empotrada en zona segura, ya que se supone que este es el punto de referencia y que este punto está completamente en reposo. Esto significa que la perforación tiene que atravesar la zona activa y llegar a la zona estable de la falla.

A continuación se presenta las formas más comunes de instalación de los monitoreos con inclinómetros.

Gráfico 5.6.2 Monitoreo de un talud con dos inclinómetros

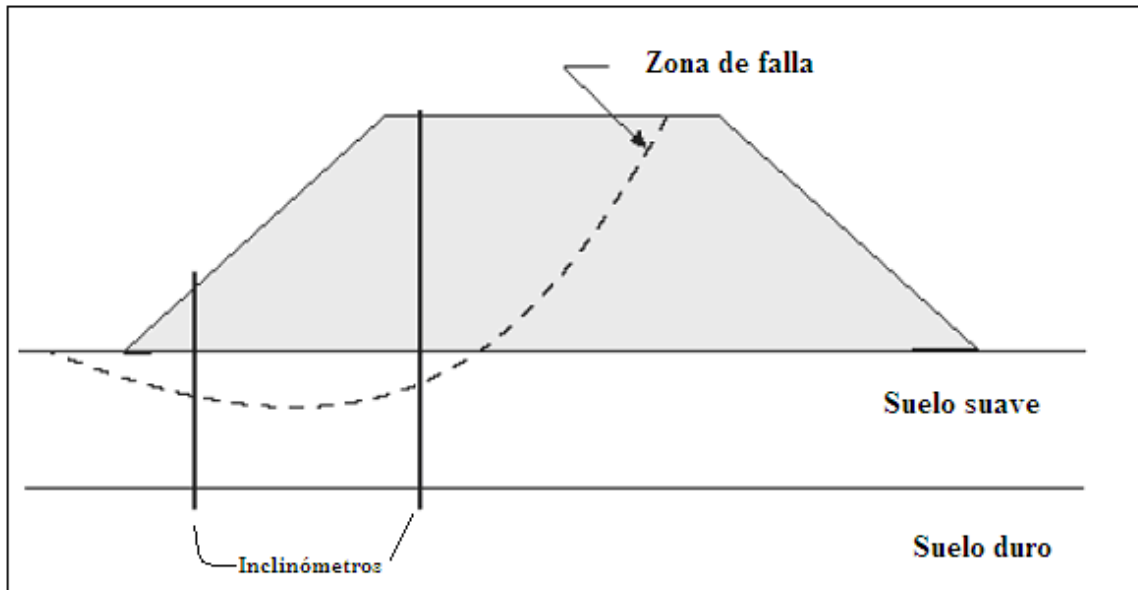
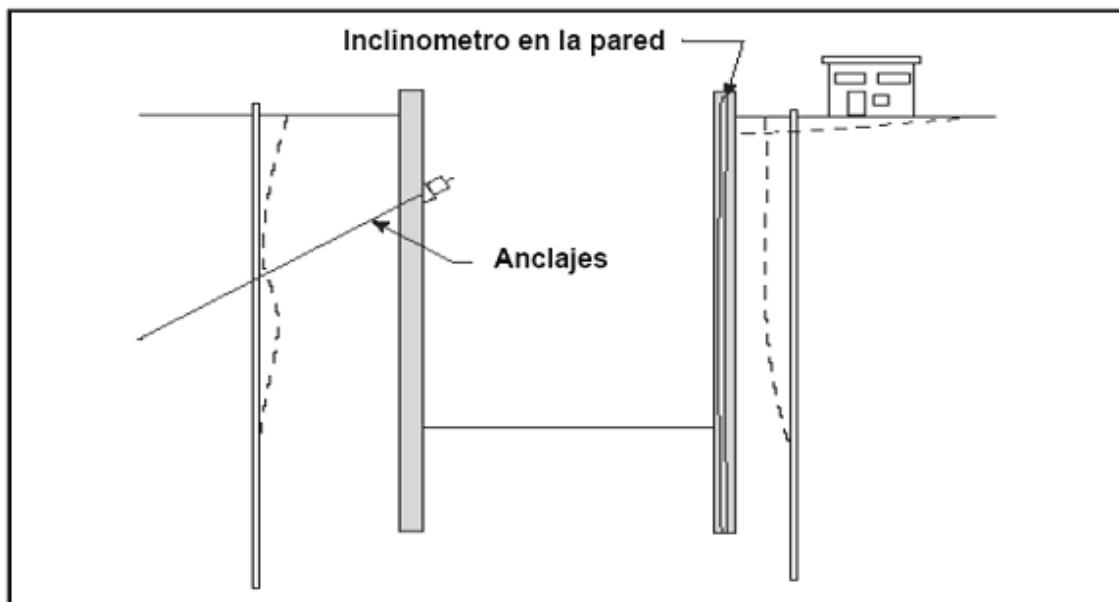


Gráfico 5.6.3 Monitoreo con un inclinómetro cerca de la pared de una excavación



Utilizando los análisis geológicos y la geometría del talud se puede aproximar la profundidad de la falla y es recomendable que se atraviese esta de 3 a 6m.

El relleno entre la perforación y la tubería inclinométrica debe de ser de lechada de agua-cemento o arena fina. El más recomendado es la inyección de lechada pero se debe hacer solo cuando las condiciones lo permitan. Luego que se

termine la perforación se prosigue a colocar la tubería inclinométrica, para lo cual existen dos posibilidades:

- **Perforación con paredes estables:** se perfora en 5 ó 6 pulgadas de diámetro, se saca las barras de perforación y se coloca la tubería inclinométrica hasta el fondo, posteriormente al lado de esta tubería se introduce hasta el fondo de la perforación un tubo o poliducto. Por medio de una bomba de inyección concreto se inyecta una simple lechada de agua-cemento de abajo hacia arriba por el poliducto. Se debe controlar el asentamiento de la lechada e inyectar la parte superior, de tal forma que la lechada se tenga hasta la superficie del terreno. (Gráfico 5.6.4)
- **Perforación con paredes inestables:** se perfora preferiblemente en 6 pulgadas, luego se coloca tubería para inyección hasta el fondo con una zapata, a través de la tubería se introduce hasta el fondo la tubería inclinométrica, posteriormente se coloca el poliducto, se extrae las barras de perforación y por medio de una bomba de inyección concreto se inyecta una simple lechada de agua-cemento de abajo hacia arriba por el poliducto. Se debe controlar el asentamiento de la lechada e inyectar la parte superior, de tal forma que la lechada se tenga hasta la superficie del terreno. (Gráfico 5.6.5)

Gráfico 5.6.4 Instalación de la tubería en sondeos estables

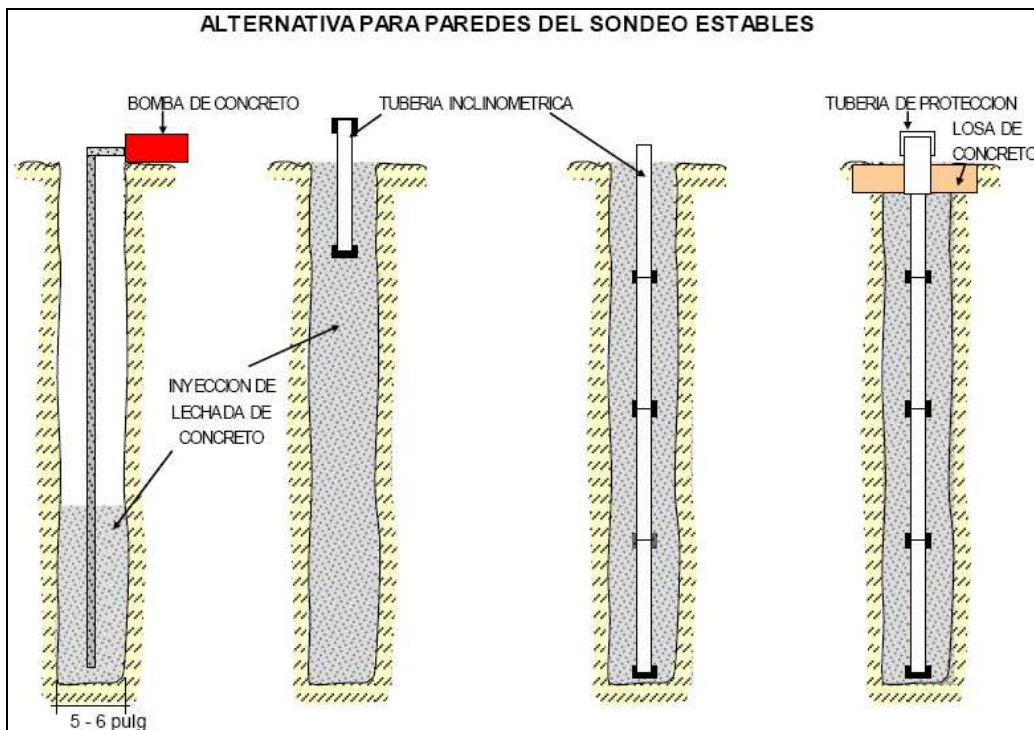
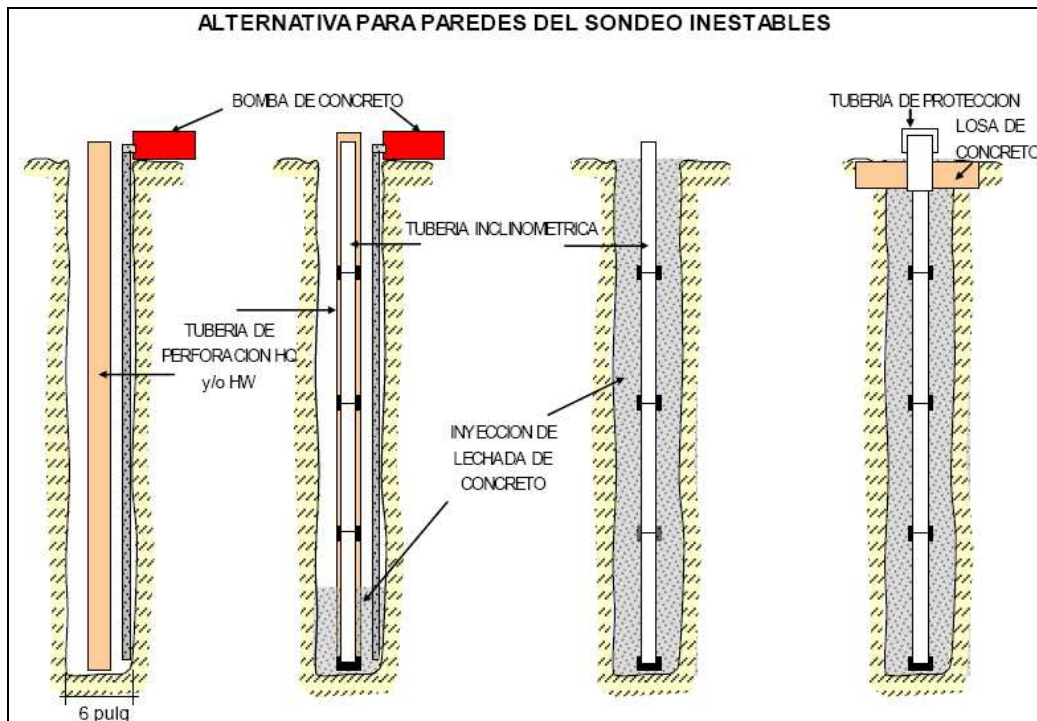


Gráfico 5.6.5 *Instalación de la tubería en sondeos inestables*



Es importante que la tubería quede lo más estirada posible. Generalmente este es un problema debido a que la lechada antes de fraguar genera una fuerza de empuje hacia la tubería, provocando que esta tienda a subir y no quedarse donde se estimó.

Las soluciones para este problema son las siguientes:

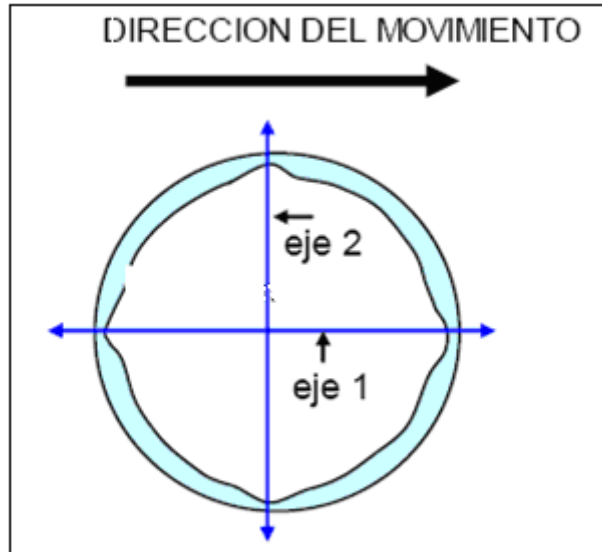
- Llenar de agua la tubería inclinométrica para contrarrestar la fuerza de empuje.
- Colocar un contra peso en la parte inferior de la tubería.
- Anclar la tubería al fondo del sondeo.

La parte más importante en la instalación de la tubería inclinométrica es la orientación. El inclinómetro debe de estar posicionado de manera que las lecturas proporcionen la información que se busca obtener

Como se requiere conocer el movimiento horizontal posible del talud, es importante que la sonda recorra la tubería de forma perpendicular al talud, esto quiere decir que los carriles de la tubería deben quedar orientados hacia fuera del talud, en sentido del movimiento. Esta orientación debe estar previamente definida antes de comenzar la instalación.

Las tuberías de plástico usualmente tienen dos posibles recorridos y estos se encuentran a 90 grados uno con el otro. Generalmente solo se utiliza un plano de medición y el plano a utilizar debe de quedar según la figura 5.6.6.

Gráfico 5.6.6 Orientación de la tubería inclinométrica



Cuando se espera que los movimientos laterales sean de gran magnitud y de alta velocidad se debe considerar la instalación de inclinómetros con mayor diámetro, esto evitará que en la tubería se obstruya tempranamente en el monitoreo.

5.7 Calibración

Es recomendado que el inclinómetro se mande a calibrar donde el fabricante cada determinado periodo de tiempo según la frecuencia de uso que se le de al aparato, lo cual debe de estar especificado en el manual del mismo. Cuando esta práctica se vuelva complicada para los operarios existen métodos para revisar la calibración del inclinómetro en campo.

La calibración debe ser realizada siguiendo una calendarización frecuente. Esto evitará que se tengan incertidumbres sobre la variación de la calibración en cada medida, es decir que mientras más se alejen los tiempos entre calibraciones, más incertidumbre sobre los datos existirá.

Es recomendable que la calibración del inclinómetro se haga cada vez que se van a tomar las lecturas, esto se hace utilizando cualquiera de los siguientes métodos.

5.7.1 Prueba con tubería cerca de la vertical. Se puede instalar una tubería inclinométrica corta de prueba en una zona estable donde se considera que la temperatura sea estable.

Esta tubería instalada deberá medir aproximadamente 2 metros y se debe perforar con un método que proporcione un sonde bastante vertical. Conociendo que la alineación es cercana a la vertical podemos determinar si existe algún error tipo escala, rotación del azimut o un traslado del cero.

5.7.2 Prueba en el fondo de la tubería en campo. Esta prueba se hace cuando se instala un inclinómetro y se introduce a una profundidad mayor que la requerida para el monitoreo a realizar. Como se conoce que el tramo final de la tubería está sobre un suelo firme y estable, se puede usar esta zona para hacer las correcciones necesarias de la información obtenida por el instrumento. Este empotramiento en suelo o roca firme se debe dar dentro de un rango de 6 a 9 metros.

5.7.3 Soporte de prueba. Algunos fabricantes de inclinómetros proveen de un soporte para la revisión del estado del instrumento. El soporte está fabricado de manera que presente una alineación vertical real, así se puede determinar las correcciones necesarias a realizarle a las lecturas.

5.8 Mantenimiento

La sonda inclinométrica debe ser revisada frecuentemente, se le deben realizar las reparaciones y ajustes necesarios a las ruedas.

Después de cada medición de campo las ruedas deben de ser limpiadas y aceitadas.

Cuando se tienen instalaciones a largo plazo se debe de cuidar el desgaste de los carriles dentro de la tubería. Por lo que se debe evitar que entren materiales sólidos dentro de la tubería. Es recomendable que se lave con agua limpia y que se rebalse la tubería, de esta manera los materiales que estén dañando adentro puedan salir.

Es importante que se le dé énfasis al los requisitos de mantenimiento que presenta cada manual proporcionado por el fabricante.

5.9 Recolección de datos

5.9.1 Procedimiento de recolección de datos. La recolección de datos se debe hacer por medio de dos técnicos.

Es muy importante que la tubería y la sonda sean del mismo fabricante y que se use la misma sonda durante todo el monitoreo

Para obtener la mayor exactitud se debe procurar que para todas las mediciones se utilice la misma sonda, el mismo cable y los mismos técnicos. Esto ha demostrado que reduce considerablemente los errores.

Cuando se haga una medición en campo es necesario efectuar un chequeo para corroborar el buen funcionamiento del sistema inclinométrico. Esto se debe hacer por medio de cualquier método de calibración mencionado anteriormente.

Luego se procede a tomar los datos siguiendo los siguientes pasos.

De debe tener en cuenta que previo a estos pasos se deben tomar las siguientes consideraciones:

- Leer detenidamente el manual del fabricante e instalar el software necesario para el almacenaje y post-procesamiento de datos.
- Con el software instalado se puede generar un proyecto e introducir los datos necesarios de configuración para la medición en campo.
- Verificar que la unidad de lectura contenga la configuración del proyecto donde se procederá a hacer las lecturas.
- Verificar la batería de la unidad de lectura. (El manual indica los niveles necesarios para efectuar las mediciones.)

Los pasos a seguir en campo son:

- Determinar el eje principal en dirección al movimiento o eje principal.
- Introducir el inclinómetro de prueba dentro del eje principal para determinar obstrucciones o descarrilamientos. (si no se cuenta con un inclinómetro falso seguir al siguiente paso).
- Conectar de forma correcta y segura el cable al inclinómetro y a la unidad de lectura.
- Colocar con las ruedas hacia arriba apuntando a la dirección del posible movimiento del talud e introducir lentamente hasta el fondo de la tubería el inclinómetro.
- Encender la unidad de lectura.
- Colocar la polea en la parte inicial de la tubería.

- Esperar 10 minutos que el aparato se estabilice a la temperatura ambiente.
- Tomar la medición según el intervalo previamente definido.
- Cuando se finalicé el primer recorrido se debe sacar el la sonda inclinométrica e introducirla al fondo dándole un giro de 180 grados. (siempre se deberá medir el eje principal).
- Bajar el inclinómetro al punto mas bajo.
- Tomar la medición cada según el intervalo previamente definido y verificar los check-sums*.
- Cuando se termine el segundo recorrido indique que ha finalizado.
- El aparato lo guardará en su memoria según la fecha que se haya realizado, no sobre pone los datos a las mediciones pasadas.
- Guardar el equipo seco y limpio para las próximas mediciones.
- Descargar y guardar los datos obtenidos en la computadora para no perder los datos.

**El término check-sum está definido a continuación.*

Como muestran los pasos, las mediciones con la sonda inclinométrica se deben de hacer haciendo el recorrido dos veces, estando ambas separadas por 180 grados. Esto resulta en que a cada profundidad existen dos mediciones y se debe de intentar que ese par de mediciones se den exactamente a la misma profundidad.

Basándonos en las diferencias presentadas por las dos mediciones hechas a la misma profundidad pero giradas 180 grados, nos dan una reducción de los datos obtenidos de manera que se minimizan los errores del instrumento y los errores de provocados por las irregularidades de la tubería inclinométrica.

Un excelente chequeo de la fiabilidad del instrumento se da al calcular la suma algebraica de cada lectura con su pareja separada a 180 grados, este chequeo se debe de hacer durante la toma de datos en el campo. A esta suma algebraica se le denomina check-sum.

5.9.2 Lectura Inicial. El monitoreo con el inclinómetro digital se basa en las medidas referenciadas a un perfil inicial. Esta lectura provee el perfil al cual todas las mediciones posteriores harán referencia y será la base en donde se fundamentaran las conclusiones y las acciones a tomar. Es por esto que es de suma importancia que esta lectura inicial se haga lo más cuidadosamente posible.

Luego de instalar la tubería inclinométrica se debe de dejar transcurrir un periodo de tiempo prudencial para que la lechada fragüe y fije la tubería en su posición. Esto se en un intervalo de 3 a 5 días después de la inyección.

Se recomienda hacer dos lecturas inmediatamente después de la instalación para ver si quedo de forma aceptable. Durante estas medidas de prueba las lecturas estarán variantes. Luego que pase el tiempo necesario para hacer la lectura inicial se procede haciendo dos lecturas y corroborando que ambas no varían más allá de las tolerancias aceptables. Cuando se obtienen un par de lecturas estables se puede tomar cualquiera de las dos como la lectura inicial y continuar con las lecturas según lo programado. Si durante el monitoreo se cambia alguno de los componentes principales, es necesario efectuar de nuevo las lecturas iniciales.

A continuación se muestra una sección fotográfica de una toma de datos:



Inclinómetro Instalado
Correctamente
1



Recorrido de la sonda
de prueba
2



Colocación de la
polea y fijador
3



Conexión de la sonda
Inclinométrica
4



Introducción del eje principal
de la sonda inclinométrica
5



Estabilización por
temperatura en el fondo
6



Encender la unidad
de lectura

7



Ascender la sonda
según los intervalos

8



Grabar cada lectura
utilizando el disparador

9

Al finalizar recorrido repetir desde paso 5, pero girando la sonda 180°

5.10 Procesamiento de datos

El inicio del procesamiento es la revisión de los check sums, el cual se puede hacer durante la recolección de datos. El check sum generalmente es el doble del traslado del cero que tiene el transductor y estos son un chequeo de error en los datos. En teoría los check sums deben de mantenerse igual para todas las medidas a cualquier profundidad pero en la práctica estos varían según la tubería inclinométrica y las habilidades del técnico recolector; por lo que las variaciones pequeñas no indican ningún problema. Cuando la desviación estándar es mayor a 10 ó 20 (depende de las especificaciones del fabricante) existe un problema en los datos.

Luego de hacer la revisión se debe proceder a los siguientes cuatro pasos.

- Diferencias de 180 grados.
- Cambiar la lectura de cada profundidad restándole las diferencias de 180 grados.
- Hacer el cambio acumulativo sumando desde el fondo cada cambio en los datos.
- Convertir el cambio acumulativo en medidas de deformación usando la constante de calibración.

Al proceso formado por los pasos anteriores se le denomina reducción de los datos. La reducción de datos se puede realizar de forma manual. Generalmente los fabricantes proveen del software necesario para la reducción de los datos. Los fabricantes de los aparatos nos proporcionan el software necesario para la

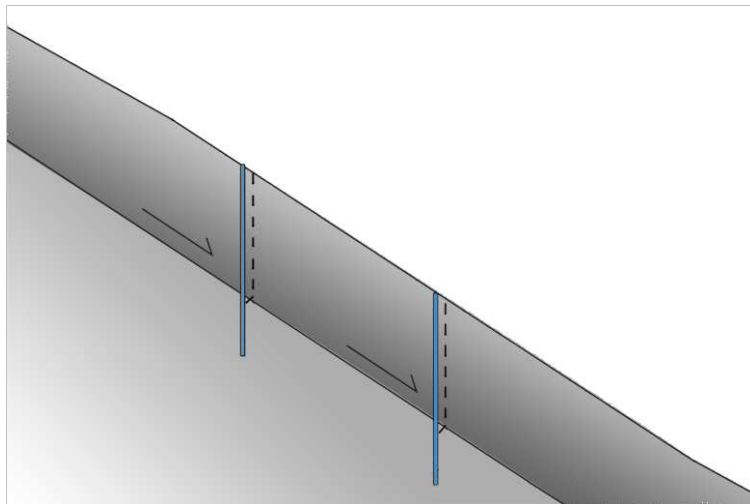
reducción de datos e incluso algunas veces estos programas generan estadísticas para la detectar errores.

5.11 Interpretación de los datos

El objetivo de la utilización del inclinómetro es definir la localización de las zonas de deformación y generar una evaluación de la zona en relación al tiempo. La evaluación e interpretación no se debe de enfocar en determinar el perfil de la tubería, si no la variación de este perfil en el tiempo.

Generalmente la zona deformación es de muy pocos metros de profundidad y las lecturas que se realizan en este intervalo son las más representativas para la interpretación de los datos.

Gráfico 5.11.1 Instrumentación de un talud con una zona de deformación marcada



La herramienta más efectiva para el análisis de datos proporcionados por el inclinómetro son las graficas. El análisis de estas gráficas se hace enfocándonos en pocos puntos seleccionados que representan el proceso de desplazamiento versus tiempo. Los movimientos que sean menores a la precisión del aparato no se deben considerar. La gráfica acumulativa puede ser mal interpretada debido a que puede presentar cambios hacia adentro o hacia fuera, por lo que se debe poner el énfasis en aquellos puntos que desarrollan movimientos notables.

El inclinómetro es un instrumento que proporciona una gran cantidad de información, los programas de cómputo la tabulan y la representan en graficas; pero dependerá del conocimiento y habilidad del ingeniero para entender el proceso que se está generando y la habilidad del mismo para crear un sistema que recolecte los datos de manera efectiva que le facilite la interpretación.

No existe una fórmula matemática, física ni geotécnica para la interpretación de los datos, esta se debe de basar en el conocimiento del comportamiento del terreno, el entendimiento de los procesos geotécnicos y del amplio conocimiento del inclinómetro, ya que cada caso variara según sus condiciones hidrogeológicas, estratigráficas, geométricas, climáticas, operacionales, etc.

Es importante mencionar que los datos que presenta el inclinómetro son susceptibles a todos los factores de error anteriormente mencionado. Por lo que el ingeniero debe ser capaz de reconocer el tipo de error que presentan los datos y hacerle las correcciones necesarias para la correcta interpretación y presentación de los datos.

Fotografía 6.1.5 Obra de mitigación



- **Obra permanente:** Esta consistió en un muro con anclajes activos con profundidad suficiente para que el bulbo penetrara la zona de falla y se colocara en la zona estable del talud. Este muro se construyó con altura de aproximadamente 7.5 metros y con un espesor de 35 centímetros. Cada anclaje tenía una fuerza de 55 toneladas y el muro tenía una zapata en la parte inferior del mismo. Se colocó un sistema de drenes para darle salida al agua y liberar la presión de intersticial sobre el muro.

Fotografía 6.1.6 Construcción del muro de arriba hacia abajo en Santa Catarina Pinula



Fotografía 6.1.7 Muro anclado terminado del deslizamiento de Santa Catarina Pinula



6.1.3 Instrumentación del muro

6.1.3.1 Planificación del monitoreo. A continuación se presenta la planificación del monitoreo según los pasos definidos en la sección 4.2.

<p>Definir las condiciones del proyecto</p>	<p>El proyecto estaba ubicado sobre una zona geológicamente delicada. El terreno estaba compuesto básicamente por brechas. Una brecha es una roca constituida por fragmentos líticos angulares y heterogeneos que se mantienen ligados por una matriz y cuyo cemento en el caso de las asociadas a mineralización pueden ser minerales hidrotermales incluyendo a los minerales de mena, los minerales hidrotermales rellenan total o parcialmente los huecos formados en la roca fragmentada y mucha de la mineralización en brechas ha sido introducida por fluidos hidrotermales y consecuentemente se encuentra en la masa fundamental de la brecha. También pueden ser cementados por precipitaciones químicas Los procesos hidrotermales en ocasiones producen reemplazo o metasomatismo en brechas, este reemplazo corresponde composicionalmente a cemento, pero que ha sido emplazado por sustitución de material preexistente en la brecha</p> <p>Según el estudio de suelos, conforme aumenta disminuye la profundidad la brecha se presenta de forma cada vez la parte superior se presenta mas alterada que esta alteración es debido a la presencia de agua que a degradado la brecha.</p> <p>El deslizamiento era sumamente delicado ya que a pocos metros del mismo se ubica la colonia El Prado y además esta carretera es la principal conexión entre el municipio de Santa Catarina y la Capital.</p> <p>El muro fue diseñado basándose en la premisa que la cuña de falla era de forma local y que no existía una falla mas profunda, la cual amenazaría a toda la colonia El Prado y ante esta falla mas profunda el muro no tendría ninguna influencia.</p>
<p>Estimar los mecanismos que controlan el comportamiento</p>	<p>La falla se dio debido a la activación de una falla preexistente en la zona y esta activación se interpreto como consecuencia a la saturación de agua en el talud. Esta agua provenía de los drenajes de la colonia El Prado y de las altas precipitaciones de la época.</p>

<p>Definir las preguntas geotécnicas que deben de ser resueltas</p>	<p>La pregunta principal que debía resolver el monitoreo era las siguiente ¿El deslizamiento continua a pesar da la construcción del muro? ¿El muro se está moviendo?</p>												
<p>Definir el propósito de la instrumentación</p>	<p>Determinar la existencia de desplazamiento horizontal en el talud y en base a esto determinar el comportamiento del muro de contención</p>												
<p>Seleccionar los parámetros a ser monitoreados:</p>	<p>El parámetro a monitorear es el desplazamiento horizontal en la masa de suelo.</p>												
<p>Estimar las magnitudes de cambio</p>	<table border="1" data-bbox="610 888 1304 1335"> <thead> <tr> <th>Clasificación del movimiento</th> <th>Rango de desplazamientos</th> <th>Acción a tomar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Moderado</td> <td>de 2 a 5 mm</td> <td>Continuar el monitoreo</td> </tr> <tr> <td>Rápido</td> <td>de 5 a 15 mm</td> <td>Tomar las medidas técnicas necesarias</td> </tr> <tr> <td>Falla inminente</td> <td>de 15 mm en adelante</td> <td>Evacuar la zona</td> </tr> </tbody> </table> <p>Para que cualquiera de estos criterios sea valido, debe de existir una zona de desplazamiento o de corte marcada, de lo contrario se considerara un movimiento del muro anclado independiente una falla en el talud.</p>	Clasificación del movimiento	Rango de desplazamientos	Acción a tomar	Moderado	de 2 a 5 mm	Continuar el monitoreo	Rápido	de 5 a 15 mm	Tomar las medidas técnicas necesarias	Falla inminente	de 15 mm en adelante	Evacuar la zona
Clasificación del movimiento		Rango de desplazamientos	Acción a tomar										
Moderado	de 2 a 5 mm	Continuar el monitoreo											
Rápido	de 5 a 15 mm	Tomar las medidas técnicas necesarias											
Falla inminente	de 15 mm en adelante	Evacuar la zona											
<p>Determinar las acciones a seguir según los escenarios probables</p>	<p>El monitoreo completo lo realizara la empresa constructora del muro debido a la necesidad de conocer el comportamiento del mismo, así como determinar la necesidad de más inversión en obra civil en caso de que el movimiento continúe.</p>												
<p>Asignar a los responsables de las diferentes etapas del monitoreo</p>	<p>El monitoreo completo lo realizara la empresa constructora del muro debido a la necesidad de conocer el comportamiento del mismo, así como determinar la necesidad de más inversión en obra civil en caso de que el movimiento continúe.</p>												

Seleccionar de los instrumentos de medición	<p>El inclinómetro digital es el aparato ideal para monitorear desplazamientos horizontales por lo que se debe usar en el monitoreo</p>															
Seleccionar de la ubicación del instrumento en el sitio	<p>El monitoreo se debe de dar según el grafico 5.6.3. El inclinómetro fue instalado en el centro del muro a 10 metros del sondeo 2 (referirse a la figura 6.1.1)</p>															
Planificar la recolección, procesamiento, presentación, interpretación, reporte e implementación de datos	<p>Se determino que las fechas deberían ser cumplidas según el siguiente calendario</p> <p style="text-align: center;">Calendario de mediciones</p> <table border="1" data-bbox="524 741 1390 989"> <thead> <tr> <th># de medición</th> <th>Fecha</th> <th>Intervalo de tiempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>16/06/2008</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>30/06/2008</td> <td>15 días</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>28/07/2008</td> <td>28 días</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>29/09/2008</td> <td>60 días</td> </tr> </tbody> </table> <p>Se puede observar que el monitoreo se harán una medida a los 15 días, la siguiente al mes y la siguiente a los dos meses. Debido a la rapidez del proceso se considero que tres meses son suficientes para detectar cualquier movimiento y tomar las medidas correspondientes. Se procesaran los datos los días fijados. Después de la ultima medición se procederá a la interpretación, implementación y reporte de los datos</p>	# de medición	Fecha	Intervalo de tiempo	1	16/06/2008		2	30/06/2008	15 días	3	28/07/2008	28 días	4	29/09/2008	60 días
# de medición	Fecha	Intervalo de tiempo														
1	16/06/2008															
2	30/06/2008	15 días														
3	28/07/2008	28 días														
4	29/09/2008	60 días														
Planificar el control de los factores que pueden influenciar las mediciones del monitoreo	<p>Se debe de tratar de realizar las lecturas a la misma hora para que todas se hagan aproximadamente a la misma temperatura. Es importante tomar fotografías y registrar cualquier cambio notable en el sitio.</p>															
Establecer procedimientos de medición que garanticen lecturas correctas	<p>Las mediciones las tiene que hacer un técnico especialista. Es recomendable que sea un único técnico para todas las mediciones.</p>															

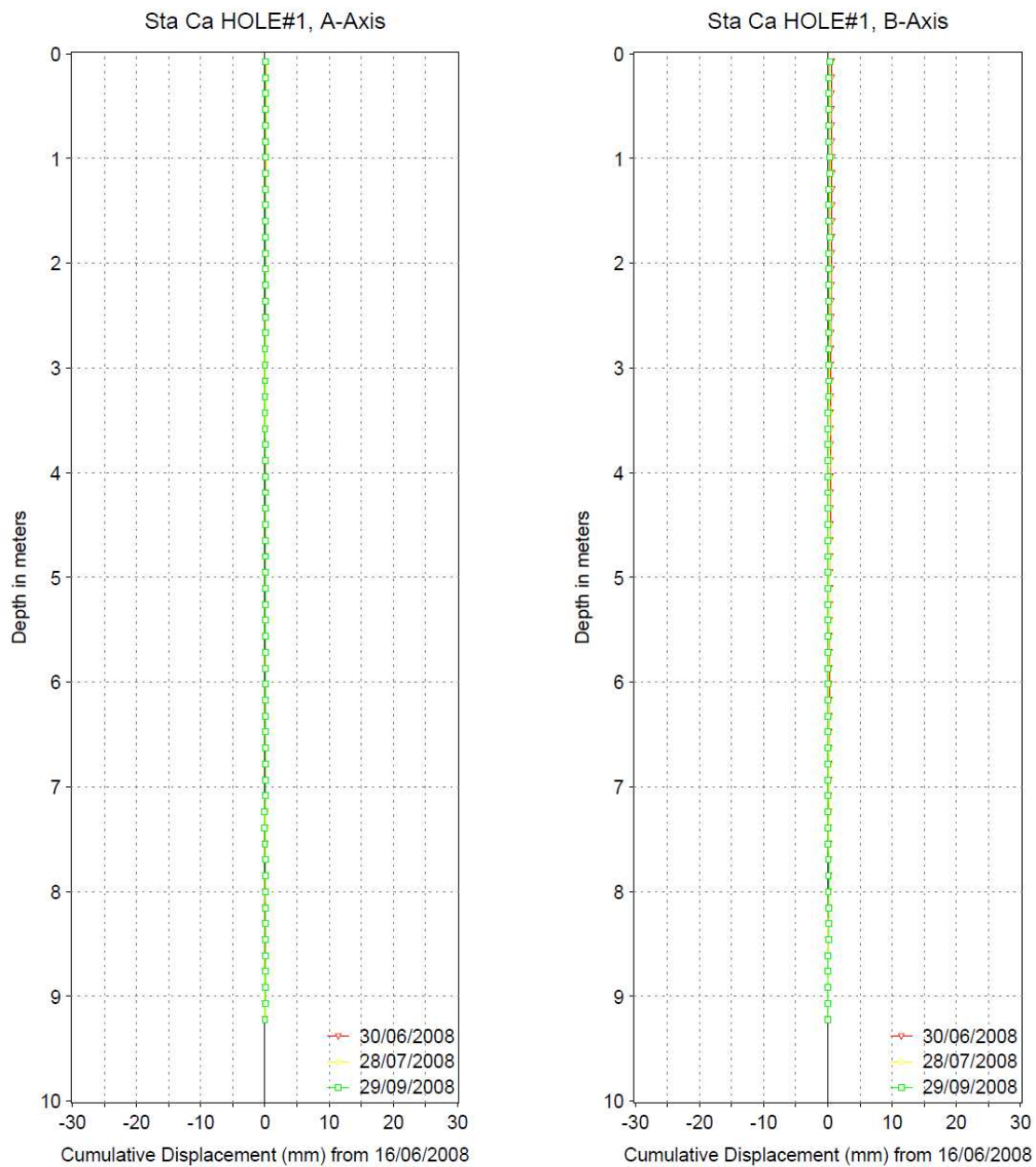
Listar el objetivo de cada instrumento	Se considera suficiente el uso de un único inclinómetro, debido a que la zona de falla relativamente pequeña. El inclinómetro debe de medir las deformaciones horizontales relativas al tiempo según la calendarización.
Planificar la instalación	El procedimiento de instalación se debe de ejecutar según el grafico 5.6.4. El inclinómetro se colocara a una profundidad de 30 metros asegurando su empotramiento total en la brecha sumamente maciza
Planificar el mantenimiento y calibración	El inclinómetro que se va a utilizar se encuentra recién calibrado. Se le debe de dar un mantenimiento según el manual del fabricante.
Escribir los acuerdos contractuales de los servicios de instrumentación en campo	Estos dos últimos pasos se deben de ejecutar con la accesoria legal pertinente y según las políticas internas de las empresas. Estos pasos no se tratan en el presente trabajo debido a su extensión y irrelevancia en la parte técnica del monitoreo
Preparación del presupuesto	

Fotografía 6.1.8 Toma de datos del deslizamiento de Santa Catarina Pinula



6.3.2 Interpretación de los datos. Luego de completar a exactitud la calendarización y tomar las mediciones según el manual del aparato, se tabularon los datos y se procesaron dando como resultado las siguientes gráficas.

Gráfico 6.1.2 Gráfica de desplazamiento acumulativo en el tiempo de Santa Catarina Pinula



Las interpretaciones de las gráficas serían las siguientes.

- La lectura cero es el origen, data de la fecha inicial propuesta en la calendarización.
- Las tres lecturas posteriores se encuentran sobre puestas a la lectura inicial.
- Ambos ejes presentan una variación casi imperceptible siendo el principal el que tuvo menos variación.
- En ninguno de los dos ejes existe un movimiento horizontal relativo en el tiempo mayor que la precisión del inclinómetro.
- No existe una zona de desplazamiento marcada por lo que no existe una falla cortante.
- Las lecturas están bien tomadas.
- El inclinómetro esta muy profundo, por lo que se puede considerar totalmente empotrado.

A partir de todas las interpretaciones anteriores podemos contestar las preguntas planteadas de manera categórica y afirmar que el muro no se esta moviendo. Esto indica que las medidas de estabilización fueron adecuadas y que muy probablemente la falla fue local.

6.2 Talud Las Marías, Colonia Lomas del Guijarro, Tegucigalpa, Departamento de Francisco Morazán.

6.2.1 Descripción del problema. El talud Las Marías se ubica en uno de los linderos una urbanización llamada ubicada en la Colonia Lomas del Guijarro, Tegucigalpa Departamento de Francisco Morazán. Esta urbanización esta ubicada de tal manera que era necesario hacer un corte en la parte final un talud para poder generar un plataforma nivelada para el desarrollo de la urbanización.

Fotografía 6.2.1 Foto del talud Las Marías



Fotografía 6.2.2 Grietas en la calle en la corona del talud Las Marías



Durante el proceso de corte del terreno para ejecutar la construcción del muro inicio un proceso de inestabilidad en el talud que se manifestó en una grieta en la calle, ante lo cual se tomaron las medidas necesarias para evitar el deslizamiento de talud y se propuso una instrumentación geotécnica para monitorear el comportamiento del mismo.

6.2.2 Descripción Geotécnica. El sitio se ubica sobre una zona en donde se tiene presencia de rocas sedimentarias clásticas.

Las rocas sedimentarias clásticas se pueden definir como un conjunto de fragmentos cementados que contienen pedazos de rocas provenientes de otras formaciones. Los fragmentos de estas rocas se le llaman clastos y estos son detritus unidos con cemento. Este tipo de material se ha clasificado dentro del Sistema Hondureño de Identificación Geológica como Formación Valle de Ángeles

La Formación Valle de Ángeles está creada por una secuencia de capas rojas de Lutitas y Limonitas. Estas se forman por la deposición de sedimentos continentales de grano fino, trasladados por suspensión y arrastre hacia zonas inundadas de agua de poca profundidad.

Fotografía 6.2.3 Formación Valle de Ángeles



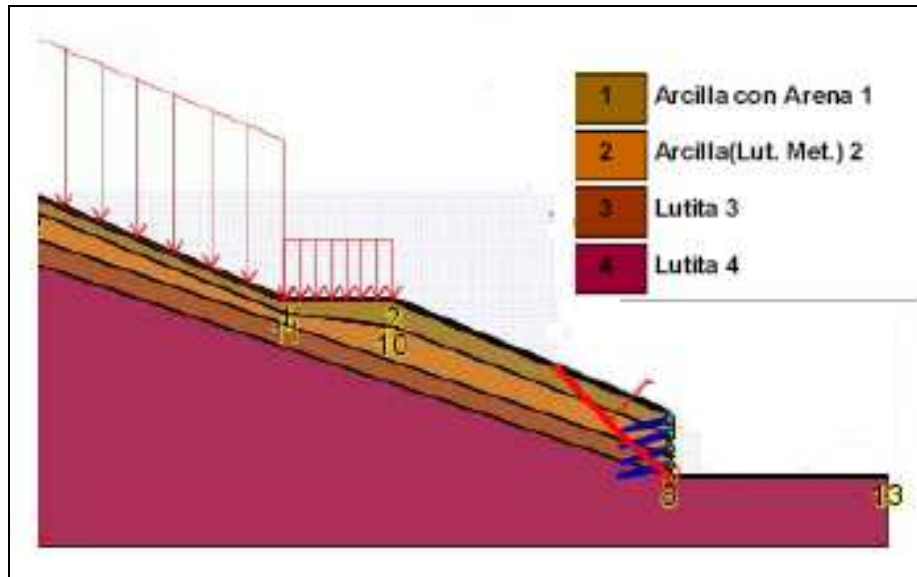
La parte superior del subsuelo está compuesta por arcillas de baja a media plasticidad que originadas por la meteorización química y física de la roca tipo Lutitas. Esta capa de aproximadamente dos metros provoca la expansión y construcción de los terrenos en función de la presencia o carencia de agua. Es un terreno inestable en la presencia de agua.

Se ejecutaron 5 sondeos alrededor del terreno con lo que se pudo caracterizar el talud según un terreno medio de la siguiente manera:

Gráfico 6.2.1 Terreno medio del talud Las Marías



Gráfico 6.2.2 Estratigrafía y carga externas del talud Las Marías



6.2.3 Instrumentación geotécnica.

6.2.3.1 Justificación y planificación del monitoreo. A continuación se presenta la planificación del monitoreo según los pasos definidos en la sección 4.2.

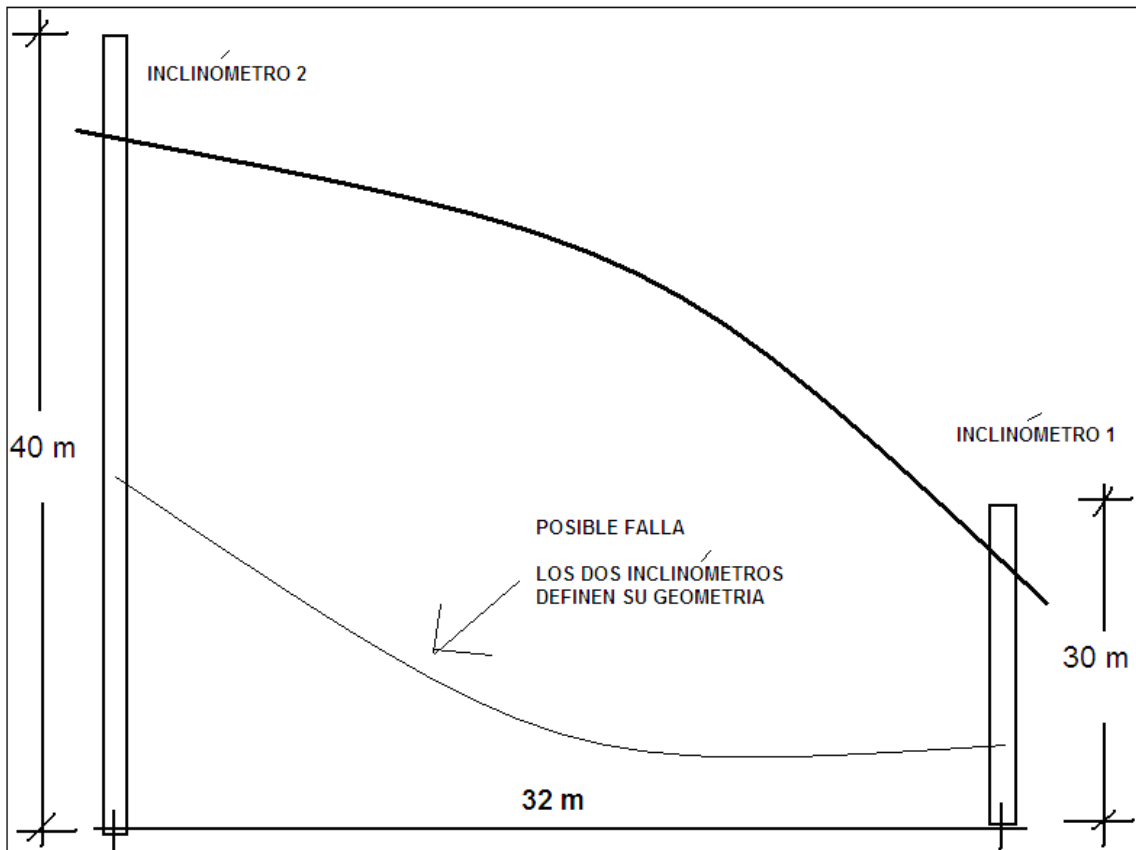
<p>Definir las condiciones del proyecto</p>	<p>Este talud presenta una condición muy delicada, en especial para una casa sumamente vulnerable en la corona del talud y la obra en proceso al pie del talud. Esto significa que el monitoreo se debió hacer de la manera más cautelosa debido a que el talud representaba un peligro fatal para una cantidad muy grande de personas. La calle que pasaba por el talud no era una arteria muy importante como sucede en otros casos</p>
<p>Estimar los mecanismos que controlan el comportamiento</p>	<p>La combinación de entre las condiciones climáticas lluviosas, un terreno sumamente susceptible al agua y el proceso constructivo desencadenaron el proceso de inestabilidad del talud, por lo que se debía conocer cual era la condición real del movimiento y la profundidad de las fallas.</p>

Definir las preguntas geotécnicas que deben de ser resueltas	<p>Las preguntas que se intentaban resolver son las siguientes: ¿Existe un movimiento en el talud? ¿Es el movimiento peligroso para las obras aledañas? Y si la respuesta es afirmativa contestar ¿Cuál la geometría de la falla?</p>												
Definir el propósito de la instrumentación	<p>Determinar la existencia de un desplazamiento horizontal en el talud, de existir esta deformación se busca definir la geometría de la falla.</p>												
Seleccionar los parámetros a ser monitoreados:	<p>La variable a monitorear es el desplazamiento horizontal en la masa de suelo.</p>												
Estimar las magnitudes de cambio	<table border="1" data-bbox="570 1035 1305 1407"> <thead> <tr> <th>Clasificación</th> <th>Rango</th> <th>Acción a tomar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Moderado</td> <td>2 a 5 mm</td> <td>Continuar el monitoreo</td> </tr> <tr> <td>Rápido</td> <td>5 a 15 mm</td> <td>Tomar acciones para evitar el movimiento</td> </tr> <tr> <td>Falla Inminente</td> <td>15 mm o más</td> <td>Evacuar a todas las construcciones aledañas</td> </tr> </tbody> </table> <p>Para que cualquiera de estos criterios sea valido, debe de existir una zona de desplazamiento o de corte marcada.</p>	Clasificación	Rango	Acción a tomar	Moderado	2 a 5 mm	Continuar el monitoreo	Rápido	5 a 15 mm	Tomar acciones para evitar el movimiento	Falla Inminente	15 mm o más	Evacuar a todas las construcciones aledañas
Clasificación		Rango	Acción a tomar										
Moderado	2 a 5 mm	Continuar el monitoreo											
Rápido	5 a 15 mm	Tomar acciones para evitar el movimiento											
Falla Inminente	15 mm o más	Evacuar a todas las construcciones aledañas											
Determinar las acciones a seguir según los escenarios probables													
Asignar a los responsables de las diferentes etapas del monitoreo	<p>La empresa encargada de los trabajos de estabilización de taludes se hará a cargo de todo el monitoreo geotécnico para poder obtener mayor información sobre los posibles procesos.</p>												

<p>Seleccionar los instrumentos de medición</p>	<p>Debido a que el inclinómetro digital mide la deformación horizontal y determina la zona de falla, se escogió como el instrumento de medición. Para poder obtener una geometría definida necesitamos instalar dos tuberías inclinométrica como lo indica el gráfico 5.6.2</p>																								
<p>Seleccionar la ubicación del instrumento en el sitio</p>	<p>La ubicación de las tuberías inclinométrica se hará según el gráfico 6.2.3</p>																								
<p>Planificar la recolección, procesamiento, presentación, interpretación, reporte e implementación de datos</p>	<p>La calendarización se hizo de manera que se monitorear un mes intensivo de mediciones y luego una separación mensual de las medidas.</p> <p>El calendario se fijo de la siguiente manera:</p> <p style="text-align: center;">Calendario de medición</p> <table border="1" data-bbox="615 921 1261 1266"> <thead> <tr> <th># de medición</th> <th>Fecha</th> <th>Intervalo de tiempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>04/07/08</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>14/07/08</td> <td>10 días</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>05/08/08</td> <td>21 días</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>12/08/08</td> <td>7 días</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>18/08/08</td> <td>6 días</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>18/09/08</td> <td>30 días</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>20/10/08</td> <td>32 días</td> </tr> </tbody> </table>	# de medición	Fecha	Intervalo de tiempo	1	04/07/08		2	14/07/08	10 días	3	05/08/08	21 días	4	12/08/08	7 días	5	18/08/08	6 días	6	18/09/08	30 días	7	20/10/08	32 días
# de medición	Fecha	Intervalo de tiempo																							
1	04/07/08																								
2	14/07/08	10 días																							
3	05/08/08	21 días																							
4	12/08/08	7 días																							
5	18/08/08	6 días																							
6	18/09/08	30 días																							
7	20/10/08	32 días																							
<p>Planificar el control de los factores que pueden influenciar las mediciones del monitoreo</p>	<p>Se debe de tratar de realizar las lecturas a la misma hora para que todas se hagan aproximadamente a la misma temperatura. Es importante tomar fotografías y registrar cualquier cambio notable en el sitio.</p>																								
<p>Establecer procedimientos de medición que garanticen lecturas correctas</p>	<p>Las mediciones las tiene que hacer un técnico especialista. Es recomendable que sea un único técnico para todas las mediciones.</p>																								

Listar el objetivo de cada instrumento	Ambas instalaciones deben de monitorear los desplazamientos horizontales y generar información para definir la geometría de la falla en caso que exista una.
Planificar la instalación	<p>El procedimiento de instalación se debe de ejecutar según el gráfico 5.6.4.</p> <p>Las tuberías inclinométrica quedaran instaladas según el gráfico 6.2.3</p>
Planificar el mantenimiento y calibración	<p>El inclinómetro que se va a utilizar se encuentra recién calibrado.</p> <p>Se le debe dar un mantenimiento según el manual del fabricante.</p>
Escribir los acuerdos contractuales de los servicios de instrumentación en campo	<p>Estos dos últimos pasos se deben de ejecutar con la accesoría legal pertinente y según las políticas internas de las empresas.</p> <p>Estos pasos no se tratan en el presente trabajo debido a su extensión y irrelevancia en la parte técnica del monitoreo</p>
Preparación del presupuesto	

Gráfico 6.2.3 Esquema del sistema escogido para el monitoreo en talud Las Marías

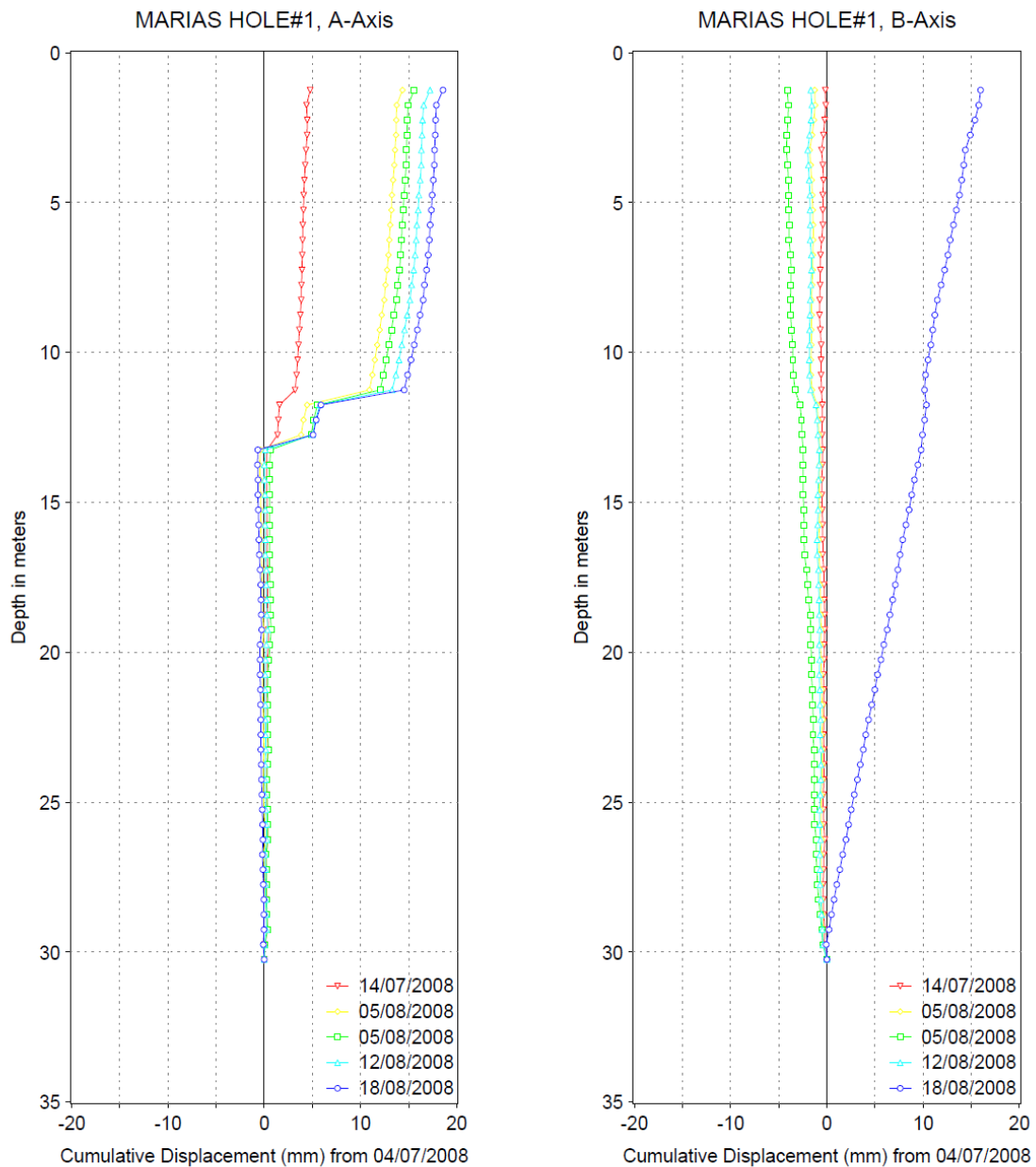


6.2.3.2 Procesamiento, interpretación y presentación de las lecturas.

Luego de ejecutar las mediciones según el calendario, se obtuvo unos resultados sumamente interesantes.

En este caso tan interesante se comenzará por el procesamiento de datos. A continuación se presenta la gráfica que nos da el programa si ninguna modificación para que se identifiquen los errores y se proceda a hacer las correcciones necesarias y se cree una gráfica presentable.

Gráfico 6.2.4 Gráfica sin modificaciones del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 1 del talud Las Marías



Antes de hacer una interpretación, se debe de hacer las correcciones necesarias, estas correcciones deben estar basadas en las siguientes observaciones.

Eje Principal (eje A)

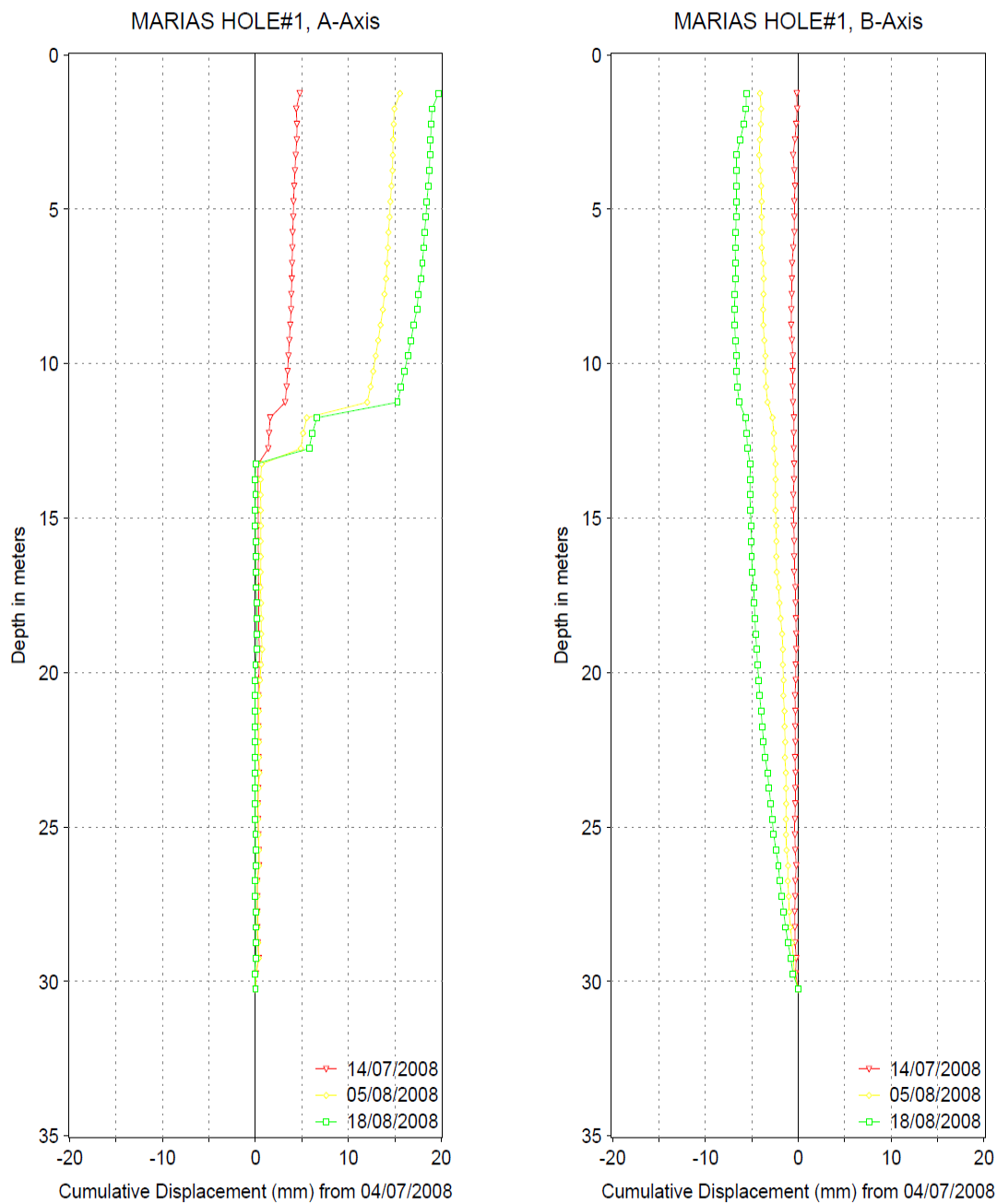
- La gráfica de la fecha 18/08/08 muestra que el talud retrocede dentro de la zona de 13 a 30 metros de profundidad y esto físicamente es imposible. Este fenómeno sucede debido a que el operador no esperó a que se estabilizara la sonda y ésta se fue estabilizando en el camino hacia arriba. Es por esto que este error se presenta en la gráfica y se debe generar un traslado de la misma hacia la parte positiva en esa zona.
- No es necesario que se tengan tantas gráficas marcando el mismo comportamiento, esto solo confunde por lo que se debe eliminar algunas y dejar las más representativas del movimiento.
- Existen dos medidas en la fecha 05/08/08, se tomará la segunda como válida debido a que por alguna razón se repitió la medición.

Eje Secundario (eje B)

- Debido a que este eje marca el movimiento paralelo a la cara del talud, si está permitido el movimiento negativo.
- Se nota que la tendencia de todas las mediciones es hacia el lado negativo (a la izquierda viendo hacia el movimiento) a excepción de la medida del 18/08/09; esto se debe a un error de rotación del azimut debido a un cuidado del aparato que rotó el transductor en ese sentido. Se debe de hacer la corrección.
- No es necesario que se tengan tantas gráficas marcando el mismo comportamiento, esto solo confunde por lo que se debe de eliminar algunas y dejar las más representativas del movimiento.
- Existen dos medidas en la fecha 05/08/08, se tomará la segunda como válida debido a que por alguna razón se repitió la medición.

A continuación se muestra la gráfica a presentar con las correcciones ya realizadas.

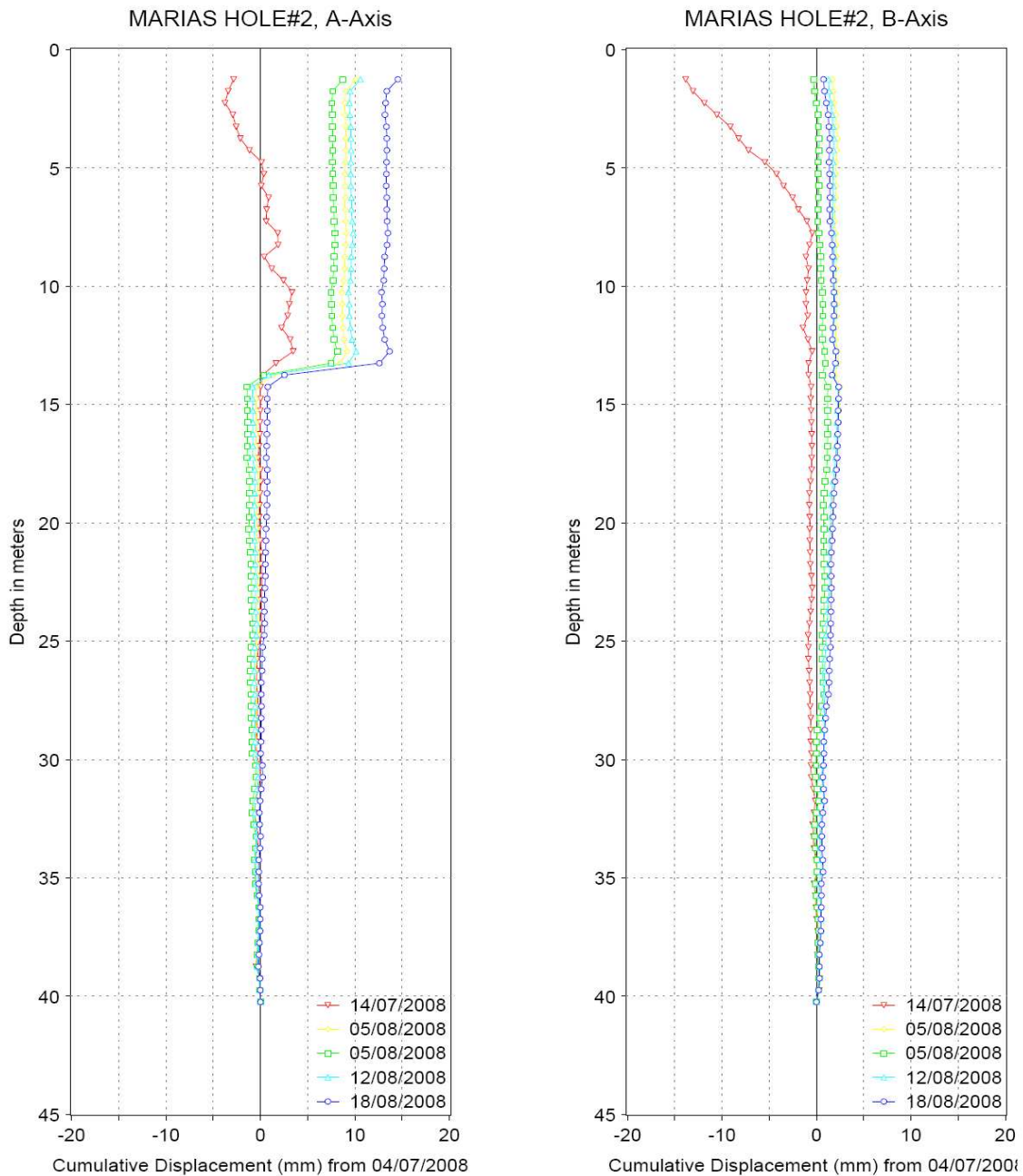
Gráfico 6.2.5 Gráfica final del desplazamiento acumulado del inclinómetro 1 talud Las Marías



Luego de obtener esta gráfica se procesara la grafica del inclinómetro 2.

La gráfica sin procesar es la siguiente:

Gráfico 6.2.6 Gráfica final del desplazamiento acumulativo del inclinómetro 2 talud Las Marías



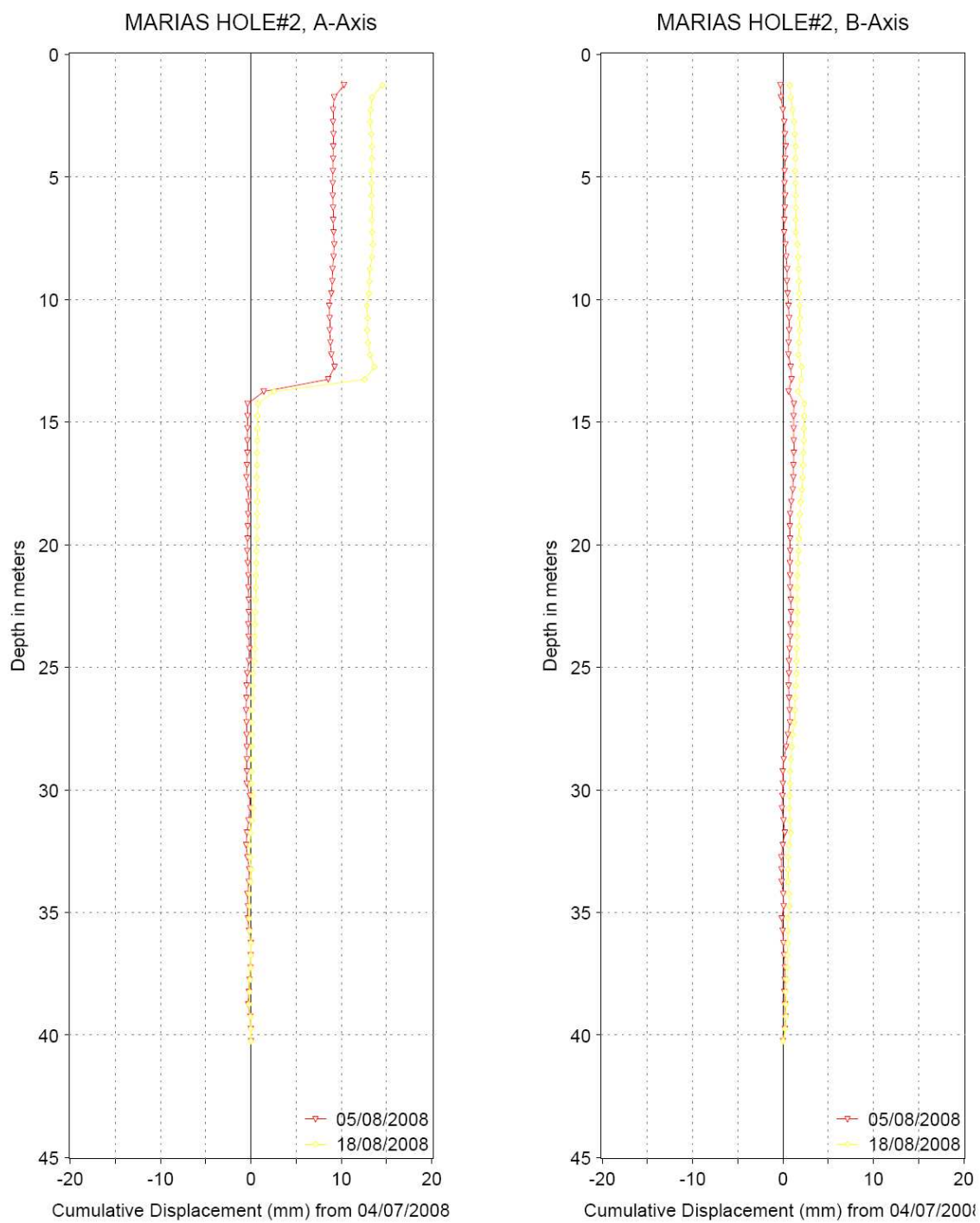
Eje Principal (eje A)

- La mayoría de gráficas muestra un desplazamiento hacia dentro del talud, de nuevo este error es debido a la estabilización por temperatura durante el recorrido.
- No es necesario que se tengan tantas gráficas marcando el mismo comportamiento, esto solo confunde por lo que se debe eliminar algunas y dejar las más representativas del movimiento.
- La gráfica del 14/07/2008 muestra un comportamiento muy variante de los 0 a los 15 metros. Cuando existen comportamientos de este tipo generalmente se debe a un traslape en la toma de medidas, donde el operador pudo haber tomado la misma lectura dos veces o saltarse una lectura, por lo que esta gráfica será eliminada.

Eje Secundario (eje B)

- La gráfica del 14/07/2008 muestra un comportamiento muy variante de los 0 a los 15 metros. Esto confirma que el error fue humano por lo que es correcto eliminarla.
- No es necesario que se tengan tantas gráficas marcando el mismo comportamiento, esto solo confunde por lo que se debe eliminar algunas y dejar las más representativas del movimiento.

Gráfico 6.2.7 Gráfica final del desplazamiento acumulado del inclinómetro 2 talud Las Marías



Las gráficas de ambos inclinómetros muestran un movimiento importante. Ambas graficas muestra una zona de desplazamiento o de corte muy marcada la cual determina la profundidad de la falla en el talud. El inclinómetro 1 muestra una falla marcada a los 13 metros de profundidad y el inclinómetro 2 muestra la falla a los 14.50 metros de profundidad.

Los datos nos muestran la inexistencia de las dos últimas lecturas y esto se debió debido a que la sonda no logró pasar la falla debido a que la deformación era muy grande a partir de la lectura del 18/07/2008.

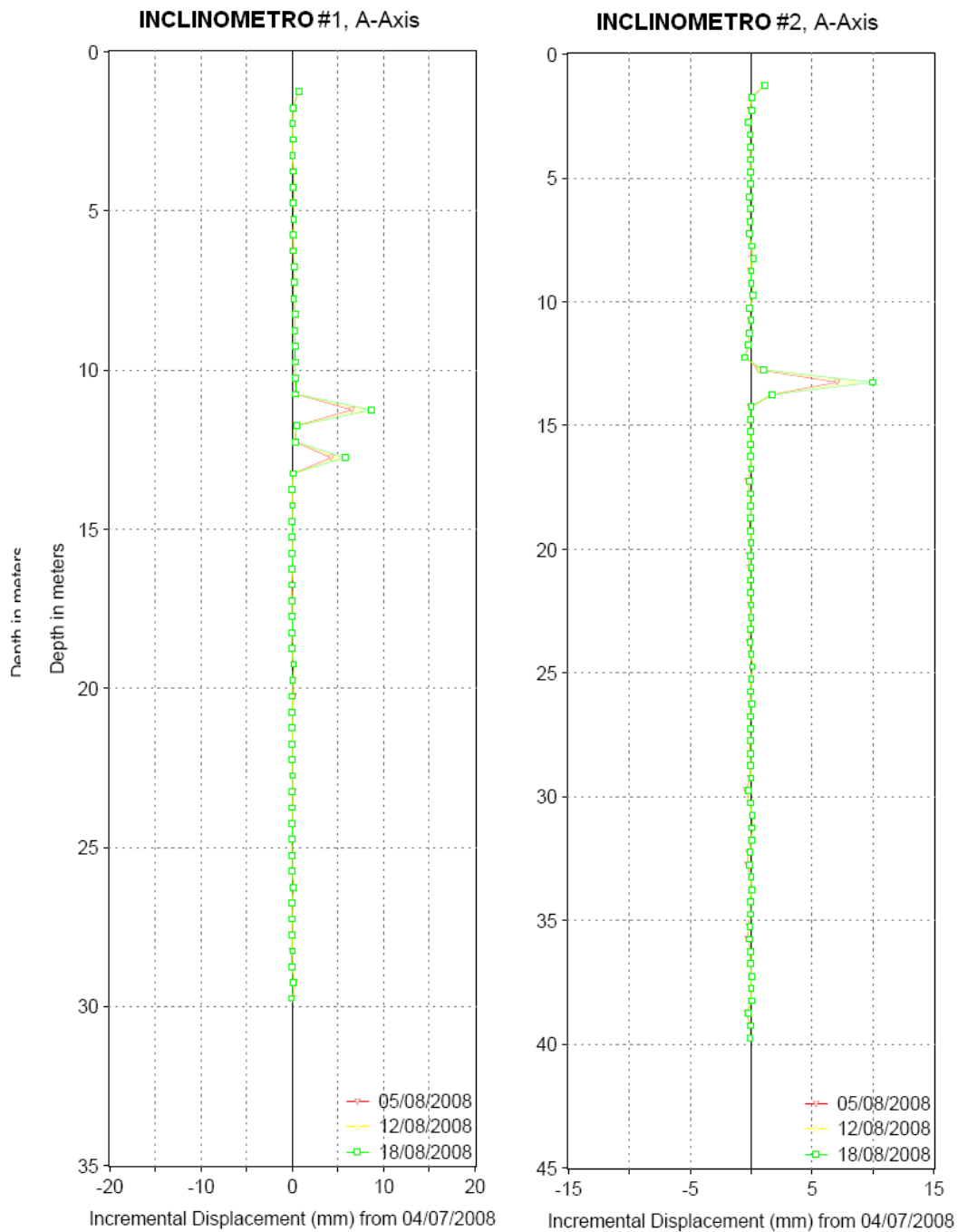
Las gráficas de tipo incremental sirven para determinar la existencia de las zonas de desplazamiento, por lo que es necesario confirmar estas zonas utilizándola. A continuación se presentan.

El inclinómetro 1 muestra un desplazamiento horizontal de 20 mm y el inclinómetro 2 muestra un desplazamiento horizontal de 15 mm. Estos rangos están clasificados según la tabla 6.2.2 dentro de la categoría inminente y se recomienda que se alerte a la comunidad de esta posible falla.

Las gráficas de tipo incremental grafican la diferencia entre una medida y la siguiente y son sumamente útiles para determinar las zonas de desplazamiento o corte. Estas gráficas se mantienen en cero cuando no existen diferencias grandes entre una medida y la siguiente pero se exageran cuando sucede lo contrario y marcan cualquier zona de movimiento.

Para asegurarnos se las zonas de corte interpretadas en las gráficas acumulativas se procede a graficar las incrementales de ambos inclinómetros en su eje principal (eje A).

Gráfico 6.2.8 Gráfica de desplazamiento incremental talud Las Marías



Esta gráfica nos marca claramente las zonas de corte.

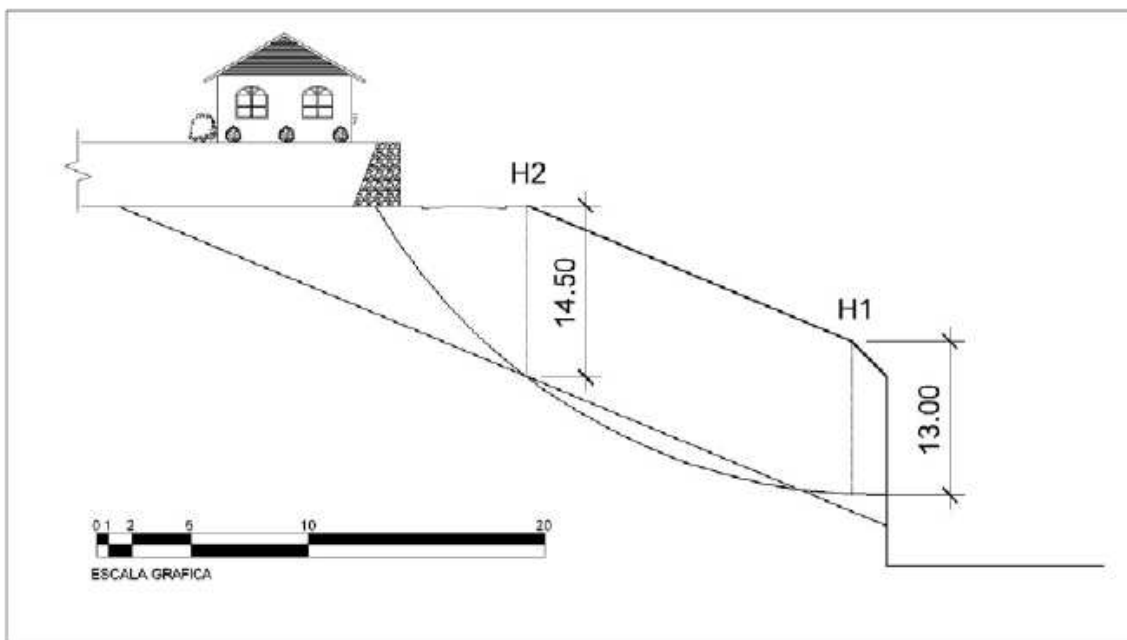
En la gráfica del Inclinómetro 2 se marca claramente la falla en los 14.50 metros y podemos tomar este dato para ubicar definitivamente la falla.

El inclinómetro 1 marca dos picos, estos significan dos movimientos diferentes pero continuos, esto marca claramente la zona de falla que se encuentra entre ambos picos. Por la cercanía de las mismas se debe de tomar como una única falla ubicada a 13 metros de profundidad.

De todo lo anterior se puede concluir lo siguiente:

- *Existe un movimiento muy grande dentro del talud de Las Marías en el cual se puede esperar grandes deformaciones posteriores que pueden incurrir en una falla en el mismo. Por lo que se considera que el talud se encuentra en riesgo inminente*
- *La geometría de la falla según lo indicado en el monitoreo esta dada de la siguiente manera.*

Gráfico 6.2.9 Geometría de la falla en el talud Las Marías



7. Conclusiones

- El inclinómetro es un instrumento de recopilación de datos que mediante su adecuado uso e interpretación correcta proporciona información sumamente valiosa sobre el comportamiento de un talud.
- EL inclinómetro mide de forma precisa los desplazamientos horizontales de un talud y la evolución de estos desplazamientos en el tiempo.
- Los programas de monitoreos deben ser realizados de forma dedicada, ya que estos son la base del éxito de cualquier instrumentación geotécnica.
- La instrumentación mediante el uso del inclinómetro puede monitorear el comportamiento de un muro de contención y proporcionarnos la información necesaria para conocer si este muro se está comportando de forma adecuada o se necesita más inversión en obra para estabilizar el talud.
- Mediante la creación de un sistema de monitoreo con varios inclinómetros podemos determinar los movimientos horizontales que presenta un talud, así como también ubicar y definir la geometría de la falla, como en el caso del talud Las Marías, Tegucigalpa, Honduras.

8. Recomendaciones

- Se recomienda que la instalación de la tubería inclinométrica se haga bajo estricta supervisión ya que el tubo debe presentar una correcta orientación y debe ser colocado con cuidado para no arruinar la tubería cuando se realice la inyección.
- Se recomienda que las lecturas de campo sean realizadas por técnicos especialistas supervisados por ingenieros de manera que se garanticen los procedimientos de toma de datos y se minimice el error humano.
- Se recomienda que se amplíe el estudio del uso del inclinómetro para monitorear desplazamientos horizontales en taludes con otros aparatos de instrumentación como el piezómetro y el extensómetro.
- Se recomienda ampliar los estudios prácticos en el uso del inclinómetro en elementos estructurales como pilotes, vigas, losas y columnas.
- Se recomienda estudiar la utilización de inclinómetros horizontales para el monitoreo de desplazamientos verticales en masas de suelos con aplicaciones como: asentamientos por consolidación, asentamientos por cargas, monitoreo de túneles, etc.

9. Bibliografía

9.1 Libros consultados

- Crespo Villalaz, Calos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 2005. Mexico D.F.
- Das, Braja M. 2001. *Fundamentos de la ingeniería geotécnica*. Mexico D,F. Thomson Editores. 594 pags.
- Dunicliff, John. 1993. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. New York. A Wiley-Interscience Publication. 578 pags.
- Gonzales de Vallejo, Luis. 2002 *Ingeniería Geológica*. Madrid Pearson Educacion. 744 pags
- Graux, Daniel. 1975. *Fundamentos de mecánica del suelo*. 2da Edicion. Barcelona. Editores Técnicos Asociados. 414 pags
- *Lopez Jimeno, Carlos. Ingeniería del Terreno*. 2002. Madrid. UD Proyectos. 401 pags.
- Lopez Marinas, Juan Carlos. *Geología aplicada a la ingeniería civil*. 2002 Madrid. 2 Edición. CIE. 566 pags.
- Sowers, George B. *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. 1972. México D.F. Limusa Wiley. 677 pags.

9.2 Manuales consultados

- Manual digilit datamate Slope indicator 2000
- Manual inclinometer probe. Slope indicator 2000

9.3 Páginas de internet

- www.slopeindicator.com
- www.wikipedia.com

10. Apéndice

Paso de medición en campo.

A continuación se describen detalladamente los pasos a seguir para tomar las mediciones en campo del inclinómetro de Slope Indicator. Tener en cuenta que previo estos pasos se deben de tomar las siguientes consideraciones.

- Leer detenidamente el manual disponible en www.slopeindicator.com y bajar el software DMM para Windows.
- Con el programa DMM instalado se podrán descargar y enviar las mediciones, graficas y el setup y vía Internet.
- Verificar la batería del inclinómetro. (El manual indica los niveles necesarios)
- El aparato debe tener introducido el Setup característico de cada proyecto y debe ser exactamente el mismo a utilizar en todas las mediciones. Si el proyecto es nuevo se puede crear uno fácilmente, si se van a hacer mediciones en un proyecto ya medido es necesario conseguir el Setup anteriormente utilizado.

Los paso a seguir en campo son

- Determinar el eje principal en dirección al movimiento (eje A).
- Introducir el inclinómetro falso en eje A para determinar obstrucciones o descarrilamientos.
- Desenrollar del carrete de cable la longitud necesaria para la medición.
- Conectar de forma correcta y segura el cable al inclinómetro y al DataMate.
- Colocar con las ruedas hacia arriba apuntando a la dirección del posible movimiento del talud (medición A0) e introducir lentamente hasta el fondo de la tubería el inclinómetro.
- Conectar el disparador.
- Prender el DataMate. (Jalando hacia arriba para liberar el switch).
- Colocar la polea en la parte inicial de la tubería.
- Presionar enter en “read” luego en “record” luego ir presionando enter para verificar los datos del proyecto específico.
- Esperar 10 minutos que el aparato se estabilice y se acomode a la temperatura.
- Tomar la medición cada medio metro siempre que el DataMate prenda los tres rombos negros.
- Cuando el DataMate indique que ha finalizado, sacar el inclinómetro e introducirlo al fondo dándole un giro de 180 grados (A180). Siempre se deberá medir el eje principal.
- Presionar enter en “continue”.

- Repetir el proceso en el numeral 11.
- Cuando el DataMate indique que ha finalizado, presionar enter en “done”.
- El aparato lo guardara en su memoria según la fecha que se haya realizado, no sobre pone los datos a las mediciones pasadas.
- Guardar el equipo seco y limpio para las próximas mediciones.
- Descargar y guardar los datos obtenidos en la computadora para no perder los datos.

Las partes que contiene el equipo completo que estará a la disposición son las siguientes.

- La computadora portátil DataMate con todas las tapaderas de las conexiones.
- El cargador del DataMate.
- El cable para la conexión con la computadora con su respectivo adaptador serial a usb.
- El carrete metálico con 100 metros de cable especial.
- Un carrete plástico con 100 metros de lazo.
- La caja metálica con el inclinómetro y el disparador.
- El inclinómetro de prueba.
- El brazo metálico con su polea.
- Todas las tapaderas de las conexiones.