PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular

“Implementación normalizada de las sondas inclinométricas para el control de deslizamientos en zonas de alto riesgo”

AUTOR:

Luis Isaac Gordillo Sánchez

QUITO, Noviembre del 2023

Contenido

1. Introducción 6

1.1. Justificación 6

1.2. Planteamiento del problema 6

1.3. Objetivos 7

1.3.1. Objetivo General 7

1.3.2. Objetivos Específicos 7

1.4. Alcance 7

2. Marco Teórico 8

2.1. Asentamientos y estabilidad de taludes 8

2.2. Métodos de cálculo de estabilidad de taludes 10

2.2.1. Factor de seguridad y altura critica 10

2.2.2. Método de Culmann (falla plana) 12

2.2.3. Método ordinario de dovelas 13

2.2.4. Método de Fellenius 14

2.2.5. Método de Bishop simplificado 16

2.2.6. Método (simplificado y corregido) de Janbu 17

2.3. Principio de un inclinómetro de probeta 19

2.4. Usos de un inclinómetro 20

2.4.1. Inclinómetro horizontal 20

2.4.2. Inclinómetro vertical 21

3. Consideraciones para el uso de un inclinómetro 23

3.1. Consideraciones geotécnicas 23

3.2. Consideraciones geográficas/meteorológicas 23

3.3. Consideraciones poblacionales 24

4. Puesta en campo y calibración 25

4.1. Partes de un inclinómetro 25

4.1.1. Revestimiento 25
4.1.2. Tubería 25
4.1.3. Material de relleno 25
4.1.4. Probeta 26
4.2. Técnicas de perforación según tipo de suelo 27
4.3. Material de relleno y colocación 30
4.3.1. Material de relleno 30
4.3.2. Calibración 31
5. Casos históricos 32
5.1. Casos nacionales 32
5.2. Casos internacionales 33
6. Manejo de información 35
6.1. Datos arrojados 35
6.2. Formulas según ASTM 6230 36
7. Conclusiones y recomendaciones 39
7.1. Conclusiones 39
7.2. Recomendaciones 40
8. Bibliografía 41
Anexos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Lista de Figuras

Figura 2-1 Fallas tipo deslizamiento: traslacional y rotacional 9
Figura 2-2 Fallas tipo (b) desprendimiento y (c) flujo 9
Figura 2-3 Fallas tipo (d) derrumbe y (e) caída 9
Figura 2-4 Mecanismos de falla por deslizamiento en taludes: (a) falla en talud, (b) falla en pie y (c) falla en la base 11
Figura 2-5 Modelo considerado para el Método de Culmann 12
Figura 2-6 Consideraciones para el Método Ordinario de Dovelas 13
Figura 2-7 Consideraciones para el Método de Fellenius 14
Figura 2-8 Tipo de falla y valores del número de estabilidad ($\boldsymbol{m}$) para el Método de Fellenius 15
Figura 2-9 Diagrama de fuerzas para la enésima dovela en el Método Simplificado de Bishop 16
Figura 2-10 Valores del factor $\boldsymbol{m\alpha}(\boldsymbol{n})$ en función del angulo $\boldsymbol{\alpha n}$ 17
Figura 2-11 Visualización de una curva de falla considerando el Método de Janbu para términos $\boldsymbol{L}$ y $\boldsymbol{d}$ 19
Figura 2-12 Instalación de inclinómetros horizontales en elementos estructurales (USGOV, 1997) 20
Figura 2-13 Visualización de una posible zona de corte usando cuatro inclinómetros .. 21
Figura 3-1 Mapa del ecuador por cantón según incidencia de desastres naturales (Zevallos, 2009) 23
Figura 4-1 Partes de una sonda inclinométrica 26
Figura 5-1 Uso de inclinómetros para prevención de deslizamientos en el cerro Mishquiyacu 32

Lista de Ecuaciones

Ecuación 2-1 Factores de seguridad para distintas acciones y esfuerzos 10
Ecuación 2-2 Altura critica para el Método de Culmann 12
Ecuación 2-3 Factor de seguridad para el Método Ordinario de Dovelas 14
Ecuación 2-4 Altura critica para el Método de Fellenius 15
Ecuación 2-5 Factor de seguridad para el Método de Bishop Simplificado 16
Ecuación 2-6 Ecuación del factor $\boldsymbol{ma(n)}$ para el Método de Bishop Simplificado 16
Ecuación 2-7 Factor de Seguridad para el Método Simplificado de Janbu 18
Ecuación 2-8 Factor de corrección para el Método Corregido de Janbu 18
Ecuación 2-9 Factor de seguridad para el Método Corregido de Janbu 19
Ecuación 4-1 Factor de amortiguamiento para inclinómetros verticales 30

1. Introducción

1.1. Justificación

Los inclinómetros de probeta (o inclinómetro vertical o sonda inclinométrica), son instrumentos que permite medir la desviación de una sonda colocada en terreno con respecto a un perfil inalterado. Esta sonda puede colocarse verticalmente u horizontalmente dependiendo de la necesidad del proyecto y puede detectar desplazamientos del suelo bajo la superficie y determinar superficies de corte (Bobrowski, 2013).

La incontrolada expansión urbana hacia los alrededores ha generado que se realicen construcciones sobre taludes, laderas e inclusive zonas de riesgo que eventualmente pueden desprenderse por acción natural (Zevallos, 2009). Por esta razón, los inclinómetros se vuelven instrumentos indispensables para garantizar la seguridad de la gente con asentamientos sobre o cercanos a cuerpos de tierra propensos a deslizamientos.

La sociedad americana de pruebas y materiales provee su estándar "ASTM D6230 – Método estándar para monitorear movimientos de tierra usando inclinómetros tipo probeta" (ASTM, 2005). Actualmente no existe normativa nacional que provea lineamientos para la aplicación de este tipo de instrumentos ni investigación al respecto que permita tener lineamientos de como implementarlos en campo.

1.2. Planteamiento del problema

La necesidad de poder brindar seguridad a la ciudadanía ante posibles desprendimientos de masas de suelo vuelve imperativo tener instrumentación en campo que nos permita determinar cuando el riesgo de un movimiento de tierras sea mayor. Asimismo, es necesario tener un sólido entendimiento sobre estos instrumentos para que su puesta en campo y toma de medidas sean fiables y los resultados que se obtienen permitan evaluar correctamente el estado de las masas de tierra.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Normalizar la implementación de sondas inclinométricas para el control de deslizamientos en zonas de alto riesgo.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones que debe presentar la ladera para decir el uso del inclinómetro.
- Detallar de las metodologías de cálculo para estabilidad de taludes y laderas.
- Describir cómo se lleva a cabo la implementación en campo y calibración de una sonda inclinométrica y sus equipos.

1.4. Alcance

Describir los principios básicos en los cuales se fundamenta una sonda inclinométrica, explicar cómo se lleva a cabo su puesta en campo, su respectiva toma de medidas e interpretación de datos, y su importancia para la prevención de desastres.

2. Marco Teórico

2.1. Asentamientos y estabilidad de taludes

Un talud puede definirse como “una superficie de tierra descubierta que forma un ángulo con la horizontal” (Das, 2014). Los taludes pueden ser naturales, como consecuencia del movimiento natural de tierras y/o erosión, o artificiales, siendo este resultado de intervención humana como la necesidad de infraestructuras para transporte, comercio y/o vivienda.

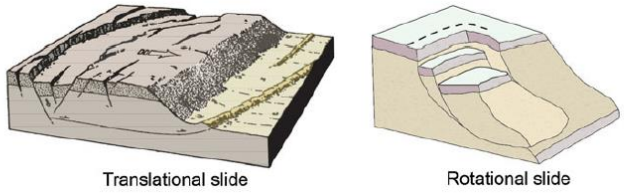
Los deslizamientos de masas de tierra se dan cuando existe una variación en la carga, lo que causa un aumento en el esfuerzo cortante o bien una disminución en la resistencia al corte. Un aumento en el esfuerzo cortante puede darse por sobrecarga en la parte superior de un talud o disminución de carga en la base. Por otra parte, una disminución en la resistencia al corte puede darse por degradación natural del material y aumento de la presión de poros (Ortigao & Sayao, 2004).

Tanto los taludes naturales como artificiales pueden fallar por múltiples causas, como asentamientos, movimiento natural del suelo, condiciones meteorológicas, sobrecarga, etc. Existen cinco tipos de fallas principalmente (Bobrowski, 2013):

1) Deslizamiento: cuando una masa de tierra se desprende enteramente del talud a través de un plano de falla como consecuencia de la acción de las fuerzas de corte. El deslizamiento puede subdividirse en dos tipos de fallas:

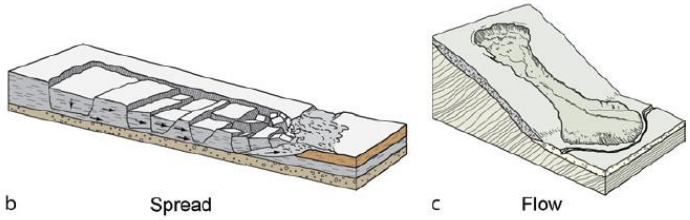
    a. Deslizamiento traslacional: cuando el plano de falla es un plano bien definido a lo largo del talud, y
    b. Deslizamiento rotacional: cuando el plano de falla es curvo y tiene forma de “cuchara”.

Figura 2-1 Fallas tipo deslizamiento: traslacional y rotacional



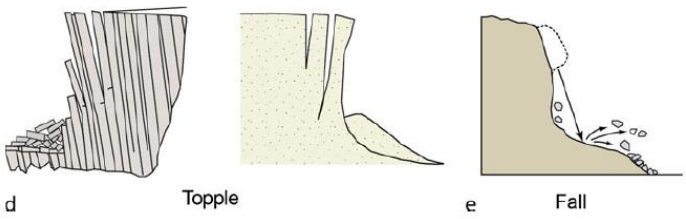
2) Desprendimiento: cuando al desprenderse una masa de tierra del talud, esta no se separa en una sola masa, sino en varias masas que caen una tras otra en distintas direcciones.
3) Flujo: cuando, al darse un desprendimiento o deslizamiento inicial, la masa de tierra dentro del plano de falla pierde fuerza y las partículas empiezan a desprenderse formando un flujo que puede alcanzar altas velocidades.

Figura 2-2 Fallas tipo (b) desprendimiento y (c) flujo



4) Derrumbe: es más común en roca y suelos consolidados, se da cuando los planos de falla son perpendiculares al suelo y esto genera que las masas roten desde su base y caigan.
5) Caída: se da cuando una roca se encuentra empotrada en un talud; al perderse el recubrimiento de dicha roca esta se desprende y cae precipitadamente hacia el terreno.

Figura 2-3 Fallas tipo (d) derrumbe y (e) caída



2.2. Métodos de cálculo de estabilidad de taludes

2.2.1. Factor de seguridad y altura critica

En general, para cualquier método de estabilidad, se busca determinar tanto las acciones/esfuerzos que aportan a la estabilidad del talud y de igual manera aquellas acciones/esfuerzos que generan una disminución en la resistencia del suelo. Para poder comparar las fuerzas a favor y en contra del equilibrio se considera un *factor de seguridad* F_s que los relaciona (Das, 2014). Se tienen varios factores de seguridad como se muestra a continuación (el sufijo r representa a las fuerzas resistentes y el sufijo d representa a las fuerzas en contra del equilibrio):

Ecuación 2-1 Factores de seguridad para distintas acciones y esfuerzos

- Para fuerzas:

$$F_s = \frac{F_r}{F_d}$$

- Para momentos:

$$F_s = \frac{M_r}{M_d}$$

- Para cohesión:

$$F_s = \frac{c'}{c'_d}$$

- Para fricción:

$$F_s = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\phi'_d)}$$

- Para esfuerzos de corte:

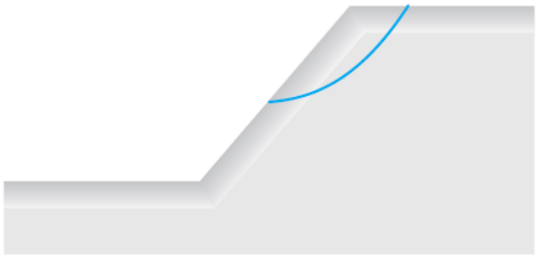
$$F_s = \frac{\tau_r}{\tau_d} = \frac{c' + \sigma' \tan(\phi')}{c'_d + \sigma' \tan(\phi'_d)}$$

El factor de seguridad dependerá del riesgo que se considere, sea este bajo, medio o alto, y según si se va a dar prioridad a las pérdidas económicas o pérdidas humanas (GEO 1984). En general, un factor de seguridad mayor a 1.5 asegura que el talud no vaya a fallar bajo los parámetros considerados.

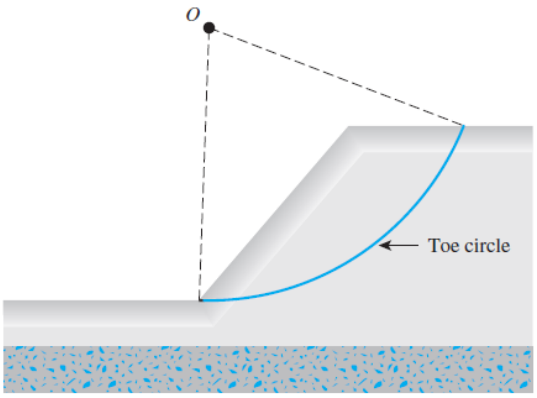
Adicionalmente, existen principalmente tres tipos de fallas principales:

- Falla en talud: cuando la curva de falla empieza en alguna parte del talud hacia la parte superior.
- Falla en pie: cuando la curva de falla, en su parte más baja, coincide con el pie del talud y se extiende hasta la parte superior.
- Falla en la base: cuando la curva de falla va desde la base del talud hasta la parte superior del mismo.

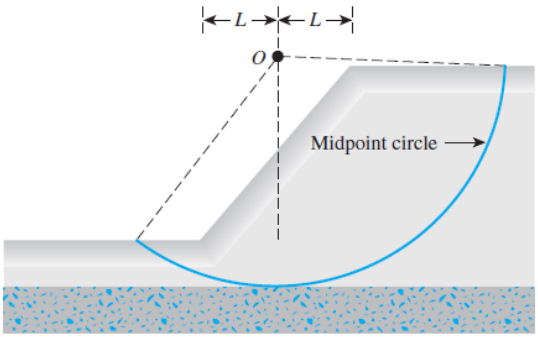
Figura 2-4 Mecanismos de falla por deslizamiento en taludes: (a) falla en talud, (b) falla en pie y (c) falla en la base



(a)



(b)



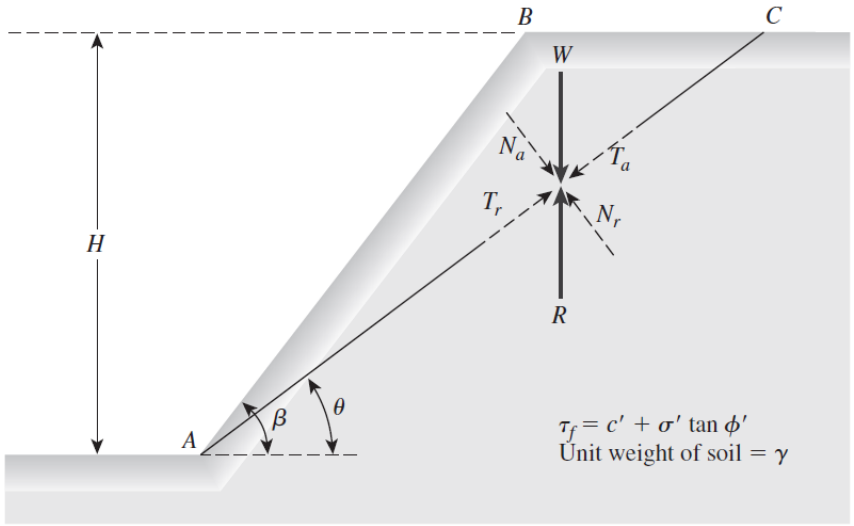
(c)

Todo lo anterior es en cuanto a fallas. Por otra parte, al realizarse un análisis se puede obtener una *altura critica* H_{cr} que representa la altura máxima para la cual se garantiza la estabilidad de un talud. El uso, ya sea de un factor de seguridad o una altura critica, dependerá del enfoque que el autor tome.

2.2.2. Método de Culmann (falla plana)

El método de Culmann considera que el plano de falla en el que ocurre el deslizamiento es una línea recta que va desde un punto en la parte superior del talud hasta el pie del mismo. Para este método se considera la línea de acción por la cual se da la posible falla y en un punto de ella se considera el equilibrio entre el peso de la masa de tierra W (y sus componentes T_a, N_a) con la reacción del suelo R (y sus componentes T_r, N_r).

Figura 2-5 Modelo considerado para el Método de Culmann



Para el método de Culmann se busca la altura critica del talud y esta viene dada por:

Ecuación 2-2 Altura critica para el Método de Culmann

$$H_{cr} = \frac{4c'}{\gamma}\left[\frac{\sin(\beta)\cos(\phi')}{1-\cos(\beta-\phi')}\right]$$

Donde:

c': cohesión efectiva

γ: peso específico del suelo

β: ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal

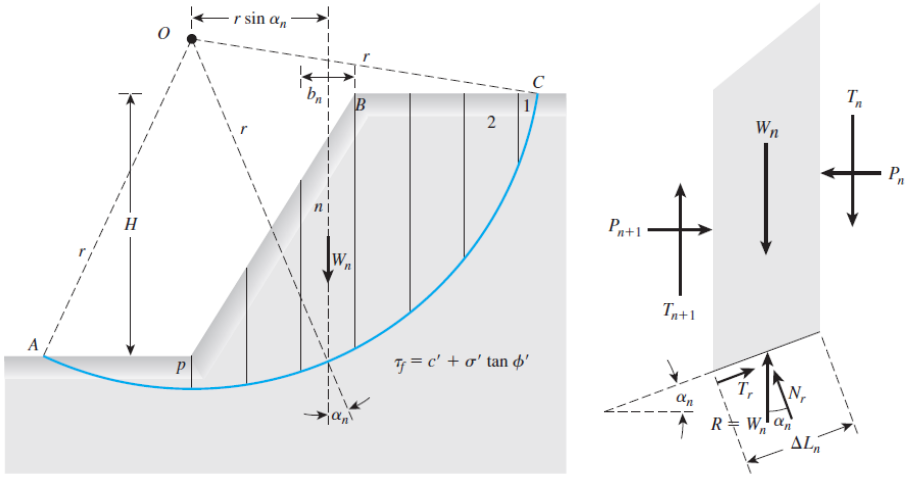
ϕ': ángulo de fricción efectiva del suelo

2.2.3. Método ordinario de dovelas

El Método Ordinario de Dovelas, o rebanadas, considera una falla circular alrededor de un punto arbitrario en el espacio, pudiendo esta falla ser cualquiera de las antes mencionadas. La masa de tierra comprendida entre el talud y la curva de falla se divide en p rebanadas y cada rebanada tendrá un ancho ΔL (no necesariamente igual).

La consideración particular de este método es que las fuerzas normales en cada cara de la dovela (P_n, $P_{n=1}$) y cortantes (T_n, T_{n+1}) a cada lado de la misma se consideran de igual magnitud y sus líneas de acción coinciden, causando que se sus efectos se cancelen mutuamente.

Figura 2-6 Consideraciones para el Método Ordinario de Dovelas



El factor de seguridad dado para el Método Ordinario de Dovelas es:

Ecuación 2-3 Factor de seguridad para el Método Ordinario de Dovelas

$$F_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=p}(c'\Delta L_n + W_n \cos(\alpha_n)\tan(\phi'))}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin(\alpha_n)}$$

Donde:

ΔL_n: ancho de cada dovela

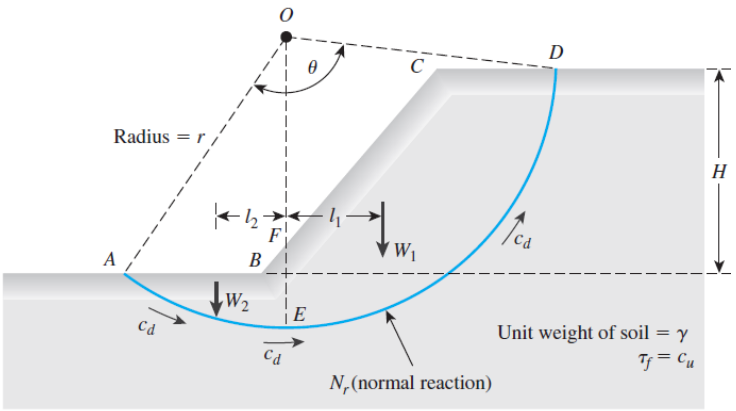
W_n: peso de la enésima dovela

α_n: ángulo en la base de la enésima dovela

2.2.4. Método de Fellenius

Fellenius (1927) para su método considera el equilibrio del talud tomando en cuenta como fuerzas en contra del equilibrio al peso de dos masas de tierra W_1 y W_2, cada una a cada lado de una vertical trazada desde el origen de la curva de falla, y considera como única fuerza resistente a la cohesión del suelo.

Figura 2-7 Consideraciones para el Método de Fellenius



Para su análisis, Fellenius encontró una altura critica dada por:

Ecuación 2-4 Altura critica para el Método de Fellenius

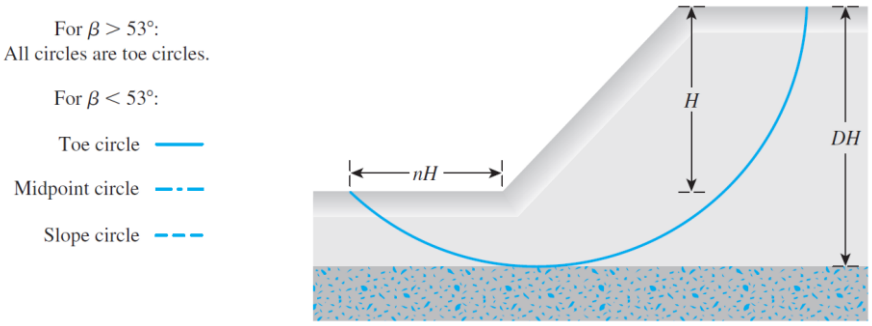
$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma m}$$

Donde:

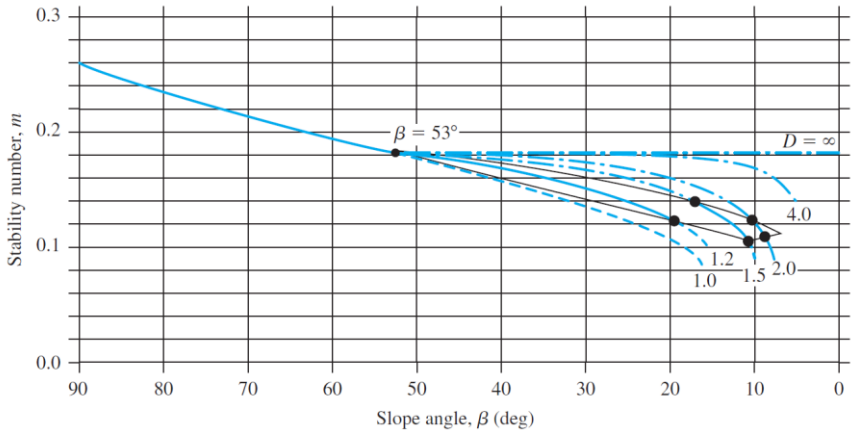
m: numero de estabilidad

El número de estabilidad dependerá del tipo de falla (sea de pie, talud o base) y del ángulo entre la horizontal y el talud β.

Figura 2-8 Tipo de falla y valores del número de estabilidad (m) para el Método de Fellenius



(a) Tipo de falla – Método de Fellenius

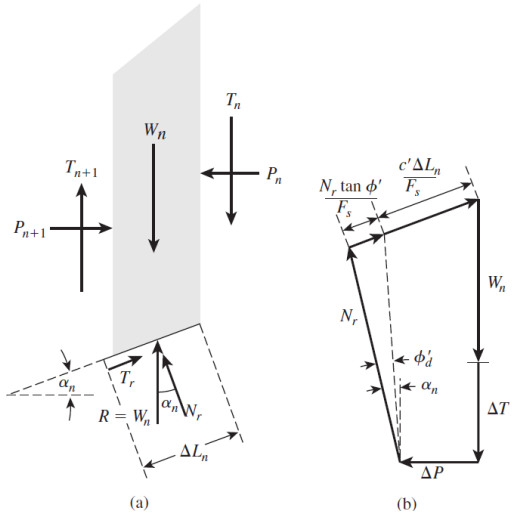


(b) Numero de estabilidad del talud m – Método de Fellenius

2.2.5. Método de Bishop simplificado

Para el método de Bishop simplificado, a diferencia del método ordinario de dovelas, se considera en cierto grado las fuerzas en las caras de la enésima dovela. Considerando el siguiente polígono de fuerzas para una rebanada cualquiera:

Figura 2-9 Diagrama de fuerzas para la enésima dovela en el Método Simplificado de Bishop



Se puede obtener el siguiente factor de seguridad:

Ecuación 2-5 Factor de seguridad para el Método de Bishop Simplificado

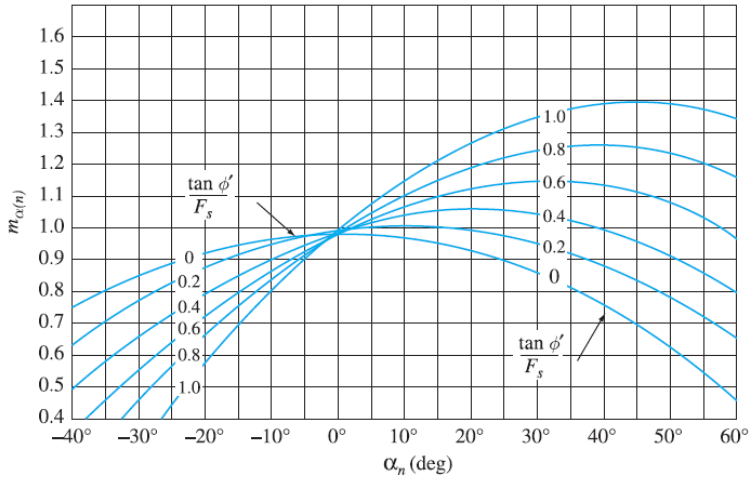
$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p}(c' b_n + W_n \tan(\phi') + \Delta T \tan(\phi')) \cdot \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin(\alpha_n)}$$

El factor $m_{a(n)}$ toma en cuenta el ángulo en la base de la dovela y es:

Ecuación 2-6 Ecuación del factor $m_{a(n)}$ para el Método de Bishop Simplificado

$$m_{\alpha(n)} = \cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\phi') \sin(\alpha_n)}{F_s}$$

Figura 2-10 Valores del factor $m_{\alpha(n)}$ en función del angulo α_n



Se puede observar que se tiene F_s a ambos lados de la ecuación por lo que se requerirá asumir un valor de prueba para el factor de seguridad e iterar.

Al ser difícil la determinación de la variación del esfuerzo cortante ΔT en cada dovela, por simplicidad se puede considerar $\Delta T = 0$.

2.2.6. Método (simplificado y corregido) de Janbu

Los anteriores métodos consideran planos de falla circulares a partir de una curva que tiene como centro algún punto arbitrario en el espacio. En la realidad será muy escaso que una curva de falla de un talud real sea el arco de un círculo. Estas fallas pueden tener varias secciones de distintos anchos que en su base poseen distinta forma (lineal, circular, elíptica, etc.).

Los anteriores métodos se conocen como “métodos circulares” por la curva de falla circular. Existen asimismo “métodos poligonales” que consideran formas irregulares para diferentes secciones de distinto ancho. Uno de los métodos poligonales más utilizados es el Método de Janbu.

La consideración del Método de Janbu es que las fuerzas entre secciones son únicamente perpendiculares a sus caras (no existen fuerzas cortantes). La forma simplificada de este método es considerar un factor de seguridad F_0 que se obtiene con la siguiente formula:

Ecuación 2-7 Factor de Seguridad para el Método Simplificado de Janbu

$$F_0 = \frac{\sum_{n=1}^{n=p}[c'\Delta L_n + (N_{r\,n} - c'\Delta L)\tan(\phi')] \cdot \sec(\alpha_n)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \tan(\alpha_n)}$$

Este método simplificado no considera que la base de las distintas dovelas tienen distinta forma, pero el método corregido si toma esto en consideración.

Como la base de una dovela no es necesariamente circular se deberá considerar un factor de corrección f_0 para la curvatura del talud:

Ecuación 2-8 Factor de corrección para el Método Corregido de Janbu

$$f_0 = 1 + b_1 \cdot \left[\frac{d}{L} - 1.4\left(\frac{d}{L}\right)^2\right]$$

Donde:

F_0: factor de seguridad para el Método Simplificado de Janbu

f_0: factor de corrección de curvatura para el Método Corregido de Janbu

b_1: factor según las propiedades del suelo

$b_1 = 0.69$ para suelos solo con cohesión (c')

$b_1 = 0.50$ para suelos con cohesión y fricción $(c' + \phi')$

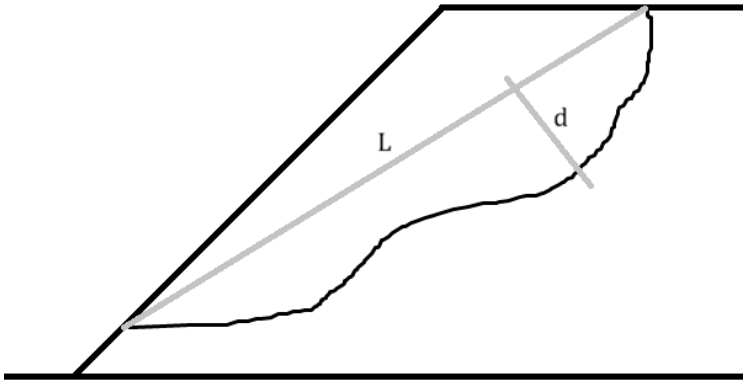
$b_1 = 0.31$ para suelos solo con fricción (ϕ')

L: longitud tomada desde ambos extremos de la falla

d: mayor distancia perpendicular desde L hasta la curva de falla

$N_{r\,n}$: componente normal de la reacción del suelo de la enésima dovela

Figura 2-11 Visualización de una curva de falla considerando el Método de Janbu para términos *L* y *d*



Finalmente, el factor de seguridad para el Método de Janbu es:

Ecuación 2-9 Factor de seguridad para el Método Corregido de Janbu

$$F_s = f_0 \cdot F_0$$

2.3. Principio de un inclinómetro de probeta

Como fundamento del uso de los inclinómetros están la estratificación de suelos. Una perforación puede mostrar como una sección del suelo está compuesta por distintas capas que no poseen las mismas propiedades mecánicas, es decir, es una masa de suelo heterogénea. Como consecuencia, el desempeño de cada capa será totalmente distinto.

Una sonda inclinométrica pasa a través de una tubería con rieles marcados a lo largo de su eje, en sus cuatro cuadrantes para tomar medidas. Cuando se baja la sonda a través de la tubería, esta mide la inclinación en cuatro direcciones ortogonales al eje para posteriormente obtener el desplazamiento para cada intervalo de medida.

La base de una sonda inclinométrica está en considerar las diferentes propiedades mecánicas de cada capa de suelo y poder determinar a qué altura se encuentran aquellas zonas que presentan un menor desempeño. Dependiendo del tipo de inclinómetro, si es de un eje se deberá bajar cuatro veces el instrumento, si es un inclinómetro de dos ejes se deberá medir dos veces.

2.4. Usos de un inclinómetro

2.4.1. Inclinómetro horizontal

Los inclinómetros horizontales son por lo regular utilizados para evaluar el desempeño de algunos tipos de infraestructuras. Por una parte, se utiliza en carreteras para determinar si existen asentamientos perpendiculares al eje de una vía en una zona específica. Esto debido a que existen zonas a lo largo de una vía donde el material bajo la subrasante, a pesar de poder haber sido mejorado, puede ser propenso a altas deformaciones, causando patologías en la vía.

De igual manera, aunque no tan común, los inclinómetros horizontales se utilizan para determinar si existen deformaciones excesivas en elementos propensos a deformación con el fin de controlar dichas deformaciones, como diafragmas y muros de contención.

Figura 2-12 Instalación de inclinómetros horizontales en elementos estructurales (USGOV, 1997)

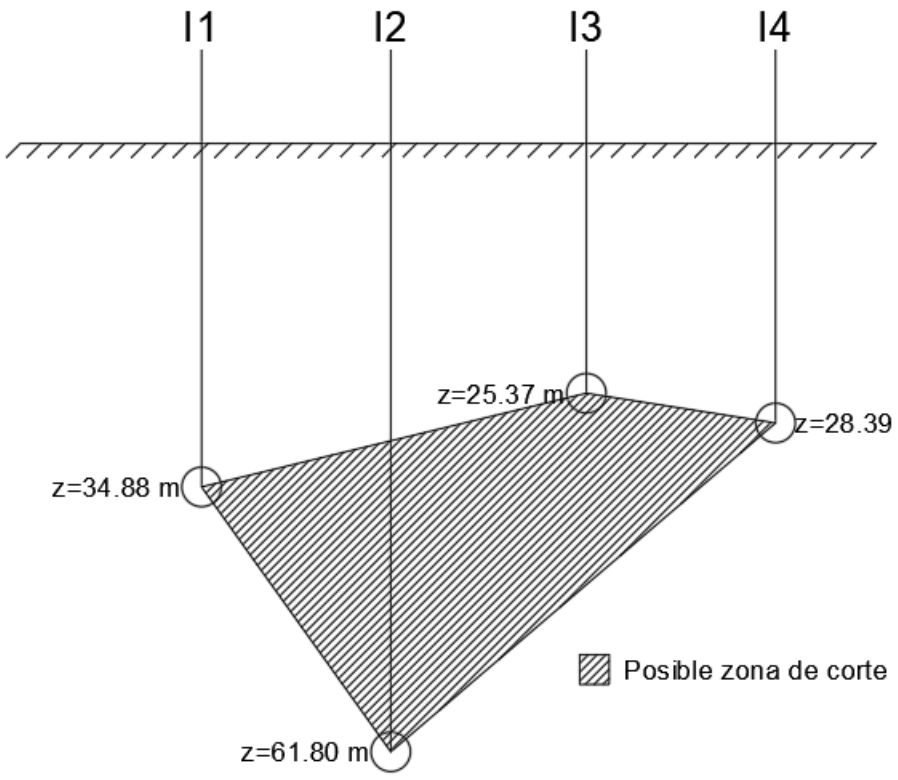


2.4.2. Inclinómetro vertical

Los inclinómetros verticales son los más comunes. Estos suelen colocarse perpendiculares a un terreno y verticalmente con el fin de determinar a qué profundidad se dan mayores deformaciones en el suelo. Estas lecturas se hacen periódicamente y ayudan a determinar si las capas de suelo están en movimiento.

A pesar de que basta un inclinómetro para poder determinar si existen movimientos de tierra, de tenerse más de tres inclinómetros de probeta en un mismo terreno, se puede trazar un plano entre tres puntos de cada inclinómetro en los cuales se tienen excesivos desplazamientos y obtener una posible zona de corte.

Figura 2-13 Visualización de una posible zona de corte usando cuatro inclinómetros



Hoy en día se pueden utilizar tanto inclinómetros verticales y horizontales al mismo tiempo para monitorear con precisión posibles fallas durante un proyecto. Un ejemplo es la utilización de estos para monitoreo de excavaciones profundas, esto con el fin de poder determinar si el suelo está empezando a ceder para tomar medidas correctivas. Esto es particularmente importante cuando se trata de obras bajo tierra como metros y subestructura de edificios, o también para casos en los que existe un constante cambio en el perfil de terreno, como minería.

3. Consideraciones para el uso de un inclinómetro

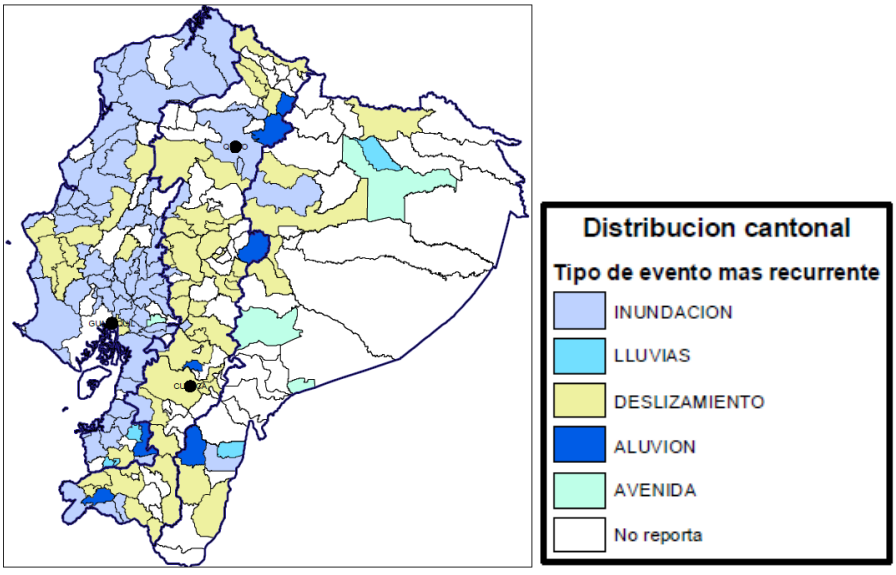
3.1. Consideraciones geotécnicas

Las consideraciones geotécnicas son resultado directo del análisis de la estabilidad de taludes. Estos análisis nos indicaran si es que, para un talud existente este será o no propenso a fallar por deslizamiento, o si es que el diseño considerado para un talud es estable únicamente con la geometría propuesta o si este requiere de alguna clase de refuerzo (geomalla o pernos de anclaje).

3.2. Consideraciones geográficas/meteorológicas

En Ecuador, de los desastres naturales con mayor incidencia están las inundaciones, derrumbos y aluviones, siendo las inundaciones las mas frecuentes en la región costa como consecuencia de la presencia de ríos y asentamientos cercanos a estos, y en la sierra son mas comunes los derrumbos y aluviones como consecuencia de la presencia de la cordillera de los Andes.

Figura 3-1 Mapa del ecuador por cantón según incidencia de desastres naturales (Zevallos, 2009)



Con lo dicho anteriormente en consideración, el riesgo en la región sierra por deslizamientos es inevitable e inherente a su situación geográfica y topográfica. Regiones con geografía muy accidentada requerirán de constante monitoreo.

Por otra parte, taludes que pueden bien ser estables pueden fallar inesperadamente debido a una alta incidencia de lluvias en forma de aluvión como consecuencia de un aumento de la presión de poros en un corto periodo (falla de tipo “flujo”). Esta clase de accidentes no se pueden prevenir, no obstante, con el uso de inclinómetros se puede determinar si una masa de tierra está en movimiento siendo esta propensa a un deslave, y alertar a poblaciones aledañas de posibles accidentes.

3.3. Consideraciones poblacionales

La elevada expansión urbana ha hecho que lugares que poseen riesgo de asentamiento se consideren para construcción. Las múltiples intervenciones en estos terrenos, como viviendas, vías, industrias y escombreras genera que se debilite el terreno y su riesgo aumente, añadiendo que, adicional a la debilitación del terreno, durante una lluvia el estado de estas laderas se vuelve crítico.

Estos asentamientos generan que exista un riesgo tanto económico como social cuando se evalúan las posibles consecuencias de un desastre, por lo que se deberá tomar en cuenta asentamientos en laderas o cercanos a estas, la densidad poblacional de dichos sectores y el estado actual de las laderas. De igual manera, se deberá analizar la historia de los asentamientos, es decir, si son formales o no, si están en un relleno, presencia de vegetación nativa, etc. para poder aseverar adecuadamente el riesgo de dichos sectores.

Adicionalmente, uno de los riesgos indirectos que tienen los movimientos de tierras es generar afectaciones derivadas. Un par de ejemplos son el represamiento de un rio e inundaciones en asentamientos cercanos a estos ríos y daños en infraestructura debido a derrumbes, deslaves y/o aluviones a sectores aledaños

4. Puesta en campo y calibración

4.1. Partes de un inclinómetro

4.1.1. Revestimiento

Para poder empezar con la instalación de un inclinómetro se deberá, como primer paso, tener una perforación profunda a cielo abierto y de un corto diámetro (de 3 a 5 pulgadas) que mantenga el suelo alrededor del eje de perforación inalterado, esto con el fin de que no existan partículas que afecten a futuro las lecturas tomadas del inclinómetro.

Realizada la perforación se coloca un revestimiento para asegurar que no existan contaminantes. Estos revestimientos suelen ser tubos corrugados de PVC o algún material que sea flexible y de bajo espesor.

4.1.2. Tubería

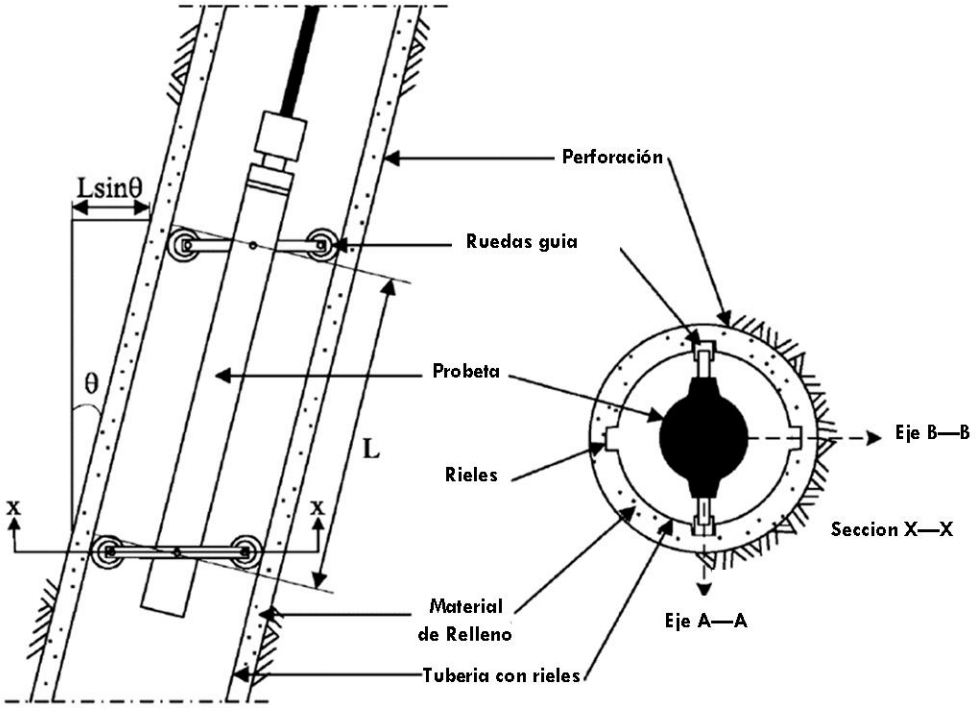
Una vez hecha la perforación y colocado el revestimiento se coloca la tubería del inclinómetro. Esta tubería es colocada verticalmente y tiene la particularidad de tener rieles guía en cuatro direcciones mutuamente perpendiculares al su eje (en los cuatro cuadrantes del circulo) de manera que se puedan tomar mediciones en cuatro direcciones.

4.1.3. Material de relleno

El material de relleno es una de las partes más importantes del inclinómetro ya que, como se menciona más adelante, las propiedades de este serán un factor determinante en poder registrar adecuadamente los movimientos del suelo.

El material de relleno se coloca entre el revestimiento y la tubería de manera que la tubería esta fija y pueda moverse con el suelo.

Figura 4-1 Partes de una sonda inclinométrica



4.1.4. Probeta

Es el instrumento propiamente, y este está compuesto de una barra con ruedas guías que permiten el paso por los rieles de la tubería. Las ruedas tienen la particularidad de ser muy sensibles y pueden medir con precisión los cortos desplazamientos del suelo.

La probeta puede ser de uno o dos ejes. Una probeta de un eje se tendrá que pasar cuatro veces para poder medir el desplazamiento en los cuatro ejes. Por otra parte, una probeta de dos ejes se tendrá que pasar dos veces ya que las ruedas delanteras y traseras pueden medir por separado el desplazamiento.

4.1.5. Lector y/o estación

Está conectado directamente con la probeta y es el que detecta el movimiento de las ruedas en el eje de la probeta. La importancia entre el lector y estación están en la periodicidad de las medidas. Para un lector se requiere de un operador que vaya físicamente a realizar la toma de medidas con la probeta.

Por otra parte, la estación es automática y permite obtener datos sin la necesidad de un operador, permitiéndonos obtener datos con mayor frecuencia y medir con mayor precisión un movimiento de tierras. La preferencia por una estación es cuando el proyecto es de gran envergadura o si es que se tiene un talud que se sabe tiene una alta probabilidad de falla.

4.2. Técnicas de perforación según tipo de suelo

Existen varias técnicas de perforación en la actualidad con la finalidad de poder aplicar la más adecuada a un proyecto según su naturaleza. A continuación, se presentan algunos métodos de perforación para al final presentar una tabla comparativa de los métodos de perforación y aquellos suelos recomendados para cada método.

- Perforación por percusión

Consiste en utilizar una punta que penetre en el suelo mediante la caída de un peso para que progresivamente se vaya abriendo paso en el terreno. Por este método se puede excavar en distintos tipos de suelos y se puede alcanzar altas profundidades.

- Barrena manual

Consiste de un tubo largo que en su punta posee una helicoidal se va rotando desde la parte superior y el material excavado se va acumulando en la punta del mismo. Es recomendable para suelos no consolidados y requiere de limpiar constantemente la punta.

- Jetting

Consiste en bombear agua al fondo de la perforación para que se genere un lodo que es más sencillo de excavar. Es un método muy eficiente, recomendado para suelos no consolidados. Una desventaja es que requiere de un constante bombeo de agua.

- Sludging

Es un método más rustico y consiste en utilizar un tubo vacío para pulsarlo contra el suelo en presencia de agua para generar lodos que vayan subiendo a través de un tubo vacío. Se recomienda para suelos no consolidados y puede ser este el método más lento de todos los presentados.

- Percusión rotatoria

Es una combinación de la percusión y del barrenado. Se tiene en la cabeza una helicoidal que rota constantemente para ir limpiando el material que se va soltando constantemente como consecuencia de la percusión. Para este método se suelen utilizar helicoidales largas y modulares.

- Taladro rotativo con descarga

Es similar a la percusión rotativa, con la particularidad de que se envía agua (o lodos) al fondo de la perforación para ir limpiando el material removido.

Tipo de Suelo		Percusión	Barrena	Jetting	Sludging	Percusión rotativa	Perf. rotativa con descarga
Grava	**Formaciones no consolidadas**	✓ ?	x	x	x	✓ ?	x
Arena		✓ ?	✓	✓	✓	✓ ?	✓
Limo		✓ ?	✓	✓	✓	✓ ?	✓
Arcilla		✓ lento	✓	?	✓	✓ lento	✓
Arena gruesa		✓ ?	x	x	x	✓ ?	x
Esquisto	**Formaciones de media/baja resistencia**	✓	x	x	x	✓ lento	✓
Arenisca		✓	x	x	x	✓	✓
Caliza	**Formaciones de media a alta resistencia**	✓ lento	x	x	x	✓	✓ lento
Roca Ígnea		✓ lento	x	x	x	✓	x
Roca Metamórfica		✓ muy lento	x	x	x	✓	x
Roca con fracturas y vacíos		✓	X	x	x	✓	✓ !
Sobre el nivel freático		✓	✓	?	x	✓	✓
Bajo el nivel freático		✓	?	✓	✓	✓	✓

✓: Método adecuado, ✓?: Riesgo de colapso, ✓! El bombeo deberá ser continuo, ? Posibles problemas, x: Método inapropiado

A pesar de ser todos los métodos mencionados válidos para perforar el suelo, no todos mantienen la integridad del suelo y puede afectar a los resultados. Aquellos métodos que implican el uso de agua y lodos no son recomendables, como el jetting, sludging y perforación rotativa con descarga.

Considerando adicionalmente que durante una perforación no es posible conocer con certeza el tipo de material con el que se va a encontrar, lo cual puede generar problemas durante la perforación, no es muy recomendable utilizar técnicas de perforación que tienen limitaciones según el tipo de material, por lo que los métodos más recomendables para poder realizar una perforación y mantener la integridad del suelo son la percusión y la percusión rotativa.

4.3. Material de relleno y colocación

4.3.1. Material de relleno

El material de relleno y el tipo de tubería que se planee en colocar serán los determinantes en poder obtener las deformaciones lo más cercano a la realidad posible de los suelos.

Materiales usualmente usados son grouts y material granular. Por una parte, los grouts suelen ser de mezclas de cemento y mezclas de cemento con bentonita, mientras que para material granular se suele tener perlas de bentonita, arena y mezclas de arena con grava. Es recomendado utilizar generalmente grout como revestimiento para un inclinómetro, mientras que el material granular es más utilizado para situaciones específicas como medios kársticos.

Un estudio realizado por Plinniger, Alber y Dullman (Plinninger et al., 2010) evaluó el desempeño de diferentes tipos de grout para tres distintos tipos de tubería. En su estudio presentaron un *factor de amortiguamiento* F_d que relaciona el desplazamiento exterior del suelo con el desplazamiento interior de la tubería:

Ecuación 4-1 Factor de amortiguamiento para inclinómetros verticales

$$F_d = \frac{d_O}{d_I} \left[\frac{mm}{mm}\right]$$

Donde:
F_d: factor de amortiguamiento
d_O: deformación exterior
d_I: deformación interior

Este factor de desplazamiento nos muestra cómo se deforma la parte exterior de la parte interior, es decir, que parte de la deformación externa es absorbida por la tubería del inclinómetro. Se puede notar que un factor de deslizamiento cercano a 1 es deseable puesto a que así las lecturas de deformación del inclinómetro serán iguales a la deformación del suelo.

En el estudio se determinó que la principal causa de un alto factor de amortiguamiento fue el uso de grouts de alta resistencia y también, en cuanto a la tubería, que las tuberías de alto espesor, o de metal, al ser más rígidas, eran más difíciles de deformar. Por lo que, para el uso de inclinómetros verticales, es recomendable utilizar grouts que no sean de alta resistencia y tuberías de plástico de bajo espesor.

4.3.2. Calibración

Al colocarse el inclinómetro, tanto la perforación como la puesta del tubo y el relleno deberán ser lo más vertical posible. Una vez colocada la tubería se pasa por primera vez la sonda para medir el perfil. Esta primera medida, que nos permite determinar cómo es el perfil natural del inclinómetro al momento de instalarse, es nuestro perfil de calibración. Es a partir de este perfil inicial que se empiezan a considerar los desplazamientos.

5. Casos históricos

5.1. Casos nacionales

- Cerro Mishquiyacu

El Cerro Mishquiyacu es una formación montañosa que se encuentra en Cuenca, en el cantón Paute, colindando con el rio Paute. Este cerro, como consecuencia de actividades agrícolas y ganaderas en el sector, ha ido sufriendo un debilitamiento de su estructura, lo cual puede causar una eventual falla, causando que todo el material desprendido caiga al rio y se genere un embalse. Esto puede traer como consecuencias la falta de abastecimiento de agua a los sectores que se ven influenciados por el rio Paute y puede generar inundaciones

Como medida de prevención se ha utilizado tres inclinómetros colocados en sectores estratégicos para poder monitorear los desplazamientos del suelo. Junto con la constante supervisión del cerro y la toma de medidas periódica se puede prevenir desastres.

Figura 5-1 Uso de inclinómetros para prevención de deslizamientos en el cerro Mishquiyacu



(a) Perforación para la instalación de inclinómetros



(b) Cabeza del inclinómetro colocado en el cerro Mishquiyacu

- Monitoreo de centrales hidroeléctricas en la costa

Otro caso en el que se utiliza actualmente inclinómetros es en el monitoreo de represas hidroeléctricas. El Grupo Álava actualmente se encuentran con 15 puntos de inclinómetros en 3 centrales hidroeléctricas, siendo estas La Esperanza, Poza Honda y Taurin. Estos inclinómetros no están instalados en el terreno, están colocados pegados a la propia presa para monitorear sus deformaciones y que estas no sean muy grandes.

El uso de inclinómetros, en conjunto con piezómetros, acelerómetros y una estación, permite asegurar la integridad de la estructura. Al ser el Ecuador un país que depende principalmente de la energía hidroeléctrica es de particular importancia asegurar la integridad de este tipo de infraestructura.

5.2. Casos internacionales

- Mina en Bełchatów, Polonia

Uno de los usos más comunes de inclinómetros en industrias es el caso de la minería. El constante cambio en el perfil del terreno y el regular paso de maquinaria pesada cargada

en el sitio causa que existan constantemente variaciones muy fuertes en las cargas del suelo y, como consecuencia de la maquinaria, vibraciones que también debilitan el suelo.

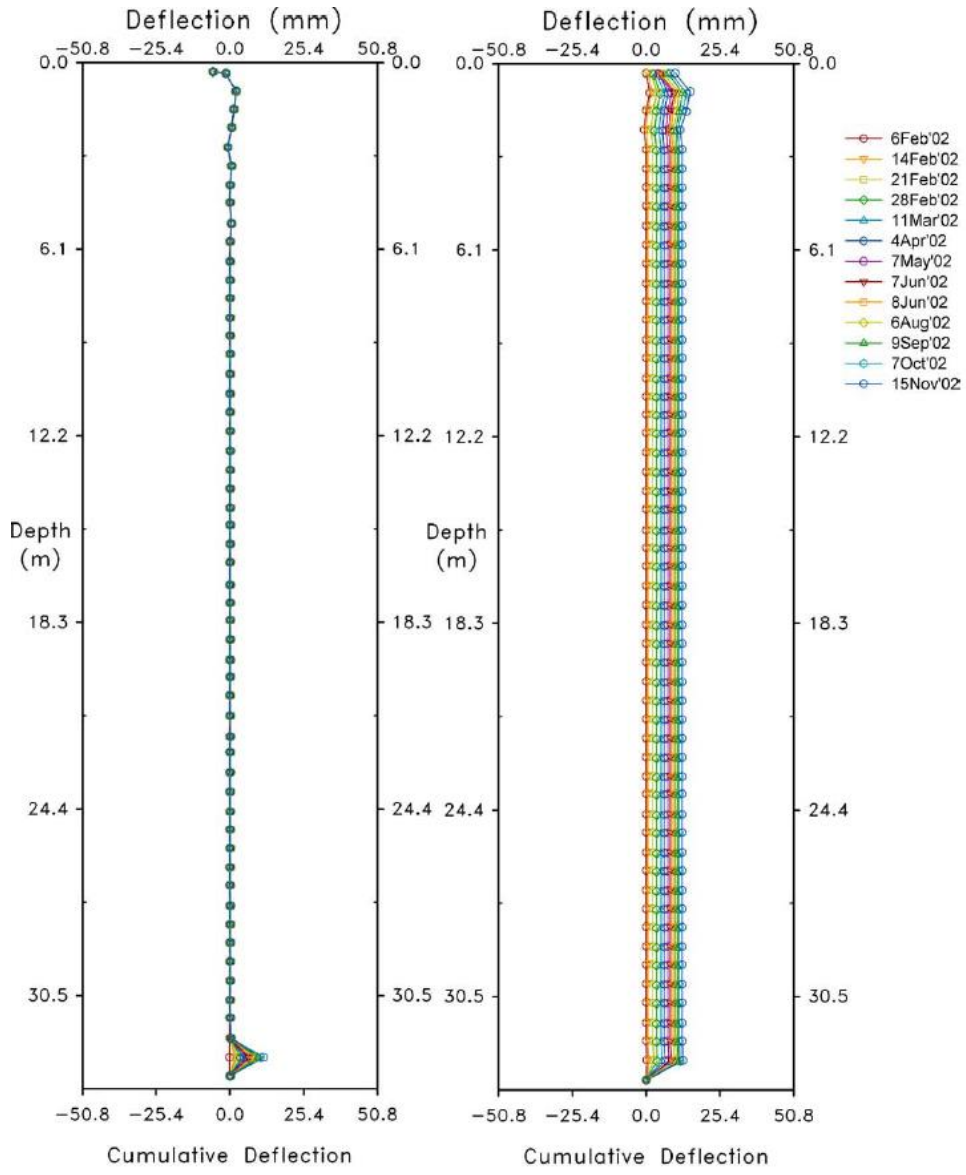
Es de particular importancia el uso de instrumentación para monitorear el terreno debido a que, al cambiarse constantemente el perfil, pueden suceder algunas cosas: puede que las excavaciones se acerque a un perfil de falla y se dé una falla repentina, el constante cambio en el perfil del terreno genera un cambio constante de los estados de carga y un terreno que antes era estable para ciertas solicitaciones puede fallar a futuro, la vibración que genera la maquinaria pesara tanto para el transporte como la excavación puede generar una debilitación de las masas de tierra, etc.

El uso de inclinómetros ha permitido monitorear los movimientos del suelo y poder determinar si los desplazamientos dados en el terreno presentan algún potencial riesgo o no. En este terreno, el uso de inclinómetros va desde el año 2007, y se encuentra que entre los años 2007 y 2010 se tuvo un desplazamiento máximo de 25 cm. A pesar de tener desplazamientos tan grandes, el constante monitoreo ha permitido modificar el perfil y adecuar el terreno para que sea capaz de soportar las cargas.

6. Manejo de información

6.1. Datos arrojados

Al bajarse el inclinómetro y tomar las medidas para un paso *L* (entre 30 y 60 centimetros) se obtiene una medida de desplazamiento. Las gráficas arrojadas por un inclinómetro son de profundidad versus desplazamiento, pudiendo estar ser incremental o acumulada.



Grafica arrojada de un inclinómetro para desplazamiento incremental (izquierda) y desplazamiento acumulado (derecha)

6.2. Formulas según ASTM 6230

Toda la metodología presentada a continuación está en base a la norma "*ASTM D6230 – 98 (2005): Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers*" (ASTM, 2005)

Las lecturas R_1, R_2, R_3 y R_4 corresponden a las lecturas de las cuatro direcciones mutuamente perpendiculares al eje de la tubería. La lectura para cualquiera de estas direcciones es:

$$d = \frac{L}{K} \cdot R_{1-4}$$

Donde:

L: paso para las medidas del inclinómetro (entre 30 y 60 centímetros)

K: factor de calibración dado por el fabricante

R: lectura de desplazamiento

Como se mencionó antes, existen probetas de un eje y de dos ejes. Para las probetas de un eje se requerirán cuatro pasos para cada dirección R_{1-4}, mientras que para probetas de dos ejes se requerirán dos pasos: uno para R_1 y R_3, y otro para R_2 y R_4.

Se promedia el desplazamiento en las direcciones perpendiculares:

$$d_{1-3} = \frac{L}{K} \cdot \frac{R_1 - R_3}{2}, d_{2-4} = \frac{L}{K} \cdot \frac{R_2 - R_4}{2}$$

Se calcula la posición para una profundidad cualquiera D_n:

$$D_{n\,1-3} = \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\,1-3}\,, \qquad D_{n\,2-4} = \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\,2-4}$$

Ahora se calcula el desplazamiento ΔD_n:

$$\Delta D_{n\ 1-3} = \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\ 1-3\ @\ t-t} - \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\ 1-3\ @\ t-t_0}$$

$$\Delta D_{n\ 2-4} = \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\ 2-4\ @\ t-t} - \sum_{i=1}^{i=n} d_{t\ 2-4\ @\ t-t_0}$$

Si el paso entre cada toma de medidas L y el factor de calibración K son constantes para cada paso, la ecuación anterior se puede simplificar como:

$$\Delta D_{n\ 1-3} = \frac{L}{2K} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=n} (R_{1t} - R_{3t})_{@t-t} - \sum_{i=1}^{i=n} (R_{1t} - R_{3t})_{@t-t_0} \right]$$

$$\Delta D_{n\ 2-4} = \frac{L}{2K} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=n} (R_{2t} - R_{4t})_{@t-t} - \sum_{i=1}^{i=n} (R_{2t} - R_{4t})_{@t-t_0} \right]$$

Como el movimiento del suelo no necesariamente va a ser traslacional en ambas direcciones puede darse que exista torsión en alguna parte del eje del inclinómetro por lo que, de requerirse, se utilizara un factor de corrección por torsión.

La necesidad de un factor de torsión es que, a pesar de que un inclinómetro es capaz de medir deformaciones en dos direcciones, es porque, al tener torsiones, los desplazamientos generados pueden ser mayores a los registrados. Usualmente para

poder medir la torsión θ_i para cada intervalo se utiliza un inclinómetro especial capaz de poder medir estas torsiones en cada paso i.

Primero, se obtiene el desplazamiento total (considerando el movimiento en ambas direcciones) del inclinómetro para cada paso:

$$\Delta D_{i_R} = \sqrt{\left(\Delta D_{i_{1-3}}\right)^2 + \left(\Delta D_{i_{2-4}}\right)^2}$$

Se obtiene el ángulo que forma el desplazamiento total del inclinómetro con la horizontal:

$$\phi_i = \text{atan}\left(\frac{\Delta D_{i_{2-4}}}{\Delta D_{i_{1-3}}}\right)$$

Finalmente, se obtienen los desplazamientos reales considerando el desplazamiento total del inclinómetro ϕ_i y la torsión θ_i:

$$\Delta D_{i_{A-A}} = \Delta D_{i_R} \cdot \cot(\phi_i + \theta_i)$$

$$\Delta D_{i_{B-B}} = \Delta D_{i_R} \cdot \tan(\phi_i + \theta_i)$$

Cabe recalcar que $\Delta D_{i_{A-A}}$ y $\Delta D_{i_{B-B}}$ es lo mismo que $\Delta D_{i_{1-3}}$ y $\Delta D_{i_{2-4}}$, no se corresponde una con otra porque dependerá de cómo se dé la torsión en el suelo para determinar a qué dirección corresponde a cada corrección.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

Este trabajo de investigación busca recopilar información disponible acerca de inclinómetros y todo lo que conlleva: sus componentes, puesta en campo, datos arrojados y manejo de los mismos, y sus usos.

- Conocer el funcionamiento de los distintos componentes de un inclinómetro, como la probeta, las rieles, el material de relleno, etc., permite que el manejo y colocación en campo sea el adecuado, siendo los instrumentos colocados verticalmente, que la perforación este limpia, y también que los datos tomados sean fiables. ()

- Es de particular importancia asegurar que el revestimiento y el material de relleno interactúen adecuadamente, considerando un factor de amortiguamiento adecuado, ya que, de la interacción entre estos es lo que permitirá obtener datos fiables y que al mismo tiempo la vida útil del inclinómetro no sea demasiado corta. ()

- Los datos arrojados por los inclinómetros deberán ser manejados adecuadamente y los cálculos deberán realizarse y corregirse según lo planteado por la norma ASTM D6230 considerando el perfil de calibración inalterado. ()

- En cuanto al uso de inclinómetros en taludes, al realizarse toma de medidas periódicas y determinar los desplazamientos se puede determinar si, de acuerdo a la variación del factor de seguridad y velocidad a la que se mueve el talud, requiere o no medidas cautelares y, de tenerse más de tres inclinómetros se puede determinar la posible zona de corte, y con esto se puede estimar el posible perfil de falla y el volumen de suelo desprendido. ()

- Por otra parte, los inclinómetros pueden usarse a la par con otros instrumentos para asegurar la integridad de ciertos proyectos a largo plazo, es así, el uso en centrales hidroeléctricas que, junto a piezómetros y acelerómetros, ayudan a determinar si las deflexiones en el arco de la presa son excesivas y permite tomar medidas cautelares ante el posible desprendimiento de masas de tierra en la presa. ()

- Los inclinómetros se pueden también utilizar en proyectos para los cuales se tiene un cambio constante de perfil, lo que genera que el estado de esfuerzos sea variable y la curva de falla vaya variando, siendo en este caso útil para proyectos como metros y para la industria de la minería. ()

7.2. Recomendaciones

- La investigación de la interacción entre el relleno y el revestimiento utilizado deberá darse para cada caso particular de manera que se pueda encontrar un factor de amortiguamiento adecuado para poder escalar los desplazamientos sin desestimar los desplazamientos del suelo y la velocidad a la que se mueven las masas de tierra. ()

- Los estudios para determinar la implementación de inclinómetros deberán tener en cuenta las consideraciones antes mencionadas, geotécnicas, poblacionales, climatológicas y geográficas, para poder ponderar adecuadamente cada una de estas consideraciones y determinar si es necesario o no el uso de inclinómetros. ()

- Se recomienda difundir información acerca del uso de inclinómetros y las ventajas que poseen los mismos, así como su correcta instalación y uso, como instrumento para la prevención en el deslizamiento de masas de tierra para que su uso en obras civiles sea más frecuente. ()

8. Bibliografía

ASTM. (2005). *Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe - Type Inclinometers, ASTM D6230 - 98 (2005). 04.09*; *200*(Reapproved), 6.

Bobrowski, P. (ed.). (2013). Encycopedia of Natural Hazards. In *Encycopledia of Earth Sciences Series* (1st ed., Vol. 6, Issue April, p. 1176). Springer Dordrecht.

Das, B. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering* (8th ed.). Cengage Learning.

Ortigao, J., & Sayao, A. (2004). *Handbook of Slope Stability* (1st ed.). Springer-Verlag.

Plinninger, R. J., Alber, M., & Düllmann, J. (2010). The influence of casing and backfilling materials on inclinometer measurements. *Geologically Active*, 2361–2367.

Zevallos, O. (2009). *Degradación, vulnerabilidad y riesgo hidrogeomorfoclimático en áreas urbanas de laderas*. Ministerio de Cultura del Ecuador.