

**GUÍA DE INSTRUMENTACIÓN EN TALUDES INTERVENIDOS POR UN
PROYECTO VIAL**

CATALINA CASTRILLÓN TORRES

JUAN DAVID QUINTERO FRANCO

Trabajo de grado para optar por el título de Especialista en Vías y Transporte

ASESORES

Ms I. MANUEL ROBERTO VILLARRAGA HERRERA

I. CLARA INES BARRETO GARCÉS



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN

ESPECIALIZACION EN VIAS Y TRANSPORTE

MEDELLIN

2012

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
INTRODUCCION	10
1. INFORMACION GENERAL.....	12
1.1. ANTECEDENTES.....	12
1.2. JUSTIFICACIÓN	14
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.4. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO DE REFERENCIA	17
2.1. SECCIONES TÍPICAS EN PROYECTOS VIALES.	17
2.2 CORTES.....	19
2.3 TERRAPLÉN.....	23
2.3.1 <i>Componentes de un Terraplén</i>	24
2.3.1.1 Suelo de fundación:.....	24
2.3.1.2 Arranque:.....	25
2.3.1.4 Cabeza o corona:	27
2.3.2 <i>Conformación de un Terraplén.</i>	28
2.3.3 <i>Control en la construcción.</i>	29
2.4 MIXTAS	29
2.5 ESTUDIOS PREVIOS	31
2.5.1 <i>Evaluación hidrológica</i>	32
2.5.1.1 Precipitación	32
2.5.1.2 Condiciones Hidrogeológicas.	33
2.5.2 <i>Evaluación geológica.</i>	34
2.6 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN DEL TALUD EN CARRETERA.	41
2.6.1 <i>Consideraciones previas.</i>	41
2.6.2 <i>Proyecto Geométrico de la Explanación</i>	41
2.6.3 <i>Diseño y/o Revisión Geotécnica de la Explanación.</i>	42
2.6.4 <i>Preparación técnica y Organización de los Trabajos.</i>	42
2.6.5 <i>Construcción de la Obra.</i>	43
2.6.6 <i>Recomendaciones de Construcción.</i>	43
2.6.6.1 Explanaciones	43
2.6.6.2 Terraplén	45
2.7 PRUEBAS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO	48
2.7.1 <i>Prueba de corte directo</i>	49

2.7.2 Ensayos Triaxiales.....	50
2.7.2.1 Consolidado Drenado (CD)	51
2.7.2.2 Consolidado no drenado (CU)	53
2.7.2.3 No Consolidado no drenado (CU)	55
2.8 CONDICIONES DE ESTABILIDAD	56
2.8.1 Estabilidad del talud a corto plazo	58
2.8.2 Estabilidad del talud a largo plazo	58
3. CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.	60
3.1 DESLIZAMIENTOS	60
3.1.1. Deslizamientos Rotacionales.....	61
3.1.2. Deslizamientos Traslacionales	62
3.2. FLUJOS	63
3.2.1 Flujo de lodo (MudFlow)	64
3.2.2 Flujo de tierra (EarthFlow)	65
3.2.3 Flujo de detritos (DebrisFlow)	66
3.3. DESPRENDIMIENTOS	66
3.4. VOLCAMIENTO	68
3.4.1 Volcamineto por flexión (flexuraltoppling)	68
3.4.2 Desplome.....	69
3.5. AVALANCHAS.....	70
3.5.1. Etapas del flujo	71
3.5.2. Mecanismos de Formación de avalanchas de Tierra.....	73
3.6. DESPLAZAMIENTOS LATERALES O CORRIMIENTO LATERAL	74
4. VARIABLES A MEDIR EN UN DESLIZAMIENTO VIAL, CAUSAS Y EFECTOS.	76
4.1. CAUSAS DE LOS DESLIZAMIENTOS	76
4.1.1. Incremento en el esfuerzo de corte.....	76
4.1.2. Disminución de la resistencia del material	77
4.2 EFECTOS DE LOS DESLIZAMIENTOS.....	77
5. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE LOS INSTRUMENTOS GEOTÉCNICOS MÁS UTILIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE TALUDES.....	80
5.1. CONTROL TOPOGRÁFICO DE PUNTOS DETERMINADOS.....	83
5.2 GPS DIFERENCIAL	86
5.3. EXTENSÓMETROS SUPERFICIALES	87
5.3.1. Extensómetros horizontales.....	88
5.3.2. Extensómetros verticales.....	89
5.4. INCLINÓMETROS	92

5.5. REFLECTOMETRÍA	95
5.6. PIEZÓMETROS	99
5.6.1. Sondeo Abierto	99
5.6.2 Piezómetro de Cabeza Abierta	102
5.6.3. Piezómetro de Hilo Vibrátil.....	103
5.6.4. Tensiómetros	105
5.6.6 Uso de los Piezómetros en el Estudio de los Deslizamientos.....	108
<i>El piezómetro de cabeza abierta generalmente es el más utilizado en suelos granulares de alta permeabilidad, y los de hilo vibrátil o neumáticos son más complejos, y se recomiendan para suelos cohesivos de baja permeabilidad.</i>	
.....	109
5.6.7 Características generales de la instrumentación por piezómetros.....	109
6. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA CANTIDAD Y TIPO DE INSTRUMENTO A SER INSTALADO EN UN TALUD.	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFIA	124

INDICE FIGURAS

- Figura 1. Clasificación de los taludes y sus principales mecanismo de falla.
- Figura 2. Corte de taludes
- Figura 3. Sección en Corte de una Vía
- Figura 4. Componentes de un Terraplén
- Figura 5. Sección en Terraplén de una Vía
- Figura 6. Sección Transversal Mixta (Corte y Terraplén) de una Vía
- Figura 7. Perfil típico de meteorización Dearman (1991)
- Figura 8. Perfil típico de meteorización de un suelo tropical proveniente de roca ígnea.
- Figura 9. Localización de los suelos tropicales
- Figura 10. Excavaciones a Grandes alturas
- Figura 11. Corte Típico en Cajón
- Figura 12. Prueba de Resistencia al Corte
- Figura 13. Cámara triaxial.
- Figura 14. Ensayo consolidado drenado bajo confinamiento de cámara y bajo aplicación del esfuerzo desviador.
- Figura 15. Envolvente de falla para un suelo en un ensayo triaxial CD.
- Figura 16. Envolvente de falla para un suelo en un ensayo triaxial CU.
- Figura 17. Envolvente de falla para un suelo en esfuerzos totales en un ensayo triaxialCU.
- Figura 18. Envolvente de falla para un suelo en un ensayo triaxial UU
- Figura 19 Superficie de Falla típica en un deslizamiento de suelo
- Figura 20. Deslizamiento del Terreno

Figura 21. Deslizamiento Rotacional.

Figura 22. Deslizamiento Traslacional.

Figura 23. Flujos

Figura 24. Esquema de un Desprendimiento

Figura 25. Volcamiento por Flexión

Figura 26. Desplome

Figura 27. Esquema típico de una avalancha

Figura 28. Diagrama de instalación de un extensómetro horizontal

Figura 29. Extensómetro vertical sencillo para medir el desplazamiento de la superficie de falla.

Figura 30. Esquema de la medición del desplazamiento, en la superficie de falla, donde se emplea un extensómetro vertical (Corominas y otros, 2000).

Figura 31. Diagrama de un extensómetro multipunto

Figura 32. Inclínómetro Portátil

Figura 33. Tubo guía PVC para sonda inclinométrica

Figura 34. Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de Inclínómetro (Dunnicliff, 1993)

Figura 35. Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de reflectometría.

Figura 36. Esquema del sistema TDR

Figura 37. Esquema del cable coaxial del sistema TDR

Figura 38. Piezómetro sencillo de cabeza abierta.

Figura 39. Piezómetros de cabeza abierta.

Figura 40. Piezómetro de Casagrande.

Figura 41. Piezometro de Hilo Vibratil (Cornforth 2005)

Figura 42. Esquema de un tensiómetro

Figura 43. Esquema de fibra óptica patentado por FISO

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inclinação del talud según material y Altura.

Tabla 2. Relaciones típicas de cortes en talud en roca madre.

Tabla 3. Relaciones de Terraplenes.

Tabla 4. Relaciones de cortes y terraplenes

Tabla 5. Características de las técnicas topográficas clásicas

Tabla 6. Principales dificultades de los instrumentos de Auscultación

GUÍA DE INSTRUMENTACIÓN EN TALUDES INTERVENIDO POR UN PROYECTO VIAL.

Autores: Catalina Castrillón Torres

Juan David Quintero Franco

Título otorgado: Especialista en Vías y Transporte

Asesor del trabajo: Manuel Roberto Villarraga Herrera

Programa de donde egresa: Vías y Transporte

Ciudad: Medellín

Año: 2012

RESUMEN

La naturaleza del suelo y los fenómenos de estabilidad implican niveles de incertidumbre que requieren de un seguimiento por medio de una instrumentación y observación del comportamiento real de los taludes, que permita verificar el comportamiento adecuado de los taludes y corregir oportunamente situaciones imprevistas que puedan surgir, complementando adecuadamente la solución. La instrumentación debe implementarse en todas las etapas del proyecto, desde la exploración, previamente a la conformación de los taludes, durante la construcción y posteriormente durante la operación de la vía, y debe incluir controles topográficos, inclinómetros, piezómetros y pozos de observación del nivel freático, entre otros. El objetivo de esta guía es definir los pasos a seguir en la implementación adecuada del sistema de instrumentación correcto según el tipo de talud que se vaya a conformar para el proyecto vial.

INTRODUCCION

En el desarrollo de un proyecto vial y más específicamente en la construcción a lo largo de todo el trazado de la vía, hacen que la geotecnia en el desarrollo del proyecto no pueda agotarse en la fase de diseño y se requiera un acompañamiento permanente por parte de un ingeniero geotécnico a lo largo de cada proyecto. La confiabilidad de los estudios geotécnicos dependen de la calidad de los estudios y de la profundidad de los mismos, pero el principal problema, es que los proyectos viales en nuestro país carecen de un adecuado estudio quizás por reducir costos del proyecto entre otras razones, pero que hoy, ya hemos notado y tenemos ejemplos claros de las consecuencias por la ausencia de análisis adecuados.

Este capítulo es uno de los más importantes del trabajo ya que es donde se recogen, se describen y se tratan las variables que involucran todo el proceso de la instrumentación geotécnica que a posteriori ha permitido llevar a cabo la correlación con el tipo de talud a intervenir según sea el proyecto vial.

Dunnicliff, J. (1993). Afirma, cuando la necesidad de instrumentación es adecuada y establecida correctamente, y cuando el programa está correctamente planificado, el ahorro en los costos puede ser un resultado directo. Sin embargo, la instrumentación no tiene que justificar la reducción de los costos. En algunos casos, la instrumentación ha sido valiosa para demostrar que el diseño es correcto. En otros casos, la instrumentación logra demostrar que el diseño es insuficiente, lo que puede resultar en el aumento de los costos de construcción.

Sin embargo, tener mayor seguridad y evitar el fracaso (ahorrando el costo de las reparaciones) harán que el costo del programa de instrumentación sea efectivo.

La instrumentación es utilizada durante la construcción para garantizar la seguridad, reducir al mínimo los costos de construcción, control en los procedimientos constructivos, protección legal, mejorar las relaciones públicas, y avanzar en la técnica de la instrumentación.

Inherente a la utilización de la instrumentación, por razones de construcción es la absoluta necesidad de decidir, de antemano, un medio positivo para la solución de cualquier problema que pueda ser divulgada por los resultados de las observaciones (Peck 1973). Si las observaciones demuestran que la solución se necesita, esta acción ha estado basada en planes apropiados y previamente anticipados que con antelación ya se han analizado.

Este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

Inicialmente una breve descripción acerca de las diferentes secciones viales en proyectos viales y el efecto de las condiciones hidrologías, geológicas geotécnicas, posteriormente se toca el tema de la explanación del proyecto y sus recomendaciones constructivas, continuamos con la estabilidad de taludes y la clasificación de los principales movimientos de laderas.

Posteriormente una descripción de la instrumentación utilizada, con un resumen de las propiedades y características básicas de cada uno de los instrumentos. A continuación se han descrito los puntos más relevantes del plan de auscultación

que se debe llevar a cabo en un proyecto considerando frecuencias de lecturas, tipos de secciones de control, modificaciones del plan de proyecto, etc.

Finalmente se ha desarrollado un último punto de conclusiones concretas de este capítulo en relación a los propios instrumentos.

1. INFORMACION GENERAL

1.1. Antecedentes

Según Dunnicliff (1993), el nacimiento de la instrumentación geotécnica, como una herramienta para ayudar a las observaciones de campo, se produjo en los años 1930 y 1940. Durante los primeros 50 años de vida, una tendencia general se puede observar. En los primeros años, eran predominantes y simples, topografía, los instrumentos mecánicos e hidráulicos y la mayoría de los programas de instrumentación se encontraban en manos de los ingenieros que tenían un claro sentido en cuanto al propósito y la motivación para realizar los programas exitosamente.

Hubo éxitos y fracasos, pero el consorcio entre los instrumentos y las personas fue generalmente bueno. En los últimos años como la tecnología ha evolucionado aceleradamente y el papel de la instrumentación geotécnica se ha vuelto más seguro y confiable, los dispositivos más complejos con transductores eléctricos neumáticos se convirtieron en algo común en su momento, aunque hoy realmente ya se encuentran fuera del mercado. Algunos de estos dispositivos han obtenido buenos resultados, mientras que otros no tanto. Al mismo tiempo, la tecnología ha atraído a una proporción cada vez mayor a la profesión de la ingeniería

geotécnica, y un número creciente de programas de instrumentación que hoy en día se encuentran en manos de personas capacitadas y con un objetivo claro. Se ha seguido teniendo éxitos y fracasos, pero, a diferencia de los primeros años, un número significativo de fallas puede ser atribuidas a un matrimonio poco sólido entre los instrumentos y las personas encargadas del seguimiento a la instrumentación.

El diseño de taludes se efectúa a partir de una serie de hipótesis y simplificaciones de la naturaleza y el comportamiento de los suelos, a los mecanismos de falla que se pueden presentar; por otra parte las condiciones de estabilidad se encuentran afectadas por las condiciones climáticas. El reto del ingeniero está entonces en descubrir la hipótesis que se ajuste al comportamiento y que permita su explicación, la instrumentación entre otras, sirve para definir esta hipótesis.

En la actualidad existen diversos tipos de instrumentos que permiten hacer estas verificaciones con mayor o menor grado de certeza, como conocer la magnitud y velocidad de los movimientos superficiales, medir desplazamientos relativos entre masas de movimiento, medir movimientos horizontales a lo largo de perforaciones verticales y por lo tanto detectar zonas de movimiento, evolución y velocidad de los mismos, etc. Existen textos que tratan del tema de la instrumentación desde aspectos muy someros como el caso de los libros de mecánica de suelos y libros especializados en el tema de instrumentación geotécnica como el de Dunicliff(1993) que hacen un tratado muy detallado de cuál es el procedimiento a seguir e información muy valiosa sobre la filosofía de la instrumentación.

En Colombia por lo general, el diseño de sistemas de instrumentación, cuenta con mucha experiencia para grandes proyectos especialmente hidroeléctricas y rellenos sanitarios, que se deben ir llevando a proyectos viales, además, las condiciones geotécnicas de nuestras vías lo ameritan. Ciudades como Medellín y Bogotá han implementado planes de instrumentación importantes para zonas de riesgo.

1.2. Justificación

En Colombia, las carreteras presentan una gran problemática relacionada con la estabilidad de taludes debido a la topografía y condiciones geológicas y geotécnicas propias del país, especialmente en la Zona Andina. Los residentes y directores de obra se ven abocados a desarrollar sistemas de instrumentación que son recomendados y diseñados por expertos en geotecnia, pero en algunas ocasiones, en que no sea factible la presencia del especialista, sería importante que los encargados de la obra tuvieran las herramientas necesarias para evaluar las características de un sistema de instrumentación y en casos especiales, poderlos dimensionar. Cabe anotar que en proyectos viales la presencia de un especialista en geotecnia permanentemente es de vital importancia para el seguimiento continuo, las interpretaciones y medidas pertinentes a adoptar.

1.3. Descripción del problema

Durante la construcción de un proyecto vial, es necesario un control de los movimientos que se producen en los taludes y terraplenes durante la explanación

de la vía, esto se realiza mediante la instrumentación del talud y de los elementos de estabilización y contención; que debe ser implantados previamente o simultáneamente con el comienzo de las actuaciones, manteniéndolos durante todo el tiempo que dure la intervención y posterior a la construcción para verificar la condición de estabilidad a largo plazo o para detectar cambios ambientales en el lugar del proyecto. Es conveniente también, controlar periódicamente durante la operación dichas actuaciones el comportamiento del talud, verificando la efectividad del tratamiento.

Para definir el sistema de control de una obra se deben realizar las siguientes actividades:

- Predicción del comportamiento del talud (fase de diseño). Esto incluye exploración, elaboración de hipótesis, definición de posibles mecanismos de falla y comportamientos esperados del talud.
- Elección de magnitudes cuyo control resulte significativo para reflejar simplifícadamente el comportamiento del talud.
- Definición de instrumentos adecuados para medir las magnitudes elegidas en el punto anterior. Dichos instrumentos dependen del rango (valor máximo esperado), precisión requerida y frecuencia de lectura.
- Instalación de los instrumentos elegidos y lectura de los mismos.
- Comparación de los valores previstos con los reales.

¿Existe una forma expedita en que los encargados de las obras puedan predimensionar sistema de instrumentación geotécnica que permita el monitoreo del comportamiento de un talud?

1.4. Objetivo General

Elaborar una guía para la instrumentación de taludes al ejecutarse un proyecto de construcción vial.

1.5. Objetivos Específicos

- Determinar las características y funciones de los instrumentos geotécnicos más utilizados para el seguimiento del comportamiento de taludes.
- Establecer los criterios para la selección de la cantidad y tipo de instrumento a ser instalado en un talud o terraplén.

2. MARCO DE REFERENCIA

La implementación de proyectos viales en una menor proporción involucra infraestructura como túneles y viaductos y en su mayor parte involucra la intervención sobre el terreno, conformando taludes en cortes para seguir con el trazado original de la vía, mientras que algunos tramos del proyecto vial requieren de la construcción de terraplén o secciones combinadas. En este capítulo se presenta cada una de las secciones y su proceso constructivo.

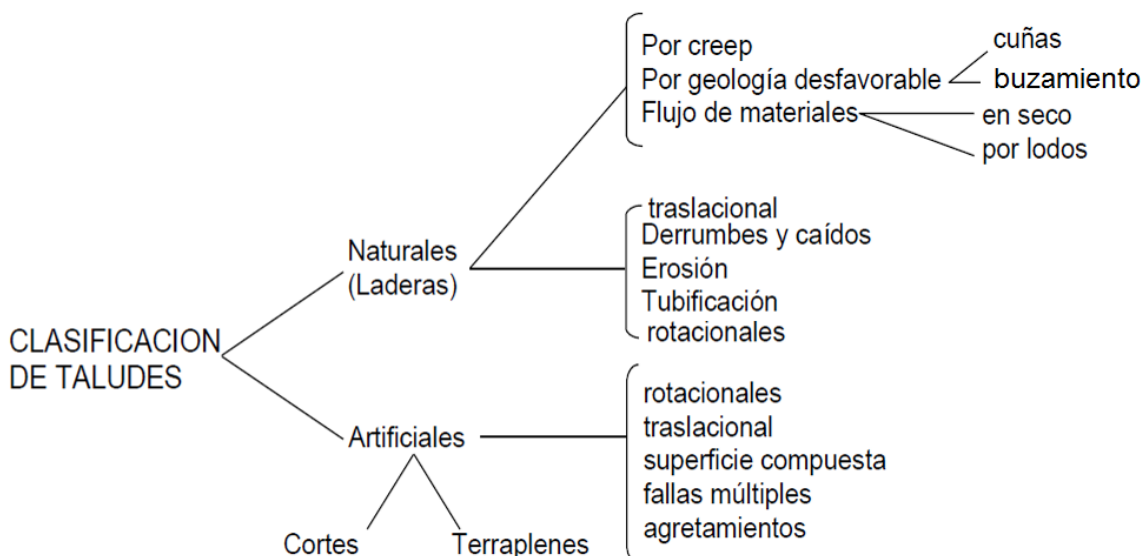
2.1. Secciones típicas en proyectos viales.

Según Navarro. S. (2008), se conoce con el nombre genérico de taludes cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las masas de tierras, conformada con ciertas condiciones geométricas como son pendiente y altura, que es susceptible o no de fallar.

Los taludes pueden definirse como obras, normalmente de tierra, que se construyen a ambos lados de la vía (tanto en cortes como en terraplén y mixtas) con una inclinación tal que garantice la estabilidad de la obra.

Principalmente existen dos tipos de taludes, tal como se muestra en la figura 1: natural o ladera, cuando el hombre no ha intervenido sobre ellos, cortes y taludes artificiales cuando dichos taludes son realizados por el hombre, según sea la génesis de su formación. También puede evidenciarse en la figura 1, los principales mecanismos de falla de cada uno de los taludes.

Figura 1. Clasificación de los taludes y sus principales mecanismo de falla.



Referencia: Morales y Monrroy, R. (2008). Muros, Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado: Control de Erosión, <http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/control-erosion-en-suelos.pdf>.

Bautista, Hernández y Ortiz (2012), afirman que se denomina como talud de corte, a las excavaciones ejecutadas a cielo abierto en terreno natural, en ampliaciones, en la corona o en bancos de préstamos. Se entiende por terraplenes a capas de suelo seleccionado una sobre la otra, cuya sección quede alojada arriba del terreno natural, por lo general se construye otra capa llamada terracería sobre éste, pero al final de cuenta en conjunto un terraplén y la terracería suelen generalizarse con el nombre de terracería. Se construye con materiales procedentes de cortes o préstamos de banco, por capas a todo lo ancho de la sección y de un espesor aproximadamente uniforme, de tal manera que la compactación especificada (90% proctor), pueda obtenerse en todos los puntos.

La diferencia que existe entre las elevaciones del terreno y la subrasante obtenida para cada una de las estaciones consideradas en el proyecto, determina la altura correspondiente de corte o terraplén. Para el caso de corte se tiene que la elevación de la subrasante es menor a la del terreno, en terraplén el caso es inverso, es decir la subrasante tiene una elevación mayor a la del terreno natural.

2.2 Cortes

Véliz, C. (2009). Se hace el corte o excavación necesaria para la conformación de la plataforma o superficie de apoyo para la máquina en el perímetro en que se harán las mismas, que incluye la conformación, el acabado y perfilación de las paredes verticales o inclinadas del talud; la localización topográfica horizontal y vertical de los chaflanes; el movimiento, transporte y disposición de los materiales resultantes de excavación suministro y colocación. Todo este proceso, es durante la construcción.

El corte de taludes consiste en la excavación de materiales en sitios previamente definidos de conformidad con un diseño previamente elaborado, utilizando métodos y recursos también previamente definidos. Las excavaciones tienen ancho mínimo, que es el ancho de la banca e inclinación definida de los taludes definido por el diseñador y el ingeniero de suelos.

El corte consiste en la excavación que se realiza en el terreno de conformidad al trazado de la carretera o camino.

En los trabajos de excavación deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros:

- Densidad

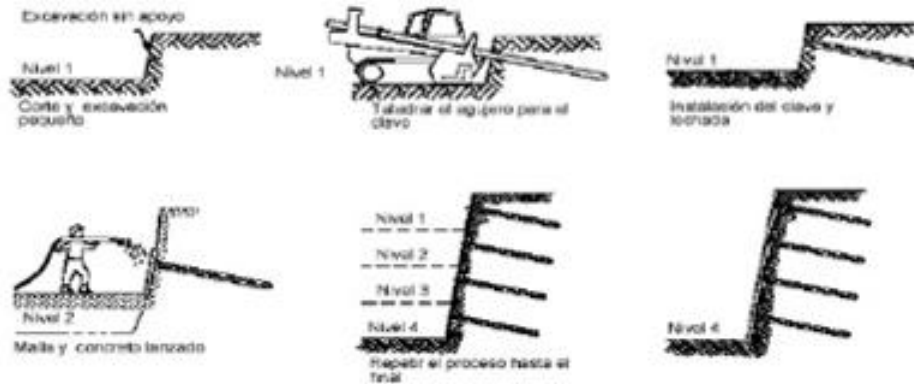
- Granulometría
- Cohesión
- Ubicación del nivel freático (si lo hubiera)
- Ángulo de fricción interna (a corto y largo plazo)

Existen otros condicionantes adicionales antes de que sea posible una excavación, considerando la seguridad y el aspecto económico; éstos son los condicionantes a tener en cuenta:

- Cota máxima de profundidad que alcanzará la excavación.
- Detectar en el subsuelo todos los obstáculos y/o infraestructuras existentes que pudieran quedar afectadas por la excavación.

Las excavaciones directas mediante talud son la solución más favorable porque no resultan muy caras y se ejecutan con rapidez, dependiendo de la topografía y la geología. De acuerdo al cálculo y el tipo de proyecto a veces es necesario realizar excavaciones profundas. Cuando se presentan estos inconvenientes, se puede optar por no excavar la totalidad del frente sino en franjas alternas entre 3 y 6 metros de ancho y alto, como se muestra en la figura 2, de manera de controlar la inestabilidad que así queda acortada, avanzando por etapas, dependiendo del método que se utilice para la estabilización del talud.

Figura 2. Corte de taludes



Referencia: Véliz, C. (2009). Estabilización de taludes con pantallas de concreto lanzado con malla electrosoldada y anclajes de concreto reforzado. <http://es.scribd.com/doc/78553503/6/Figura-14-Corte-de-talud-por-etapas>

Solorzano, A. (2005). Afirma que los taludes de gran altura en roca sólida y masiva, sedimento bien cementado o depósitos volcánicos soldados son estables en cortes de 1H : 1V, o hasta casi vertical, según la calidad de la roca, la presencia de estructuras favorables o desfavorables al talud, así como del método constructivo. Las excavaciones de grandes alturas deberán ser construidas con plataforma (terrazas) de 3 a 5 metros de ancho y de 8 a 15 metros de alto, por seguridad en caso de deslizamiento y caída de roca.

La mayoría de los suelos no se mantendrán firmes y estables en cortes verticales que excedan alturas de 1 a 3 metros o menos con materiales cementados o de una mezcla de suelo residual y roca intemperizada, dependiendo de las condiciones geológicas, con una cohesión moderada.

En la construcción de terraplenes sobre terreno inclinado o a media ladera, el talud de la superficie existente se deberá cortar en forma escalonada de acuerdo con los planos o las instrucciones del Interventor.

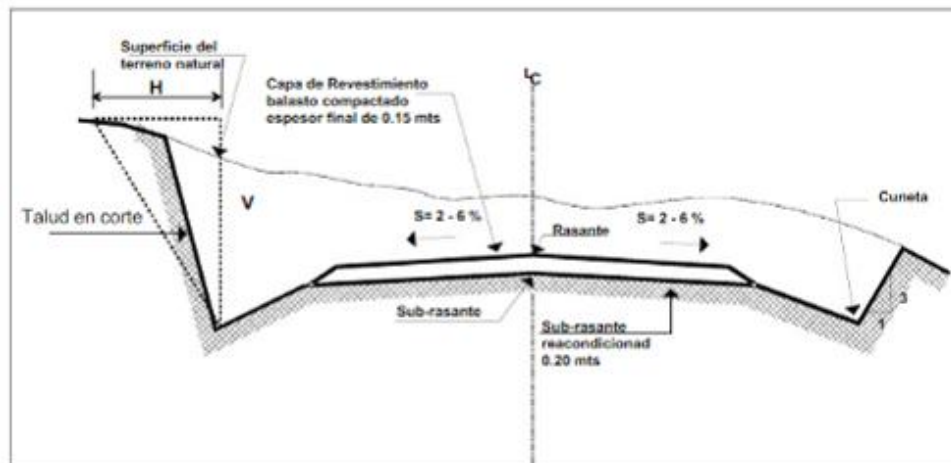
Los suelos arcillosos presentan problemas muy particulares en la construcción y mantenimiento, porque su resistencia varía, dependiendo de las condiciones climatológicas. Por lo tanto las medidas que se toman en la construcción y mantenimiento de vías en este tipo de suelos deberían enfocarse con el objetivo de evitar que los suelos arcillosos se saturen. Es de aclarar que en nuestros suelos, no necesariamente arcillosos, tienen una condición cercana a la saturación, en el momento en que se saturan pierden la succión y empiezan a presentarse los problemas. En caso de que al nivel de la subrasante se encuentren suelos expansivos, la excavación se llevará hasta un metro por debajo del nivel proyectado de subrasante y su fondo no se compactará. Esta profundidad sobreexcavada se rellenará o remplazará y conformará con material que cumpla las características definidas en el Artículo 220 de la Norma INVIAS, "Terraplenes". Los setenta centímetros (70 cm) inferiores se rellenarán con un material apropiado para "núcleo" y los treinta centímetros (30 cm) restantes con un material idóneo para "corona".

Los cortes en suelos arcillosos inicialmente pueden ser altos y verticales, pero con el tiempo perderán su estabilidad por el cambio en las condiciones de humedad o por la disipación de presiones de poros negativas. En este tipo de suelo se debe hacer los cortes relativamente planos, tal como 2H : 1V a 3H : 1V o más. En la figura 3, se muestra la sección en corte de un talud de una vía, esto es necesario realizarlo cuando la rasante de la vía se encuentra por debajo del terreno natural.

Se puede evidenciar claramente los taludes en corte, y las partes que conforman la vía.

Cuando la altura de los taludes y la calidad del material por excavar lo exijan, se deberán proyectar terrazas con una pendiente no inferior al 4% hacia el interior del talud a una cuneta que debe recoger y encauzar las aguas superficiales. El ancho mínimo de la terraza deberá ser tal, que permita la operación normal de los equipos de construcción

Figura 3. Sección en Corte de una Vía



Referencia: (2001). Mantenimiento participativo de caminos rurales.

<http://es.scribd.com/doc/49658007/23/Seccion-en-corte>

2.3 Terraplén.

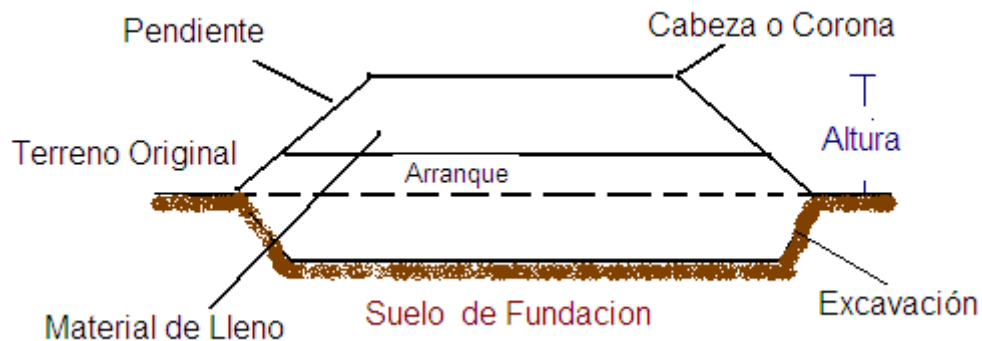
Practica para el movimiento de tierras. (Consiste en la construcción de llenos con materiales extraídos de la excavación, de zonas de préstamo y de las explanaciones, de acuerdo con los alineamientos, pendiente, perfiles transversales, dimensiones indicadas en los planos y en la libreta de topografía.

2.3.1 Componentes de un Terraplén

En un terraplén se pueden identificar, varias zonas atendiendo a la función que cumplen los materiales constituyentes. La geometría de estas zonas se definirá según cada proyecto. De esta forma, se hace a continuación una breve descripción de los cuatro elementos que conforman un terraplén.

2.3.1.1 Suelo de fundación: Se trata del material situado bajo la cota del terreno natural; la profundidad que se debe considerar es variable, depende de los materiales que la componen, si el terraplén se apoya directamente en roca o si esta en suelo. Esta capa es la más inferior de todas, por lo que está en contacto directo con el terreno natural. Sus características mecánicas no son muy elevadas, debido a que las tensiones en este punto son bajas y disipadas. En la figura 4, se ilustra la localización de cada uno de los elementos que conforma un terraplén, los cuales se van describiendo a lo largo de este capítulo.

Figura 4. Componentes de un Terraplén



Según Dunnicliff (1993), cuando se construyen terraplenes sobre suelos blandos, y el pago de las cantidades de lleno se basa en mediciones de la parte inferior real de dicho lleno, hay una necesidad de determinar la elevación final de la parte inferior del terraplén.

2.3.1.2 Arranque: son las primeras extensiones de suelo inmediatamente por encima del terreno de cimentación (1 a 2m). En esta zona puede ser necesario tomar precauciones especiales relacionadas con la geometría (si el material de lleno descansa sobre una ladera de forma que su apoyo no es horizontal) o con los materiales (si se espera la circulación de agua en el contacto entre el suelo de fundación y el material de lleno).

Los suelos de escasa o nula cohesión, se podrán emplear en la construcción del cuerpo de los terraplenes, siempre que dicho material quede confinado lateralmente con suelos cohesivos y no erosionables, y que cumplan con lo estipulado para suelos seleccionados o adecuados, en un ancho mínimo de un metro (1.0 m) medido horizontalmente desde la línea de talud hacia el cuerpo del terraplén.

El material del terraplén se colocará en capas sensiblemente paralelas y de espesor uniforme, el cual será lo suficientemente reducido para que, con los equipos disponibles, se obtenga el grado de compactación exigido. Este espesor no será mayor a treinta centímetros (30 cm) antes de la compactación. Los materiales de cada capa serán de características uniformes. No se extenderá ninguna capa, mientras no se haya comprobado que la subyacente cumple las condiciones de compactación exigidas. Se deberá garantizar que las capas

presenten adherencia y homogeneidad entre sí. Cuando se trate de terraplenes nuevos, cada capa deberá ser extendida y compactada a todo lo ancho de la sección transversal.

Riveros, Rodríguez y Torres, (2010), afirman que las obras asentadas sobre laderas, especialmente las lineales, es decir, terraplenes sobre laderas como es el caso de las carreteras requieren de estabilidad mecánica. La estabilidad más inmediata pero la más costosa, es tender los taludes de la explanación. El inconveniente es el notable incremento del volumen de tierras que pueda llegar a suponer. En el caso de laderas en roca, una buena medida es eliminar la capa del material erosionado y de origen aluvial que queda almacenado en la superficie. En laderas con taludes superiores a 2H :1V 4H :1V 6H :1V es aconsejable escalonar la superficie de contacto entre el terreno y el terraplén, si existen riesgos de filtraciones es conveniente realizar drenes longitudinales en cada uno de los escalones para evitar presiones intersticiales que desestabilicen la obra. Si la ladera es inestable puede ser factible salvarla mediante viaductos en secciones mixtas o completas, de forma que la vía no toque el terreno, cimentándose directamente sobre un estrato profundo más competente.

2.3.1.3 Núcleo (Material de Relleno): En la construcción de carreteras, generalmente se utilizan capas de material seleccionado y compactado a lo ancho de la vía. Su altura es muy variable, ya que depende de la altura de relleno que se desee construir. Zona hecha con capas de suelo compactado a máxima densidad.

El proceso constructivo de un terraplén comprende diversas etapas y operaciones encaminadas a conseguir las características resistentes y estructurales exigidas a cada capa, y que aseguren un correcto funcionamiento del mismo. La calidad de un terraplén depende en gran medida de su correcta realización, es decir, de la apropiada colocación y posterior tratamiento de los diferentes materiales empleados en su construcción.

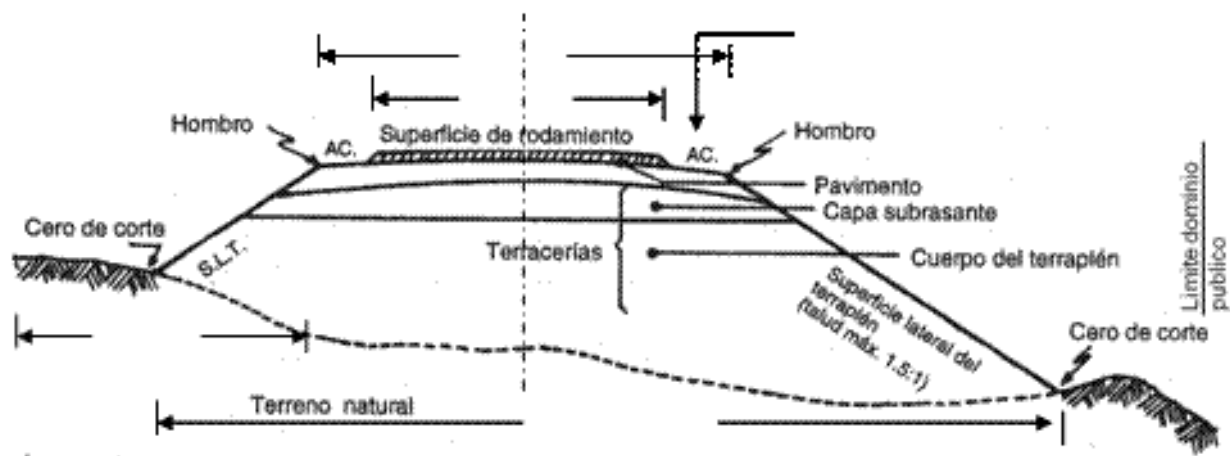
Una mala ejecución puede ocasionar diversos problemas que afectarán a la funcionalidad de la carretera.

Es de anotar que en nuestro medio es muy difícil obtener estas densidades máximas debido a que normalmente la humedad natural del suelo está por encima de las humedades óptimas y por tanto esta norma no es posible cumplirla porque se acolchonan los terraplenes, por eso se trabaja normalmente con la densidad máxima que es la obtenida con la humedad natural del terreno.

2.3.1.4 Cabeza o corona: capa de suelo generalmente de 0.15 a 0.50m con suelos granulares de buena a excelente calidad, compactados a la máxima densidad. Obviamente esto también depende de la estructura de pavimento

Los terraplenes están conformados por planos laterales que lo limitan, como se muestra en la figura 5. Su inclinación se mide por la tangente del ángulo que forman tales planos con la vertical en cada sección de la vía. La inclinación de los taludes es variable a lo largo de la vía según sea la calidad y estratificación de los suelos encontrados. Los taludes se deben diseñar analizando los aspectos geológicos, geotécnicos, facilidades de mantenimiento, perfilado y estética.

Figura 5. Sección en Terraplén de una Vía



Referencia: Proyecto de redes de transporte. Diapositiva 105

01/08/2012 http://documentos.dicym.uson.mx/resp2008/rafabojo/VT/VT20082_C4_P1_archivos/frame.htm

2.3.2 Conformación de un Terraplén.

Los terraplenes para carreteras se forman extendiendo capas delgadas de espesor uniforme del material y compactando cada capa para la densidad máxima que se obtiene con la humedad natural, o un valor cercano. El proceso de construcción de una capa a la vez, facilita la obtención de una resistencia y un contenido de humedad uniformes en el terraplén. La compactación de capas gruesas puede conducir a una resistencia variable en el terraplén, lo que podría causar asentamiento diferenciales entre áreas adyacentes.

En la mayoría de los casos se estipulan un espesor de 6 a 12 in. 15 a 30 cm. para cada capa, aunque el espesor puede aumentarse hasta 24 in. 60 cm. cuando la parte inferior del terraplén consiste principalmente en cantos rodados de gran tamaño.

2.3.3 Control en la construcción.

Según Garber (2005), El control de la construcción de un terraplén contempla revisiones frecuentes y regulares del peso unitario seco y del contenido de humedad de los materiales que se están compactando. La densidad volumétrica se obtiene directamente de las mediciones obtenidas en el campo, y entonces se calcula el peso unitario seco. Se procede a la utilización de la curva de laboratorio de humedad-densidad para determinar si el peso unitario obtenido en campo, esté de acuerdo con los resultados de laboratorio para el esfuerzo de compactación empleado.

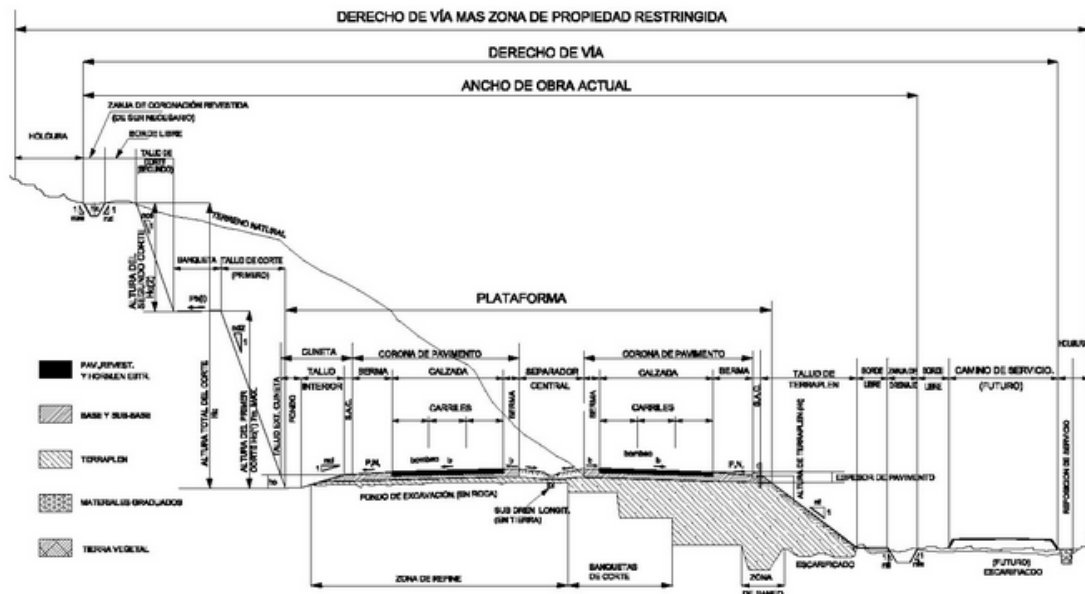
Un terraplén bien compactado no se contrae con el tiempo, ni con su exposición a la intemperie, de manera que teóricamente es posible colocarle encima una carga de manera inmediata. Además, tiene la mayor resistencia posible que corresponde al tipo de suelo, de manera que las ruedas o las orugas no se hundan mucho, la velocidad y capacidad del equipo de acarreo que camina sobre él aumenta. Un terraplén compactado no absorbe el agua de lluvia con facilidad, por lo que permanecerá lo suficientemente duro aun con las lluvias más fuertes.

2.4 Mixtas

Una sección mixta es el paso obligado por el alineamiento horizontal de una sección de corte a terraplén o viceversa, el análisis individual de cada sección esta enunciado anteriormente. La condición crítica de estas secciones radica en el cambio de rigideces entre la zona cortada y la zona de lleno, y la zona débil en ese contacto.

Se denomina sección mixta debido a que el perfil transversal del terreno es irregular, como se evidencia en las figuras 6 y 7, por lo que para precisar mejor su área es necesario acotar diferentes puntos, exactamente donde el terreno cambia.

Figura 6. Sección Transversal Mixta (Corte y Terraplén) de una Vía



Referencia: Normas de diseño geométrico. Capítulo 3: sección transversal. Sección 302, elementos. http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/DG-2001/volumen1/cap3/seccion302.htm

En estas secciones, se debe cuidar especialmente las zonas de contacto, en las que la excavación se deberá ampliar hasta que el terraplén penetre en ella en toda su sección. En la transición de corte a terraplén y viceversa se deberán construir escalones, con el ancho adecuado para el correcto trabajo de los equipos de construcción, de tal forma que se eliminen totalmente eventuales planos de

contacto inclinados, que constituyan riesgo de inestabilidad en el terraplén. Tales escalones se deberán construir de acuerdo con los planos del proyecto.

2.5 Estudios previos

Para la ejecución de un proyecto vial se debe realizar una memoria descriptiva que ilustre detalladamente y completamente el proyecto en relación a los datos, informaciones y estudios necesarios para su elaboración. Una clara información de manera precisa, sobre los datos utilizados para la elaboración del proyecto, así como de las fuentes de información de dichos datos, son vitales para la ejecución del proyecto.

Estos estudios deben indicar los métodos utilizados para la obtención de los resultados óptimos del trazado de la carretera. El procedimiento de construcción recomendado, las informaciones necesarias sobre la procedencia de los materiales que se utilizarán, así como cualquier información considerada de importancia para la elaboración del proyecto y su posterior reconstrucción.

La recopilación de información y su correcta interpretación previa al diseño del proyecto vial, son factor fundamental en el éxito del proyecto y en la anticipación a posibles inconvenientes durante el proceso constructivo, o la solución correcta cuando el suceso se presente. Es por esto que los estudios previos son tan importantes como la ejecución del proyecto, entre mas información y más detallada se encuentre, mejor será la interpretación de los factores o variables que influirán en el proyecto vial.

2.5.1 Evaluación hidrológica

Estudio hidrológico y diseño hidráulico. En los últimos años la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos en el desarrollo de proyectos viales ha tomado gran importancia, a causa de las consecuencias que la ausencia de los mismos ha traído consigo. Ejemplos claros los tenemos en algunas vías recientemente construidas y con grandes inestabilidades de sus taludes.

La falta de previsión de drenajes y el diseño inadecuado de los mismos, conllevan indiscutiblemente a razonar que no se realizó de manera adecuada el estudio Hidrológico e Hidráulico, para los drenajes en carreteras o proyectos viales en general; provocando desastres que dan como resultado pérdidas económicas, un gran impacto y daño a la ecología, de esto depende la importancia que tiene un estudio integral y completo, tanto del área hidrológica e hidráulica para el diseño de obras de drenaje de la vía, con base en la máxima crecida que puede presentar un cauce natural; así como el análisis técnico del aspecto hidráulico para el diseño adecuado de todas las obras de drenaje requeridas para un proyecto vial.

2.5.1.1 Precipitación

Comúnmente conocida con el nombre de lluvia se presenta cuando las masas de aire de la atmósfera se enfrían lo suficiente para llegar al punto de saturación. La lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en sitios relativamente cercanos; por lo cual existen las denominadas estaciones meteorológicas las cuales proporcionan datos de precipitación generalmente en milímetros de lluvia que sirven de base para cualquier estudio hidrológico e hidráulico. Los datos que proporcionan las estaciones meteorológicas se obtienen a través de aparatos

llamados pluviómetros y pluviógrafos de los cuales se tienen registros históricos que se obtienen en el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM).

Los estudios de la precipitación analizan el régimen de lluvias en la región a partir de los datos de estaciones pluviométricas y pluviográficas.

El análisis comprende la variabilidad de la precipitación en el tiempo, su distribución sobre el área de estudio, la cuantificación de los volúmenes de agua que caen sobre la zona, las magnitudes y frecuencias de los aguaceros intensos, y las curvas de intensidad-duración que en última instancia son las que definen la magnitud de las obras a emplear en los proyectos

2.5.1.2 Condiciones Hidrogeológicas.

Mijailov, L.(1985). La hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas (dentro de la Geodinámica Externa), que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación, así su definición dice “La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación”.

Actualmente los estudios hidrogeológicos son de especial interés no solo para la provisión de agua a la población sino también para entender el ciclo vital de ciertos elementos químicos, como así también para evaluar el ciclo de las sustancias

contaminantes, su movilidad, dispersión y la manera en que afectan al medioambiente, por lo que esta especialidad se ha convertido en una ciencia básica para la evaluación de sistemas ambientales complejos. El abordaje de las cuestiones hidrogeológicas abarcan: la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, fisuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos, es así que la investigación hidrogeológica implica, entre otras, dos temáticas principales:

1. El estudio de las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas.
2. El estudio de los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos.

2.5.2 Evaluación geológica.

Absolutamente todas las obras de construcción guardan una relación directa con la geología, pero aun más los proyectos viales se encuentran estrechamente ligados con la geología. Se puede esperar que todo proyecto de carreteras importante encuentre una gran variedad de condiciones geológicas, puesto que se extienden grandes distancias. La evaluación geológica plantea el reconocimiento de las principales formaciones rocosas, aspectos como litología, geomorfología, tectónica de placas y condiciones estructurales del área del proyecto, sus características físicas, químicas y estructurales, así como sus implicaciones ambientales respecto a las obras viales previstas por el proyecto.

2.5.2.1 Características de Suelos y Rocas según su origen.

Según Das, B. El suelo es producido por intemperismo, es decir, por la fractura y rompimiento de varios tipos de rocas en piezas más pequeñas mediante procesos mecánicos y químicos. Algunos suelos permanecen donde se forman y cubren la superficie rocosa de la que se derivan y se llaman *suelos residuales*. En contraste, algunos productos intemperizados son transportados por medio de procesos físicos a otros lugares y depositados. Esos se llaman *suelos transportados*. Según el *agente de transporte*, subdividen en tres categorías principales:

1. Aluviales o fluviales: Depositados por agua en movimiento.
2. Coluviales: Depositados por acción de la gravedad y por combinación de la gravedad y agua (flujos de escombros y flujos de lodos)
3. Glaciales: Depositados por acción glacial
4. Eólicos: Depositados por acción del viento.

En adición a los suelos transportados y residuales, las turbas se derivan de la descomposición de materiales orgánicos encontrados en áreas de poca altura donde el nivel freático está cerca o arriba de la superficie del terreno. La presencia de un nivel alto del agua freática ayuda o soporta el crecimiento de plantas acuáticas que al descomponerse forman turbas. Este tipo de depósito se encuentra comúnmente en áreas costeras y regiones glaciares. Cuando un porcentaje relativamente grande de turba se mezcla con el suelo inorgánico, se le denomina suelo orgánico. Estos suelos orgánicos tienen la característica de un contenido natural de agua entre 200% y 300%, y son altamente compresibles. Las pruebas de laboratorio muestran que bajo carga se obtiene un gran asentamiento debido a la consolidación secundaria de los suelos orgánicos.

Durante la planificación, diseño y construcción de cimentaciones, terraplenes y estructuras de contención, los ingenieros deben conocer el origen de los depósitos de los suelos sobre los que se construirán las cimentaciones, como se muestra en la figura 7, debido a que cada estrato de suelo tiene atributos físicos propios y únicos.

Figura 7. Perfil típico de meteorización Dearman (1991)

GRADO	CRITERIO LÍMITE	DESCRIPCIÓN
VI	Textura Ausente	La roca se ha decolorado y transformado completamente en suelo en el cual se ha perdido la estructura original de la roca parental. Existe gran cambio de volumen.
V	Textura original presente y núcleos ausentes	La roca se encuentra transformada en suelo pero conserva la textura original. Se pueden encontrar bloques de rocas. Las propiedades del suelo dependen de la naturaleza de la roca parental. Puede excavar a mano.
IV	Núcleos de roca presentes	Roca decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y tener decoloradas las paredes la estructura original cerca de las discontinuidades puede estar alterada, menos del 50% del material es roca. La recuperación varía entre un 10 y 50% y el RQD varía entre el 10 y 30%.
III	Relación Suelo / Roca 50/50. Suelo Presente.	La roca está decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y las superficies decoloradas. El porcentaje de roca varía entre 50 y 90%, la recuperación varía entre el 50 y 100%, el RQD varía entre 30 y 90%.
II	Suelo y decoloración presentes	La roca está ligeramente decolorada cerca de las discontinuidades, más del 90% es roca, se recupera casi el 100%, RQD de casi 90%
I	Decoloración ausente	La roca no presenta decoloración, recuperación de casi 100%, RQD de casi 95%.

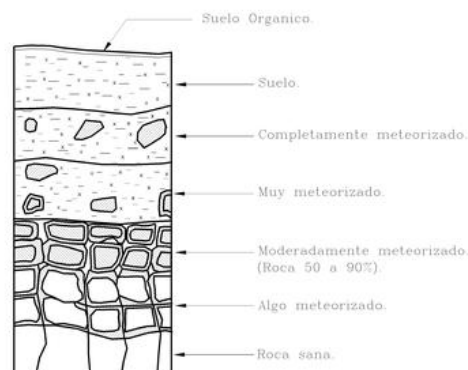
Referencia: <http://www.aredigital.gov.co/Residuos/Documents/PGIRS/Cap.%20III%20Diagn%C3%B3stico.pdf>

Para esta guía nos enfocaremos en estudiar los suelos clasificados como tropicales, que por estar ubicados en la llamada zona tropical se deben estudiar de una manera particular de los usados en la mecánica de suelos tradicional, ya que todas estas teorías clásicas han sido desarrolladas en suelos que presentan climas con estaciones.

La meteorización en suelos tropicales es un fenómeno extenso y profundo el cual genera un perfil típico de suelos dependiendo de la roca que lo origina, la meteorización puede ser química o mecánica la cual se genera dependiendo de la ubicación geográfica y de las condiciones del clima, en la figura 8, observamos un perfil que corresponde a la meteorización química proveniente de la

descomposición de una roca ígnea. En la descomposición física o mecánica no hay un perfil tan espeso ni tan definido, porque la roca no cambia de propiedades.

Figura 8. Perfil típico de meteorización de un suelo tropical proveniente de roca ígnea.



Referencia: Suelos residuales. <http://dc96.4shared.com/doc/Uu0FsD6h/preview.html>

El proceso de meteorización química en los ambientes tropicales se ve favorecido por factores como son la humedad, temperatura, lluvias y vegetación densa que junto con la composición química de la roca favorecen este proceso, generando mayores profundidades de meteorización. Por otra parte, el proceso de meteorización mecánica se da en zonas secas, afectado por los cambios bruscos de temperatura, entre otros. La meteorización mecánica ocurre por formación de fracturas por acción de, la erosión, cambios de temperatura, ciclos de humedecimiento y secado, los cuales generan expansión y contracción de la roca, entre otros fenómenos.

2.5.2.2 Suelos Tropicales.

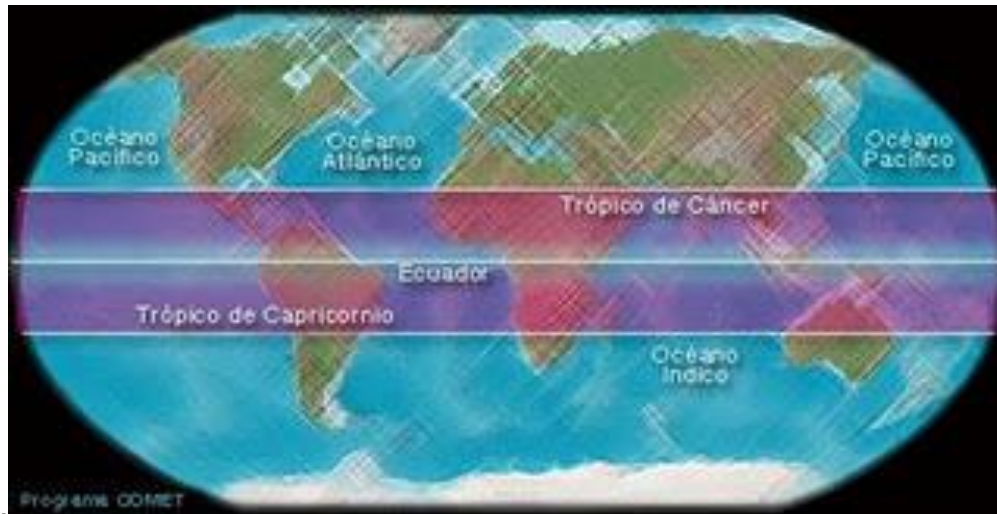
2.5.2.2.1 Definición.

La definición de “suelo tropical” varía de un país a otro pero una definición razonable podría ser la de un suelo afectado por condiciones ambientales que pueden ser residuales que han sufrido meteorización y descomposición de la roca madre, podemos hablar de suelos transportados que se han meteorizado.

2.5.2.2.2 Localización.

La zona tropical se extiende entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio e incluye la mayor parte de América Latina, África y la India, Asia Meridional y la aproximadamente la mitad de Australia figura9. Su ubicación latitudinal en el planeta trae como consecuencia una incidencia solar directa, con menor variabilidad de la longitud del día y de la noche durante todo el año. De tal manera, en los trópicos se encuentran caracterizados climáticamente por un régimen estacional que concentra lluvias de gran intensidad en ciertos períodos del año acompañadas con períodos de déficit hídricos; con estabilidad de la temperatura, que suele encontrarse por encima de los 20°C.

Figura 9. Localización de los suelos tropicales



Referencia: Conociendo nuestros suelos. <http://ubvsuelos.wordpress.com/2011/10/13/%C2%BFque-caracteriza-a-los-suelos-tropicales-2/>

2.5.2.2.3 Características de los suelos tropicales.

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

Mc Craken et al. (1983) señala al clima como factor fundamental en el proceso de formación de los suelos, reconociendo a las precipitaciones y la temperatura como las propiedades del clima con mayor correlación con las características del suelo. Tales características explican, de acuerdo a este autor, porque los suelos tropicales son más profundos e intemperizados que los suelos templados. Primavesi (1980).

Algunas de las características de los suelos residuales que tienen una influencia significativa en la resistencia al cortante son los siguientes:

La presencia de partículas cementantes da un componente de resistencia y rigidez que puede ser fácilmente destruido. Relación de vacíos ampliamente variable que no está relacionada con la historia de esfuerzos. Saturación parcial, posiblemente hasta una profundidad considerable.

Cuando los suelos residuales son excavados y utilizados para llenos, su estructura original queda destruida en gran medida y se comportan en una forma convencional. Las propiedades de los suelos tropicales compactados pueden ser determinadas con aceptable certeza mediante los ensayos de la mecánica de suelos convencional debido a que la estructura cementante de los suelos tropicales es destruida por la compactación.

El clima puede ser descrito en términos de las condiciones generales y del clima actual e inmediatamente precedente. La descripción del clima debe cuantificar la precipitación anual, incluyendo intensidad. Las variaciones de la precipitación diurna y estacional, las variaciones de temperatura y la humedad.

La topografía y la hidrología tienen una influencia decisiva en las características del drenaje, que a su vez tiene un efecto mayor en la mineralogía el suelo residual.

El patrón de drenaje natural debe ser definido y descrito en términos generales.

2.6 Metodología para la determinación de la inclinación del talud en carretera.

Para construir una vía es necesaria la conformación de taludes en corte, terraplén o mixtas esta intervención necesariamente debe cumplir con los siguientes pasos para garantizar su propia estabilidad.

2.6.1 Consideraciones previas

- Topográficas.
- Geológicas
- Hidrológicas
- Hidráulicas
- Climatológicas
- Impacto medio ambiental.

2.6.2 Proyecto Geométrico de la Explanación

- Definición del trazado en la planta, diseño del perfil y secciones transversales, asegurando mínimo impacto ambiental y la mayor economía posible.
- Diseño del sistema de Drenaje.

2.6.3 Diseño y/o Revisión Geotécnica de la Explanación.

- Aseguramiento de la debida estabilidad y resistencia (diseño y/o revisión de la estabilidad de los taludes, determinación de asentamientos en secciones críticas, diseño y control de compactación)
- Los estudios tienen como objetivo caracterizar la estructura geológica-geotécnica de la zona, valorar la estabilidad de los taludes, y establecer aquellas medidas de prevención y/o corrección pertinentes para garantizar la estabilidad.
- Recopilación y análisis de la documentación técnica existente.
- Caracterización geológica - geotécnica del talud: Los parámetros geotécnicos del terreno, necesarios para la realización de los cálculos de estabilidad.
- Estabilidad ante rupturas circulares, caída de bloques, cuñas, etc . Análisis de la estabilidad de los taludes excavados mediante modelización informática del talud con métodos de cálculo de estados límites. Se analiza el factor de seguridad por una ruptura circular tipo suelo o caídas de bloques para tipo de macizos rocosos. Se comprueban diferentes situaciones del nivel de agua, parámetros externos y otros factores

2.6.4 Preparación técnica y Organización de los Trabajos.

- Proyecto ejecutivo de Organización de las explanaciones.
- Presupuesto.

2.6.5 Construcción de la Obra.

- De las Explanaciones y del sistema de drenaje.
- Control de la calidad de realización de los trabajos, de su avance físico y del presupuesto.

2.6.6 Recomendaciones de Construcción.

2.6.6.1 Explanaciones

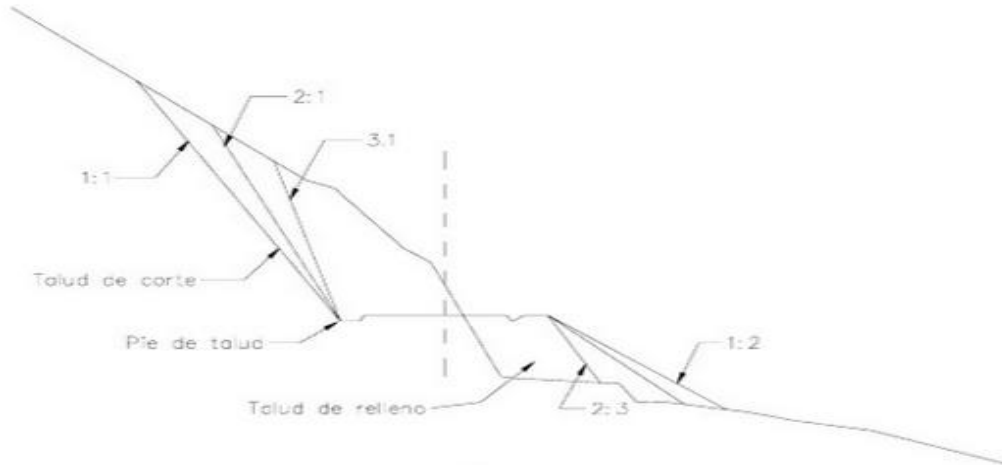
El trabajo comprende el conjunto de actividades de excavación y nivelación de las zonas donde ha de fundarse la carretera, incluyendo taludes.

Los taludes de gran altura en roca sólida y masiva, sedimento bien cementado o depósitos volcánicos soldados son estables en cortes de 1:1 a casi vertical.

Las excavaciones de grandes alturas deberán ser construidas con terrazas de 3 a 5 metros de ancho y de 8 a 15 metros de alto para seguridad en caso de deslizamiento y caída de roca, ver figuras 10 y 11.

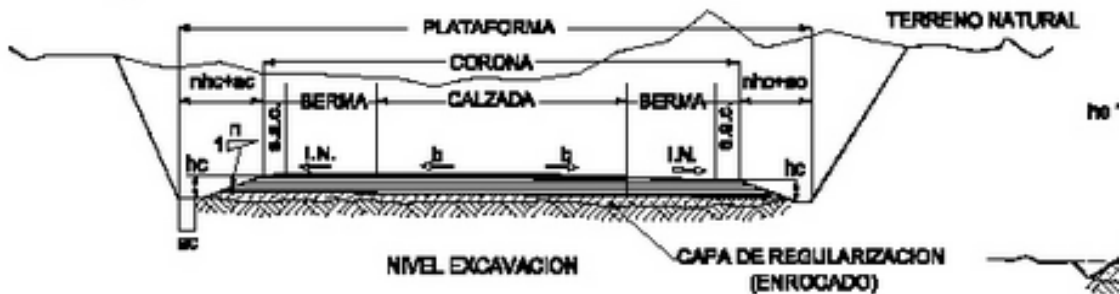
La construcción de taludes en corte seguirán las indicaciones de la norma INVIAS 210-07.-234-07

Figura 10. Excavaciones a Grandes alturas



Referencia: Solorzano, A. (2005). Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché. <http://es.scribd.com/doc/52299878/22/Tabla-IV-Inclinacion-de-taludes-segun-material-y-altura>

Figura 11. Corte Típico en Cajón



Referencia: Guía de diseño geométrico. Capítulo 3. Sección transversal, imagen B. http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/DG-2001/volumen2/cap3/seccion302.htm

2.6.6.2 Terraplén

Según Bañón, L. El proceso constructivo de un terraplén comprende diversas etapas y operaciones encaminadas a conseguir las características resistentes y estructurales exigidas a cada capa, y que aseguren un correcto funcionamiento del mismo. La calidad de un terraplén depende en gran medida de su correcta construcción, es decir, de la apropiada colocación y posterior tratamiento de los diferentes materiales empleados en su construcción.

Una mala ejecución puede ocasionar diversos problemas que afectarán a la funcionalidad de la carretera. Así, una mala compactación, provocará asentamientos excesivos del terraplén que fisurarán y alabearán la superficie de rodadura; la incorrecta ejecución del cimientado en una ladera puede provocar problemas de inestabilidad, ocasionando el colapso y desmoronamiento de la obra. Se recomienda seguir todas las indicaciones propuestas y definidas según la norma INVIAS 220-07.

Podemos decir que cada intervención en taludes en corte o en terraplén tienen condiciones particulares y deben ser analizados individualmente porque las recomendaciones adoptadas por el INVIAS y las que hemos nombrado anteriormente, pueden cambiar drásticamente.

La mayoría de los suelos no se mantendrían firmes y estables en cortes verticales que excedan alturas de 3 metros para suelos residuales y roca intemperizada con una cohesión moderada. En taludes de poca altura de 2 a 3 metros las laderas deberán ser excavadas con relación de 2 H:1 V o más tendidos, inicialmente para promover la estabilización vegetal y aprovechar el área (Ver tabla 1.)

Tabla 1. Inclinación del talud según material y Altura.

Material	Altura	Inclinación V H
Corte:		
Duro	Cualquiera	1/4:1 = 4:1
Semiduro	Cualquiera	1/4:1 = 4:1
Semisuave y suave	0 a 3 metros	1:1 = 1:1
	3 a 7 metros	1/2:1 = 2:1
	más de 7 metros	1/3 = 3:1
Relleno:		
Todo material	0 a 3 metros	2:1 = 1:2
	más de 3 metros	1 1/2:1 = 2:3

Fuente: Manual de caminos rurales con impacto mínimo

H = Horizontal

V = Vertical

Referencia: Solorzano, A. (2005). Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché. <http://es.scribd.com/doc/52299878/22/Tabla-IV-Inclinacion-de-taludes-segun-material-y-altura>

En los suelos arcillosos se deben hacer los cortes relativamente tendidos, tal como 2H : 1V a 3H : 1V o más, los terraplenes anchos también son convenientes para acomodar deformación y reducir al mínimo la inestabilidad en suelos arcillosos.

Los valores recomendados para cortes en taludes en roca y suelo presentados en las tablas (2 y 3) son para aplicaciones de rutina y no reflejan condiciones locales especiales tal como agua subterránea, fallas y zonas de cizallamiento o zonas de material intemperizado, etc. que probablemente requieren taludes con menor inclinación

Tabla 2. Relaciones típicas de cortes en talud en roca madre.

Tipo de roca	Rango máxima de pendiente	
	Masiva	Fracturada
1. Igneas Granito, basalto, toba volcánica soldada y ceniza y piroclástica cementada	1/4:1 a	1/2:1
2. Sedimentarias Arenisca y caliza masiva, roca arcillosa y roca limosa masiva	1/4:1 a	1:1
3. Metamórfica Esquisto y mármol Pizarra	1/4:1 a	1/2:1 3/4:1
4. Roca intemperizada o serpentina	1/4:1 a	1:1
5. Granito descompuesto in situ ligeramente o moderadamente intemperizado	1/4:1 a	1:1

Referencia: Solorzano, A. (2005). Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché. <http://es.scribd.com/doc/52299878/22/Tabla-IV-Inclinacion-de-taludes-segun-material-y-altura>

Tabla 3. Relaciones de Terraplenes.

Tipo de roca	Rango máxima de pendiente	
	Talud sin agua subterránea	Talud con agua subterránea
1. Roca Madre	1.2:1	1.5:1
2. Grava arenosa	1.3:1	1.8:1
3. Arena, granos angulares bien graduadas	1.5:1	2:1
4. Grava limosa, arena uniforme	1.8:1	3:1
5. Arena limosa, arena arcillosa	1.75: o más plano	3:1
6. Limo arcilloso arenoso	2:1 o más plano	4:1

Referencia: Solorzano, A. (2005). Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché. <http://es.scribd.com/doc/52299878/22/Tabla-IV-Inclinacion-de-taludes-segun-material-y-altura>

En la tabla 4, se muestran las inclinaciones de taludes según la clase de material y la altura del corte o terraplén, comparando con la norma INVIAS ARTÍCULO 210 – 07 EXCAVACIÓN DE LA EXPLANACIÓN, CANALES Y PRÉSTAMOS, podemos observar que todos los taludes tienen una pendiente mayor al 4% (0.25H: 1V) hacia el interior del talud, siendo la más baja para taludes en roca madre sin agua subterránea con una inclinación (1.2H:1V).

Tabla 4. Relaciones de cortes y terraplenes

Tipo de roca	Rango máxima de pendiente	
	Talud sin agua subterránea	Talud con agua subterránea
1. Roca Madre	1.2:1	1.5:1
2. Grava arenosa	1.3:1	1.8:1
3. Arena, granos angulares bien graduadas	1.5:1	2:1
4. Grava limosa, arena uniforme	1.8:1	3:1
5. Arena limosa, arena arcillosa	1.75: o más plano	3:1
6. Limo arcilloso arenoso	2:1 o más plano	4:1

Referencia: Solorzano, A. (2005). Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché. <http://es.scribd.com/doc/52299878/22/Tabla-IV-Inclinacion-de-taludes-segun-material-y-altura>

2.7 Pruebas para determinar los parámetros de resistencia del suelo

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia al esfuerzo cortante que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él. Los ingenieros deben entender la naturaleza de la resistencia cortante para analizar los problemas de la estabilidad del suelo, tales

como capacidad de carga, estabilidad de taludes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

Mohr (1900) presentó una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo cortante. Así entonces, la relación funcional entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla.

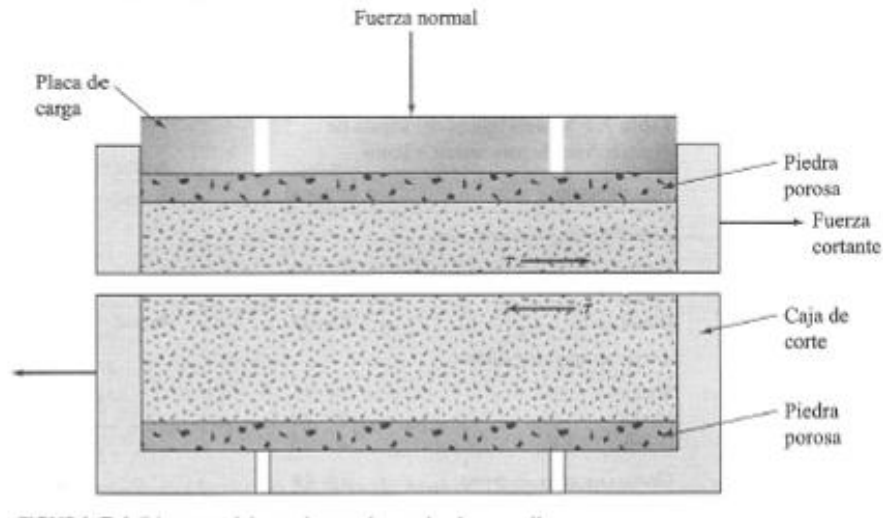
Para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb 1776). Esta relación se escribe como

$$T = c + \sigma \tan \Phi.$$

2.7.1 Prueba de corte directo

La prueba de corte es más antigua y simple. Un diagrama del aparato para la prueba de corte directo se muestra en la figura 12, el equipo consiste en una caja de corte metálica en la que se coloca el espécimen. Las muestras pueden ser cuadradas o circulares. El tamaño de los especímenes generalmente usados es aproximado de 20 a 25 cm², transversalmente y de 25 a 30 mm de altura. La caja está cortada horizontalmente en dos partes. La fuerza normal sobre el espécimen se aplica desde la parte superior de la caja de corte. El esfuerzo normal sobre los especímenes debe ser tan grande como 1000 kn / m². La fuerza cortante es aplicada moviendo una mitad de la caja respecto de la otra para generar la falla en el espécimen de suelo.

Figura 12. Prueba de Resistencia al Corte



Referencia: Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica.

Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser controlada por el esfuerzo o por la deformación unitaria. En las pruebas controladas por el esfuerzo, la fuerza cortante es aplicada en incrementos iguales hasta que el espécimen falla, lo cual tiene lugar a lo largo del plano de separación de la caja de corte.

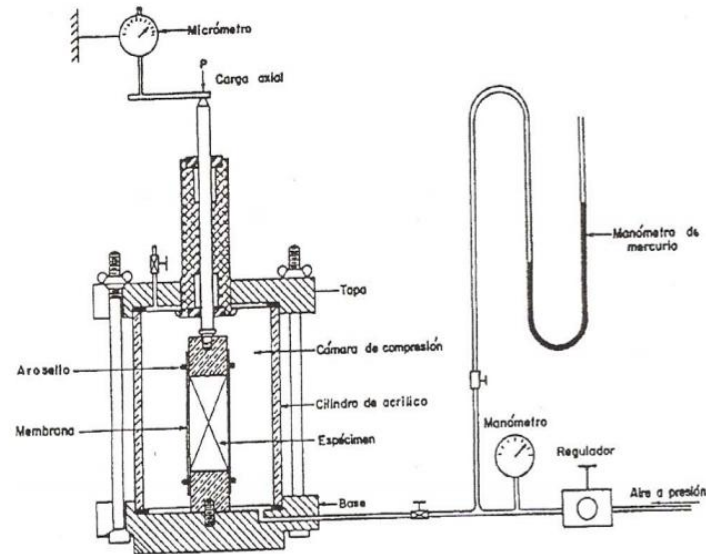
En pruebas controladas por la deformación unitaria se aplica una razón constante de desplazamiento cortante.

2.7.2 Ensayos Triaxiales

Los ensayos triaxial son los más confiables y utilizados para determinar las características de tensión-deformación y los parámetros de resistencia al corte del suelo. Estos son ensayos donde se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales (triaxial) sobre una muestra de suelo y así crear condiciones que se asemejen a las reales en campo. Para realizar esta prueba se

utiliza un equipo llamado cámara triaxial que consta como se observa en la siguiente Figura 13.

Figura 13. Cámara triaxial.



Referencia:http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/123456789/1827/1/ESTABILIDADDE_TALUDESENCARRETERAS.pdf

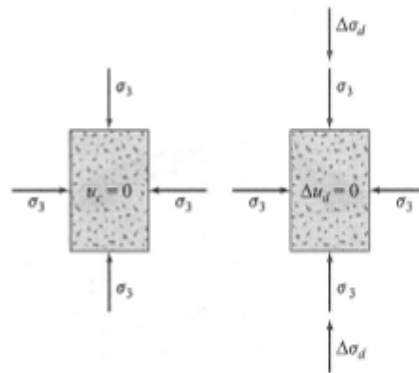
Es conveniente mencionar que la elección de la prueba a utilizar depende del mecanismo de falla esperado o en su caso modelo de falla establecido; asimismo, deberá tomarse en cuenta las condiciones de esfuerzos e hidráulicas a las que está o estará sometido el material, así como las condiciones de análisis de corto o largo plazo.

2.7.2.1 Consolidado Drenado (CD)

Proyectos y apuntes teórico prácticos (2011). A este ensayo se lo conoce también como ensayo lento (S). El drenaje se permite en las dos últimas etapas, de este

modo se tiene una consolidación bajo la presión de cámara y el exceso de presión de poro se disipa durante la aplicación lenta del esfuerzo desviador (figura14).

Figura 14. Ensayo consolidado drenado bajo confinamiento de cámara y bajo aplicación del esfuerzo desviador.

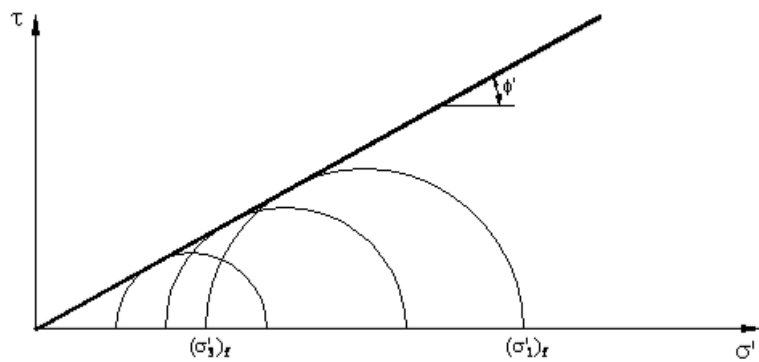


Referencia: Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica.

En la primera etapa se satura la muestra completamente de agua, en la segunda esta es consolidada bajo una presión isotrópica de cámara y en la tercera etapa se aplica una carga axial, que va incrementándose a un ritmo suficientemente lento para que no se presente un incremento en la presión de poros. Con un drenaje total y una velocidad adecuada, se asegura que la presión de poros en la muestra permanezca constante.

El objetivo del ensayo es determinar los parámetros de resistencia efectivos c' y Φ' del suelo.

Figura 15. Envolvente de falla para un suelo en un ensayo triaxial CD.



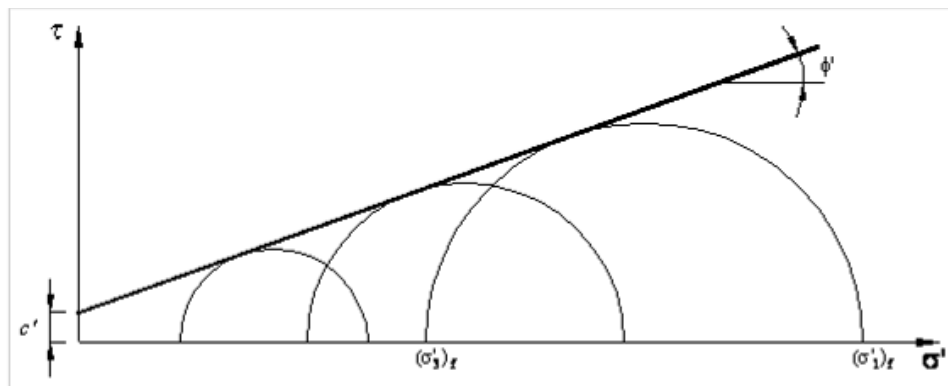
Referencia: Proyectos y apuntes teórico prácticos de ingeniería civil. (2011).
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/suelos-ensayo-triaxial-consolidado.html>

2.7.2.2 Consolidado no drenado (CU)

Proyectos y apuntes teórico prácticos (2011). Este ensayo también denominado ensayo consolidado rápido (R), consta de tres etapas (saturación, consolidación y compresión). En primer lugar, la probeta es saturada completamente de agua, luego incrementando la presión de cámara es consolidada, esta etapa lleva al suelo a un estado prescrito de volumen y de presión de poros, a partir del cual se pueden medir con exactitud los siguientes cambios de volumen o de presión de poros que ocurrirán durante el ensayo. Finalmente cuando se ha disipado el exceso de presión de poros al valor de la contrapresión original σ_3 se cierran las válvulas de drenaje para empezar la compresión, donde la probeta llegará al punto cedente sin drenado. Cuanto mayor sea la presión de cámara σ_3 mayor será el esfuerzo desviador necesario para producir la falla.

El objetivo del ensayo es determinar los parámetros efectivos c' y Φ' , ya que estos gobiernan la resistencia al corte del suelo y determinar también algunas características respecto al cambio de volumen y rigidez del suelo.

Figura 16. Envoltorio de falla para un suelo en esfuerzos efectivos en un ensayo triaxial CU.



Referencia: Proyectos y apuntes teórico prácticos de ingeniería civil. (2011). <http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/ensayo-triaxial-consolidado-no-drenado.html>

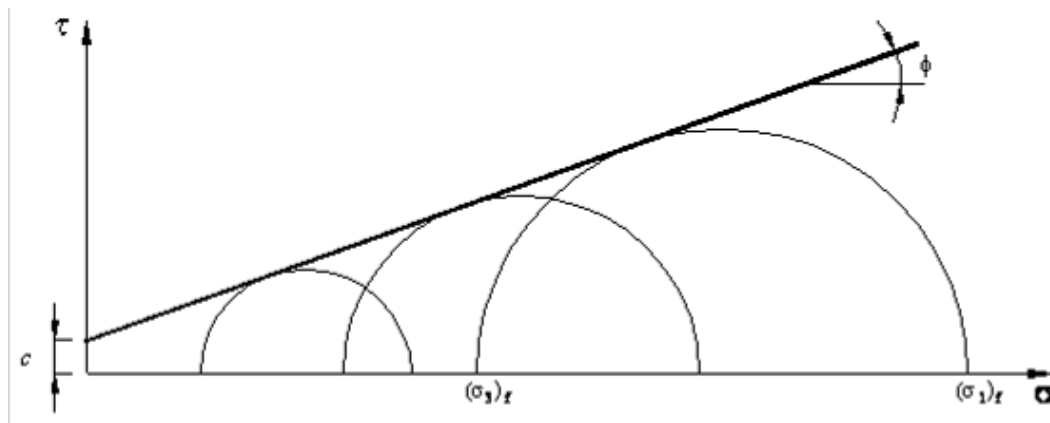
Braja, Das. La envolvente del esfuerzo total de falla se obtiene dibujando una línea que toque todos los círculos de Mohr del esfuerzo total. Para arena y arcilla normalmente consolidadas, esta línea será aproximada por una línea recta que pasa por el origen y se expresa por la ecuación:

$$T_f = \sigma \tan \phi$$

Donde: σ = esfuerzo total

ϕ = ángulo que forma la envolvente de falla del esfuerzo con el eje del esfuerzo normal, también conocido como ángulo de resistencia cortante consolidada-no drenada.

Figura 17. Envolvente de falla para un suelo en esfuerzos totales en un ensayo triaxial CU.



Referencia: Proyectos y apuntes teórico prácticos de ingeniería civil. (2011).
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/ensayo-triaxial-consolidado-no-drenado.html>

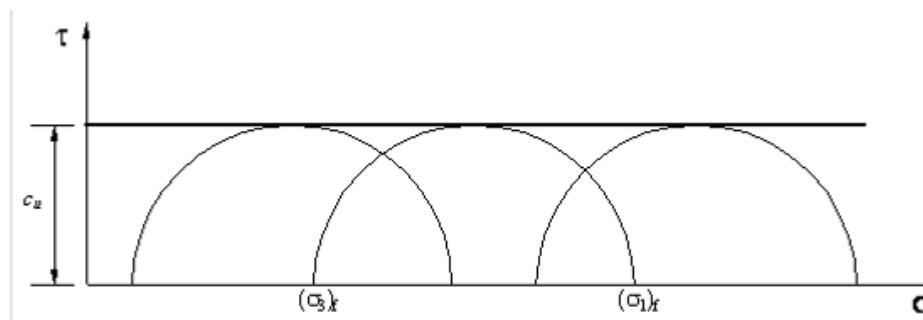
2.7.2.3 No Consolidado no drenado (CU)

Proyectos y apuntes teórico prácticos (2011). A este ensayo se lo denomina también ensayo rápido (Q) donde no se permite en ningún momento el drenaje. La probeta no es consolidada, por lo tanto no se disipa la presión de poros durante la aplicación de la presión isotrópica de cámaras σ_3 en la etapa de saturación.

Este ensayo se usa para determinar el parámetro de resistencia no drenado **uu** y es adecuado para arcillas saturadas. En condiciones no drenadas, los suelos saturados presentan un esfuerzo de corte crítico que tiende a mantenerse

constante para cualquier valor del esfuerzo normal. Un aumento en el esfuerzo axial ocasiona un aumento semejante en la presión de poros, por lo tanto el esfuerzo efectivo normal permanece constante.

Figura 18. Envoltente de falla para un suelo en un ensayo triaxial UU.

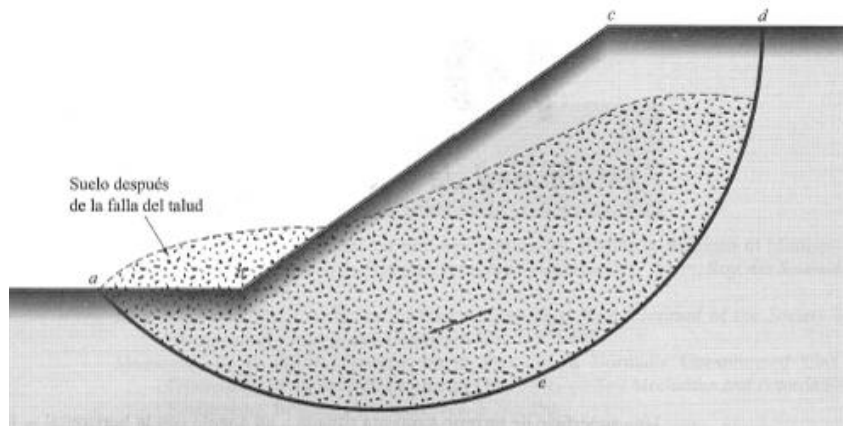


Referencia: Proyectos y apuntes teórico prácticos de ingeniería civil. (2011).
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/suelos-ensayo-triaxial-no-consolidado.html>

2.8 Condiciones de Estabilidad

Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente no restringida, y puede ser natural o construido. Si la superficie del terreno no es horizontal, una componente de la gravedad, ocasionará que el suelo se mueva hacia abajo, como la muestra la figura 19 si la componente de la gravedad es suficientemente grande ocurrirá la falla del talud; es decir, la masa de suelo en la zona se deslizará hacia abajo. La fuerza actuante vence a la fuerza resistente al corte del suelo lo largo de la superficie de ruptura.

Figura 19. Superficie de Falla típica en un deslizamiento de suelo



Referencia: Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica.

En muchos casos los ingenieros civiles tienen que efectuar cálculos para verificar la seguridad de taludes naturales, taludes de excavación y de terraplenes compactados. Este proceso, llamado análisis de la estabilidad de taludes, implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo.

El análisis de la estabilidad de un talud no es tarea fácil. La evaluación de variables tales como la disposición de los diferentes tipos de suelos, las características de los mismos y la presencia de estructuras resulta una tarea formidable. La infiltración a través del talud y la selección de una superficie de deslizamiento potencia se agregan a la complejidad del problema.

Generalmente para análisis a corto plazo se usan esfuerzos totales y a largo plazo esfuerzos efectivos, a no ser, que se conozca la distribución de presión de poros en ambos casos.

2.8.1 Estabilidad del talud a corto plazo

Modelos de análisis de estabilidad. La estabilidad a corto plazo deben tenerse en cuenta que los suelos que no tienen un drenaje rápido están sujetos a presiones de poro por acción de las cargas aplicadas. La estabilidad a corto plazo de arcillas normalmente consolidadas y limos, se recomienda utilizar análisis de esfuerzos totales. Aunque se puede realizar el análisis utilizando esfuerzos efectivos. Es muy difícil estimar o medir las presiones de poro para la utilización en el análisis. Para arcillas sobre-consolidadas el análisis de estabilidad a corto plazo es prácticamente imposible de realizar, debido a que son suelos dilatantes que generan presiones de poros negativas.

2.8.2 Estabilidad del talud a largo plazo

Esta condición de la estabilidad a largo plazo, puede analizarse utilizando métodos de esfuerzos efectivos con parámetros de resistencia determinados en ensayos triaxiales drenados, o ensayos de corte directo, o ensayos triaxiales consolidados – no drenados con medición de la presión de poros en especímenes compactados a la densidad y contenido de humedad de campo, en terraplenes cohesivos construidos en suelo firme. Las resistencias al cortante se relacionan a los esfuerzos efectivos por medio de los parámetros c y ϕ .

Las presiones de poro están gobernadas por condiciones de infiltración constante, pudiendo ser determinadas por redes de flujo u otro tipo de análisis de infiltración.

Las presiones de poro internas y externas deben incluirse en el análisis.

Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, presiones de poros y demás propiedades de los suelos y del talud y las condiciones de estabilidad a corto y largo plazo, se procede a realizar un estudio detallado de los posibles movimientos de ladera que se pueden presentar.

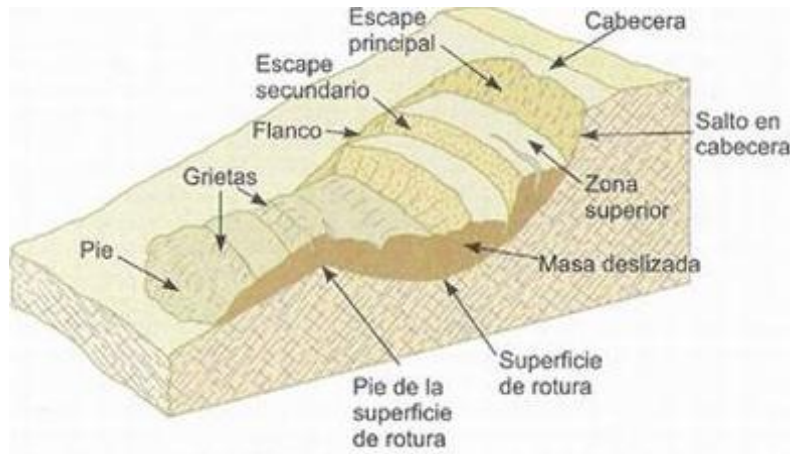
3. CLASIFICACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA.

Movimientos de ladera. Se entiende como movimiento de ladera, “*slope movement*” (Varnes, 1978) o “*landslide*” (Sharpe, 1938), el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente. Se incluye cualquier tipo de movimiento en masa, excepto la subsidencia y el hundimiento. Otra definición que se manifiesta en términos análogos es la aportada por Corominas y García Yagüe definiendo movimientos de ladera como los movimientos del terreno o desplazamientos que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente como consecuencia de la fuerza de la gravedad. Los hundimientos de cavidades o de materiales están excluidos de estos movimientos.

3.1 Deslizamientos

Movimientos a favor de una superficie de fractura. En este tipo de movimiento de ladera el desplazamiento del terreno se produce sobre una o varias superficies de rotura bien definidas, como se muestra en la figura 20. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad, prácticamente sin deformación interna, en su recorrido. La velocidad suele ser variable e implican a volúmenes grandes en general, aunque no siempre.

Figura 20. Deslizamiento del Terreno



Referencia: Movimientos de ladera.

http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf

3.1.1. Deslizamientos Rotacionales

Dice Corominas, J. Cuando la superficie de deslizamiento es un plano curvo, como se evidencia en la figura 21, el terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. Suelen darse en materiales poco cohesivos (la profundidad a la que se dan depende de la cohesión, a mayor cohesión más profundos) y laderas escarpadas. Previo al deslizamiento se producen unas grietas en lo alto del escarpe.

Figura 21. Deslizamiento Rotacional.



Referencia: Corominas, J. Tipos de roturas en Laderas y taludes. <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

Se producen fundamentalmente en materiales homogéneos o en macizos rocosos muy fracturados y se suelen identificar por una inclinación contrapendiente de la cabecera.

3.1.2. Deslizamientos Traslacionales

Cuando la superficie de falla o fracturas en roca tienen menor o igual pendiente que el terreno, tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada, como se muestra en la figura 22. La masa deslizada puede proseguir por la ladera. Los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas. A medida que un deslizamiento traslacional progresa puede romperse, en particular si aumenta la velocidad.

Figura 22. Deslizamiento Traslacional.



Referencia: Movimientos de ladera.

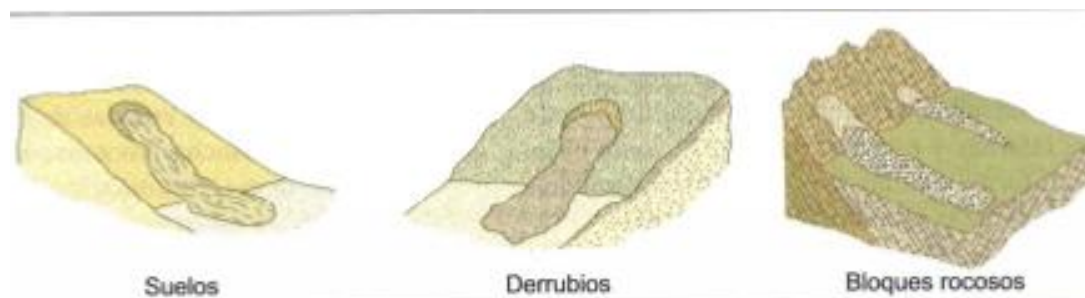
http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf

Es más fácil que se produzca cuando hay fallas o cuando alternan rocas competentes y menos competentes. Suelen producirse sobre materiales heterogéneos con superficies de discontinuidad bien definidas.

3.2. Flujos

Bajo este sustantivo se agrupan a diferentes movimientos de ladera que tienen en común la deformación interna y continua del material y la ausencia de una superficie neta de desplazamiento (Varnes, 1978). Son masas de material sin cohesión que fluye, como se muestra en la figura 23, como un fluido viscoso al sobrepasar su límite líquido, pueden formarse en cualquier material poco consolidado (inclusive puede llegar a afectar los niveles superiores de roca alterada o intemperizada) y hasta en rocas, especialmente pelíticas y esquistosas más o menos descompuestas. Se pueden desplazar grandes distancias.

Figura 23. Flujos



Referencia: Movimientos de ladera.

http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf

Silva, G. afirma que Los flujos se producen en materiales con poca cohesión, mal gradados, producen movimientos rápidos y potencialmente destructivos.

Son fenómenos básicamente estacionales, es decir, frecuentes en temporada de lluvias, aunque son numerosos los casos relacionados con roturas de conductos de agua, depósitos de agua, o por efecto de la aceleración de deslizamientos, por trastornos en el régimen hidrogeológico e, inclusive, por movimientos sísmicos (licuación de arenas). Dependiendo del material movilizado se clasifican como:

3.2.1 Flujo de lodo (MudFlow)

Inestabilidad de laderas. Suele involucrar volúmenes variables de material fino con alto contenido de limos y arcillas. Las velocidades de desplazamiento igualmente pueden ser variables y suelen estar relacionadas con factores como la

pendiente de la ladera, la cantidad de agua involucrada en la movilización del material, la resistencia de la matriz y el alto porcentaje de finos.

El flujo de lodo está definido por dos características físicas: Densidad y Viscosidad.

La densidad de los lodos está comprendida entre 1.0 gr/cm³ y 2.0 gr/cm³. El valor más bajo se aplica cuando el volumen de sólidos en la mezcla fluida es inferior al 20% del total; el más alto cuando esa relación es superior al 80%.

La viscosidad absoluta del agua clara a 20°C de temperatura es de 1 centipoise. En lodos muy espesos la viscosidad absoluta puede alcanzar valores próximos a 6000 poises.

El evento generador de los flujos de lodo, puede ser un sismo, una erupción volcánica o una lluvia crítica

3.2.2 Flujo de tierra (EarthFlow)

Son movimientos lentos de materiales blandos. Estos flujos frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal. Suelen presentar grandes volúmenes de material terroso con menos de 2 mm de diámetro predominando sobre limos y arcillas, generando formas de lengua o de gran lóbulo.

Son una combinación del desplome y del movimiento plástico de material sin consolidar. Se mueven lento, pero son perceptibles y pueden implicar desde unos cuantos hasta varios millones de metros cúbicos de material terroso. Parte de este material se comporta como un sólido elástico y parte como una sustancia plástica, dependiendo de su posición de la masa en movimiento

3.2.3 Flujo de detritos (DebrisFlow)

Suelen involucrar volúmenes de medianos a grandes de hasta 10.000m^3 de material grueso de diferente diámetro que incluye bloques de rocas, derrubios y roca descompuesta. Generan trazas lineales bien definidas, como un corredor alargado, con embudos o conos divergentes en los extremos, generalmente con conexión con la red de drenaje. Las velocidades de movilización suelen ser rápidas a muy rápidas, tiende a ser clasto soportados, la resistencia la controlan lo clastos.

3.3. Desprendimientos

Copons, R .y Tallada, A. (2009) afirman, un desprendimiento (*rockfalls*) es una masa rocosa, o de tierra, que se separa de una vertiente casi vertical y cae libremente a través del aire. La masa inestabilizada impacta en el terreno fragmentándose en porciones más pequeñas que siguen una trayectoria particular. Los volúmenes de los desprendimientos son extremadamente variables, desde las frecuentes caídas de bloques de pocos metros cúbicos, hasta la caída de grandes partes de una montaña que se manifiestan en casos muy excepcionales, Figura 24, donde se define: la zona de salida de la masa rocosa, la posterior fragmentación a lo largo de la zona de trayecto y la acumulación de bloques rocosos en la zona de llegada.

Figura 24. Esquema de un Desprendimiento



Referencia: Copons, R. y Tallada, A. Movimientos de ladera.

<http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199931/267374>

La rotura suele producirse por deslizamiento o vuelco de pequeña envergadura, proporcionando a la masa desprendida una velocidad inicial. La propagación de los desprendimientos en laderas con pendientes superiores a los 76° se produce principalmente por caída libre, por debajo de este ángulo los impactos contra el terreno son frecuentes mientras que en laderas de menos de 45° la propagación se realiza por gravedad y eventualmente, por deslizamiento.

Corominas, J. afirma que las caídas con una trayectoria básicamente vertical en acantilados por la socavación efectuada por un río, el oleaje o la meteorización y disgregación de las rocas son consideradas colapsos, el material caído, una vez desparramado por la ladera, no suele experimentar nuevos movimientos. Cuando las caídas son frecuentes, los bloques se acumulan al pie de los escarpes rocosos

formando pedregales que ocasionalmente experimentan roturas y originan corrientes de derrubios (Van Steijn et al. 1988). El área fuente de desprendimientos es de difícil acceso. Por este motivo, aunque es posible la sujeción de los bloques en origen, el tratamiento suele consistir en la interposición de obstáculos en el recorrido (pantallas dinámicas, zanjas). En ocasiones, los desprendimientos rocosos son fenómenos precursores de roturas de ladera de grandes proporciones.

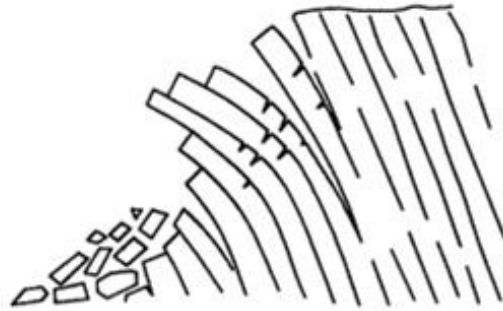
3.4. Volcamiento

Corominas, J. Es la rotación hacia delante y hacia el exterior de la ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. La fuerza desestabilizadora es la gravedad así como el empuje ejercido por el terreno adyacente o los fluidos (agua o hielo) en las grietas. Dentro del mecanismo de vuelco pueden distinguirse dos procesos:

3.4.1 Volcamiento por flexión (flexuraltoppling)

Tiene lugar en rocas con un sistema preferente de discontinuidades, formando vigas semicontinuas en voladizo, figura 25. Las columnas continuas cuando se doblan hacia delante, rompen por flexión. Este tipo de movimiento es característico en esquistos, filitas, pizarras y en secuencias rítmicas finamente estratificadas.

Figura 25. Volcamiento por Flexión



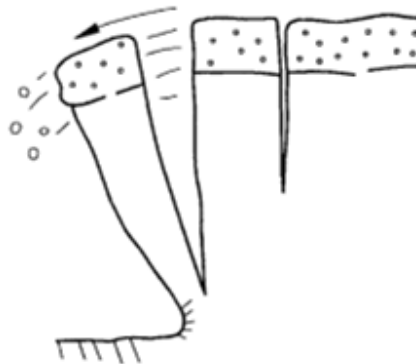
Referencia: Corominas, J. *Tipos de roturas en Laderas y*

taludes. <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

3.4.2 Desplome

La masa suelta, cae con un movimiento brusco de giro, al menos inicial, apoyado en su base externa, figura 26. Estos movimientos se producen en bordes acantilados rocosos o de materiales areno-arcillosos compactados. Si la ladera es empinada, las roturas por vuelco pueden transformarse en caídas.

Figura 26. Desplome



Referencia: Corominas, J. *Tipos de roturas en Laderas y*

taludes. <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

El desarrollo de un vuelco a gran escala en la ladera puede comportar cambios significativos en la permeabilidad del macizo rocoso tanto en el espacio como en el tiempo. La abertura de grietas puede facilitar el drenaje del macizo y ayudar a la autoestabilización.

Las velocidades son, en su inicio, lentas pero suelen acelerarse hasta ser extremadamente rápidas. Los efectos destructivos son similares a los desprendimientos.

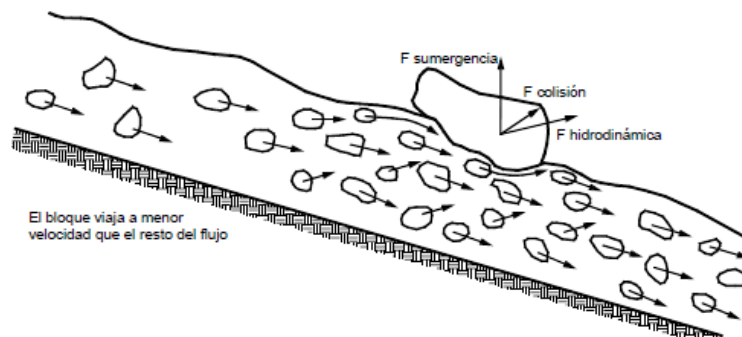
3.5. Avalanchas

Movilización de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas o derrubios a gran velocidad, en ocasiones, superiores a los 50 m/s. El término avalancha no implica necesariamente un mecanismo distinto al de los previamente definidos en otros flujos como las corrientes de derrubios. Presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad de una masa rocosa “en seco”. Gran parte del transporte se da en el medio aéreo, pero también existe un componente de salto y rodamiento.

Se considera un evento catastrófico, temporalmente instantáneo y de muy alta recurrencia. El volumen de material movilizado suele ser muy superior a los 100.000m^3 , generalmente 1 ó varios millones de metros cúbicos de roca.

En el caso de avalanchas de materiales saturados, cuando las concentraciones de sedimentos exceden un cierto valor crítico, o la disponibilidad de agua disminuye la concentración, las propiedades del flujo cambian en forma significativa no solamente en cuanto a las características del flujo sino también en la forma como los sedimentos son transportados figura 27. Un flujo de detritos puede convertirse en flujo hiperconcentrado al disminuir la concentración de partículas sólidas o el flujo hiperconcentrado puede convertirse en flujo de detritos al aumentar la concentración.

Figura 27. Esquema típico de una avalancha.



Referencia: Control de erosión en zonas tropicales. Capítulo 5. pag 182 <http://erosion.com.co/control-de-erosion-en-zonas-tropicales.html>

3.5.1. Etapas del flujo

Se pueden diferenciar tres etapas en un proceso de avalancha:

3.5.1.1. Formación de la avalancha.

Al ocurrir un evento anómalo como lluvias extraordinarias, sismos fuertes o deshielos rápidos se pueden generar procesos de deslizamiento o erosión, los cuales producen una concentración de sedimentos o partículas sobre las laderas o cauces. Las masas que se sueltan pueden estar saturadas o puede haber aporte adicional de agua de acuerdo a las características del proceso activador. La concentración de sedimentos suelos sobre una pendiente fuerte propicia su movimiento.

3.5.1.2. Transporte

En la etapa de avalancha propiamente dicha, la velocidad y el caudal aumentan bruscamente como en una especie de onda. En este proceso pueden incorporarse al flujo nuevos sedimentos por arrastre o por aportes de deslizamientos, corrientes de agua u otras avalanchas. En esta etapa el flujo puede comportarse como flujo de lodos, hiperconcentrado o de detritos, de acuerdo a la composición, concentración y velocidad. Después de esta primera avalancha pueden venir otras ondas de menor o mayor amplitud.

3.5.1.3. Depositación

Al disminuir la pendiente o aumentar el ancho del canal, ocurre una disminución de la velocidad o frenado de la avalancha. La energía cinética disminuye y se produce sedimentación de las partículas.

3.5.2. Mecanismos de Formación de avalanchas de Tierra.

La forma más común de avalanchas es debida a los deslizamientos de tierra generalizados, relacionados con la ocurrencia de lluvias excepcionales. Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos básicos para hacer un buen análisis.

3.5.2.1. Susceptibilidad a la ocurrencia de avalanchas por lluvia.

Cuando se determina una susceptibilidad a avalanchas, se refiere a la cuenca de una corriente de agua y no a una ladera en particular y la cuenca para el análisis de avalanchas debe referirse a un sitio de salida.

La susceptibilidad a la ocurrencia de avalanchas por lluvia de una cuenca depende de los siguientes factores:

- a. Permeabilidad del perfil de suelo.
- b. Pendiente de las laderas.
- c. Pendiente y sección de la corriente principal.
- d. Propiedades de la cuenca de drenaje.

3.5.2.2. Magnitud de la anomalía climática.

Aunque pueden ocurrir avalanchas de tierra en zonas de alta pluviosidad permanente, la probabilidad de ocurrencia es mayor en zonas normalmente secas, y donde el período de recurrencia de las grandes lluvias es mayor. Entre mayor sea la diferencia entre la lluvia máxima esperada y la lluvia promedio la posibilidad de avalanchas es mayor.

3.5.2.3. Intensidad de lluvia crítica.

La intensidad de la lluvia determina hasta cierto grado el requisito de que la infiltración sea mayor que la exfiltración o capacidad de drenaje y al mismo tiempo proporciona el caudal de agua requerido para que la mezcla de agua suelo se comporte como un flujo.

3.5.2.4. Magnitud de lluvia antecedente.

Control de erosión en zonas tropicales. El volumen de lluvia ocurrida en los días precedentes a la lluvia activadora de las avalanchas es un factor determinante.

3.6. Desplazamientos Laterales o Corrimiento Lateral

Según Conrado, C. Villafarner, G y Rios, L., el corrimiento lateral involucra el desplazamiento de grandes bloques de suelo como resultado de la licuación. El desplazamiento ocurre en respuesta a la combinación de las fuerzas de la gravedad y las inerciales generadas por el sismo. Los corrimientos laterales se presentan por lo general en pendientes suaves (comúnmente menores a los 3 grados) y se incrementan en las cercanías a un canal o un río. La magnitud de los desplazamientos horizontales generalmente varía en el orden de metros. Las capas de suelos desplazados en general presentan fisuras, fracturas, deslizamientos y hundimientos de bloques.

Se consideran como la etapa final de una serie de movimientos donde la deformación interna predomina sobre otros mecanismos de movimientos, se producen generalmente en terrenos casi planos.

En el Manual de estimación de riesgos (2011), se encuentra que los desplazamientos o corrimientos laterales son de dos tipos:

- Desplazamiento lateral lento, propio del ocurrido en los estratos rocosos gruesos, que sobreyacen a materiales blandos los cuales al producirse la ruptura o agrietamiento por efecto de factores desencadenantes, este material se desplaza hacia las grietas dando origen a desplazamientos lentos.
- Desplazamiento lateral rápido propio de materiales limo arcillosos sensibles o arenas de densidad baja y media con poca cohesión, los cuales por efectos de factores desencadenantes como los sismos dan origen al movimiento extremadamente rápidos y peligrosos produciendo licuación.

4. VARIABLES A MEDIR EN UN DESLIZAMIENTO VIAL, CAUSAS Y EFECTOS.

En el Art. Denominado “LOS DESLIZAMIENTOS”, se encuentra: Los deslizamientos son desplazamientos de masas de tierra o rocas por una pendiente en forma súbita o lenta. El deslizamiento o derrumbe, es un fenómeno de la naturaleza que se define como “el movimiento pendiente abajo, lento o súbito de una ladera, formado por materiales naturales - roca- suelo, vegetación o bien de llenos artificiales”. Los deslizamientos o derrumbes se presentan sobre todo en la época lluviosa o durante períodos de actividad sísmica. Dependen de las siguientes variables: Clase de rocas y suelos; Topografía (lugares montañosos con pendientes fuertes); Cantidad de lluvia en el área; Actividad sísmica; Actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.); Erosión (por actividad humana y de la naturaleza).

Los deslizamientos o movimientos de masa no son iguales en todos los casos. Para evitarlos o mitigarlos (reducir el riesgo) es indispensable saber las causas y la forma cómo se originan. La masa, una vez producida la rotura puede deslizarse a una distancia variable, traslapándose con el terreno natural y marcando éste una superficie de separación bien definida.

4.1. Causas de los Deslizamientos

Westen, C. La ocurrencia de los deslizamientos es consecuencia de un complejo campo de esfuerzos. Básicamente, los dos parámetros más determinantes son:

4.1.1. Incremento en el esfuerzo de corte

Influenciado o detonado por alguna de las siguientes características:

- Remoción del soporte lateral o de base (erosión, deslizamientos previos, cortes de carreteras y canteras)
- Incremento de carga (peso de la lluvia/nieve, rellenos, vegetación)
- Incremento de presiones laterales (presiones hidráulicas, raíces, cristalización, expansión de la arcilla)
- Esfuerzo transitorio (terremotos, vibraciones de camiones, maquinaria, explosiones)
- Inclinación regional (movimientos geológicos).

4.1.2. Disminución de la resistencia del material

Influenciado o detonado por alguna de las siguientes características:

- Disminución de la resistencia del material (movilización) cambios en el estado de consistencia)
- Cambios en las fuerzas intergranulares (presión de los poros de agua, disolución)
- Cambios en la estructura (disminución de la resistencia en el plano de falla, fractura miento debido a “descargas”)

4.2 Efectos de los deslizamientos

Traen como consecuencia efectos adversos tales como:

- Pérdidas de vidas humanas.
- Pérdidas materiales
- Daños a las obra de infraestructura viviendas, escuelas, carreteras.
- Incomunicación de pueblos.

- Represamiento y desbordamiento de ríos.

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

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

Las medidas de desplazamientos en superficie y en el interior del terreno permiten detectar el movimiento de una zona determinada del talud o de todo él en conjunto, y conocer la dirección y velocidad del mismo. Los sistemas de medida de desplazamientos en superficie estarán condicionados por la precisión que se pretenda y por la magnitud de los movimientos.

Los movimientos en el interior se miden con inclinómetros y extensómetro. Además, de ser útiles para la medida de la velocidad y dirección del movimiento, estos sistemas permiten localizar las superficies de rotura.

La medida de las presiones intersticiales en el interior del talud se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetro en sondeos o pozos de reconocimiento.

Todo lo anterior, solicita el empleo de programas de computador, los cuales permiten la modelización detallada y el análisis de la rotura y del comportamiento de las laderas en suelos y rocas. Programas como FLAC, UDEC, ZSOIL, PLAXIS, PHASE2, ROCKFALL, ROTOMAP, etc., permiten el análisis de casos complejos y de una gran variedad de condiciones hidrogeológicas, tensionales, etc., modelizándose también las medidas de estabilización, el método de solución

explícita utilizado por FLAC lo hace un programa recomendado para la simulación de grandes deformaciones y modelos que requieren un gran número de elementos, el programa PLAXIS es recomendado para problemas de excavaciones subterráneas, análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a grandes cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo acoplado.

5. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE LOS INSTRUMENTOS GEOTÉCNICOS MÁS UTILIZADOS PARA EL SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DE TALUDES.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la instrumentación es utilizada durante la construcción para garantizar la seguridad, reducir al mínimo los costos de construcción, control en los procedimientos constructivos, protección legal, mejorar las relaciones públicas, y avanzar en la técnica de la instrumentación.

Importancia de la Instrumentación de Taludes

- Indicar fallas inminentes
 - Estructuras geotécnicas pueden fallar con consecuencias catastróficas en cuanto a vida y propiedad. Este tipo de fallas puede ocurrir por sobrecarga, errores de diseño, construcción con deficiencias, deterioro, etc.
 - El monitoreo puede servir para dar aviso y salvar vidas.
- Entregar avisos
 - Sistemas de instrumentación pueden ser instalados para entregar aviso de que algún indicador ha excedido límites aceptables.
 - Estos instrumentos pueden ser parte de un sistema autónomo que automáticamente active la alarma.
- Revelar Incertidumbres
 - Como ingenieros se trabaja constantemente con incertidumbres, las cuales pueden llevar a fallas catastróficas.

- Siempre existirán incertidumbres en los proyectos geotécnicos; se instrumenta para observar el comportamiento real de la obra
- Evaluar hipótesis de diseño
- Minimizar daños a estructuras adyacentes: por ejemplo, monitoreando el desplazamiento lateral de una excavación.
- Control de la Construcción: la instrumentación puede ser utilizada para monitorear el progreso de cierto desempeño geotécnico para controlar así la actividad constructiva.
- Mejorar el estado del conocimiento: muchos de los avances en la ingeniería geotécnica tienen sus raíces en datos obtenidos de la instrumentación de proyectos a escala real.

Obando, T. (2009). Cuando se presentan signos de inestabilidad en un talud (grietas o roturas en la parte superior, abultamiento y levantamiento en la pata, etc.) o cuando se precisa controlar el comportamiento de un talud frente a la estabilidad, se recurre a la instrumentación o auscultación del talud y su entorno, a fin de obtener información sobre el comportamiento del mismo y las características del movimiento; velocidad, pautas en los desplazamientos, situación de las superficies de rotura, presiones de agua, etc.

El control de la velocidad del movimiento permite conocer el modelo de comportamiento, y tomar decisiones referentes a su estabilización; en ocasiones se puede predecir aproximadamente cuando tendrá lugar la rotura, en base al registro de la curva desplazamiento-tiempo y su extrapolación en el tiempo.

Marañón, C. Durante una inspección visual se observan todas las anomalías topográficas que se puedan detectar, así como las grietas existentes, los signos de rotura o de desgarre, las discontinuidades que puedan ser favorables al movimiento, los humedales que afloren. Todas ellas se deben vincular con los mapas geológicos con el objeto de poder efectuar un primer esquema, es decir un primer modelo del deslizamiento que explique la inestabilidad que se está produciendo.

Dunnicliff, J. (1993) afirma que la práctica en la ingeniería de la instrumentación geotécnica implica una unión entre las capacidades que ofrecen los instrumentos de medición y las capacidades de las personas.

Hay dos categorías generales de los instrumentos de medición. La primera categoría se utiliza para la determinación in situ de las propiedades del suelo o roca, por ejemplo la permeabilidad, por lo general durante la fase de diseño de un proyecto como el piezocono, veleta de corte, etc. La segunda categoría se utiliza para monitorear el desempeño, por lo general durante la fase de construcción u operación de un proyecto, y puede implicar la medición de presión de las aguas subterráneas, deformación, esfuerzo total, carga o tensión, un ejemplo es, piezómetros de cuerda vibrante.

Durante las últimas décadas, fabricantes de instrumentos geotécnicos han desarrollado una gran variedad de productos valiosos y versátiles para el seguimiento de los parámetros relacionados con geotecnia. Quienes no están familiarizados con la instrumentación podrían creer que la obtención de información requiere nada más escoger un instrumento de una galería, instalarlo y tomar las lecturas. El uso de instrumentos geotécnicos, no es más que la

selección adecuada de estos, pero se debe realizar paso a paso, con un proceso completo de ingeniería, empezando por una definición del objetivo y terminando con la aplicación de los datos.

Cada paso es fundamental para el éxito o el fracaso de todo el programa, y el proceso de ingeniería implica la combinación de las capacidades de los instrumentos y las personas.

Para llevar a cabo la auscultación de un talud es necesaria la selección de las magnitudes a medir, de los puntos de medida y de los instrumentos adecuados, además de una correcta instalación, registro e interpretación de los datos obtenidos. La instrumentación permite comprobar el comportamiento del talud y verificarlos modelos y análisis de estabilidad realizados. Previamente a los trabajos de instrumentación, es necesario conocer las características y propiedades de los materiales que forman el talud, mediante un estudio previo.

5.1. Control topográfico de puntos determinados

Monitoreo de los movimientos de masas inestables. Los métodos basados en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Estos métodos permiten monitorear un área que haya mostrado algunos indicios de inestabilidad, con lo cual se puede dar seguimiento a sus desplazamientos, teniendo como referencia bancos fijos ubicados fuera del área inestable, este es el procedimiento más directo, para conocer, midiendo sus efectos, la evolución de un potencial deslizamiento. Las mediciones topográficas también permiten dar

seguimiento a la formación y progresión de grietas que se generan en los hombros de los taludes, y que comúnmente anteceden a las fallas.

Bajo este término se engloban todas aquellas técnicas propias de la Cartografía clásica terrestre. Hasta hace relativamente poco tiempo constituían el único sistema válido y eficaz para llevar a cabo la medida de deformaciones de la superficie terrestre sin cometer grandes errores.

Tabla 5. Características de las técnicas topográficas clásicas

Método	Uso	Resultados	Rango	Precisión
Nivelación trigonométrica o por pendientes	Variación de la altitud	dZ	Variable	20 mm
Nivelación geométrica o por alturas	Variación de la altitud	dZ	Variable	±1 mm/Km
Nivelación geométrica de precisión	Variación de la altitud	dZ	Variable	±0.1 mm/Km
Triangulación topográfica	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	< 300-1000 m	5-10 mm
Itinerario topográfico (Poligonal)	Desplazamiento de blancos móviles	dX, dY, dZ	Variable	5-10 mm
Distanciómetro electroóptico (MED)	Desplazamiento de blancos móviles	dD	1-10 Km	7 mm±1-5 ppm

Su fundamento se basa en la medida de las variaciones de las coordenadas de una serie de puntos durante un determinado intervalo de tiempo. Para ello se han de repetir las medidas de las coordenadas (-X, -Y, -Z) de los puntos de control, varias veces, en diferentes instantes, para así determinar si se ha producido o no variación en cualquiera de las tres direcciones del sistema de referencia. Las lecturas de estos puntos de control suele realizarse desde unos puntos de coordenadas conocidas denominados bases topográficas que han de permanecer fijas durante todo el periodo de lectura. Los métodos topográficos pueden clasificarse en dos grandes grupos, altimétricos y planimétricos. Otro método utilizado en el estudio de fenómenos de inestabilidad de laderas es el de medición

de distancias reales, cuya finalidad es determinar la variación de la distancia existente entre el punto de control y la base de referencia. Las principales características de cada una de estas técnicas se resumen en la Tabla 5.

El monitoreo topográfico se realiza por nivelación y colimación de referencias superficiales. Este método consiste básicamente en colocar referencias o bancos topográficos (testigos) a lo largo de ejes o líneas longitudinales y transversales dentro de un área en movimiento. Es recomendable que estos ejes se establezcan en las direcciones longitudinales (uno al menos por el posible eje del movimiento) y transversal (en planta y elevación) localizados en los extremos de esos ejes, fuera del área potencialmente inestable. La ubicación de estos ejes la cantidad de los puntos de referencia dependen del tamaño del área en estudio y de la posición y cantidad del posible agrietamiento.

Al ubicar el tránsito en un banco extremo del eje y visar el del otro extremo, se establece una línea visual o de colimación, a la cual se refieren los puntos testigos del movimiento, para esto último basta ir colocando en cada punto una regleta metálica graduada, lo que permitirá detectar desplazamientos laterales al milímetro. A su vez, la elevación de los puntos testigo del movimiento se establece mediante una nivelación o trabajo de altimetría, para lo que se puede utilizar un nivel o el mismo tránsito, nuevamente referidos los puntos extremos considerados fijos. Es deseable verificar esta última suposición, para lo que se deberá establecer otro punto de control más alejado de la zona inestable.

Una vez definidas la posición y la elevación iniciales de cada punto de referencia, se realizan posteriormente mediciones topográficas periódicas con el fin de conocer la evolución de sus movimientos. La periodicidad de esos levantamientos

depende de la velocidad que desarrolle la inestabilidad, de hecho, este monitoreo de los movimientos constituye un medio para prevenir un desastre, ya que dependiendo de esa velocidad, es un medio idóneo para dar una alarma, e incluso una alarma generalizada para evacuar alguna zona poblada a la que impactara esa inestabilidad.

5.2 GPS diferencial

El GPS se está utilizando con frecuencia para monitorear los movimientos superficiales de deslizamientos. Una estación base, en un sitio conocido, se utiliza para hacer las correcciones y refinamientos de una o varias estaciones móviles. Todas las estaciones emplean el mismo sistema satelital.

El GPS relaciona observaciones a estaciones móviles desconocidas, con observaciones simultáneas en la estación base conocida. A medida que las señales son monitoreadas, los errores pueden sugerir que la estación base se está moviendo, pero lo que realmente está ocurriendo, son los movimientos de las estaciones móviles. Todas las mediciones se relacionan a la estación base. Mientras la posición sea definida en forma relativamente precisa, los otros movimientos internos serán consistentes.

Un valor asumido de latitud y longitud puede ser utilizado sin afectar la calidad de las mediciones internas. La precisión de GPS puede deteriorarse considerablemente donde la superficie del terreno está cubierta de árboles o en épocas de condiciones climáticas desfavorables.

Dunnicliff, J. (1993). Afirma, Cuando la necesidad de instrumentación es adecuada y establecida correctamente, y cuando el programa está correctamente planificado, el ahorro en los costos puede ser un resultado directo. Sin embargo, la instrumentación no tiene que justificar la reducción de los costos. En algunos casos, la instrumentación ha sido valiosa para demostrar que el diseño es correcto. En otros casos, la instrumentación logra demostrar que el diseño es insuficiente, lo que puede resultar en el aumento de los costos de construcción. Sin embargo, tener mayor seguridad y evitar el fracaso (ahorrando el costo de las reparaciones) harán que el costo del programa de instrumentación sea efectivo.

La instrumentación es utilizada durante la construcción para garantizar la seguridad, reducir al mínimo los costos de construcción, control en los procedimientos constructivos, protección legal, mejorar las relaciones públicas, y avanzar en la técnica de la instrumentación.

Inherente a la utilización de la instrumentación, por razones de construcción es la absoluta necesidad de decidir, de antemano, un medio positivo para la solución de cualquier problema que pueda ser divulgada por los resultados de las observaciones (Peck 1973). Si las observaciones demuestran que la solución se necesita, esta acción ha estado basada en planes apropiados y previamente anticipados que con antelación ya se han analizado.

5.3. Extensómetros superficiales

Una técnica para el monitoreo superficial de grieta consiste en colocar dispositivos electromecánicos, que permitan medir desplazamientos relativos entre masas de

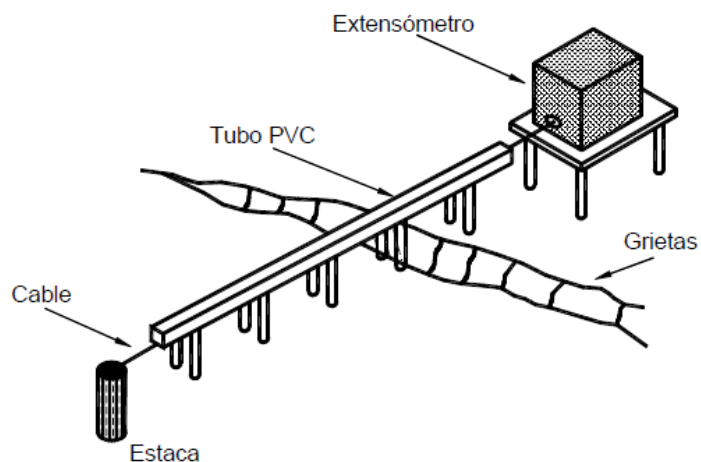
movimiento. La colocación de estos dispositivos resulta muy conveniente cuando la zona que se desea monitorear es de difícil acceso y/o cuando se requiere establecer un monitoreo continuo y automático del movimiento del terreno para determinar la posibilidad de un deslizamiento en una ladera o talud. En las excavaciones subterráneas como túneles y minas es muy común el uso de este método de instrumentación.

5.3.1. Extensómetros horizontales

El extensómetro horizontal es utilizado para medir el movimiento relativo comparando la distancia entre dos puntos de una forma manual o automática y deformaciones en general de la masa de suelo.

Los extensómetros (Figura 28) miden movimientos relativos entre la boca del sondeo y uno o varios puntos situados en el interior.

Figura 28. Diagrama de instalación de un extensómetro horizontal



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

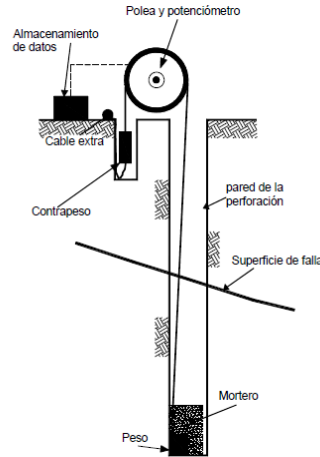
Los extensómetros generalmente, se instalan a través del escarpe principal y en terraplenes a través de las grietas para determinar su movimiento y deformación. Colocando una serie de extensómetros interconectados desde el escarpe principal hasta la punta del deslizamiento, se puede determinar en forma clara el movimiento de bloques individuales dentro del movimiento general. Las mediciones deben tener una precisión de al menos 0.2mm y deben relacionarse con los datos de lluvia diaria.

Tiene la ventaja de no ser afectado por la humedad, densidad o presión atmosférica.

5.3.2. Extensómetros verticales

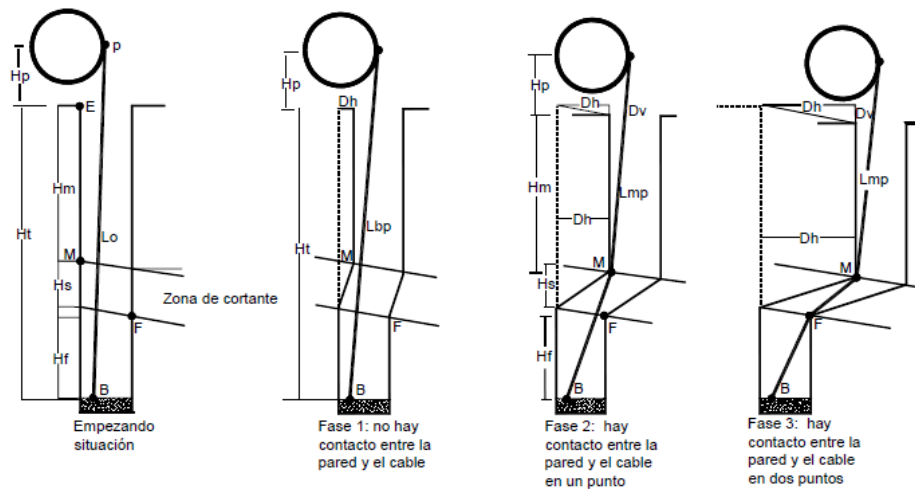
Suarez, J. Los extensómetros verticales (o medidores de deformación vertical) miden el aumento o disminución de la longitud de un cable que conecta varios puntos anclados dentro de una perforación y cuya distancia de separación, es conocida aproximadamente. Generalmente, se colocan unos pesos para mantener la tensión en los cables. El fondo del cable debe estar en el suelo o en roca dura y estable (Figuras 29 y 30).

Figura 29. Extensómetro vertical sencillo para medir el desplazamiento de la superficie de falla. (Corominas y otros 2000)



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Figura 30. Esquema de la medición del desplazamiento, en la superficie de falla, donde se emplea un extensómetro vertical (Corominas y otros, 2000).



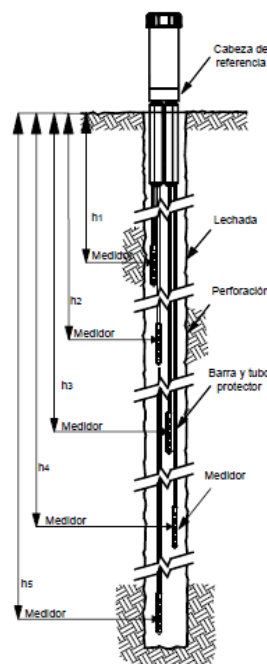
Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Los extensómetros verticales son muy útiles para determinar movimientos de la superficie de falla cuando las deformaciones son mayores de cinco centímetros, caso en el cual, los inclinómetros no se pueden utilizar por la imposibilidad de la entrada del equipo medidor, al tubo del inclinómetro. El sistema es simple y permite mediciones frecuentes con facilidad.

Generalmente, los desplazamientos medidos son menores que los reales, debido a la deformación del ducto y el cable.

Los extensómetros pueden ser sencillos o multipunto (Figura 31). La instalación de éstos últimos es compleja y se requiere calibrar las tensiones para una medición correcta. El movimiento relativo puede medirse en forma mecánica o en forma eléctrica. La mayoría de los extensómetros multipunto contienen hasta 5 sensores. Éstos se encuentran conectados a un cable multi-conductor, el cual permite las lecturas desde la superficie.

Figura 31. Diagrama de un extensómetro multipunto (Abramson y otros 2002)



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

5.4. Inclínómetros

Ayala, C. y Andreu, P. (2006) afirman que, los Inclínómetros permiten medir movimientos horizontales a lo largo de la vertical de un sondeo y por tanto detectar la zona de movimientos más acusada, su evolución y la velocidad de los mismos. Es, en consecuencia, un equipo de gran utilidad para la detección de superficies de deslizamiento en taludes.

Los inclinómetros deben alcanzar la zona estable situada debajo del plano de rotura más profundo. Estos aparatos constan de un torpedo que baja por una tubería especial previamente instalada en el interior del sondeo. El torpedo permite medir (por ejemplo, cada 50 cm) el ángulo que forma la tubería, lo que multiplicado por la distancia medida permite ir conociendo los desplazamientos horizontales a lo largo del sondeo, integrando las lecturas de abajo a arriba. Al atravesar la zona de rotura, ésta suele quedar definida por cambios en los desplazamientos horizontales, lo que permite realizar el análisis posterior correspondiente; si los desplazamientos son importantes, el tubo puede quedar cortado e impedir las medidas. Los Inclínómetros (Figura 32) miden la desviación (inclinación) del sondeo en dos direcciones ortogonales, proporcionando curvas de desplazamientos cuya inflexión denota la situación de los planos.

Figura 32. Inclínómetro Portatil



Referencia: Juan David Quintero Franco, obra Valle Sur Arquitectura y Concreto.

Figura 33. Tubo guía PVC para sonda inclinométrica.



Referencia: Juan David Quintero Franco, obra Valle Sur Arquitectura y Concreto.

Un sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro componentes principales

a. Un tubo guía de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación. Este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora. Generalmente, se utilizan diámetros de tubo entre 1.5 y 3.5 pulgadas.

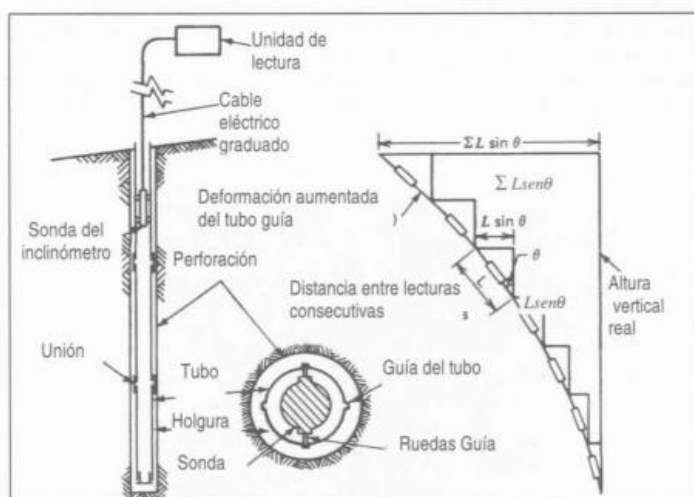
b. Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos servo-acelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento.

c. Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. Generalmente, el cable está graduado para el control superficial. El cable tiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones; los cables eléctricos se encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene unas marcas para medir profundidades. Estas medidas están relacionadas hasta la mitad de la altura del torpedo. Superficialmente, el cable se maneja con una polea, que tiene unas tenazas para sostenerla. Se recomienda siempre, trabajar con la polea para evitar el riesgo de que el cable pueda torcerse al sostenerlo.

d. Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y en ocasiones, puede guardar y procesar los datos. El equipo de lectura es compacto y está sellado contra la humedad. La memoria puede guardar hasta 40 mediciones completas. La unidad también puede realizar chequeos y revalidar la información. En oficina, los datos del inclinómetro se descargan en un computador.

En la figura 34, se puede evidenciar cada una de las cuatro partes que componen un inclinómetro.

Figura 34. Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de inclinómetro (Dunnicliff, 1993)



Referencia: Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas. <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-2.pdf>

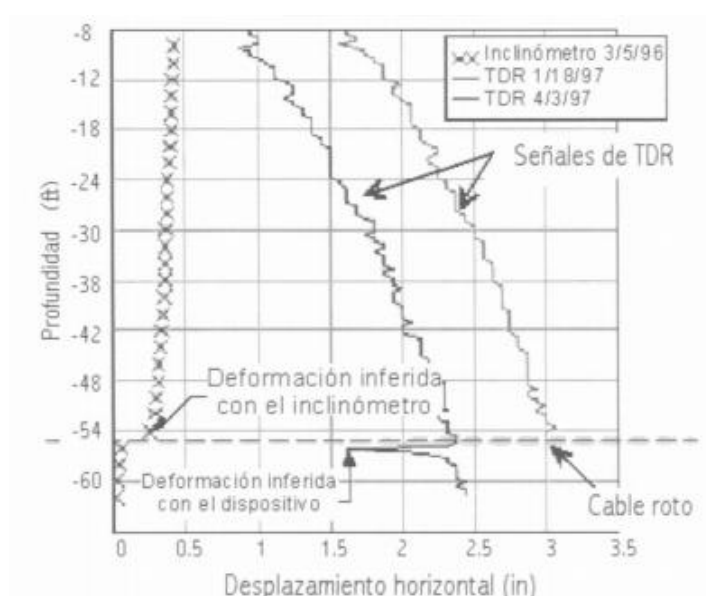
5.5. Reflectometría

Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas, se encuentra que: el sistema TDR (*Time Domain Reflectometry*) es un dispositivo relativamente nuevo que se utiliza para monitorear los movimientos laterales a profundidad en laderas inestables. Su instalación requiere de la perforación de un pozo de 2" a 4" de diámetro, a lo largo del cual se inserta un cable coaxial, fijándolo a la base de la perforación por medio de un contrapeso y llenando el pozo con una lechada pobre de suelo-cemento. El TDR se puede utilizar tanto en suelos duros o firmes, como en suelos blandos. Como en el caso del inclinómetro, otra de sus ventajas es que permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical.

El principio básico del funcionamiento del TDR es similar al que se muestra en la figura 35. Se coloca un cable coaxial dentro del deslizamiento y se ensaya el cable enviando pulsos de voltaje en forma de ondas, las cuales se reflejan.

Este procedimiento resulta muy sencillo ya que sólo toma algunos segundos en hacer la conexión y el disparo, para que la grafica de resultados se muestre casi instantáneamente.

Figura 35. Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de Reflectometría.



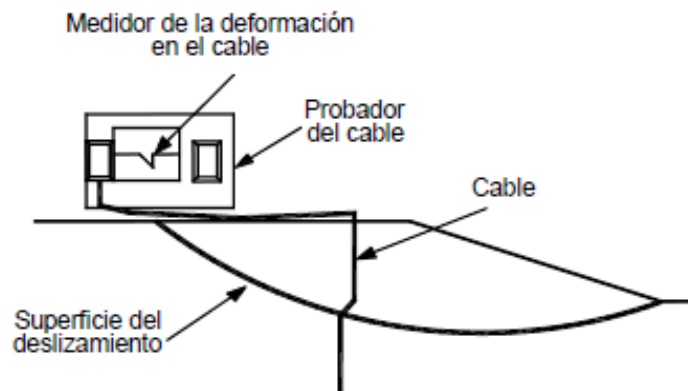
Referencia: Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de inestabilidad de laderas.

<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-2.pdf>

La medición de la reflexión permite identificar roturas o esfuerzos en el cable, el sistema TDR requiere de mediciones para determinar las condiciones del cable a través del tiempo, el movimiento del terreno deforma el cable y cambia la

impedancia (relación entre tensión e intensidad de corriente) de éste. El cambio en la impedancia puede ser monitoreado para localizar la superficie de falla y los movimientos del terreno como se indica en la figura 36.

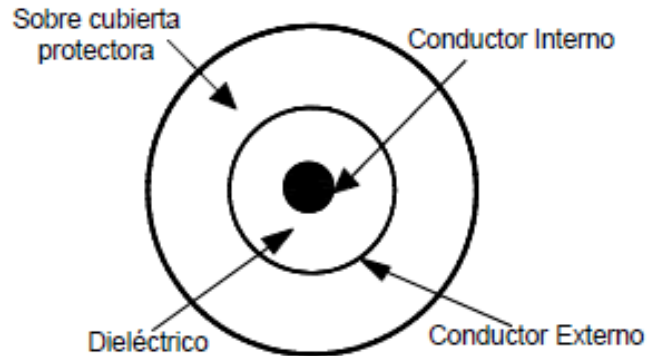
Figura 36. Esquema del sistema TDR



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Los cables coaxiales que se utilizan (Figura 37) en el sistema TDR tienen una impedancia característica, determinada por el espesor y el tipo de material aislante.

Figura 37. Esquema del cable coaxial del sistema TDR



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Suarez, J. El material aislante puede ser hecho de cualquier material no conductor como PVC, teflón, o aire. Si el cable se deforma, la distancia entre el conductor interno y el externo cambia y por lo tanto, cambia la impedancia en ese punto. El medidor de TDR determina la localización de las deformaciones a lo largo del cable.

El sistema TDR es utilizado con frecuencia en los Estados Unidos y especialmente, por el Departamento de Carreteras de California (Kane y Beck, 1996). El sistema TDR tiene una gran cantidad de ventajas sobre los inclinómetros ya que generalmente es más económico, las mediciones son más rápidas y más sencillas.

Entre las desventajas del sistema TDR se encuentra que no es posible determinar la dirección y la magnitud de los movimientos; sin embargo, la tecnología del sistema podría mejorar en el futuro (Tsang y England, 1995).

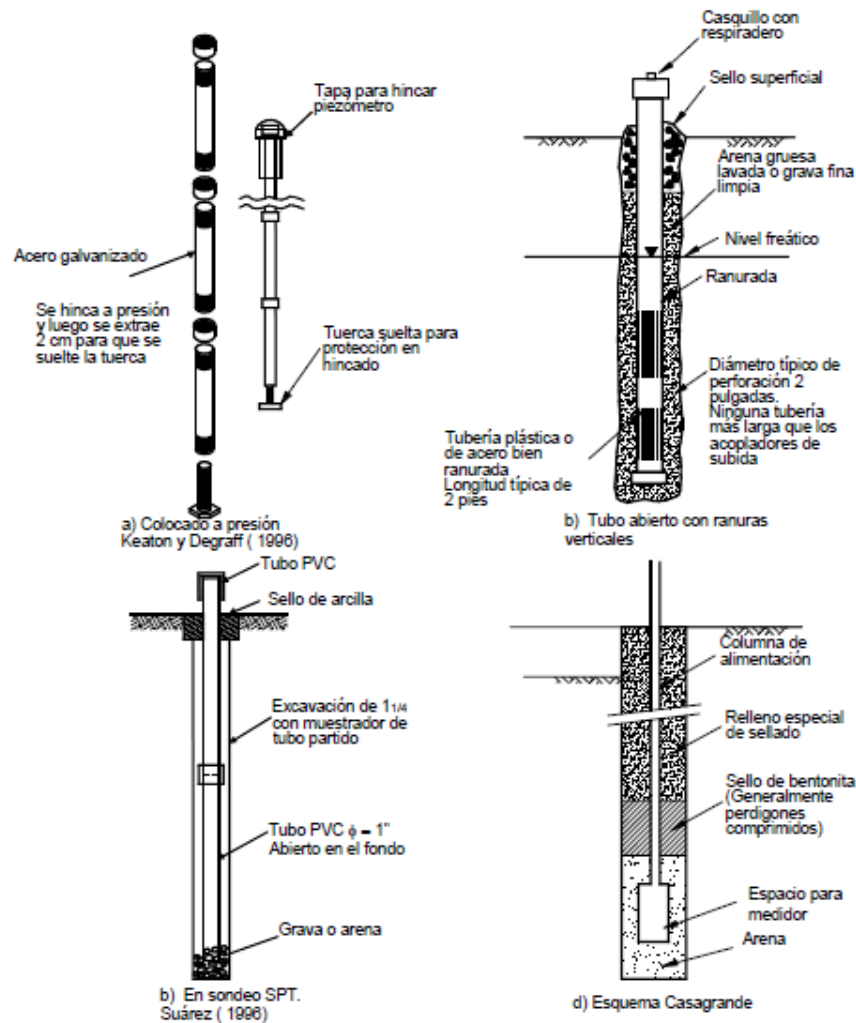
5.6. Piezómetros

Suarez, J. La presión de poros se puede monitorear utilizando excavaciones de observación o piezómetros, los cuales pueden ser de tubo abierto, neumáticos o de cable vibratorio. El tipo de piezómetro a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y de su precisión.

5.6.1. Sondeo Abierto

Consiste en perforaciones abiertas en las cuales se coloca un tubo perforado (Figuras 38 y 39), su función principal es establecer un promedio del nivel freático

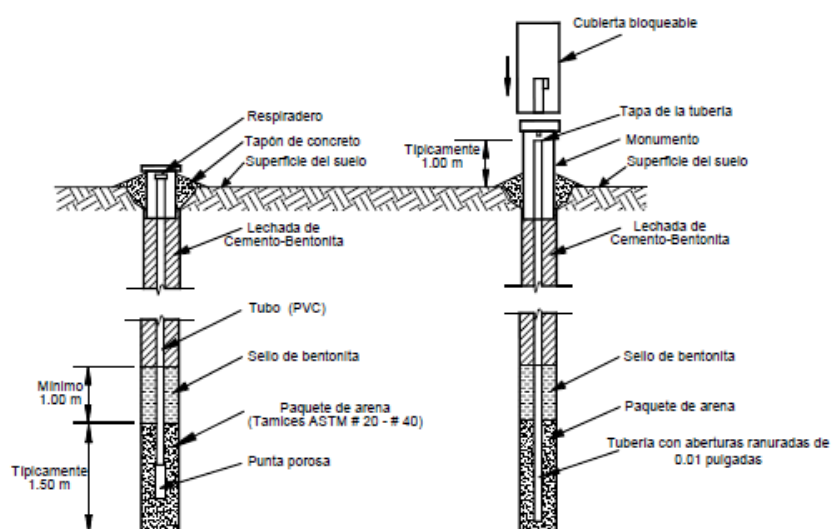
Figura 38. Piezómetro sencillo de cabeza abierta.



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

La profundidad del nivel de agua se puede medir por medio de un cable y un elemento detector (que bien puede ser un medidor eléctrico o un simple objeto metálico). Una cubierta de protección impide la entrada del agua lluvia.

Figura 39. Piezómetros de cabeza abierta.



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Si el sondeo abierto se encuentra en una formación de suelo homogéneo con solo un nivel de agua presente, este sistema es válido para obtener información de las variaciones del nivel freático.

Su precisión generalmente es buena, pero como la perforación tiene comunicación con todos los estratos, no se puede especificar la presión del agua en un sitio determinado. El nivel del agua que se obtiene, corresponde a la cabeza de presión en la zona más permeable y esto puede prestarse para errores en el análisis.

5.6.2 Piezómetro de Cabeza Abierta

Uno de estos piezómetros es el tipo Casagrande (Figura 40), que es muy similar al tubo abierto con un filtro y con la colocación de sellos de Bentonita, permite especificar el sitio de la lectura, eliminando el factor de error ya descrito.

Generalmente, se coloca un filtro o un elemento poroso, para determinar el sitio específico de la medición. Los piezómetros de cabeza abierta son considerados por los ingenieros, como los más confiables.

Figura 40. Piezómetro de Casagrande.



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

Algunas de las ventajas de los piezómetros de cabeza abierta son los siguientes (Abramson y otros, 2002):

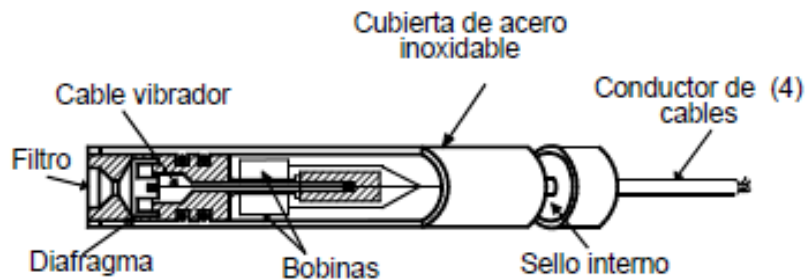
- Son simples y fáciles de interpretar.
- Su durabilidad y permanencia en el tiempo es muy buena.
- Son fáciles de mantener.
- Se pueden utilizar unidades de medida portátiles.
- Se puede muestrear el agua freática.
- Se pueden utilizar para medir la permeabilidad del suelo.

Entre las limitaciones de los piezómetros de cabeza abierta se puede mencionar que son de respuesta lenta con el tiempo y que los filtros pueden taparse con la entrada repetida de agua; sin embargo, la limitación más importante es que no permiten medir los niveles pico de presión durante tormentas cuando los piezómetros se encuentran instalados en arcillas (Cornforth, 2005).

5.6.3. Piezómetro de Hilo Vibrátil

Consisten en un diafragma metálico que separa la presión del agua del sistema de medida, un filtro poroso que actúa de material permeable y que permite el paso del agua desde el exterior al interior del piezómetro, un cable tensionado que está unido al punto central de un diafragma que puede ser metálico o de cauchos especiales. Las deflexiones del diafragma ocasionan cambios en la tensión del cable, la cual es medida y convertida en presión (Figura 41).

Figura 41. Piezómetro de Hilo Vibrátil (Cornforth 2005)



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>

La utilización de piezómetros de hilo vibrátil origina, con frecuencia, errores por el comportamiento del piezómetro a través del tiempo (Abramson y otros, 2002). Son muy comunes los problemas de corrosión por falta de hermeticidad de la cavidad sellada.

Otra dificultad relativamente común de los piezómetros de hilo vibrátil, es la deformación o “*creep*” a largo plazo, lo cual modifica la tensión del cable y la precisión de las medidas. Igualmente, el sensor es susceptible a daños por la acción de los rayos durante las tormentas eléctricas. El cable metálico enterrado en el piso, actúa como un elemento que atrae los rayos.

Entre las ventajas del piezómetro de hilo vibrátil se encuentra la facilidad de lectura y la poca interferencia para la colocación de terraplenes. Igualmente puede utilizarse para medir presiones negativas de agua, cuando se cuenta con filtro poroso adecuado con una presión de entrada de aire entre 0.1-1.5 Mpa. El principal uso de los piezómetros de hilo vibrátil, se relaciona con la facilidad para

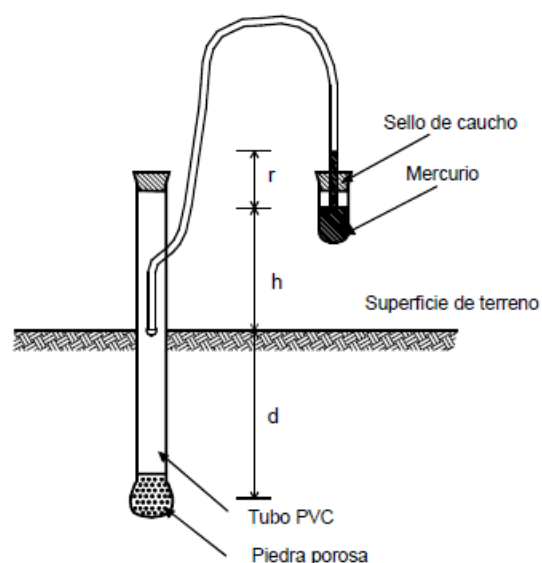
incorporarlos a los sistemas automáticos de adquisición de datos y la posibilidad de transmitirlos a grandes distancias.

5.6.4. Tensiómetros

Los tensiómetros miden la presión de poros negativa en materiales no saturados y generalmente, son capaces de medir presiones desde cero hasta menos una atmósfera (Abramson, 1996).

Suarez, J. El instrumento tiene una piedra porosa de entrada de aire en un extremo de un tubo metálico lleno de agua. Una válvula de vacíos se coloca al otro extremo del tubo. Cuando la punta porosa está en contacto con el suelo, existe una tendencia del agua a salir del tubo y entrar al suelo. El potencial de salida de agua del tubo es una medida de la succión o presión negativa (Figura 42).

Figura 42. Esquema de un tensiómetro



Referencia: Suarez, J. Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 12. Instrumentación y monitoreo. <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>.

Típicamente, un tensiómetro es instalado con la punta porosa a la profundidad de medida y el resto del tensiómetro queda sobre la superficie del terreno, pero en ocasiones, los tensiómetros son enterrados dentro del suelo (Figura 43).

Se requiere un mantenimiento permanente de los tensiómetros, especialmente durante los periodos secos en los cuales la entrada de aire produce difusión a través del agua.

Este aire debe ser removido para asegurarse que la presión medida por el transductor representa la presión real de poros en el suelo y no la presión del aire dentro del tubo (Gasmó, J.M., 1997). Para medir la succión del suelo más allá del rango de los tensiómetros, se puede utilizar los sicómetros; no obstante, la precisión de los sicómetros es dudosa (Abramson y otros, 2002).

5.6.5 Sensores y unidades de lectura de fibra óptica.

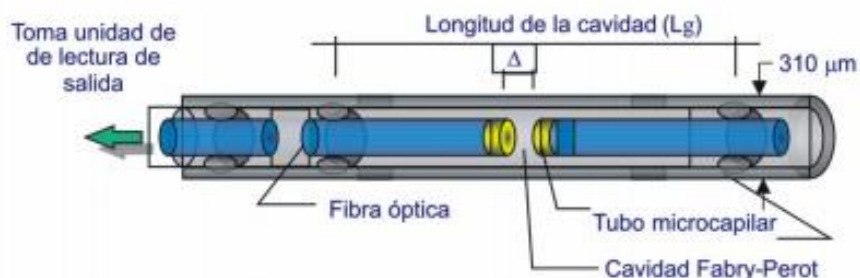
Uno de los más recientes y novedosos desarrollos en el campo de la instrumentación para ingeniería civil, especialmente en la instrumentación geotécnica y estructural, son los sensores de fibra óptica. Este nuevo tipo de sensores crea un fuerte interés en investigación y desarrollo. Varias tecnologías basadas en los diferentes principios, como interferometría de Fabry-Perot, redes Bragg y polarimetría, están bien documentadas en la bibliografía (Udd 1995; Culshaw & Dakin, 1996). En este caso nos centraremos en la interferometría de Fabry-Perot (FPI), principio en el que se basan los sensores de fibra óptica de

FISO empresa canadiense creada en 1994 pionera en el desarrollo de este sistema de lectura. Básicamente, la FPI consiste en 2 espejos colocados uno contra el otro; al espacio que los separa se le llama longitud de la cavidad. La luz reflejada en el FPI se modula en longitud de onda en concordancia exacta con la longitud de la cavidad. Como los sensores basados en FPI convierten tensión, temperatura, carga o presión en variaciones de la longitud de la cavidad, el objetivo se reduce a conseguir una manera práctica de alcanzar mediciones lo más precisas posible de la longitud de la cavidad de Fabry-Pérot

5.6.5.1 Sensores de presión y Piezómetros

El diseño de los sensores de presión de fibra óptica, a partir de los cuales se fabrican los piezómetros, se basan en la medición sin contacto del desvío del diafragma de acero inoxidable, en contraposición a la medición de la deformación del diafragma, más convencional. La presión aplicada al diafragma de acero inoxidable produce un desvío en su superficie brillante. Este desvío causa una variación en el espacio entre la superficie brillante del diafragma y la punta fija de la fibra óptica. El espacio entre la fibra óptica y el diafragma de acero se convierte en una cavidad Fabry-Perot. La geometría y el material del transductor se seleccionan para obtener una relación lineal entre el desvío del diafragma y la presión aplicada. Ver figura 43.

Figura 43. Esquema de fibra óptica patentado por FISO



Referencia: Nuevos Instrumentos de Medida: Sensores y unidades de lectura de fibra óptica. http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_7.pdf paginas 232-233

5.6.6 Uso de los Piezómetros en el Estudio de los Deslizamientos

Los piezómetros generalmente se instalan como parte de las investigaciones del sitio, se deben implementar tanto durante la construcción del proyecto como durante la vida útil del mismo. Cabe anotar que los piezómetros descritos anteriormente son para verificar y hacer seguimiento progresivo a la posición del nivel freático. Según sea el caso en estudio, es importante que la punta de los piezómetros se encuentre muy cerca o en la superficie de falla. Igualmente, es importante que se puedan medir las presiones del agua subterránea durante largos periodos de tiempo.

El piezómetro, debe estar por encima de la superficie de falla para que no se dañe en el proceso de movimiento.

Si el sensor se encuentra muy profundo, éste, los tubos, o los cables, pueden dañarse o ser destruidos al moverse la masa activa. Igualmente, si el piezómetro se introduce en la roca o suelo duro, o muy profundo, las presiones de poros son generalmente menores que las del deslizamiento.

Si el sensor se encuentra muy superficial, las mediciones de presión de aguas pueden ser incorrectas; incluso, pueden ser mayores que la presión en la superficie de movimiento.

Otra decisión importante es definir el tipo de piezómetro, que puede ser de respuesta rápida como el piezómetro de hilo vibrátil o el neumático, o de respuesta lenta como el de cabeza abierta.

El piezómetro de cabeza abierta generalmente es el más utilizado en suelos granulares de alta permeabilidad, y los de hilo vibrátil o neumáticos son más complejos, y se recomiendan para suelos cohesivos de baja permeabilidad.

5.6.7 Características generales de la instrumentación por piezómetros

Tipo	Sistema de medida	Observaciones
Pozo de Observación	Tubo ranurado instalado en el interior de un sondeo cuyo nivel de agua se mide con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> - Medidas de niveles freáticos en terrenos permeables. - No se deben utilizar cuando existan niveles colgados o capas artesianas. - Tiempo de respuesta largo principalmente en terrenos poco permeables. - Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.
Piezómetro Abierto	Tubo ranurado en su extremo inferior, instalado en un sondeo. El extremo inferior se sella para evitar transmisión de presiones intersticiales en el interior del tubo. La medida del nivel se realiza con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> - Medida de presiones intersticiales en terrenos permeables. - Bajo costo - Solamente se puede instalar en un punto del sondeo - Tiempo de respuesta grande principalmente en suelos poco permeables - Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.
Piezómetro Cerrado	<p>Sensor que detecta la presión intersticial en un punto mediante un transductor que da una señal proporcional a los cambios de presión.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El transductor puede ser neumático, de resistencia eléctrica o de cuerda vibrante. 	<ul style="list-style-type: none"> - Permiten el control de presiones intersticiales en varios puntos de un sondeo. - Mayor costo - Tiempo de respuesta corto aún en terrenos pocos permeables - Poco afectados por los movimientos que se puedan producir en el talud. - Los de cuerda vibrante son precisos y fiables. - Los de resistencia eléctrica pierden precisión con variaciones de temperatura y pierden su estabilidad, a largo plazo, por señales a distancia. - Los neumáticos son aconsejables para distancias menores de 200 m.

Referencia: Auscultación de taludes, instrumentación. <http://www.galeon.com/geomecanica/cap15.pdf>

6. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LA CANTIDAD Y TIPO DE INSTRUMENTO A SER INSTALADO EN UN TALUD.

Dunnicliff, J. (1993). En el diseño de un proyecto superficial, la capacidad del suelo para apoyar la estructura, debe ser considerada. En el diseño de un proyecto subterráneo, también debe tenerse en cuenta la capacidad del suelo para sostenerse o ser apoyado por otros medios.

El diseñador geotécnico trabaja con una amplia variedad de materiales naturales heterogéneos, que pueden ser alterados para hacerlos más adecuados o en algunos casos para causar daños, pero los valores numéricos de sus propiedades ingenieriles no pueden ser asignados con exactitud.

A medida que avanza la construcción y las condiciones geotécnicas son observadas y su comportamiento es controlado, los criterios de diseño pueden ser evaluados y verificados, pero nunca cambiados durante el proceso de construcción. Por lo tanto, las observaciones de la ingeniería geotécnica durante la construcción son a menudo una parte integral del proceso de diseño y la instrumentación geotécnica es una herramienta para ayudar a estas observaciones.

La Planificación de un programa de monitoreo con el uso de la instrumentación geotécnica es similar a otros diseños ingenieriles. Un diseño de ingeniería típico comienza con la definición de un objetivo y continúa a través de una serie de pasos lógicos para la elaboración de planos y especificaciones del proyecto. Del mismo modo, la tarea de planificar un programa de monitoreo debe ser un proceso lógico y comprensible, que comienza con la definición del objetivo y termina con la

planificación de cómo los datos de medición llevarán una acción a implementar. Por desgracia, hay una tendencia entre algunos ingenieros y geólogos de proceder de una manera ilógica, a menudo, seleccionando primero un instrumento y realizando mediciones a continuación sin saber qué hacer con los datos de dichas mediciones.

La planificación sistemática requiere esfuerzo y dedicación especial por parte del personal responsable. El esfuerzo y la planificación deben ser realizados por personal con conocimientos especializados en aplicaciones de instrumentación geotécnica. Reconociendo que la instrumentación no es más que una herramienta, no un fin en sí mismo, este personal debe ser capaz de trabajar en equipo con los diseñadores o asesores geotécnicos del proyecto.

La planificación de una instrumentación debe realizarse siguiendo cada uno de los pasos que se enumeran a continuación.

- **Definir las condiciones del proyecto.** El ingeniero o geólogo responsable de la planificación de un programa de monitoreo debe estar familiarizado con el proyecto, si el programa está diseñado por otro personal, debe hacerse un esfuerzo especial para familiarizarse con las condiciones de este.

Esta familiarización incluye el diseño y el tipo de proyecto, la estratigrafía del suelo y las propiedades inherentes de los materiales, las condiciones del agua subterránea, el estado de las estructuras cercanas u otras instalaciones, condiciones ambientales, y el método de construcción previsto.

- **Prever los mecanismos de falla que controlan el comportamiento.**

Antes de desarrollar un programa de instrumentación, una o más hipótesis de trabajo deben ser desarrolladas por mecanismos de falla que puedan controlar el

comportamiento del talud. Las hipótesis deben basarse con un conocimiento exhaustivo de las condiciones del proyecto.

- **Definir las preguntas que los diseñadores Geotécnicos necesitan responder.** La Instrumentación no debe utilizarse a menos que exista una razón válida que pueda ser defendida. Si los ingenieros o geólogos no son capaces de definir un objetivo claro para el programa, se debe cancelar el programa y no continuar con este.

- **Selección de los parámetros que deben controlarse.** La mayoría de las mediciones de presión, deformación, carga, tensión, y temperatura son influenciadas por las condiciones dentro de una zona muy pequeña y por lo tanto depende de las características locales de esa zona. A menudo son esencialmente mediciones puntuales, sujeta a cualquier variabilidad en las características geológicas o de otro tipo, y por lo tanto, no representan las condiciones en una escala mayor. Cuando este es el caso, un gran número de puntos de medición puede ser necesarios antes de ser colocados en los datos obtenidos. Por otro lado, muchos dispositivos de medición de deformación responden a los movimientos dentro de una zona amplia y representativa, por lo tanto, datos proporcionados por un solo instrumento, puede ser significativos, y las mediciones de deformación son generalmente los más fiables y menos ambiguas.

- **Predicción en el cambio de las magnitudes.** Las predicciones son necesarias para que los rangos de los instrumentos y la sensibilidad de los instrumentos se puedan seleccionar.

Una estimación del máximo valor posible, o el máximo valor de interés, conduce a una selección del rango del instrumento. Esta estimación a menudo requiere de un criterio ingenieril sustancial, pero en ocasión se puede hacer con un cálculo sencillo, como es el caso con la presión de poros máxima en una base de arcilla debajo del eje central del terraplén.

Una estimación del mínimo valor de interés lleva a una selección de la sensibilidad, precisión y exactitud del instrumento, alta precisión va de la mano con delicadeza y fragilidad. En algunos casos, la alta precisión puede ser necesaria cuando los pequeños cambios en las medidas de las variables tienen un significado importante, o donde sólo un corto período de tiempo se encuentra disponible para evaluar la tendencia a cierto comportamiento, por ejemplo, cuando se establece la tasa de velocidad de movimiento a partir de datos de Inclinómetros.

Si las mediciones son para construcción con fines de control o de seguridad, debe hacerse una predeterminación de los valores numéricos que indican la necesidad de medidas correctivas. Estos valores numéricos se dan a menudo en términos de tasa de cambio medidos, en lugar de asumir magnitudes absolutas. El concepto de niveles de alerta como verde, amarillo y rojo también son útiles. El color verde indica que todo está bien, el amarillo indica la necesidad de medidas preventivas, incluyendo un aumento en la frecuencia de los controles, y el rojo indica la necesidad de medidas correctivas oportunas.

- **Selección de instrumentos para el monitoreo en campo.** Los pasos anteriores complementan, la selección del instrumento ideal a emplear, según sea el caso que se requiera, lo principal que se pretende buscar es la fiabilidad.

Inherente a la fiabilidad es la máxima simplicidad, y generalmente en los transductores se puede colocar en el siguiente orden decreciente, según simplicidad y fiabilidad:

- óptico
 - mecánico
 - hidráulico
 - neumático
 - eléctrico
- **El costo más bajo de un instrumento no debe ser el factor determinante para su selección.** El instrumento menos costoso probablemente no sea el que finalmente del costo mínimo total en el proceso de instrumentación. En la evaluación económica de los demás instrumentos alternativos, el costo total de la adquisición, calibración, instalación, mantenimiento, monitoreo y procesamiento de datos deben ser comparados.

Es responsabilidad de los ingenieros, desarrollar un nivel adecuado de entendimiento de los instrumentos que se seleccionan, y los ingenieros del proyecto encargados del proceso de instrumentación, discutirán la forma de su aplicación con los ingenieros geotécnicos o geólogos antes de seleccionar los instrumentos. Deben hablar tanto como sea posible acerca de la aplicación y buscar todas las limitaciones de los instrumentos propuestos.

Los instrumentos deben tener un historial de los registros anteriores y siempre debe tener la máxima durabilidad en el ambiente instalado. El medio ambiente para los instrumentos geotécnicos es duro ver tabla 6 y por desgracia, algunos de

los instrumentos no están lo suficientemente bien diseñados para un funcionamiento confiable en el entorno donde será instalado.

Tabla 6. Principales dificultades de los instrumentos de Auscultación

1	Grandes deformaciones	A menudo deformaciones de cizallamiento
2	Corrosión química	Aguas subterráneas, morteros, aditivos para el concreto, bacterias) y electrólisis de materiales diferentes, las corrientes eléctricas.
3	Temperaturas extremas	temperaturas bajo cero a 38°C (100°F), en el sol (la temperatura puede ser superior en ciertos casos similar al almacenamiento de residuos nucleares)
4	Explosivos	Actividades de construcción, transporte sin cuidado desde y hacia el sitio de instalación.
5	Vandalismo,	Destrucción por maquinaria de construcción.
6	Medio ambiente	Polvo, suciedad, barro, lluvia, precipitaciones químicas.
7	Accesibilidad	La pérdida de la accesibilidad a los instrumentos cuando está cubierto por rocas, concreto y otros elementos

Referencia. Dunnycliff, J. (1993). pag. 41

Con algunos instrumentos, si se obtiene una lectura, se asume que la lectura es correcta, mientras que otros instrumentos tienen una función de calibración mediante la cual pueden verificarse después de la instalación claramente, esta característica es muy deseable.

- Otros objetivos para la selección de los instrumentos incluyen una adecuada instalación durante la construcción, un mínimo de interferencia, y la más mínima dificultades de acceso para la lectura del instrumento.

- Se debe determinar la necesidad de un sistema de recopilación de datos automático y las lecturas deben ser seleccionadas según la frecuencia que previamente se planeo para la toma y duración de estas.

- Se deben tener en cuenta acciones preventivas y correctivas en el caso que alguno de los sistemas no esté funcionando adecuadamente y considerar e identificar la necesidad de repuestos y unidades de lectura que se encuentren en (*standby*) o sin funcionamiento. Plazos para la entrega y el tiempo disponible para la instalación del instrumento puede afectar la selección de los instrumentos.

La pregunta final es: ¿El instrumento seleccionado, alcanzará mi objetivo? Si un instrumento no ha sido ensayado y este se selecciona, todas las partes involucradas en el proceso, deben reconocer el carácter experimental del instrumento

- **Selección de lugares de Instrumentación.** La selección de las ubicaciones de instrumentos debe reflejar el comportamiento predicho y debe ser compatible con el método de análisis que más adelante se utilizará en la interpretación de los datos. Los análisis de elementos finitos a menudo son útiles en la identificación de puntos críticos y las orientaciones preferentes de instrumentación. Un enfoque práctico para la selección de ubicaciones de instrumentos implica dos pasos.

En primer lugar, se identifican las zonas de especial interés, tales como las zonas estructuralmente débiles, las zonas de mayor carga, o zonas donde se prevé más presión de poros. Se hace una selección de zonas normalmente con secciones transversales donde el comportamiento predicho se considera

representativo de toda la zona. Cuando se consideran las zonas representativas, las variaciones en la geología y los procedimientos de construcción también deben ser considerados. Estas secciones se consideran entonces como principales secciones instrumentadas, y los instrumentos se encargan de suministrar datos completos de comportamiento. Generalmente hay por lo menos dos secciones primarias instrumentadas. En tercer lugar, porque la selección de zonas representativas pueden ser incorrectas, los instrumentos deben ser instalados en un número de secciones secundarias instrumentadas, para servir como índices de comportamiento comparativo. Los Instrumentos de estas secciones secundarias debe ser la mayor cantidad posible, y también se deben instalar en las secciones principales para realizar las comparaciones.

Los lugares generalmente deben ser seleccionados de manera que los datos pueden ser obtenidos tan pronto como sea posible durante el proceso de construcción. Debido a la variabilidad inherente del suelo y la roca, es aconsejable confiar en un solo instrumento como indicador.

- **Recopilación de los factores que pueden influir en los datos de medición.** Las Medidas por sí mismas rara vez son suficientes para llegar a conclusiones útiles. El uso de instrumentos normalmente implica mediciones relativas a las causas, y por lo tanto, los registros completos y los diarios se deben mantener todos los factores que podrían causar cambios en los parámetros medidos. La decisión que se haya tomado para controlar diversos parámetros de causalidad, siempre debe incluir detalles de la construcción y el avance del proyecto. Las observaciones visuales del comportamiento esperado e inusual también deben registrarse. Deben mantenerse registros de la geología y otras

condiciones del subsuelo y de los factores ambientales que pueden, por sí mismos, afectar los datos monitoreados, por ejemplo, temperatura, precipitación, nieve, sol y sombra.

- **Establecer procedimientos para asegurar la exactitud de la lectura.** El personal responsable de la instrumentación debe ser capaz de responder a la pregunta: ¿Es correcto el funcionamiento del instrumento?, la capacidad de respuesta depende de la disponibilidad de una buena evidencia, para lo cual se requiere de planificación. La respuesta a veces puede ser proporcionada por la observación visual.

En situaciones críticas, un conjunto de instrumentos pueden ser utilizados. Un sistema de respaldo es a menudo útil y con frecuencia proporcionará una respuesta a la pregunta, incluso cuando su precisión es significativamente menor que la del sistema primario.

- **Plan de Instalación.** Los procedimientos de instalación y la capacitación del personal encargado de dicha labor, se debe planificar con suficiente antelación a las fechas programadas. Los planos de instalación deben ser coordinados con el constructor y las disposiciones necesarias para garantizar el acceso y la protección de los instrumentos instalados ante cualquier daño.
- **Recopilación de datos, procesamiento, presentación, interpretación, e Implementación.** La capacitación del personal debe ser planificado. En esta etapa de la planificación la verificación debe hacerse para asegurar que las medidas correctivas se han proyectado, que el personal encargado de la interpretación de los datos de instrumentación tienen autoridad para iniciar medidas correctivas, que

los canales de comunicación entre el personal de diseño y construcción están abiertos.

- Cuando las condiciones del terreno requieren de la experiencia que sea tenido en el pasado y los métodos de construcción son inciertos, el diseñador puede elegir entre un diseño ultra conservador, o un diseño económico basado en los resultados de un ensayo de laboratorio a gran escala. Hay muchos ejemplos en la práctica de la ingeniería geotécnica de pruebas a gran escala diseñados para responder a preguntas específicas, incluyendo terraplenes de prueba, excavaciones de prueba, evaluación de la capacidad de desagüe, etc.

- Las incertidumbres de las propiedades ingenieriles, o el comportamiento durante la fase de diseño a menudo afectan los procedimientos en la construcción o el cronograma del proyecto. El diseñador puede por lo tanto, especificar un programa para controlar el comportamiento real durante la construcción, de modo que los procedimientos o programas pueden ser modificados de acuerdo al comportamiento real. Este uso de la instrumentación normalmente se conoce como el control en la construcción, aunque también juega un papel muy importante en garantizar la seguridad y reducir los costos de construcción. Por ejemplo, en la construcción de un terraplén en un depósito de arcilla blanda utilizando procedimientos de construcción por etapas, la instrumentación normalmente se utiliza para determinar cuándo la arcilla puede soportar la siguiente etapa del lleno.

- **Implementación de las medidas correctivas.** Es inherente a la utilización de la instrumentación para propósitos constructivos, existe la absoluta necesidad

de predecir lo que posiblemente suceda en el futuro, o de evaluar cualquier problema que puede ser revelado por los resultados de la observación. Si las observaciones demuestran que las medidas correctivas son necesarias, la acción debe basarse en los planes previstos anteriormente.

Como se comentó en el anterior numeral, hay varios niveles de advertencia que pueden ser identificados según el rango o tolerancia que se definió inicialmente, por ende, cada uno requiere una acción diferente. La planificación debe asegurar que la mano de obra requerida y los materiales estarán disponibles para que la acción correctiva pueda realizarse en forma rápida, agradable y para que el personal responsable de la interpretación de los datos de instrumentación tenga la autoridad para iniciar medidas correctivas.

Un canal de comunicación abierto debe mantenerse entre el personal de diseño y el personal de construcción, de modo que la acción correctiva pueda ser discutida en cualquier momento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De cara al futuro no hay razón para creer en un papel cada vez menor para la instrumentación geotécnica. Por el contrario el diseño geotécnico y la ejecución de proyectos de infraestructura siempre estarán sujetos a incertidumbres, y la instrumentación seguirá siendo un elemento importante para la estabilidad de las estructuras construidas.
- Es necesaria la llegada de los sistemas automáticos de procesamiento de datos, es cierto que estos sistemas y procedimientos tienen muchas ventajas, sin embargo, debemos ser conscientes de sus limitaciones, ningún sistema automático puede sustituir el juicio del ingeniero. Debemos tomar todas las ventajas posibles de esta nueva tecnología, pero nunca hay que olvidar que el juicio juega un papel importante y primordial a menudo en la práctica de la ingeniería geotécnica.
- El aumento de los costos laborales en muchos países ha reducido la disponibilidad de personal competente. Esta tendencia, por supuesto, fomenta el uso de sistemas y procedimientos automáticos, sin embargo, reduce el número de personal disponible para ejercer un juicio de ingeniería.
- Hay una tendencia hacia el uso de nuevos métodos de construcción. ejemplos de innovaciones en el pasado reciente, incluidos los muros en tierra reforzada, los soportes laterales, y los suelos modificados o estabilizados. Estas innovaciones a menudo requieren la verificación de campo antes de que se acepte ampliamente, y la instrumentación geotécnica siempre jugará un papel importante.

- Muchos avances en ingeniería geotécnica son el resultado de las mediciones de campo. A menudo, estas mediciones se han realizado para una de las razones específicas de un proyecto, y el avance general del conocimiento ha sido un sub-producto. Sin embargo, varias pruebas prácticas notables de investigación se han hecho para comprobar y extender teorías existentes para el comportamiento del suelo y de la roca y, por tanto proporcionar una base para extender el estado de la técnica para el diseño de construcción geotécnica
- Si se produce una situación de crisis, sus características deben ser definidas de modo que las medidas correctivas se pueden planificar y poner en práctica. La Instrumentación a menudo desempeña un papel en la definición de estas características. Por ejemplo, las mediciones de la posición del nivel freático y la fluctuación de este, junto con la superficie de falla, son necesarios para definir la naturaleza de un deslizamiento de tierra.
- La seguridad es una consideración esencial en todos los proyectos de construcción. Los programas de instrumentación pueden proporcionar las garantías necesarias, mediante indicadores de comportamiento con respecto al umbral de los límites y proporcionar una advertencia de los posibles efectos adversos en la construcción. Por ejemplo, a menudo hay una necesidad de controlar el posible efecto de las construcciones en estructuras adyacentes, el control de la deformación alrededor de una excavación como un medio de seguridad para garantizar el soporte lateral. El uso de instrumentos para el control de la seguridad es rutinario durante las excavaciones de los edificios, túneles de metro y carreteras en zonas urbanas.

- La instrumentación se utiliza para proporcionar aportes en el diseño inicial de una construcción o para el diseño de tratamientos en construcciones existentes.
- La Instrumentación a menudo desempeña un papel muy importante en la definición de las condiciones del lugar durante la fase de diseño de un proyecto. Por ejemplo, las presiones y las fluctuaciones del nivel freático deben ser determinadas para fines de diseño, lo que requiere el uso de piezómetros.

BIBLIOGRAFIA

- Navarro. S. (2008). *Estabilidad de taludes*. Recuperado el 18 de abril 2012, de <http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/estabilidad-de-taludes.pdf>.
- Bautista Sánchez Cinthia, Hernández Rangel Leslie Gisell, Ortiz Calderón Iris Marlene. (2012). *Exploración y comportamientos de suelo, cortes terraplenes y taludes*. (Tuxpan, México). <http://es.scribd.com/doc/91534400/Cortes-Terraplenes-y-Taludes-Word>.
- Véliz, Carolina (2009). *Estabilización de taludes con pantallas de concreto lanzado con malla electrosoldada y anclajes de concreto reforzado*. Guatemala. <http://es.scribd.com/doc/78553503/6/Figura-14-Corte-de-talud-por-etapas>
- Solórzano, Aníbal. (2005). *Rehabilitación, mejoramiento y apertura de tramo carretero que conduce de la ruta nacional 7W a las comunidades de Chibuc y Turbalyá en el municipio de Sacapulas, departamento de Quiché*. Guatemala. <http://es.scribd.com/doc/52299878/21/Corte-y-relleno>.
- Riveros Anggi, Rodríguez Mirleé y Torres Freidys. (2010). *Terraplenes*. Mérida: universidad de los Andes, Escuela de ingeniería geológica. <http://es.scribd.com/doc/55419909/Terraplenes>,
- Dunicliff, John. (1993). *Geotechnical Instrumentation for monotorig field performance*. John Wiley & Sons, Inc.
- *Práctica recomendada para la ejecución y control de calidad del movimiento de tierras*. <http://es.scribd.com/doc/24569116/Movimiento-de-tierras>.

- *Mantenimiento participativo de caminos rurales.* (2001).
<http://es.scribd.com/doc/49658007/23/Seccion-en-corte>
- *Capítulo 4. Estudio hidrológico y diseño hidráulico.*
<http://biblio2.ugb.edu.sv/bvirtual/7897/capitulo4.pdf>
- Mijailov, L. 1985. *Hidrogeología.* Editorial Mir. Moscú, Rusia. 285 p.
- Art. Hidrogeología. <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidrogeolog%C3%ADa>
- Das, Braja. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.* California States University, Sacramento. Capítulo 1 pag 1-2.
- NORMA INVIAS 210-07.-234-07
- Bañón, Luis. *Capítulo 2. Construcción de terraplenes.*
http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010202.pdf
- NORMA INVIAS ARTÍCULO 210 – 07 *Excavación de la explanación, canales y préstamos.*
- *Proyectos y apuntes teórico prácticos de ingeniería civil.* (2011).
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/03/suelos-ensayo-triaxial-consolidado.html>.
- *Modelos de análisis de estabilidad.*
<http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/clase-4/tema04-En-proceso.pdf>
- <http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/123456789/1827/1/ESTABILIDADEDETALUDESENCARRETERAS.pdf>
- Corominas, J. *Tipos de roturas en Laderas y taludes.*
<http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>

- *Movimientos de ladera.*
[http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3 MOVIMIENTOS.pdf](http://www.ugr.es/~ren03366/DEA/TEMAS/memoria/3_MOVIMIENTOS.pdf)
- Silva, Gustavo. *Avalanchas generadas por lluvias, sismos y erupciones volcánicas.* <http://www.geocities.com/gsilvam/lahares.htm>
- *Inestabilidad de laderas: Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración.* (2005). Managua, Nicaragua
<http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/proyectos/metalarn/deslizamiento.pdf>
- Copons, Ramon y Tallada, Anna. (2009). *Movimientos de ladera.*
<http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199931/267374>
- Conrado, Carlos A., Villafañe, German A. y Ríos, Luis C. X jornadas geotécnicas de la ingeniería Colombiana. Resistencia de los suelos a la licuación: comentarios a la norma NSR-98. <http://es.scribd.com/doc/2568602/resistencia-de-los-suelos-a-la-licuacioncolombia>
- *Manual de estimación del riesgo ante movimientos en masa en laderas. Cuaderno técnico No.3.* (2011). Lima Perú.
<http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1744/doc1744-1a.pdf>
- *Art. Los deslizamientos.*
<http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/fopae/remocion/queHacer.pdf>.
- Westen, Cees. *Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas.* International institute for aerospace survey and earth sciences.
- *Art. Deslizamientos de tierra.*<http://mirian-yumbillo.blogspot.com/2010/04/causas-de-los-deslizamientos.html>

- Obando, Tupak E. (2009). *Sistemas de monitoreo y control de la estabilidad de taludes rocosos y suelos. Recursos Mineros de la universidad internacional de Andalucía.* <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/estabilidad-taludes-roca-y-suelos/estabilidad-taludes-roca-y-suelos.pdf>
- *Instrumentación orientada a registrar efectos y/o causas de la inestabilidad de laderas.* <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-2.pdf>.
- Ayala, Carcedo y Andreu, Posee. (2006). Manual de ingeniería de taludes. España. <http://books.google.com.co/books?id=0Riz-5qZERcC&pg=PA392&lpg=PA392&dq=extensometros+superficiales+auscultacion+de+taludes&source=bl&ots=PgQLC3uFIO&sig=aLEYtSzFt8qJ5MaajzgGR2P5rpg&hl=es&sa=X&ei=caMBUIjyNaPI2gWwpMjKCw&ved=0CFsQ6AEwAg#v=onepage&q=extensometros%20superficiales%20auscultacion%20de%20taludes&f=false>
- Suarez, Jaime. *Deslizamiento: Análisis geotécnico. Capítulo 12: Instrumentación y monitoreo.* <http://erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-an%C3%A1lisis-geot%C3%A9cnico.htm>
- *Monitoreo de la presión del agua en al subsuelo.* <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15771/doc15771-3b.pdf>.
- Proyecto de redes de transporte. Diapositiva 105 01/08/2012 http://documentos.dicym.uson.mx/resp2008/rafabojo/VT/VT20082_C4_P1_archivos/frame.htm.
- Garber, Nicholas J. y Lester A.(2005). *Ingeniería de tránsito y Carreteras.* tercera edición. Pag. 891 2005

- *Normas de diseño geométrico. Capítulo 3: sección transversal. Sección 302, elementos.* http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/DG-2001/volumen1/cap3/seccion302.htm.
- *Suelos Residuales.* (2012). <http://dc96.4shared.com/doc/Uu0FsD6h/preview.html>.
- *Auscultación de taludes, instrumentación.* <http://www.galeon.com/geomecanica/cap15.pdf>