

IV INSTRUMENTACIÓN ORIENTADA A REGISTRAR EFECTOS Y/O CAUSAS DE INESTABILIDAD DE LADERAS

4.1 SOBRE LA NECESIDAD DEL MONITOREO E INSPECCIÓN

Dada la problemática que se ha descrito en capítulos anteriores, es necesario poder reconocer los deslizamientos potenciales en una etapa temprana, a través de investigaciones e inspecciones periódicas y así prevenir posibles desastres. Diversos instrumentos se han desarrollado para detectar los movimientos masivos de laderas, como los que se abordan en el siguiente capítulo, y de la presión en el agua del subsuelo, que se tratan en el capítulo 6. La instrumentación de laderas ha tenido mejoras recientes, y la aplicación creciente de la tecnología computacional ha podido desarrollar sistemas automáticos de medición y monitoreo de instrumentos. En algunos países han puesto en marcha estos sistemas avanzados, en los que los datos son procesados para predecir la ocurrencia de fallas, y están ligados a una alarma o sistema de precaución. Estos aspectos se abordan en el capítulo 8. La inspección de las laderas es el trabajo fundamental para la cabal comprensión del estado de los taludes, sobre todo en áreas con antecedentes de inestabilidades. La detección visual de la deformación de la ladera debe ser la principal preocupación, particularmente durante o después de condiciones climáticas inusuales, tales como lluvias intensas o un sismo. Para evaluar la potencialidad a los deslizamientos de una zona deben seguirse las acciones descritas en el inciso 3.1 de este documento. Deben ser puntos de inspección las manifestaciones de deformación de los taludes tales como agrietamientos, depresiones, expansiones, rotura de pavimentos o protecciones de talud. Merece especial atención el flujo de aguas en laderas; es importante inspeccionar las corrientes de agua en el hombro y al pie, los afloramientos y los sistemas de drenaje, notando su gasto y su variación. Deberá observarse el crecimiento de vegetación en la ladera, aparición de porciones sueltas y fragmentos rocosos caídos. Cuando se detecten síntomas de una falla de gran escala, es pertinente considerar el monitoreo del área usando instrumentos, así como tomar medidas de emergencia, en caso de considerarse necesario.

4.2 ENFOQUE FENOMENOLÓGICO Y ENFOQUE EXPLICATIVO

La instrumentación resulta una herramienta básica en la actividad geotécnica. Para el tema que aquí se trata, su objetivo más importante es el de monitorear el comportamiento de una ladera, a fin de juzgar su seguridad global. Además, permite avanzar en el estado actual del conocimiento, propiciando así mejores soluciones técnicas a las inestabilidades de laderas y a su prevención.

Para que a partir de la instrumentación se conozca realmente el comportamiento de una ladera u otra obra, y se deriven lecciones valiosas, es necesario que se coloquen instrumentos que midan no sólo los efectos, tales como desplazamientos, sino también las causas, a través de la medición de las variables internas o causales de dicho comportamiento. Cuando sólo se recurre a la medición de los efectos, tales como las mediciones topográficas, se adopta un enfoque meramente fenomenológico; es claro que con este planteamiento las respuestas serán parciales al no establecerse la relación entre las causas y los efectos (Dunnicliff, 1988). Entonces, una instrumentación completa requiere no sólo de medios para medir deformaciones o sonidos provocados por los deslizamientos o flujos, sino también registrar las variables causales, tales como las presiones de poro y las aceleraciones en el subsuelo; en este caso se estaría adoptando un enfoque explicativo. Debe reconocerse sin embargo, que para los fines de Protección Civil, el objetivo no es necesariamente explicar o caracterizar los fenómenos naturales, sino más bien aminorar los efectos, para lo que el énfasis estará sólo en la medición y registro de éstos; así, la mayor de las veces únicamente se justificarían enfoques fenomenológicos.

4.3 REQUERIMIENTOS DE UNA INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

La instrumentación de una obra geotécnica requiere una planeación cuidadosa (Hanna, 1973; Kovan y Amstad, 1984), siempre enfocada a dar respuestas específicas a aspectos o preguntas específicas acerca de las variables explicativas y de sus efectos. De hecho, Peck (1969 y 1984) distingue a estas acciones como la regla simple y clave para una instrumentación exitosa. La identificación de tales cuestionamientos es por tanto un punto de partida ineludible para establecer las características de la instrumentación por colocar; esto es, si no se sabe qué y dónde medir, incluso sabiendo cómo, lo más probable es que efectivamente no se mida lo que debería medirse. Adicionalmente, la instrumentación debe adecuarse a las condiciones del sitio, al periodo de medición previsto, al rango de valores esperados, y a la precisión requerida en las mediciones. Otro lineamiento muy claro que debe respetarse es que los instrumentos más convenientes sean los más simples; esto es, que si es posible, deberán seleccionarse equipos o transductores mecánicos en vez de los eléctricos, por ejemplo; cuanto más complejos, su posibilidad de falla aumenta. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que esos sensores son de costo elevado, y que los recursos económicos son siempre restringidos; e incluso, usualmente los recursos humanos disponibles se presentan en proporción inversa al grado de sofisticación de los instrumentos.

La planeación de una instrumentación requiere conocimiento, buen juicio, comprensión de los problemas geotécnicos, paciencia e imaginación. Exige realizar un diagnóstico de cómo funciona una ladera y de cómo eventualmente pudiera fallar. Sólo así será posible seleccionar convenientemente las características y el tipo de instrumentos y definir en qué posición ubicarlos. En ello deberá también respetarse un principio básico de toda medición, en el sentido de buscar que la presencia del propio sensor no altere sensiblemente las variables que está midiendo; esto es, que el transductor no genere una discontinuidad o que se convierta en un agente perturbador dentro de una masa de suelo.

Un aspecto que es esencial para llevar a cabo un proyecto de instrumentación, es la participación comprometida y entusiasta de un grupo reducido de profesionales clave. Un proyecto de esta naturaleza resulta muy beneficiado si un grupo pequeño de ingenieros se involucra en todas las etapas del mismo, desde la planeación y el desarrollo del sistema hasta el análisis y la interpretación de los datos y su reporte, pasando por su calibración, integración, colocación, mantenimiento y monitoreo periódico. La atención a un sinnúmero de detalles durante el diseño y la instalación de los instrumentos es vital, esencial e indispensable.

V MONITOREO DE LOS MOVIMIENTOS DE MASAS INESTABLES

5.1 MEDICIONES TOPOGRÁFICAS

Los métodos basados en la medición de referencias topográficas permiten conocer con exactitud la velocidad y la magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Estos métodos permiten monitorear una 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 nos permiten dar seguimiento a la formación y progresión de grietas que se generan en los hombros de laderas o taludes, y que comúnmente anteceden a las fallas.

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 del área en movimiento, Fig. 5.1. Es recomendable que estos ejes se establezcan en las direcciones longitudinal (uno al menos por el posible eje del movimiento) y transversal (de ser posible varias líneas). Los puntos testigos del movimiento quedan referidos a bancos fijos (en planta y elevación) localizados en los extremos de esos ejes, fuera del área potencialmente inestable. La ubicación de estos ejes y 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 un 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 permitiría detectar desplazamientos laterales al milímetro. A su vez, la elevación de los puntos testigos del movimiento se establece mediante una nivelación o trabajo de altimetría, para lo que se usaría un nivel o el mismo tránsito, nuevamente referidos a 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 basar un alertamiento, e incluso una alarma generalizada para evacuar alguna zona poblada a la que impactaría esa inestabilidad; más adelante se proporcionan valores de velocidad de movimiento que podrían dar pautas para esos niveles de alertamiento.

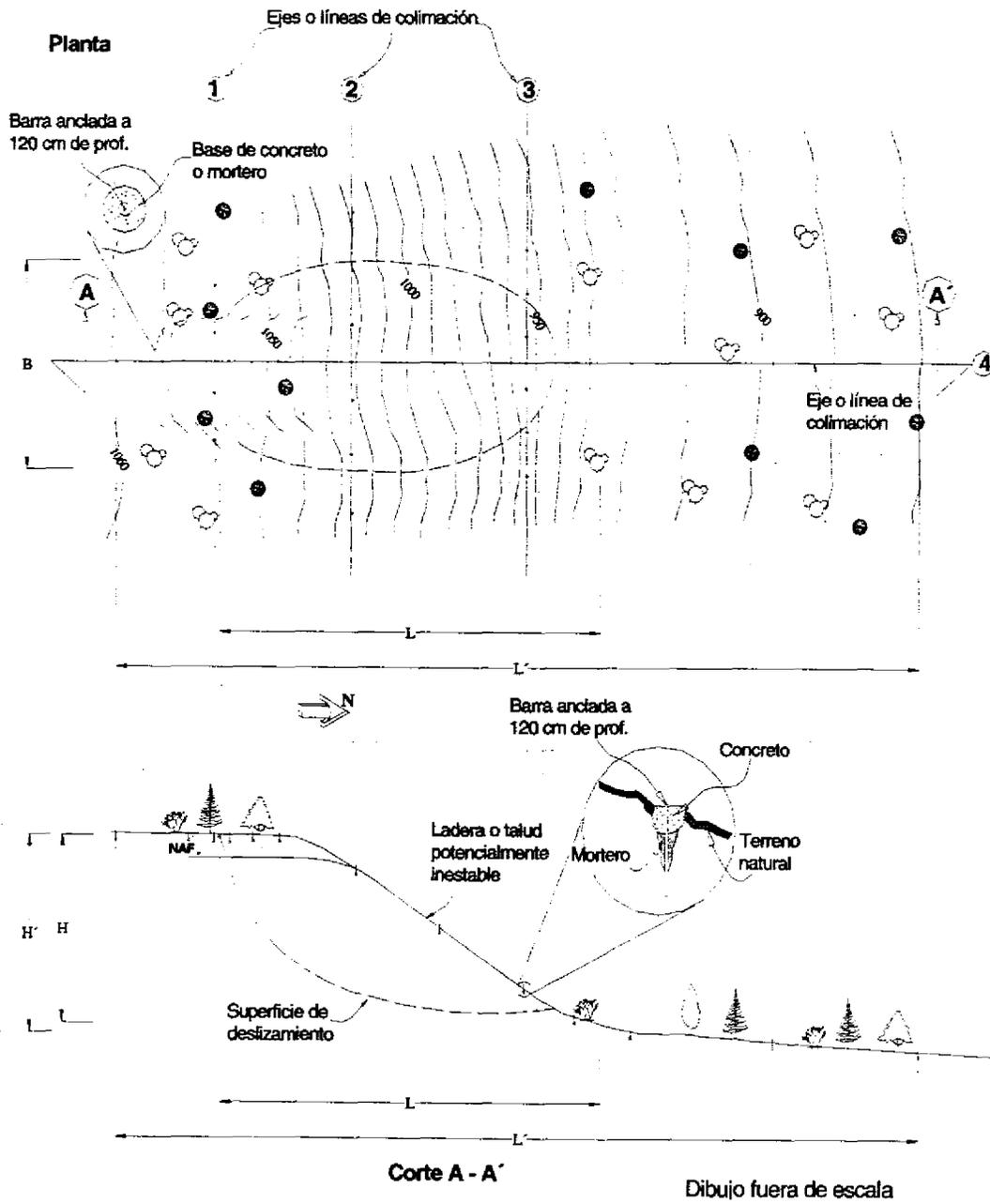


Fig. 5.1 Monitoreo topográfico de referencias superficiales mediante nivelación y colimación

Actualmente existen dispositivos tecnológicamente avanzados que permiten realizar mediciones topográficas con gran exactitud y a costos accesibles. Estos levantamientos requieren de especialistas en topografía, por lo que a nivel estatal de Protección Civil se debería contar con al menos una brigada de topografía, encargada de realizar las mediciones topográficas periódicas antes descritas. Habrá municipios con zonas con problemas de inestabilidad de laderas, que requerirían a esos especialistas, ya sea de su propio personal o de una empresa. El éxito del monitoreo depende en gran medida de la rapidez con que se logren establecer esas líneas de medición, una vez que una ladera exhiba los primeros síntomas de inestabilidad; ello exige una administración ágil y comprometida.

5.2 MONITOREO DEL AGRIETAMIENTO SUPERFICIAL

Generalmente los métodos topográficos son adecuados para el monitoreo superficial y generalizado del movimiento de una masa térrea. Sin embargo, cuando se requieren mediciones locales, tales como para conocer la evolución de un agrietamiento, se puede recurrir a éstas directamente, o bien con métodos mecánicos o eléctricos de instrumentación geotécnica, como los que se describen en los subincisos siguientes.

5.2.1 Uso de cinta y nivel

Este es quizás una de las técnicas de monitoreo más sencillas y de bajo costo que se utilizan para medir la magnitud de los movimientos locales y superficiales de una masa de suelo o roca; particularmente se utiliza para dar seguimiento con el tiempo a la abertura y desnivel que experimentan grietas que se generan en los hombros de laderas y/o taludes antes de su falla. Las grietas principales se orientan en dirección perpendicular al movimiento del área inestable, por lo que la atención de la medición debe centrarse en los componentes horizontal y vertical del desplazamiento, en dirección perpendicular a las grietas.

El método consiste en colocar puntos de referencia, de preferencia barras de metal ancladas en el terreno, en los que se pueda medir su separación, utilizando regletas graduadas o flexómetros, Fig. 5.2. La definición del componente vertical puede ayudarse con el uso de un nivel de albañil, o mediante un nivel de manguera. Así pues, las mediciones periódicas de la separación vertical y horizontal de los puntos de referencia, se comparan con la primera lectura, lo que permitirá conocer el desplazamiento progresivo de las masas en movimiento.

Las mediciones también se pueden realizar de manera directa midiendo la distancia entre los puntos de referencia con un flexómetro. La medición directa de la separación que sufren los puntos de referencia, a través del tiempo, proporciona los elementos suficientes para establecer si una ladera se está moviendo; y con ello establecer la potencialidad de un deslizamiento. De la misma manera, resulta factible medir directamente el desnivel y la separación entre las grietas, siempre y cuando la medición se realice en los mismos puntos de referencia, para conocer la evolución del movimiento de la ladera.

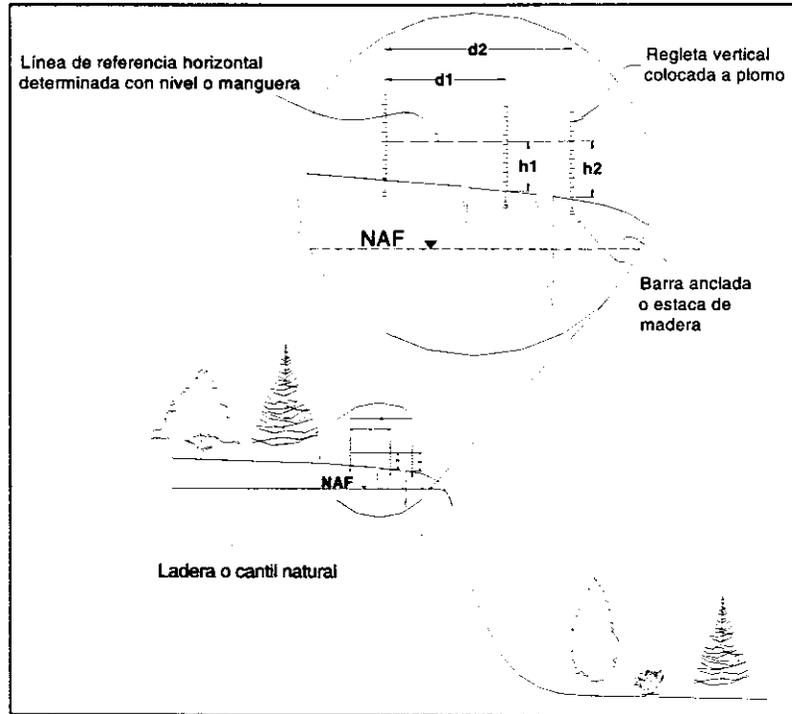


Fig. 5.2 Medición de la separación y desnivel entre masas en movimiento

Cabe señalar que las referencias superficiales deben colocarse de tal manera que queden firmemente ancladas al terreno natural, a una profundidad de 1 a 1.2 m, Fig. 5.3; ello para que los cambios estacionales de la capa más superficial no influyan en las mediciones, y para que las referencias no sean fácilmente movidas o robadas. Dependiendo del material donde se vayan a fijar, cabría utilizar un mortero de cemento para fijarlas. Se recomienda colocar puntos de referencia redundantes que permitan comparar resultados entre sí, y tener certeza sobre el movimiento real del terreno.

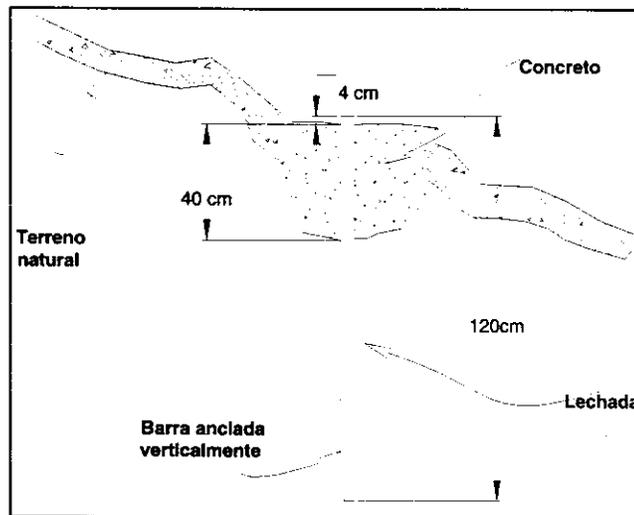


Fig. 5.3 Banco de referencia superficial

5.2.2 Uso de regletas deslizantes

El método consiste en colocar dos regletas de plástico transparentes, paralelas entre sí, fijadas a dos postes anclados a cada lado de una grieta, Fig. 5.4; de esta manera se puede definir la evolución de su abertura en la superficie, al medir los componentes vertical y horizontal del desplazamiento relativo. En una de las regletas se traza una malla reticular de 20 x 20 cm, subdividida milimétricamente si así se desea para mejorar la precisión de las mediciones. En la otra regleta se traza un cursor que se hace coincidir con el centro o cruce de los ejes principales de la malla, durante su colocación. Los movimientos subsiguientes del cursor indican el desplazamiento relativo del terreno con respecto a una lectura previa. El costo de instalación de estas regletas es relativamente bajo, y su operación es bastante sencilla por lo que se estima que no requiere personal especializado para la toma de lecturas.

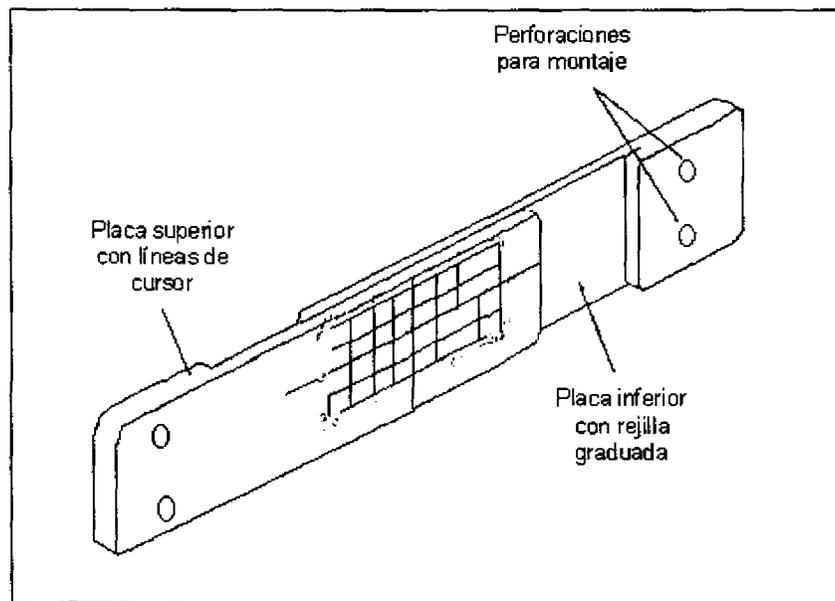


Fig. 5.4 Uso de regletas deslizantes para el monitoreo de grietas superficiales (Dunnicliff, 1993)

5.2.3 Uso de dispositivos basados en alambres y poleas

El monitoreo de la separación y progreso de grietas puede resultar bastante útil para definir si una ladera o talud se encuentra en un estado de falla inminente. Una técnica alternativa a los procedimientos antes descritos, consiste en colocar dispositivos basados en alambres y poleas que se pueden integrar a un sistema de alarma, el cual es activado cuando se alcanza un desplazamiento previamente establecido en una regleta graduada, Fig. 5.5. Resulta particularmente útil cuando la zona por monitorear es de difícil acceso, o se encuentra en zonas francamente peligrosas, y donde se requiere monitorear al avance de grietas de manera permanente.

Sólo se debe cuidar que el material con el que se construya el dispositivo sea resistente a las condiciones ambientales de la zona; y su mantenimiento debe estar orientado a mantener en óptimas condiciones el sistema de disparo y el sistema de alarma. Cabe mencionar que el esquema de la Fig. 5.5 sólo tiene un carácter explicativo. Actualmente existen técnicas muy sofisticadas de comunicación a distancia que pueden integrarse a este sistema de monitoreo.

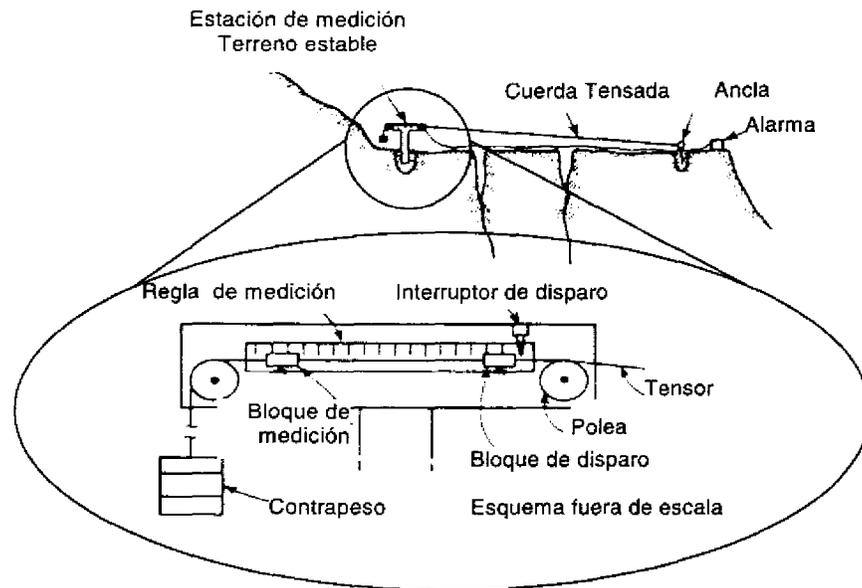


Fig. 5.5 Monitoreo de grietas en el hombro de laderas inestables mediante dispositivos basados en regletas, alambres y poleas (Dunnicliff, 1993)

5.2.4 Uso de dispositivos eléctricos y mecánicos

Una técnica refinada para el monitoreo superficial de grietas consiste en colocar dispositivos electromecánicos, que permitan medir los desplazamientos relativos entre masas en 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 la Fig. 5.6 se muestra una vista de la colocación de un extensómetro eléctrico, el cual se fija en un extremo a la masa estable, y en el otro extremo se coloca una extensión que se une a una barra anclada dentro de la masa en movimiento. De manera similar, en la Fig. 5.7 se presenta la colocación de un extensómetro, en el cual la medición se realiza a través de un deformímetro que es colocado y unido coaxialmente a una cuerda tensada, la cual a su vez se fija a la barra anclada del otro lado del agrietamiento.

La principal ventaja de estos dispositivos es que pueden incorporarse a un sistema de comunicación a distancia, con lo que pueden mantener comunicación continua con un sistema de registro alojado en una caseta de control u oficina remota.

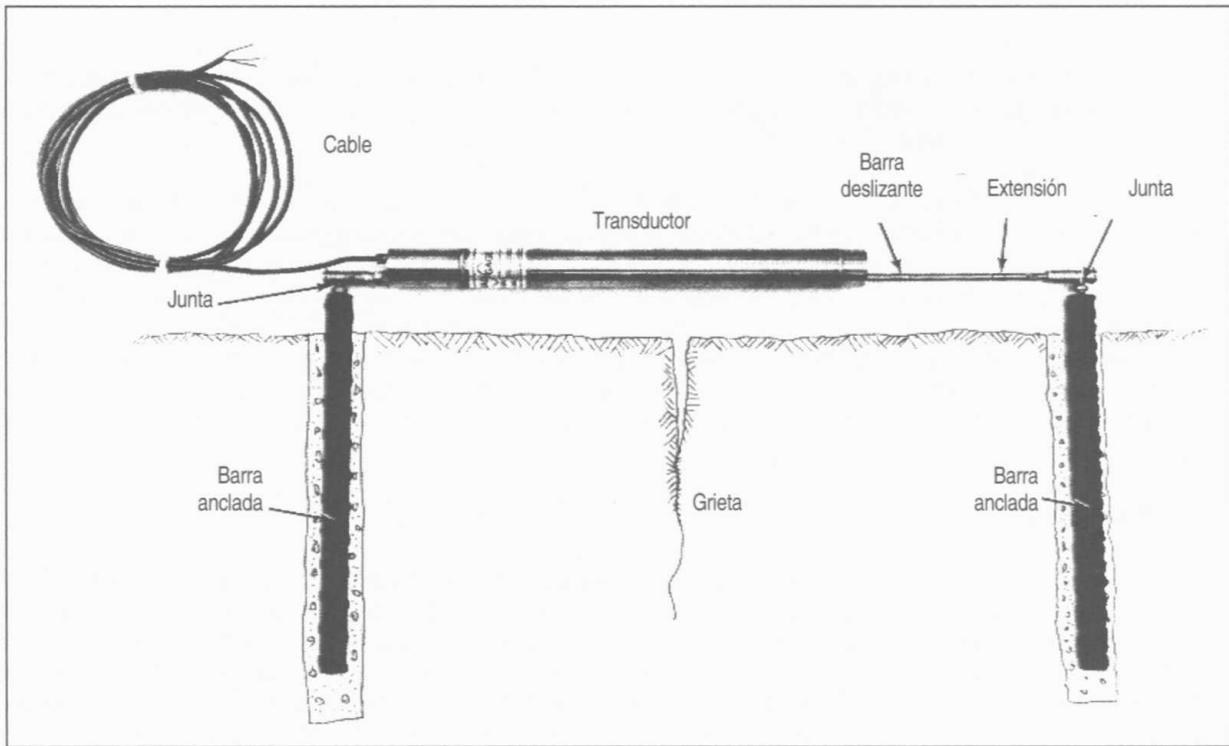


Fig. 5.6 Extensómetro eléctrico para el monitoreo de grietas (Dunnicliff, 1993)

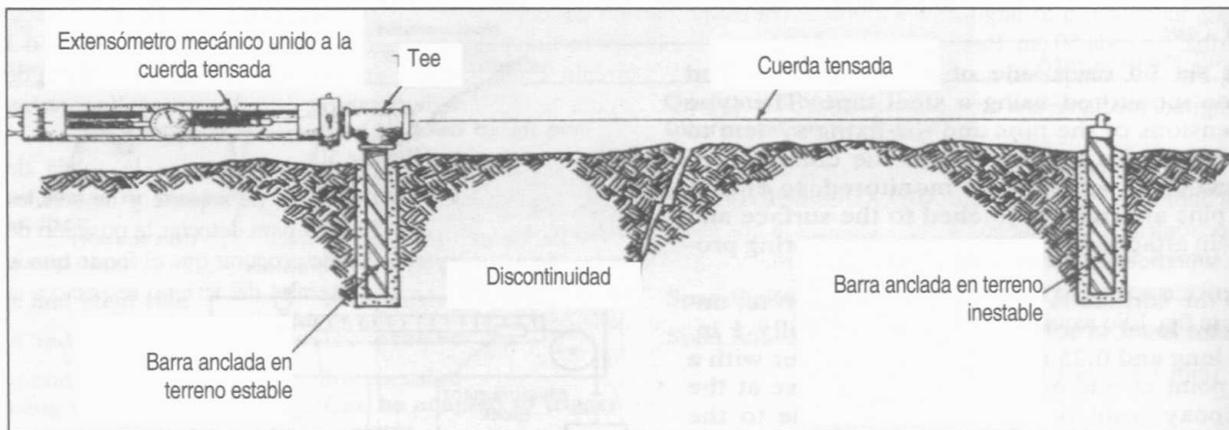


Fig. 5.7 Extensómetro electromecánico para el monitoreo de grietas (Dunnicliff, 1993)

5.3 MONITOREO DE LOS DESPLAZAMIENTOS A PROFUNDIDAD

El monitoreo de las deformaciones a profundidad en laderas inestables permite conocer, entre otros aspectos, la profundidad de la potencial superficie de falla de una ladera o talud, definida por el movimiento relativo de la masa deslizante con respecto a la masa estable remanente.

Para conocer el desplazamiento relativo a profundidad entre dos masas en movimiento, se requiere de la perforación de un pozo o sondeo, a lo largo del cual se instalan tubos que permiten guiar en su interior con cierta dirección a una sonda mecánica o eléctrica, la cual detecta las inclinaciones entre sus apoyos en un plano, respecto a un eje vertical. La profundidad de los puntos de medición se determina al acompañar la sonda con una cinta métrica, con la que se registra ésta respecto a la boca de la perforación. El movimiento lateral de los tubos testigos a través del tiempo, se determina tomando lecturas periódicas que pueden ser mensuales, semanales o diarias, si así lo requiere el problema. Al costo de la perforación se añade el de estos equipos que es relativamente alto, ya que requiere una sonda eléctrica hermética dotada con una longitud de cable suficiente, además de los tubos especiales que se describen más adelante.

5.3.1 Inclinómetro

Los inclinómetros se pueden utilizar prácticamente en cualquier tipo de terreno, desde suelos duros o firmes, hasta suelos blandos. Su utilización permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical. Esta técnica requiere la perforación de un pozo de 4" de diámetro, a lo largo del cual se instalan tubos de inclinómetro de 3" de diámetro, los cuales cuentan con cuatro guías por su interior diametralmente opuestas, y perpendiculares entre sí. Al introducir una sonda electrónicamente instrumentada, es posible registrar las inclinaciones a diferentes profundidades en el plano vertical por donde pasan las guías, tal como se muestra en la Fig. 5.8. Al interpretar las inclinaciones que se registran entre los apoyos de la sonda, los que conservan una separación constante, es posible definir la configuración que adquiere ese tubo a esa profundidad. Las diferencias entre las configuraciones que se registren en posteriores mediciones respecto a la inicial (usualmente no vertical), nos proporciona el desplazamiento lateral a la fecha, en el plano y a la profundidad correspondientes.

Para la toma de lecturas la sonda del inclinómetro se introduce en dos ocasiones, una por cada par de guías. En cada inmersión a lo largo de los tubos se realiza un barrido de lecturas que generalmente se hacen de abajo hacia arriba, y a cada 50 cm. En la mayoría de los casos los tubos de inclinómetro se fabrican de PVC y en tramos de 1.5 ó 3 m, Fig. 5.9, aunque en nuestro país también se usan de aluminio. Cada tramo se une con un cople de 20 a 30 cm de longitud, mediante una conexión rápida, o bien con remaches que se efectúan en el campo.

La profundidad a la que se registra una inclinación se determina haciendo acompañar a la sonda de inclinómetro con una cinta métrica metálica, o bien marcando esas distancias en el cable de soporte y de señales electrónicas. Desde luego, la profundidad a la que se instalen los tubos, debe ser suficiente para detectar la posición de la superficie potencial de falla. Durante la instalación de los tubos de inclinómetro se debe procurar que el fondo quede perfectamente fijo en la masa de suelo, lo que permitirá referenciar los movimientos laterales del terreno respecto a la base fija. Ello requiere a su vez que el terreno en el que se fije la base de los tubos sea estable.

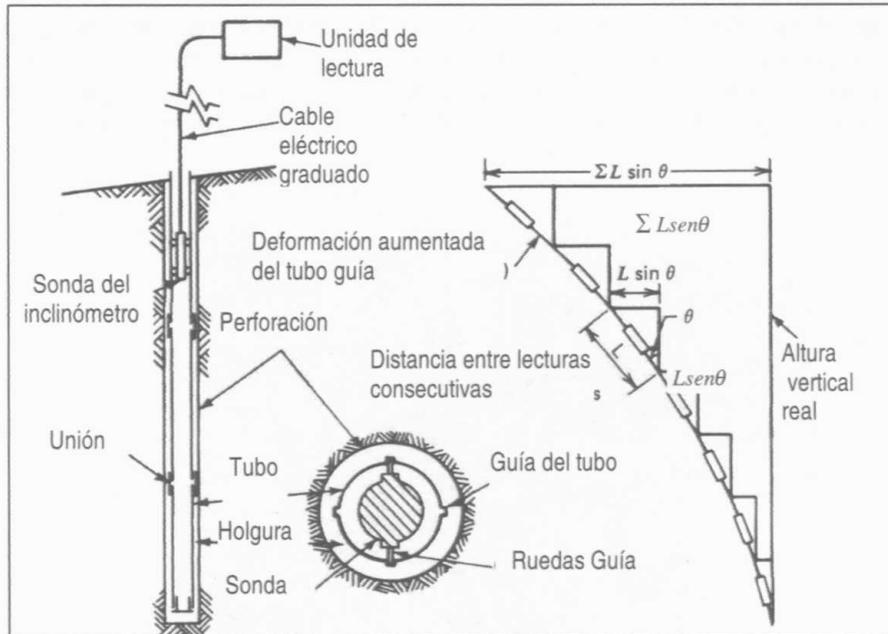


Fig. 5.8 Esquema de instalación e interpretación de mediciones con sonda de inclinómetro (Dunncliff, 1993)

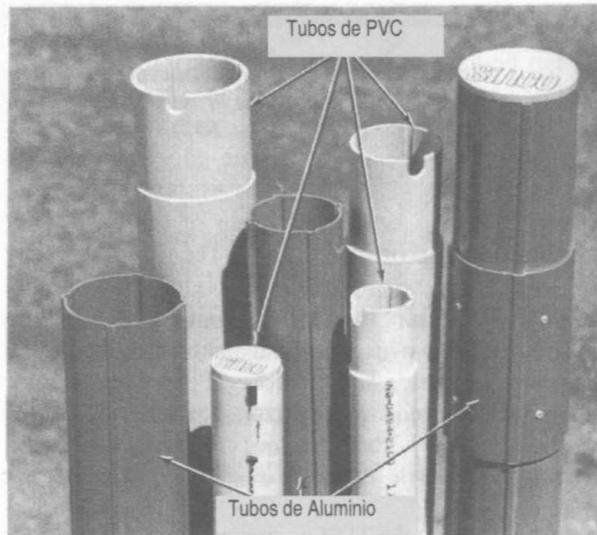


Fig. 5.9 Tubos de inclinómetro (Dunncliff, 1993)

La sonda de inclinómetro en sí está constituida ya sea por un péndulo con pequeños extensómetros eléctricos (*strain gages*) pegados en su superficie; o bien, por un sensor de aceleración, o servo-acelerómetro, alojados en su interior. La sonda se construye usualmente en aluminio, y debe ser totalmente hermética ya que debe soportar la presión de agua del subsuelo. Los transductores o sensores de la sonda están diseñados especialmente para detectar la inclinación de la sonda, dentro de un intervalo, con respecto a un eje vertical; por ello siempre es recomendable que la

perforación y la colocación de los tubos de inclinómetro sean lo más cercano a la vertical. La sonda de inclinómetro cuenta con un sistema de medición digital en superficie, que consiste de un registrador portátil interconectado con el sensor a través de un cable eléctrico de uso rudo. El cable generalmente es fabricado con marcas exteriores a cada 50 cm que ayudan a conocer la profundidad del sensor en cada momento. Existen en el mercado diferentes equipos con intervalos diversos de medición de inclinación, y de precisión; en la Fig. 5.10 se presenta una vista de todo el conjunto de uno de ellos.

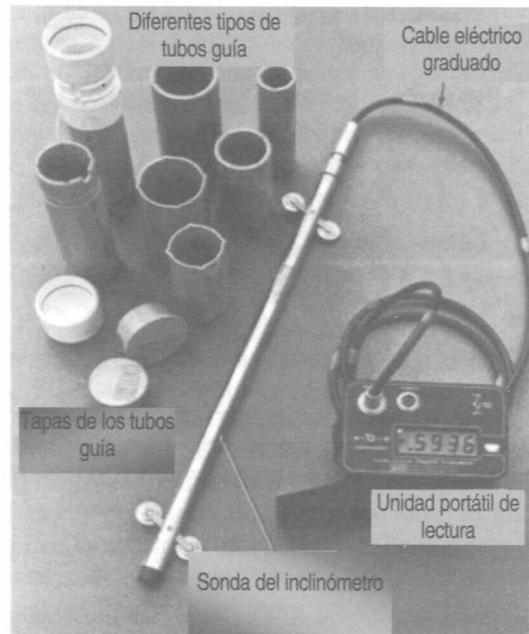


Fig. 5.10 Vista de un inclinómetro y su equipo de medición en superficie (Dunnicliff, 1993)

5.3.2 Dispositivo TDR de reflectometría

El TDR (por las siglas en inglés: 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 rellenando 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, el TDR permite detectar con precisión la profundidad de los movimientos laterales del terreno respecto a un eje vertical.

El principio básico de funcionamiento del TDR es similar al que se muestra en el esquema de la Fig. 5.11. Con el dispositivo marcado con la letra (a) se envía un pulso eléctrico a través del cable coaxial. Cuando el pulso encuentra un doblez o una discontinuidad en el cable, la señal es reflejada y graficada en la pantalla del dispositivo. De esta manera en la gráfica se muestra un pico que indica la profundidad de la discontinuidad o del doblez del cable coaxial. Este procedimiento resulta muy sencillo ya que sólo toma algunos minutos en hacer la conexión y el disparo, para que la graficación de resultados se muestre casi instantáneamente.

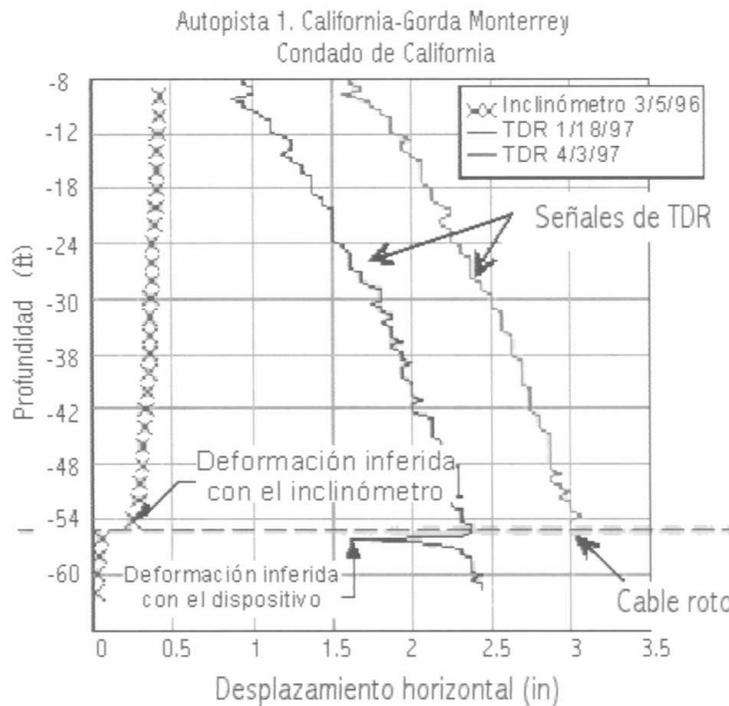
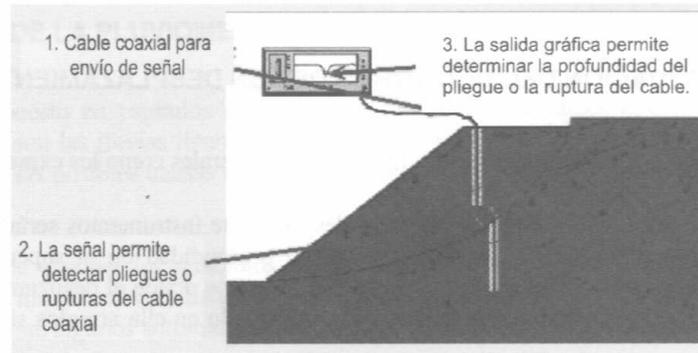


Fig. 5.11 Principio de funcionamiento del dispositivo TDR de reflectometría

La magnitud relativa del movimiento y su velocidad, así como la determinación de la profundidad de la zona donde ocurrió el doblez o la discontinuidad del cable, se pueden determinar de manera precisa con este dispositivo, independientemente de la longitud del cable, ya que el método permite monitorear distancias de hasta 15 km de longitud, según el fabricante. Entre sus virtudes más importantes destaca la posibilidad que tiene para detectar los movimientos laterales de la potencial superficie de falla, en el instante mismo en que se realizan las mediciones en

superficie. Tiene la posibilidad de implementarse a un sistema de comunicación a distancia para registrar las mediciones de manera remota. Por otra parte, la sencillez del método permite instalar varios de ellos en un área establecida, y monitorear todos los dispositivos desde una caseta donde se hacen concurrir todos los cables. Hasta donde conocen los autores, este procedimiento todavía no ha sido utilizado en México. A decir de sus fabricantes, el equipo es de relativo bajo costo.

5.4 CONTROL Y EVALUACIÓN DEL MONITOREO DE LOS DESPLAZAMIENTOS

El monitoreo deberá ejecutarse siguiendo ciertos lineamientos generales como los expresados a continuación:

- De considerarse necesario, las mediciones superficiales mediante instrumentos serían con extensómetros en la cima y en el pie de la ladera, y la definición de la profundidad de la superficie de falla mediante inclinómetro, en la parte central del eje longitudinal. En los casos donde el deslizamiento exceda los 150 m de ancho, se requerirá una segunda línea de medición, colocando en ella arreglos similares a los de aquella línea principal.
- La frecuencia de medición será una vez por semana durante un periodo ordinario, dos a tres veces por semana en una etapa precautoria, y mediciones diarias ante condición de falla inminente.
- La medición debe generalmente continuarse por alrededor de un año, una vez que la actividad de un deslizamiento se detenga. Debe reconfirmarse esta situación, para detectar posibles reactivación durante y después de la temporada de lluvias y huracanes.
- Los resultados del monitoreo son utilizados para evaluar el tamaño y la etapa del movimiento masivo que eventualmente conduciría a su falla. Los movimientos de los deslizamientos tienen un proceso que va desde su etapa temprana, donde se observa acumulación de movimiento, la etapa secundaria cuando se aprecian grietas y movimiento constante, y la etapa final cuando crecen las grietas en abertura y número, lo que conduciría claramente a la falla. Las medidas a tomar en cada etapa son también diferentes, de monitoreo creciente en la etapa temprana, hasta el cierre y evacuación de las zonas de alto riesgo.