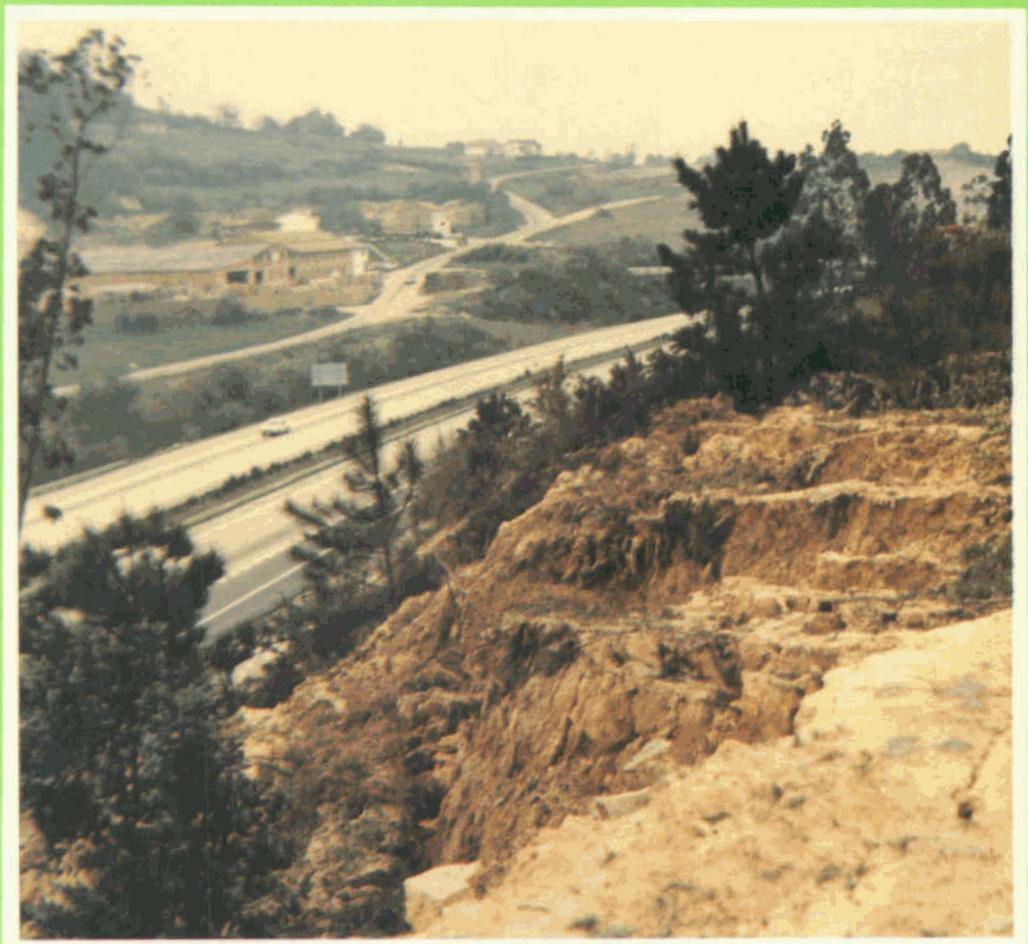


Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

**ELABORACION DE DIRECTRICES DE RIESGOS
GEOLOGICOS PARA PROTECCION CIVIL**

Ingeniería GeoAmbiental



MOVIMIENTOS DEL TERRENO

01052

Portada: Deslizamiento en el entorno de la
autopista Oviedo Avilés.

(Foto: E.A.T. S. A.)

El Instituto Tecnológico GEOMINERO de España, ITGE, que incluye, entre otras, las atribuciones esenciales de un "Geological Survey of Spain", es un Organismo autónomo de la Administración del Estado, adscrito al Ministerio de Industria y Energía, a través de la Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales (R. D. 1270/1988, de 28 de octubre). Al mismo tiempo, la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica le reconoce como Organismo Público de Investigación. El ITGE fue creado en 1849.

**MOVIMIENTOS
DEL
TERRENO**

AÑO 1.989

Este trabajo ha sido realizado por la Dirección de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental del Instituto Tecnológico y GeoMinero de España en régimen de contratación con la Empresa EQUIPO DE ASISTENCIA TECNICA, S.A., con la participación del siguiente personal técnico:

POR EL ITGE: D. Francisco Javier Ayala Carcedo
Ingeniero de Minas - Director del Estudio

POR E.A.T., S.A.: D. José M^a Rodríguez Ortiz
Dr. Ingeniero de Caminos

D. Pablo de la Fuente Martín
Dr. Ingeniero de Caminos

D. Carlos Prieto Alcolea
Licenciado en Ciencias Geológicas

D. José Luis Lamas Romero
Ingeniero de Caminos

ELABORACION DE DIRECTRICES DE RIESGOS GEOLOGICOS
PARA PROTECCION CIVIL

MEMORIA

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

ANEXO

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

MEMORIA

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

<u>INDICE</u>	<u>Pag</u>
1. INTRODUCCION	1.
2. TIPOLOGIA DE LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO	2.
3. LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO EN ESPAÑA	6.
4. PELIGROSIDAD POTENCIAL Y RIESGOS ASOCIADOS A LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO	31.
5. DETERMINACION DEL RIESGO	39.
6. CAUSAS DE LOS MOVIMIENTOS	43.
6.1. Introducción	43.
6.2. Causas de los movimientos	44.
6.3. Análisis de los factores antrópicos	45.
7. ACTUACIONES Y ANALISIS DEL MOVIMIENTO	51.
7.1. Medidas a corto plazo	51.
7.2. Estudios y trabajos de detalle	54.
8. MEDIDAS CORRECTORAS	67.
8.1. Movimientos en suelos	67.
8.2. Tratamiento de taludes rocosos	84.
9. REFERENCIAS	91.

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

1. INTRODUCCION

Los movimientos del terreno constituyen un riesgo geológico de considerable importancia por su incidencia sobre edificaciones, obras públicas, instalaciones industriales, etc. Algunos estudios recientes (IGME, 1987) han valorado las pérdidas anuales por esta causa en más de 25.000 millones de pesetas, en una hipótesis de riesgo medio.

En muchos casos estos movimientos se deben a la actividad humana, que con sus obras altera el equilibrio natural de las laderas provocando desplazamientos de las mismas más o menos importantes. La magnitud y velocidad de estos desplazamientos es muy variada, con volúmenes entre unos pocos m³ y varios millones, desplazándose a veces a menos de 1 cm/año y en otros casos a varios metros por segundo.

Parece razonable y responde a una necesidad social informar a la opinión pública y a los técnicos u Organismos correspondientes, sobre las circunstancias que pueden conducir a estos movimientos, así como las medidas a adoptar en el caso de que éstos ya se hayan iniciado.

En esta Memoria se describen de forma sucinta los distintos tipos de movimientos y las causas que pueden producirlos, así como las medidas correctoras más recomendables en cada caso.

2. TIPOLOGIA DE LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Existen numerosas clasificaciones de los movimientos del terreno, la mayor parte de las cuales se distinguen por su complejidad, lo cual da idea, por un lado de la gran variedad de movimientos y por otro de la dificultad de su clasificación.

En líneas generales puede hablarse de:

- Deslizamientos
- Desprendimientos
- Flujos y coladas.

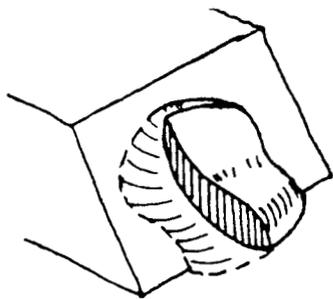
Estos movimientos afectan tanto a los suelos como a las rocas, si bien el tipo de material condiciona la morfología del movimiento.

En la figura 2.1. se muestran algunos ejemplos típicos.

Los deslizamientos pueden ser de tipo plano o rotacional. En el primer caso el terreno sufre un movimiento de traslación sobre una superficie plana sensiblemente paralela a la superficie del terreno. En su desplazamiento el material se desintegra en bloques muchas veces conectados por las raíces de los árboles y la vegetación. Las velocidades de desplazamiento están en el orden del cm/día.

Los deslizamientos rotacionales rompen el terreno según una superficie cóncava hacia arriba. El material girado suele conservar su integridad salvo en la zona del pie, donde suele abrirse con grietas radiales. Las velocidades de desplazamiento son muy variables, desde el cm/año al m/día.

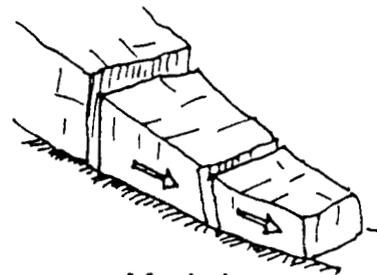
Los flujos o coladas son movimientos de materiales disgregados, generalmente saturados de agua y que se comportan como un fluido viscoso. En el caso de materiales pétreos (aludes de piedras) los materiales descienden a altas velocidades arrastrados por el agua. Las velocidades varían del cm/minuto al m/segundo.



Deslizamientos rotacionales



Reptaciones o movimientos superficiales muy lentos



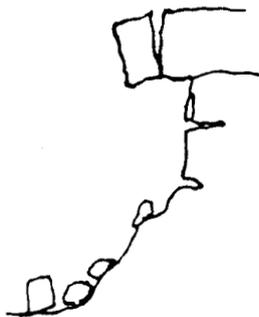
Movimientos en bloque



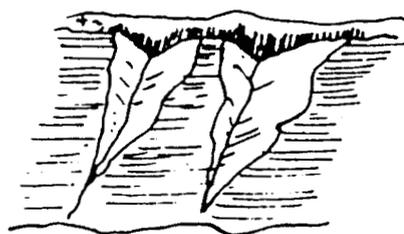
Coladas de barro



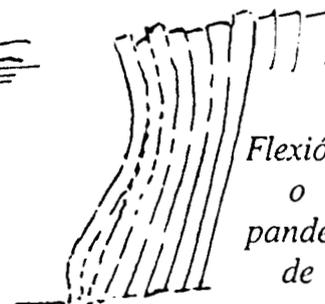
Avalancha de piedras



Desprendimientos



Deslizamiento de cuñas de roca



Flexión o pandeo de estratos

FIG. 2.1.- EJEMPLOS DE MOVIMIENTOS DEL TERRENO TÍPICOS.

Los desprendimientos son caídas libres de bloques de roca situados en acantilados, cornisas, etc. por pérdida de soporte o adherencia en el macizo rocoso donde están encajados. Las velocidades de caída son de varios metros por segundo.

En el caso de rocas, suelen ser también característicos los movimientos y desprendimientos por flexión o vuelco de estratos subverticales.

En muchos casos los movimientos se producen según esquemas complejos, combinación de varios de los tipos reseñados, lo cual explica la dificultad de su clasificación.

Entre las numerosas clasificaciones existentes, la más ampliamente utilizada es la de Varnes (1978), la cual no repetiremos aquí por ser muy conocida. Se da en cambio en la figura 2.2. una clasificación simplificada debida a A. García Yagüe (1988).

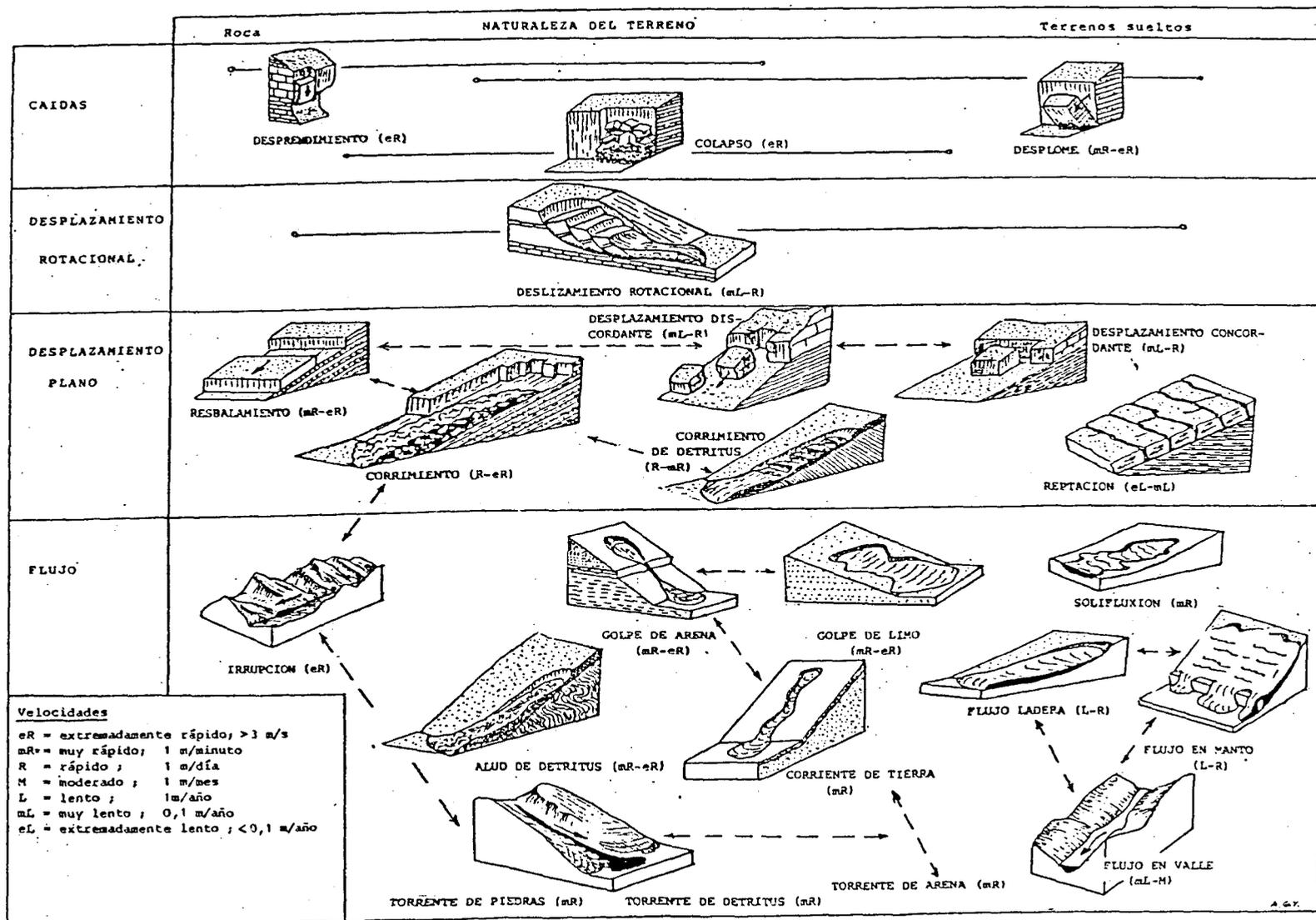


FIG. 2.2.- CLASIFICACION PROPUESTA POR A. GARCIA YAGUE (1988).

3. LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO EN ESPAÑA

Debido a su relieve montañoso y a la naturaleza del terreno, una gran parte del territorio nacional es proclive a movimientos de diferentes tipos, si bien éstos se concentran en zonas de desfavorables condiciones climáticas o litológicas. En la fig. 3.1. se muestra una zonificación del territorio nacional según la peligrosidad potencial de los fenómenos de inestabilidad.

Es importante señalar, sin embargo, que los movimientos que se producen de forma natural constituyen un riesgo geológico de importancia limitada si se comparan con los problemas de inestabilidad, derivados de la actividad humana.

Se hace a continuación una revisión de algunos casos significativos en la historia reciente.

a) Desprendimientos de rocas

La mayor parte de los accidentes mortales registrados se refieren a desprendimientos de roca. Con gran frecuencia un bloque aislado desprendido de un acantilado suele ser la causa de la destrucción de viviendas y servicios. En otros casos una masa importante de roca se desprende de un frente y se desintegra en numerosos bloques y piedras de tamaño medio formando una avalancha de piedras.

El minado o socavación de cantiles rocosos por los ríos o la erosión de capas blandas lleva frecuentemente al desprendimiento de cornisas y al deslizamiento de cuñas.

Estos fenómenos se concentran en valles tortuosos debido a la socavación en curva (el caso de las "hoces"). El río Júcar es un buen ejemplo, habiéndose registrado varios desprendimientos catastróficos.

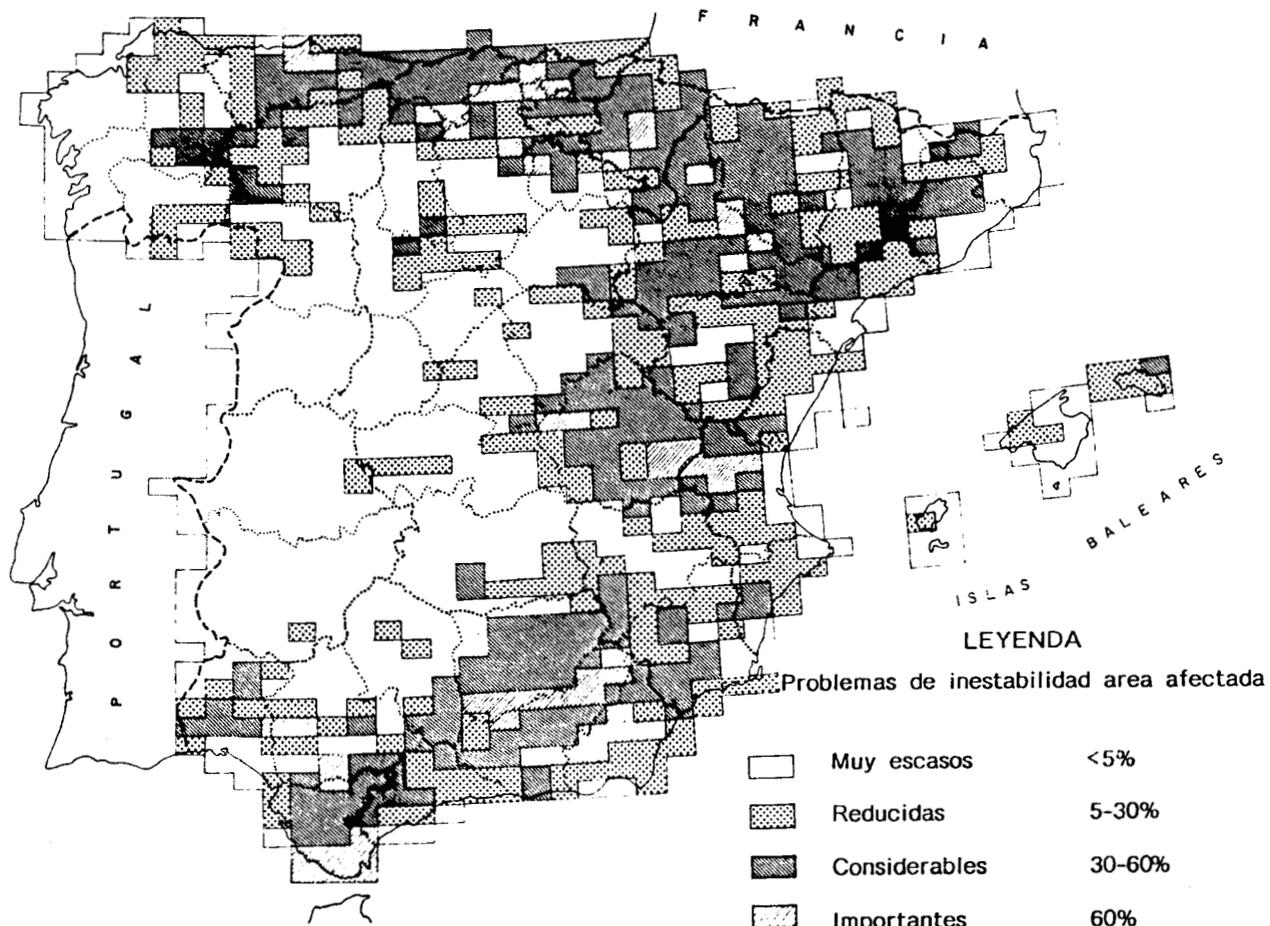


FIG. 3.1.- ZONIFICACION DEL TERRITORIO ESPAÑOL RESPECTO A PROBLEMAS DE ESTABILIDAD.

García Yagüe (1977) cita por ejemplo un desprendimiento ocurrido en Alcalá de Júcar en 1946 con destrucción de numerosas casas y 12 personas muertas.

Los cantiles prominentes son muy sensibles a la acción del viento y del agua, así como a la acción combinada de ambos agentes. Frecuentemente el perfil de erosión muestra forma irregular debido a la diferente resistencia de la secuencia de capas. Un perfil típico se muestra en la fig. 3.2.

Se citan con frecuencia accidentes en localidades del valle del Ebro, como Fraga, Ballobar, Arnedo, etc. donde predominan las rocas sedimentarias blandas.

El proceso suele llevar al desprendimiento de cornisas cuando la capa blanda subyacente es erosionada en una profundidad superior a la que puede soportar en ménsula la roca competente L_0 . Esta longitud suele verse reducida por juntas o planos de debilidad o decompresión paralelos al frente del acantilado.

Los valores medidos varían de 0,3 a 0,7 L_0 en función de la altura del acantilado y de la historia tectónica del mismo.

La degradación aumenta notablemente por escorrentía superficial de agua cuando no está adecuadamente recogida y fluye sobre el cantil.

La erosión eólica puede ser también importante en acantilados altos formados por areniscas blandas o sedimentos poco cementados. Las velocidades del viento aumentan de modo significativo con la altura y además los granos de arena arrastrados pueden ser muy abrasivos para los frentes rocosos. En frentes largos la arena puede proceder del mismo cantil y los efectos erosivos se concentran en las partes cóncavas o en los puntos de mayores velocidades. Se han medido profundidades de erosión en taludes expuestos comprendidas entre 0,1 y 3 mm/año.

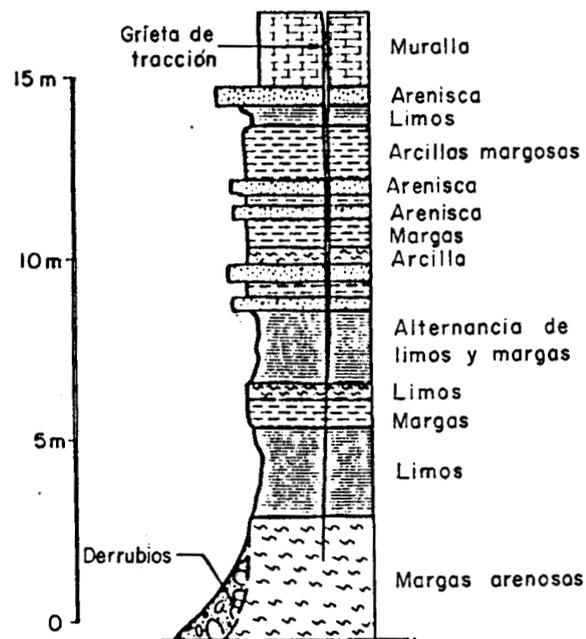


FIG. 3.2.- PERFIL DE EROSION TÍPICO EN EL CANTIL DEL CASTILLO DE FRAGA (HUESCA).

Existe muy limitada experiencia referente a desprendimientos debidos a efectos sísmicos.

Como bien se sabe, los promontorios rocosos son tan vulnerables a los seismos como los edificios altos y generalmente sufren una amplificación de las ondas sísmicas transmitidas por el sustrato rocoso. Al igual que se ha comprobado en frentes de cantera bajo el efecto de voladuras, la mayor inestabilidad suele estar asociada a ondas superficiales de baja frecuencia (menor de 5 Hz).

Las cuñas prismáticas verticales separadas de la masa general por juntas abiertas se comportan como ménsulas de muy pequeña inercia, sufriendo desplazamientos que conducen fácilmente al vuelco o a la rotura por flexión. Las presiones dinámicas del agua en las grietas pueden también aumentar los momentos volcadores.

Pueden citarse como ejemplos algunos desprendimientos significativos.

El 21 de julio de 1874 una parte importante del promontorio rocoso que domina el pequeño pueblo de Azayra (Navarra) se desprendió, aplastando 72 casas y causando 92 muertos, 32 de ellos niños. Los bloques rocosos cubrieron los escombros de los edificios no permitiendo el rescate de 60 cadáveres.

Informes locales hablan de 11 muertos por desprendimientos en 1863 y accidentes semejantes el 20 de enero de 1903 (2 muertos) y el 13 de mayo de 1946 (2 niños muertos).

El escarpe tiene unos 75 m de altura y está formado por yesos oligocenos con intercalaciones arcillosas (fig. 3.3.). La formación yesífera está fracturada por procesos orogénicos cuaternarios y las juntas se han ido agrandando por infiltración de agua y fenómenos de disolución.

Los desprendimientos se han seguido produciendo hasta la actualidad, lo cual ha llevado a la construcción de un zanjón al pie del talud (excavación

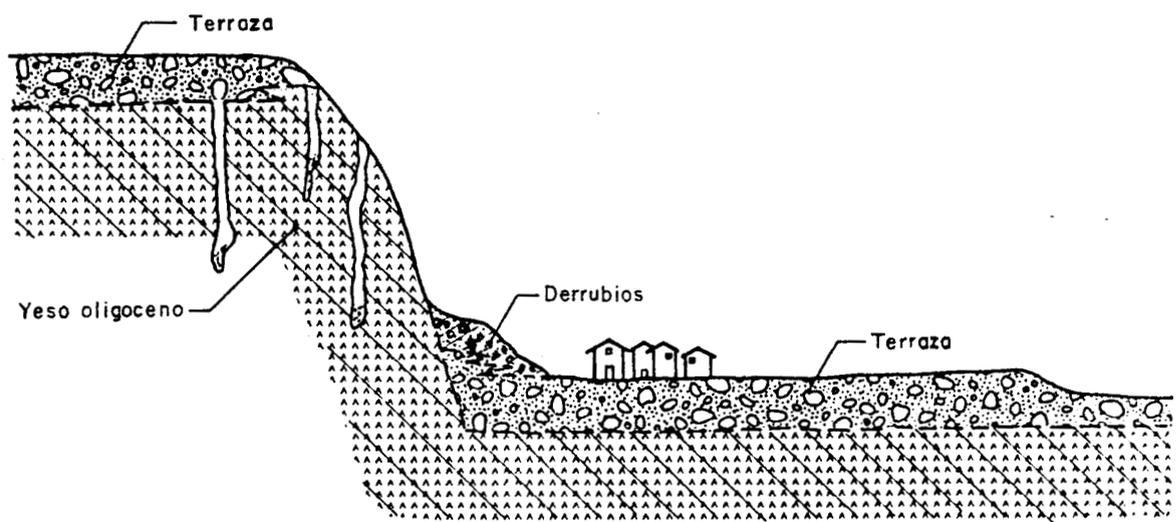


FIG. 3.3.- PERFIL DE LA PEÑA DE AZAGRA (MODIFICADO DE FACI ET. AL. 1988).

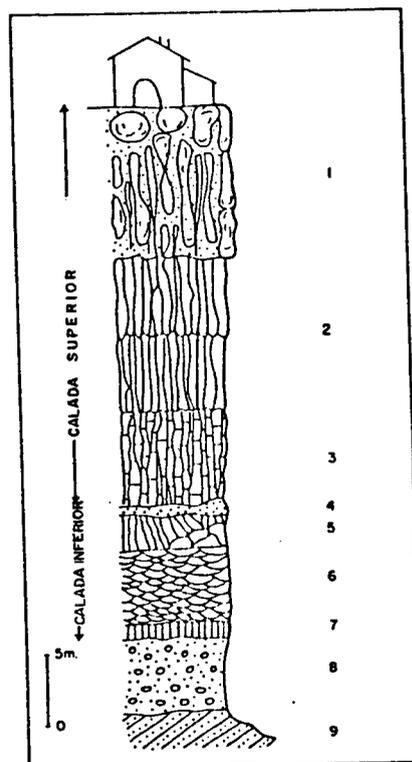


FIG. 3.4.- PERFIL DEL ACANTILADO BASALTICO DE CASTELLFOLLIT DE LA ROCA (Corominas & Alfonso, 1988).

de 17.500 m³) y a la eliminación de bloques inestables en la parte alta (Faci et al., 1988).

Los desprendimientos son también muy comunes en zonas volcánicas. La erosión de los niveles blandos piroclásticos da lugar a una falta de soporte de las lavas suprayacentes, generalmente muy fracturadas.

El 18 de mayo de 1981 unos 250 m³ de material basáltico se desprendieron de un acantilado de 15 m de altura, adyacente a una carretera en la zona urbana del Puerto de la Cruz (Tenerife). Afortunadamente sólo resultó destrozado un automóvil aparcado, sin mayores daños para el tráfico o los edificios próximos. Como consecuencia, se ha construido una carretera de nuevo trazado evitando ese punto conflictivo.

En la península es notable el caso de los desprendimientos del acantilado basáltico de Castellfollit de la Roca (Gerona). En septiembre de 1976 la parte superior del acantilado que formaba una cornisa de 10 m de altura y 3 m de vuelo, se desprendió en una longitud de 50 m, afectando a parte de las edificaciones colocadas encima (fig. 3.4.).

El retroceso del acantilado (unos 8 m/100 años) se debe probablemente a la apertura del diaclasado columnar en los basaltos por presiones de hielo o raíces, así como el proceso de meteorización que produce la hidrólisis de los silicatos.

b) Coladas de barro

Pueden citarse varios ejemplos interesantes de coladas de barro o derrubios, como principalmente en zonas montañosas con alta pluviometría.

Existen datos históricos de una colada de barro en Inza (Navarra) en 1714-15 (Ayala et al. 1987). El movimiento afectó a la montera superficial alterada (arcilla con $w_L = 60\%$, $IP = 28\%$) de unos esquistos cretácicos (flysch negro, saturado por el agua almacenada en una montera caliza, que a su vez también sufrió algún vuelco (fig. 3.5.).

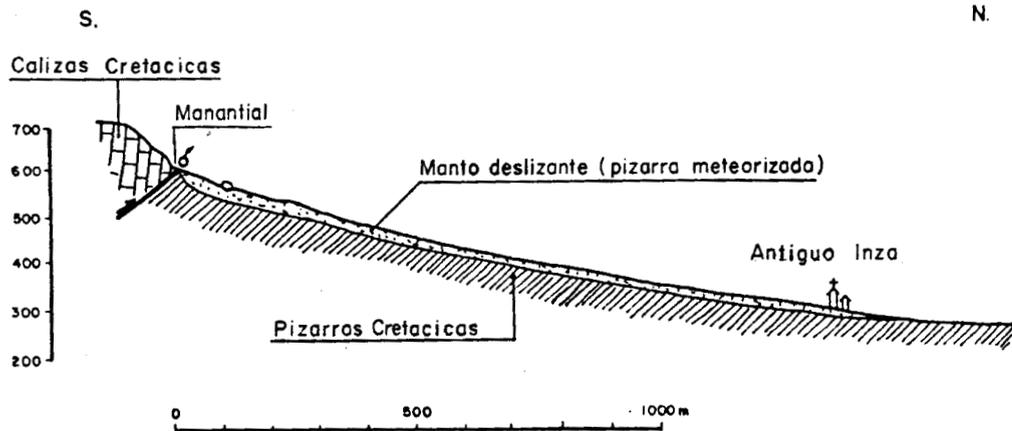
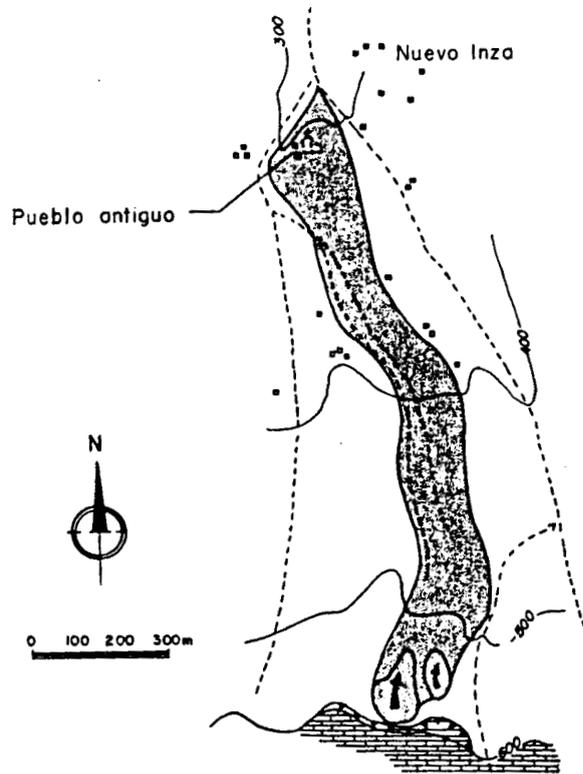


FIG. 3.5.- PLANTA Y PERFIL DEL DESLIZAMIENTO DE INZA (Aya la et. al. 1987).

La pluviometría de la zona es de 1.600 a 1.900 mm/año.

Características principales del deslizamiento:

Talud medio	13°
Potencia de la lengua	4 m (10 m máx)
Volumen	1.000.000 m ³ aprox.
Longitud	1.450 m

La velocidad media del deslizamiento fue de unos 20 m/día y tardó 4 meses en alcanzar un reposo aparente. En su fase final el barro destrozó la mayor parte de las casas del pueblo, incluida la iglesia. El pueblo se reconstruyó a unos 100 m de su posición original.

Quizá el flujo lento más importante observado en tiempos recientes es el que afectó a la CN-321 de Granada a Málaga, en el puerto de Los Alazores.

La carretera sufrió desplazamientos de metros hasta ser finalmente abandonada, buscándose otro trazado.

El volumen estimado es superior a 20 millones de m³ y las dimensiones en planta de la zona movida superan los 3x4 km².

Otro interesante caso es el de La Coma en los Pirineos, 150 km al norte de Barcelona.

El 8 de noviembre de 1882 una lengua de barro fluyó talud abajo alcanzando velocidades de varias decenas de metros a la hora.

Al cabo de 9 horas el flujo se detuvo a punto de alcanzar algunas casas, debido al menor talud de la ladera y a la formación de un flujo lateral.

Características del deslizamiento:

Volumen de barro desplazado	230.000 m ³
Recorrido	820 m
Desnivel entre el origen y el final del movimiento	300 m
Talud medio	21,5°
Talud final	17°
Potencia del flujo	7 m

En el flujo ladera abajo el barro siguió un antiguo barranco formando un canal de 70 m de anchura con dos caballones de acompañamiento laterales. En la parte final el ancho del flujo superó los 100 m (fig. 3.6.).

Las propiedades geotécnicas del barro eran:

Límite líquido	27-41%
Índice de plasticidad	10-18%
Cohesión efectiva	0,5 t/m ²
Angulo de rozamiento interno	26°
Angulo de rozamiento residual	23°

El origen de esta colada fue un deslizamiento rotacional producido en un canchal de gravas sobre un sustrato de areniscas y lutitas eocenas.

En la zona pirenaica se citan con frecuencia coladas de derrubios con consecuencias catastróficas. Este es el caso por ejemplo, del deslizamiento de Senet, que en 1963 desplazó un millón de m³ cegando el río Noguera Ribagorçana y produciendo daños importantes aguas abajo.

En noviembre de 1982 un pequeño depósito morrénico de unos 3.000 m³ fluyó unos 250 m por un talud de unos 30° hasta alcanzar algunas casas del pueblo de Cabdella con el resultado de 3 personas muertas y varias heridas.

De especial interés es la colada de barro ocurrida en abril de 1986 en Los Olivares, un pequeño pueblo de la sierra de Granada, situado en las márgenes del río Velillos (fig. 3.7.), (Rodríguez Ortiz, et al. 1987).

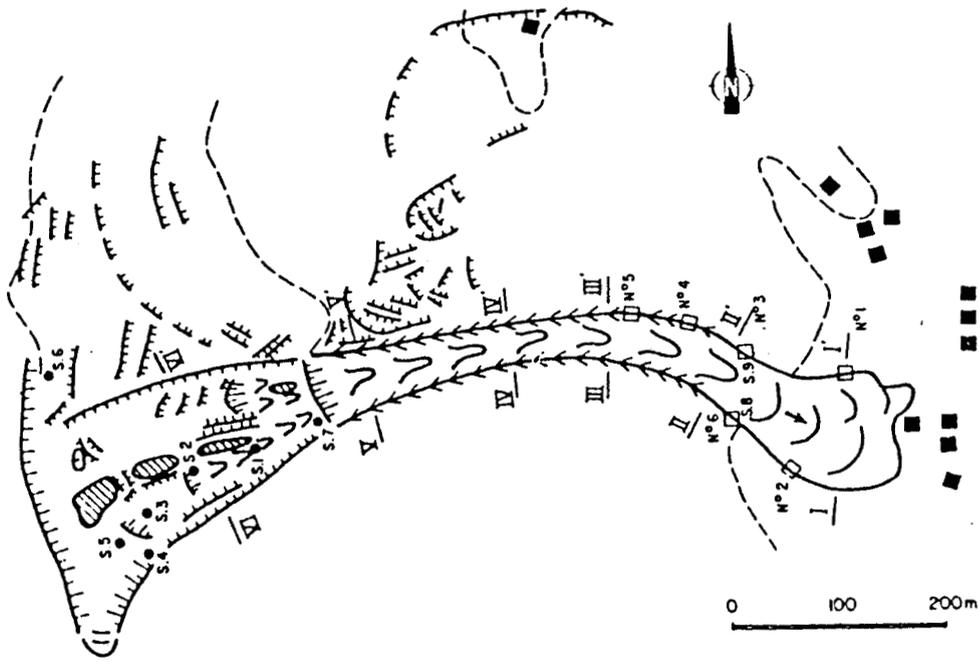


FIG. 3.6.- PLANTA DE LA COLADA DE BARRO DE LA COMA MUDFLOW
(Corominas et. al, 1988).

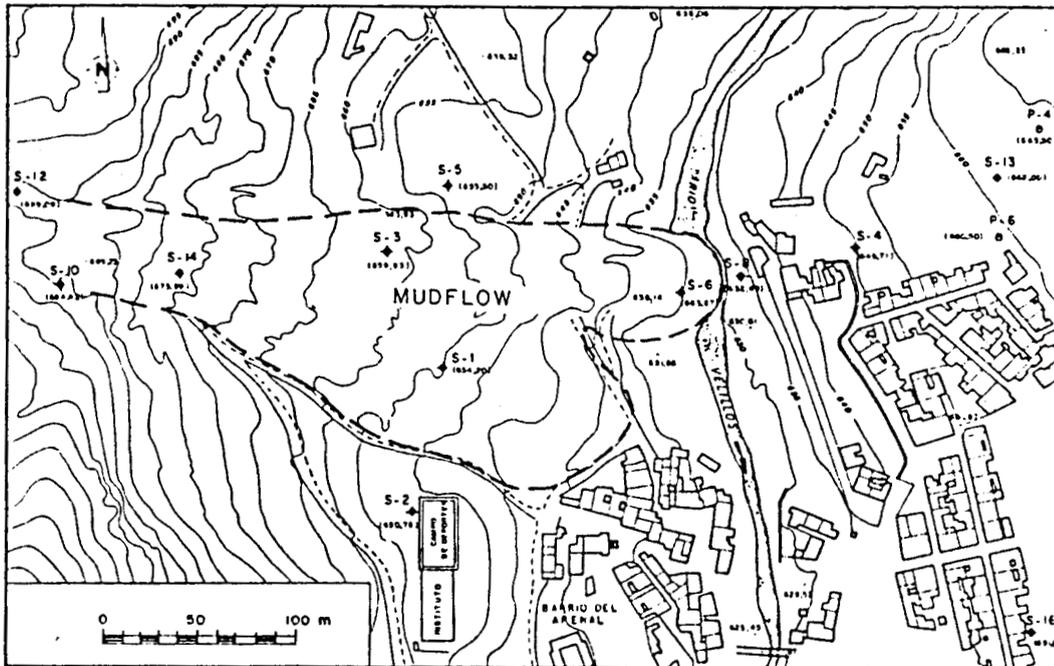


FIG. 3.7.- PLANTA DE LA COLADA DE BARRO DE OLIVARES.

La lengua comenzó a formarse el 12 de abril, aumentando su velocidad talud abajo hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 1 m/hora el 19 de abril. A partir de ahí la velocidad descendió hasta llegar a anularse una semana más tarde.

El barro se formó en un valle de forma alargada (quizá un circo de origen glaciario) situado a unos 70 m por encima del cauce del río (fig. 3.8.). La alteración de la red natural de drenaje debido a la explotación de una cantera de dolomita, dió lugar a movimientos rotacionales generalizados, afectando a las margas cretácicas. La masa de arcilla saturada fluyó hacia un umbral natural que cerraba la cubeta, remontándolo y descendiendo por la ladera como una masa viscosa hasta alcanzar el río al pie de la misma. En la parte baja apareció un segundo lóbulo por existir un cambio lateral de talud. Este lóbulo se aproximó a algunas casas provocando pequeñas grietas en las mismas.

La mayor parte del deslizamiento se produjo en terreno baldío (ya calificado por los naturales del lugar como peligroso) sin dañar edificios o propiedades.

Según se aproximaba la lengua al río Velillos se pudo apreciar el riesgo de interceptar éste, creando una presa que al romperse produjera una ola de inundación aguas abajo. Se intentaron colocar tubos de acero corrugado para mantener el paso del agua, pero quedaron destruidos a las pocas horas. La medida más eficaz fue la excavación de importantes volúmenes de tierra (hasta 5.000 t/día) para evitar la formación de la presa.

Características del deslizamiento:

Talud medio	16% (9°)
Espesor de la lengua	5 a 8 m
Volumen	130.000 m ³
Ancho en el umbral	60 m
Ancho de la lengua	150 m
Recorrido	380 m

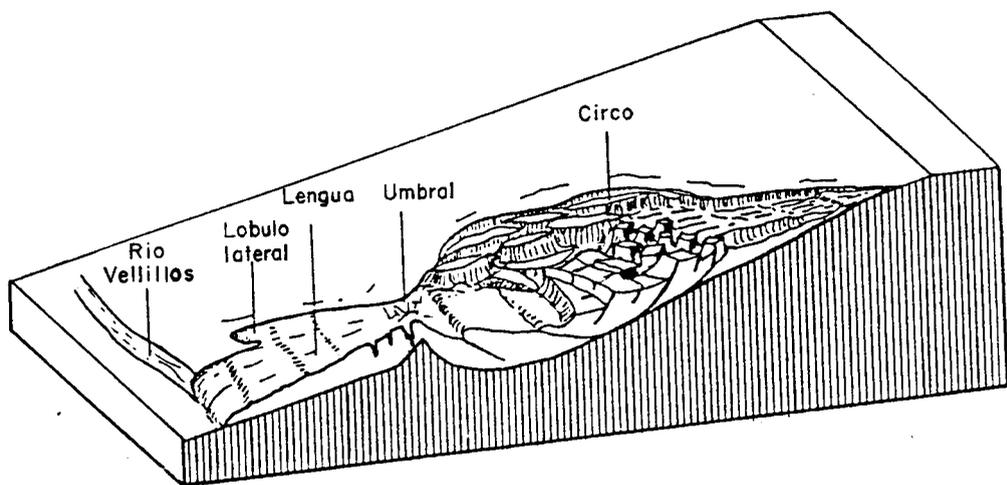


FIG. 3.8.- ASPECTOS MORFOLOGICOS DEL DESLIZAMIENTO.

Las arcillas margosas que constituían la lengua eran de plasticidad media, con un contenido de carbonatos entre 34 y 64%. Los análisis mineralógicos mostraron un porcentaje de montmorillonita del 14 al 29%.

Los análisis retrospectivos realizados indican que la resistencia al corte movilizada del barro en la fase más crítica del movimiento fue de $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ y $\phi' = 20^\circ$.

Es interesante señalar que sondeos recientes han demostrado que el talud ya estaba ocupado por antiguos deslizamientos de edad todavía no determinada, pero presumiblemente de los últimos 1.000 años.

La última colada conocida en España es del 18 de abril de 1988 en el pequeño pueblo de Reinoso (Burgos), donde fluyó una delgada capa (2 m) de margas miocenas sobre un sustrato calcáreo. La pendiente era muy suave (8%) y la masa desplazada de unos 10.000 m^3 en una longitud de 80 m.

Las velocidades máximas fueron de unos 2 m/hora y el deslizamiento estuvo activo durante unas 7 horas aproximadamente hasta que fue detenido por una hilera de árboles próxima al pueblo. Las causas deben buscarse en la saturación del talud, bien por una montera de calizas miocenas, o por la rotura de algunas conducciones de agua que atravesaban el área.

c) Movimientos rotacionales y complejos

Estos movimientos son los más frecuentes en España, si bien, debido a su lenta velocidad, sus efectos se reducen a daños materiales, aunque éstos pueden alcanzar magnitudes importantes.

Entre los movimientos rotacionales un conocido ejemplo es el del pequeño pueblo de Puigcercós, situado en una suave cuesta de calizas, lutitas y areniscas.

Varias grietas aparecieron entre mayo de 1857 y agosto de 1863, pero el principal deslizamiento ocurrió en 1881 a raíz de una estación lluviosa.

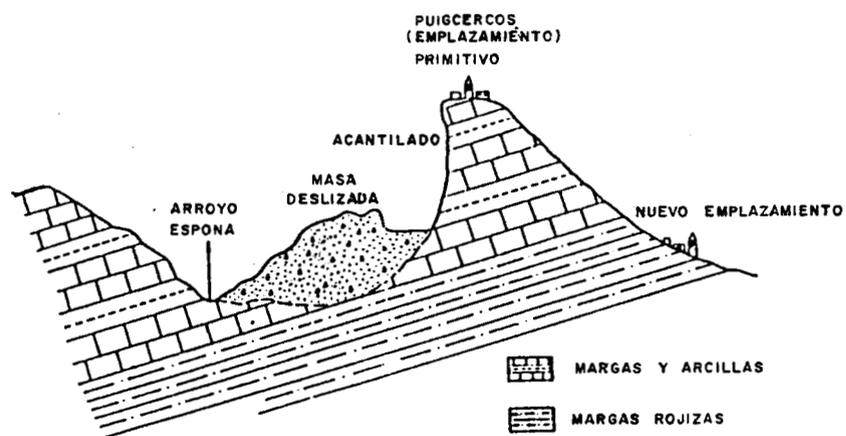


FIG. 3.9.- DESLIZAMIENTO DE PUIGCERCOS (Avci, 1978).

El 13 de enero de 1881 se produjo un deslizamiento creándose un acantilado de 50 m de altura y 150 m de longitud, al borde de las casas. La masa desplazada se desintegró acabando en el arroyo Espona, cegando su cauce y creando un embalse de depósitos limosos que colmataron el valle (fig. 3.9.).

Frente al peligro de nuevos deslizamientos, el pueblo fue abandonado y reconstruido en otro lugar.

También a finales del siglo pasado se cita el deslizamiento de Puebla de Arenós en el río Mijares. El deslizamiento se originó en un sustrato de margas de edad aptense con intercalaciones de calizas (fig. 3.10.). La superficie del deslizamiento superó las 50 Ha, con un desnivel de 300 m.

La masa deslizada represó el río obligando a abrir un nuevo canal para permitir el paso del agua.

Otro ejemplo típico es el deslizamiento del Lebeña en Santander que afecta a la CN-621. El frente del deslizamiento tiene una anchura de 450 m y los movimientos se aprecian 400 m talud arriba (fig. 3.11.). Al pie de la masa deslizada se encuentra el río Deva, parcialmente desplazado por los derrubios.

El origen del deslizamiento parece estar en la base de un grueso banco de calizas carboníferas que sirve de exutorio a las fuertes lluvias de la zona. Las calizas descansan sobre pizarras arcillosas cuya parte superior meteorizada desliza con facilidad, dando lugar a una masa caótica de bolos en una matriz arcillosa, adoptando la forma final de un lento flujo de derrubios.

La presencia de bancos rocosos permeables sobre rocas impermeables blandas es causa frecuente de deslizamientos múltiples imbricados, movilizados por saturación del coluvial superficial. Este es el caso de los deslizamientos de Carmona (Sevilla) (fig. 3.12.). El terreno está formado por una montera de arenisca conchífera o albero sobre algunas capas arenosas poco cementadas y un sustrato de margas azules de plasticidad media que deslizan fácilmente

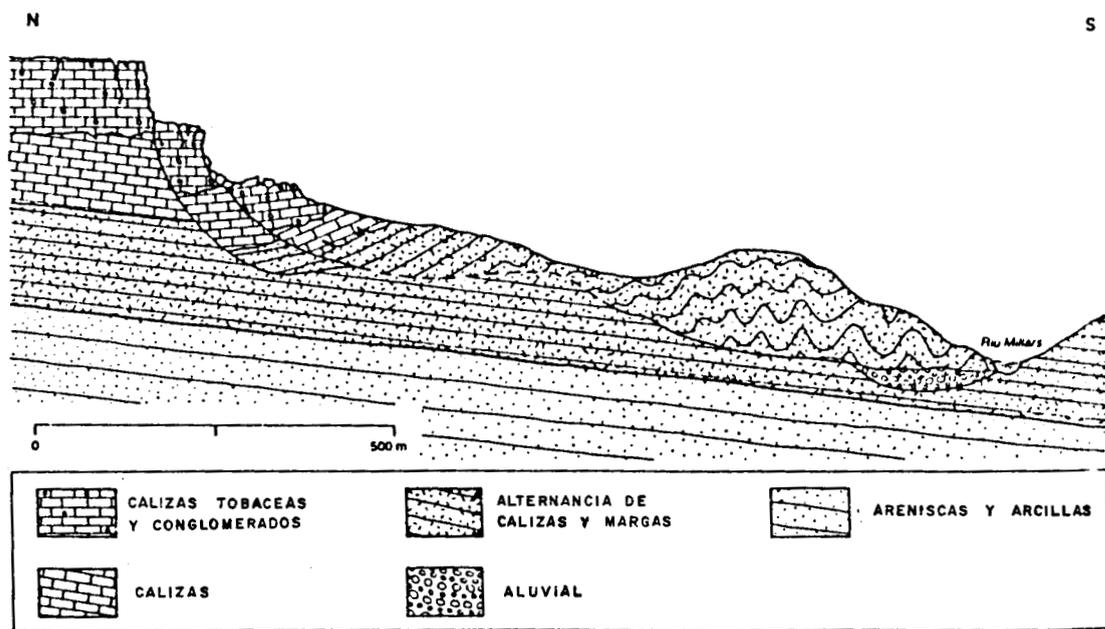


FIG. 3.10.- EL DESLIZAMIENTO DE PUEBLA DE ARENOS
(Según R. Génova en Corominas & Alonso, 1988)

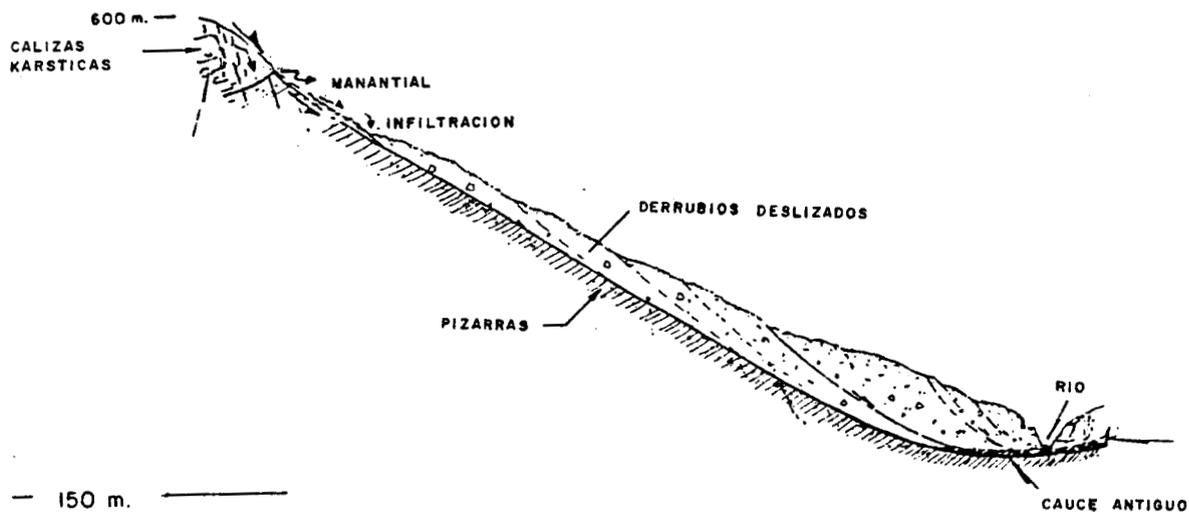


FIG. 3.11. - EL DESLIZAMIENTO DE LEBEÑA
(Cortesía MOPU, 1987)

al saturarse. Estas margas son muy frecuentes en el valle del Guadalquivir y su ángulo de rozamiento residual es inferior a 18° .

Merece especial mención el deslizamiento que está afectando al valle de Cobas en Galicia, probablemente reactivado por la construcción de una nueva carretera.

Aunque el deslizamiento original pudo estar motivado por la socavación producida por el río Sil, el fenómeno que ahora se observa es el de extrusión de una masa de pizarras bajo el peso de una potente montera de caliza (fig. 3.13.). La salida de agua (pluviometría anual superior a 1.000 mm) al pie de las calizas también provoca flujos de barro.

Un número importante de deslizamientos se debe a la socavación por corrientes de agua. Este fenómeno es particularmente intenso en Alcoy (Alicante). La ciudad está rodeada por 3 ríos y descansa sobre margas miocenas con una montera tobácea. Algunos informes indican pérdidas de longitud en ciertas calles de hasta 25 m en un período de 35 años. En la fig. 3.14. se muestran diversos tipos de inestabilidad en el área de Alcoy.

De gran importancia fueron también los daños causados por las crecidas del Segre (Pirineos) en 1982, probablemente correspondientes a un período de retorno de $T = 500$ años. Las velocidades de avenida (unos 10 m/seg) produjeron la rotura de una pequeña presa, un puente y varias casas en el pueblo de Pont de Bar (Lérida) así como la reactivación de un antiguo deslizamiento que cortó la carretera C-1313 en un tramo de 300 m (fig. 3.15.). Los movimientos se iniciaron como deslizamientos de base provocados por la erosión, siguiendo el efecto de las sobrepresiones intersticiales remanentes al producirse las condiciones de desembalse subsecuentes a la rotura de la presa. Posteriormente se fueron produciendo movimientos regresivos ladera arriba hasta niveles situados a unos 200 m sobre el cauce.

Las masas deslizadas eran una mezcla caótica de calizas brechificadas en una matriz arcillosa, las cuales habían deslizado originariamente sobre

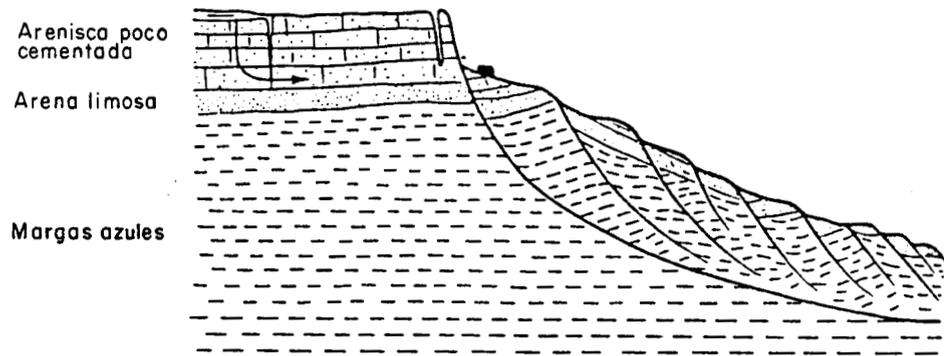


FIG. 3.12.- DESLIZAMIENTOS DE CARMONA (cortesía MOPU).

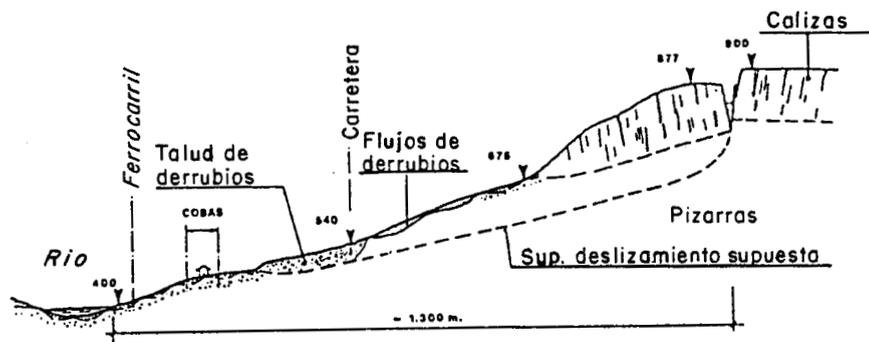


FIG. 3.13.- PERFIL DEL DESLIZAMIENTO DE COBAS (Llorca y Delgado, 1988).

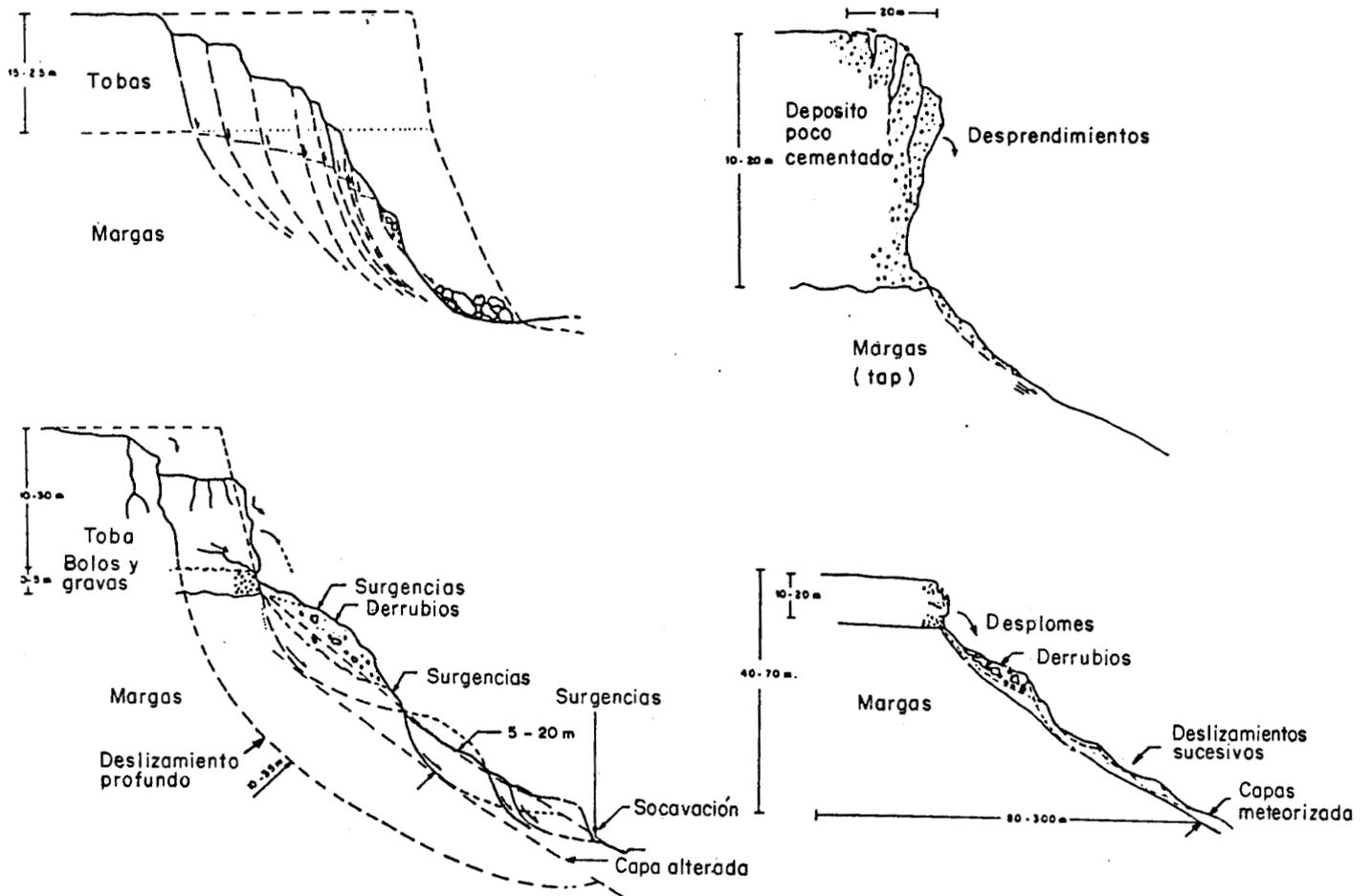


FIG. 3.14. - DESLIZAMIENTOS TIPICOS EN EL AREA DE ALCOY.

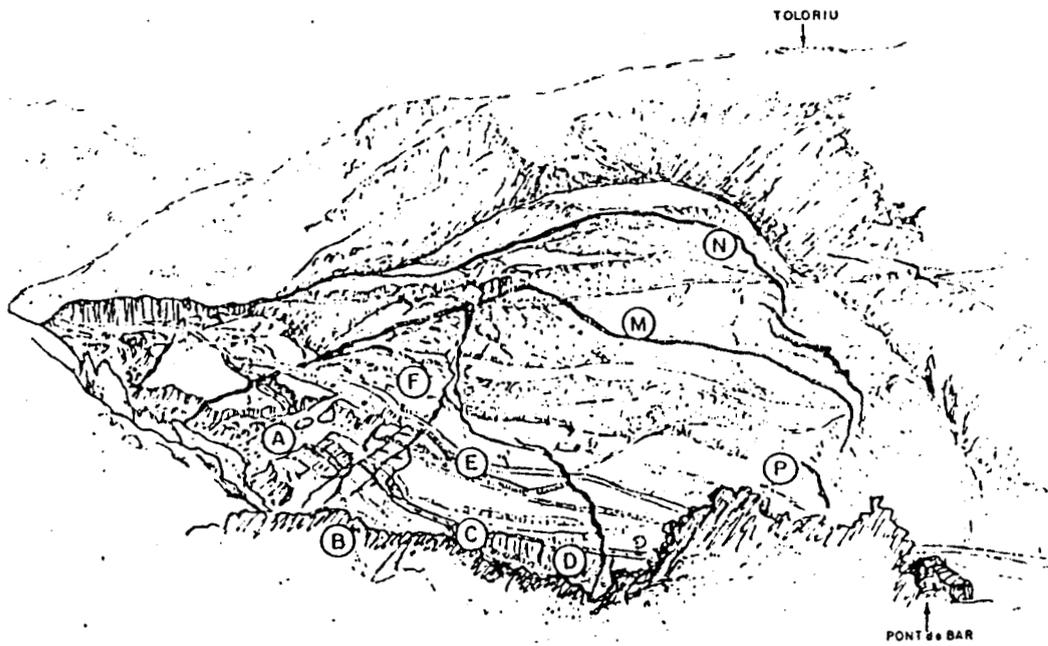


FIG. 3.15.- VISTA GENERAL DEL DESLIZAMIENTO DE PONT DE BAR
(C. León, 1983).

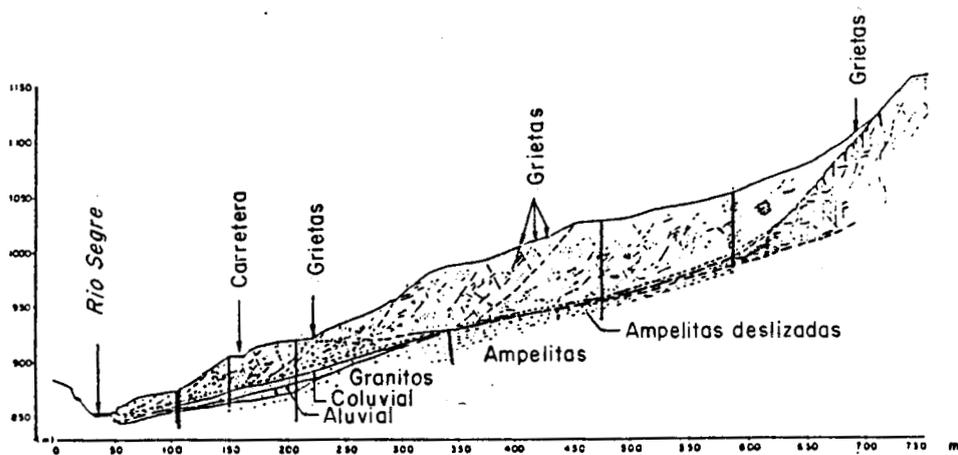


FIG. 3.16.- SECCION POR EL EJE DEL DESLIZAMIENTO DE PONT DE BAR.

una delgada capa de pizarras ampelíticas ($c' = 1 \text{ t/m}^2$ y $\phi_{\text{res}} = 23^\circ$) (fig. 3.16.).

Las medidas correctoras supusieron un muro anclado con una resistencia superior a 150 t/m y varias obras de encauzamiento y defensa del cauce.

En algunos casos se producen deslizamientos por formación de cavernas al paso del agua por rocas solubles, como pueden ser las calizas o los yesos.

Un deslizamiento de este tipo se produjo en Santa Cruz de Moya (Cuenca) por subsidencia de bancos yesíferos al disolverse el sustrato triásico (fig. 3.17.).

d) Otros movimientos

Amplias regiones de España están sometidas a degradación de los taludes por agentes erosivos, la meteorización resultante de ciclos de humedad y sequedad, las presiones de agua en arcillas agrietadas, formación de sales.

Generalmente la profundidad afectada es muy pequeña, pero los daños suelen ser muy extensos para las construcciones superficiales, carreteras y edificios.

Los movimientos muy lentos de tipo fluencia también entran en esta categoría. De cierto interés es el caso de Tendrúy (Lérida - Cuenca de Tremp).

El pueblo original se construyó sobre gravas recubriendo las margas rojas del Paleógeno (fig. 3.18.). El contacto entre las gravas y las margas tiene un buzamiento de unos 7° hacia el barranco excavado por un arroyo. El efecto combinado de erosión del arroyo e infiltración de agua a través de las gravas indujo un lento movimiento de todo el pueblo hacia el valle próximo.

El movimiento fue detectado en 1957 pero hasta 1969 no se aceptó como inevitable la necesidad de abandonar el lugar. Se ha construído un nuevo pueblo en una zona estable más hacia el sur.

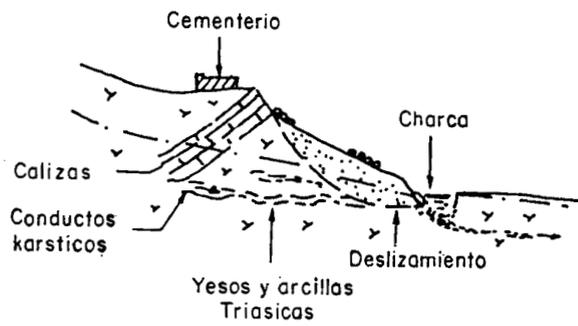


FIG. 3.17.

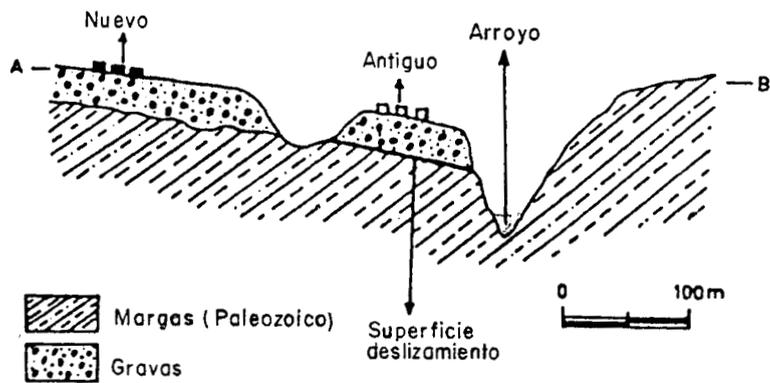


FIG. 3.18.- CORTE DEL DESLIZAMIENTO DE TENDRUY (Avci, 1978).

4. PELIGROSIDAD POTENCIAL Y RIESGOS ASOCIADOS A LOS MOVIMIENTOS DEL TERRENO

Los deslizamientos, al igual que las riadas, terremotos y avalanchas, son en muchos casos fenómenos naturales impredecibles, con consecuencias de distintos grados de gravedad.

En general es conveniente distinguir entre la peligrosidad potencial y el riesgo asociado a movimientos del terreno.

La peligrosidad potencial equivale a la probabilidad de que ocurra un determinado movimiento en un período dado de tiempo. El concepto podría extenderse a una cierta extensión de terreno.

Por el contrario, el riesgo puede definirse como el producto de la probabilidad anterior por los daños asociados a dicho movimiento.

En los daños pueden incluirse pérdida de vidas, bienes y servicios o efectos ambientales.

Se han propuesto teorías muy diversas para evaluar la peligrosidad potencial de un determinado territorio frente a los movimientos del terreno. Las clasificaciones resultantes pueden ser muy simples (por ejemplo, áreas que pueden verse afectadas por movimientos o no) o complejas, con división en varios niveles de peligrosidad.

Existen casos en que es relativamente sencillo asignar probabilidades de presentación de deslizamientos como en el tema de la recesión de los acantilados costeros, ya que las zonas inestables pueden ser fácilmente observables constatando su evolución en períodos relativamente cortos de tiempo. Así por ejemplo puede predecirse la velocidad de recesión o los metros de acantilado que se perderán en un período determinado de tiempo. Experiencias de este tipo han sido realizadas por Grainger & Kalaugher (1987) en la costa norte de Devon.

Circunstancias parecidas se dan en todos aquellos movimientos que muestran algún grado de actividad y cuya evolución puede seguirse por auscultación convencional, fotogrametría, medidas topográficas o geodésicas, etc. Tal es el caso del Proyecto DUTI del Instituto de Tecnología Federal de Lausane, en el que se siguen los deslizamientos ya detectados controlando la probabilidad de que las velocidades observadas se mantengan o varíen (Bonnard y Noverraz, 1984).

El problema se plantea en cuanto a la asignación de probabilidades de inestabilidad en zonas potenciales en las que aún no se han manifestado los movimientos. Dentro de esto hay que distinguir los casos de movimientos fósiles, donde aparecen indicios de inestabilidad, como grietas, curvatura de árboles, lisos, etc., de aquellos otros casos en los que no hay ningún signo aparente.

En el primer caso, cabe hacer una evaluación de aquellas circunstancias que pueden reactivar el movimiento y su probabilidad.

Así por ejemplo en algunas zonas se ha visto que al alcanzarse una determinada intensidad de lluvia, se producían deslizamientos, pudiendo asociarse por tanto la probabilidad de deslizamiento a la probabilidad de presentación de un determinado período lluvioso.

Es frecuente estimar la inestabilidad potencial de manera subjetiva, utilizando la experiencia de determinados expertos. Se pueden indicar grados de probabilidad (baja, media, alta, etc.) o cuantificaciones de la misma (10%, 30%, 80%, etc.). Esto no resulta muy difícil siempre que se aplique a un número de casos suficientemente extenso y haya consistencia entre las predicciones y los indicadores en que se basan.

La mayor dificultad se plantea en los casos en que no hay indicios de inestabilidad, pero el terreno corresponde a formaciones que resultan inestables bajo determinadas condiciones o combinaciones de factores. En este caso es necesario distinguir tales factores y ver cómo se combinan en cada uno de los taludes para evaluar la probabilidad de deslizamiento.

Daremos como ejemplo algunas de las clasificaciones utilizadas para evaluar la probabilidad de movimientos.

En la Tabla 4.1. se muestra la clasificación utilizada en la región de Sidney (Australia), la cual está específicamente orientada al desarrollo urbano.

La tabla 4.2. se utilizó para construir un mapa de estabilidad de taludes en la zona de Windy Point de Victoria. Se consideran 9 factores diferentes con pesos variables de 0 a 4. La suma de las puntuaciones da una puntuación global, tal como se indica en la parte inferior de la tabla.

Esta tabla presta muy poca atención a la actividad previa del movimiento y, por otro lado, las categorías de taludes son poco apropiadas para zonas en las que niveles arcillosos activos en condiciones residuales pueden dar lugar a deslizamientos con pendientes incluso inferiores a 10°.

Inglés, 1976, ha propuesto la tabla 4.3. de factores favorables y desfavorables que se adjunta. Esta clasificación también pone mucho énfasis en los taludes escarpados y mientras se da poca importancia a fenómenos anteriores de inestabilidad, se presta mucha atención a la vegetación y al drenaje. También es dudosa la consideración de los buzamientos como desfavorables.

Stevenson (1977) propone el esquema de la tabla 4.4. Se asignan diversas puntuaciones según la plasticidad de la arcilla, la posición del nivel freático, el ángulo del talud y la complejidad del mismo, así como el uso a que está sometido el territorio. A la presencia del nivel freático y a la complejidad del talud que es un índice de su historia pasada, se le asigna valor doble en la ponderación, resultando un índice de riesgo

$$R = (P + 2W) \times (S + 2C) U$$

En general parece que valores de este índice superiores a 50, pueden ser indicativos de una posible inestabilidad.

Como puede apreciarse, todas estas clasificaciones son muy subjetivas

TABLA 4.1. - EVALUACION DE LA ESTABILIDAD EN LA REGION DE SIDNEY
(Walker et al. 1985)

Probabilidad de Movimientos	Descripción	Condiciones para el desarrollo urbano
Muy alta	Evidencia de deslizamientos activos o pasados. Gran probabilidad de movimientos.	Inadecuado para el desarrollo urbano salvo importantes obras de mejora. Se requiere intensa investigación geotécnica. Si se construye es con mayor riesgo del usual.
Alta	Evidencia de reptaciones y pequeñas inestabilidades, pueden ocurrir movimientos bajo condiciones climáticas extremas.	Se requieren limitaciones al desarrollo y/o trabajos geotécnicos. Necesario estudio geotécnico. Si se construye es con mayor riesgo del usual.
Media	Posible fluencia en laderas escarpadas con suelos potentes; pueden producirse movimientos si las operaciones constructivas no tienen en cuenta las condiciones particulares.	Puede ser necesario imponer limitaciones y realizar estudios geotécnicos. Con prácticas ingenieriles adecuadas puede construirse con un nivel de riesgo normal.
Baja	No se observa evidencia de inestabilidad; no deben producirse movimientos si los cambios morfológicos son moderados.	Se requiere una buena práctica constructiva, adecuada para construcciones en la ladera.
Muy baja	Caso típico de laderas muy suaves con pequeña cobertura de suelo.	No se requieren prácticas constructivas especiales.

TABLA 4.2. - EVALUACION DE LA ESTABILIDAD SEGUN JOYCE Y EVANS,
 1976

1. Angulo de talud	
a) 0-5	0
b) 6-15	1
c) 16-26	2
d) 27-42	3
e) más de 42	4
2. Vegetación	
a) Vegetación intensa	0
b) Vegetación ligera	1
c) Césped	2
d) Sin vegetación	3
3. Desmonte de carretera	4
4. Ganado pastando	1 ó 2
5. Proximidad al nivel freático o manantiales	0 a 3
6. Erosión fluvial	1
7. Diaclasado	1
8. Buzamiento en sentido desfavorable	1 ó 2
9. Inestabilidades previas	2
Clasificación (suma de puntuaciones anteriores)	
1. Estable	5
2. Potencialmente inestable	6-9
3. Inestable	10-13
4. Muy inestable	14-15

TABLA 4.3. - EVALUACION DE LA ESTABILIDAD SEGUN INGLES, 1976

Factores desfavorables	
Dificultades de drenaje en taludes superiores a 1:8	0,40
Talud superior a 1:4	0,20
Ausencia de vegetación	0,15
Terreno arcilloso	0,05
Roca con buzamiento desfavorable	0,05
Sobrecargas en cabecera o cortes al pie	0,05
Afloramientos del nivel freático	0,05
Grietas superficiales	0,03
Zona sísmica	0,02
TOTAL	1,00
Factores favorables	
Buen drenaje profundo	-0,40
Talud menor de 1:8	-0,20
Vegetación arbórea	-0,15
Recarga artificial al pie	-0,05
Estratificación subhorizontal	-0,05

Notas:

- La evidencia de movimientos superiores a 0,1 mm/año aumenta la puntuación en 0,2.
- Si no se conoce alguna de las condiciones anteriores, debe tomarse con su valor más desfavorable.

TABLA 4.4. - EVALUACION DE LA ESTABILIDAD SEGUN STEVENSON (1977)

P-Factor de plasticidad de la arcilla	
Bajo IP	1
Medio IP	2
Alto IP	3
W-Factor hidrogeológico (posición del nivel freático máximo respecto a la posible superficie de rotura)	
Por debajo de la superficie	1
Entre la superficie y la mitad de la profundidad de la misma	2
Por encima de la posición anterior	3
S- Angulo de talud	
Bajo (tercio inferior de la gama natural)	1
Medio (tercio central)	2
Alto (tercio superior)	3
C-Complejidad del talud	
Talud regular	1
Antiguo deslizamiento, actualmente erosionado	2
Rotura reciente sin erosión	3
U-Usos del suelo	
Bosque	1
Despejado o edificado con precauciones especiales	1,25
Construido sin precauciones especiales	1,5

e incompletas y resultan de difícil extrapolación fuera del área en el que han sido desarrolladas.

Para taludes en roca puede citarse el método factorial propuesto por Romana, estableciendo el índice SMR (Slope Mass Rating) según la siguiente definición:

$$SMR = RMR - (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

En esta expresión el RMR es el de la clasificación de Bieniawski, donde se tiene en cuenta la resistencia de la roca matriz, el RQD, la separación de las discontinuidades, la naturaleza del relleno, la presencia de agua, etc. F_1 depende del paralelismo entre la dirección del diaclasado y el frente del talud. F_2 se refiere al buzamiento de los estratos y F_3 refleja la relación entre el frente del talud y el buzamiento de las diaclasas. En F_4 se tiene en cuenta el método de excavación.

Según el valor del índice SMR se puede estimar el grado de probabilidad de rotura de un determinado talud rocoso. Valores del SMR inferiores a 20 son indicativos de rotura o deslizamiento.

5. DETERMINACION DEL RIESGO

El riesgo se define como el producto de la peligrosidad potencial por los daños ocasionados.

La evaluación del riesgo implica por tanto la cuantificación del peligro y de sus consecuencias.

Un peligro determinado puede tener diferentes consecuencias. Por ejemplo la reptación superficial puede causar los siguientes daños a los edificios:

- Daños arquitectónicos (grietas)
- Daño a los servicios (rotura de tuberías)
- Daños estructurales

Estas consecuencias son características del peligro. Diferentes peligros pueden tener diferentes características.

Cada una de las características descritas puede asociarse con un coste, tal como el de su reparación, aunque en algunos casos es imposible llegar a esta valoración, como en el caso de efectos ambientales o estéticos.

Por otro lado, incluso en casos de daños claros, es problemático el establecimiento de un coste. Por ejemplo, una grieta puede ser aceptable para un propietario que no quiere vender su vivienda; en caso de venta la grieta puede tener influencia, pero ello depende de las condiciones del mercado.

Los daños en los edificios dependen de las características de sus cimentaciones y estructuras, de la profundidad y tipo de deslizamiento y de la distancia entre el edificio y los límites de la zona inestable. Determinados movimientos lentos pueden ser absorbidos por edificios relativamente rígidos y monolíticos, mientras que otros edificios pueden resultar totalmente destrozados. Se conocen casos de reptaciones en las que los edificios sufrieron desplazamientos de varios metros sin presentar daños apreciables.

Por otro lado, las tierras de labor pueden recuperarse fácilmente en zonas deslizadas una vez estabilizado el movimiento, por lo que el riesgo es distinto del de aquellos casos en que el terreno queda totalmente inutilizado para cualquier uso posterior.

En el caso de desprendimientos de roca suele llegarse a la destrucción total de los edificios afectados, sin embargo, el riesgo global asociado con estos desprendimientos puede ser muy bajo, dado el escaso número de casos que se presentan.

Los mayores problemas se plantean respecto a la evaluación de las vidas humanas por la dificultad de asociar un valor monetario a las mismas. Dada la velocidad de los movimientos del terreno, este riesgo sólo suele ser aplicable en el caso de desprendimientos de roca, ya que en los otros tipos de movimiento resulta muy difícil que se vean implicadas directamente vidas humanas.

Resulta interesante a escala nacional la evaluación de riesgos geológicos realizada por el I.T.G.E. en su publicación del año 1987.

Partiendo de la información geológica recopilada por otros autores, se clasifica el territorio nacional en 1078 cuadrículas, correspondientes al mapa topográfico 1:50.000.

Para cada una de estas cuadrículas se hizo una asignación de grados de peligrosidad de acuerdo con la escala siguiente :

- 0: Sin información o no clasificado.
- 1: Peligrosidad nula. Zonas con ausencia de problemas de inestabilidad.
- 2: Peligrosidad baja. Zonas con áreas sujetas a problemas de inestabilidad generalmente poco importantes y/o de carácter esporádico.
- 3: Peligrosidad moderada. Zonas con áreas sujetas a problemas de inestabilidad de relativa importancia por su frecuencia, intensidad o extensión.
- 4: Peligrosidad alta. Zonas con áreas sujetas a problemas de inestabilidad importantes por su frecuencia, intensidad o extensión, y/o con abundantes áreas inestables.

Evidentemente, esta es una primera simplificación, ya que la cuadrícula no es una unidad geomorfológica ni geocinética, pudiendo afectar los movimientos a porcentajes muy variables de la extensión total.

Para la evaluación del riesgo se introdujeron diversos parámetros, siguiendo las directrices del Master Plan for California (1973). Así por ejemplo, el índice de coste geológico variaba de 0 Pts por persona/suceso en zonas con grado de peligrosidad 1, a 8.471 Pts para el grado de peligrosidad 4. Estas cifras están realizadas por correlación con otros estudios y lógicamente su evaluación constituye una parte muy delicada de la fiabilidad del riesgo total.

Para tener en cuenta las personas potencialmente afectadas por los movimientos del terreno se aplicaba, al número medio de personas residentes en cada cuadrícula un coeficiente de proximidad que variaba de 0 a 1, según el grado de explosión del movimiento. Así se obtenían un 9,25% de habitantes expuestos potencialmente al riesgo en zonas de baja peligrosidad. Dicho porcentaje, descendía al 5,53% en zonas de peligrosidad media, y al 4,75% en zonas de peligrosidad alta.

En este caso también existe un grado de incertidumbre notable, ya que en el caso de movimientos del terreno existe una tendencia natural de la población a evitar las zonas inestables además de las indicaciones en este sentido de los planes de ordenación urbana. Resulta curioso sin embargo que los desprendimientos mortales, por ejemplo en cantiles rocosos, suelen darse en zonas de muy baja densidad de población y con edificación dispersa, lo que equivale a decir que la probabilidad de accidentes es en estos casos muy superior a la media de una región o cuadrícula.

En la evaluación del riesgo, se incluye además un factor de catástrofe para tener en cuenta las posibles pérdidas de vidas humanas. Los valores de este factor varían de 1 a 1,5 según el grado de peligrosidad, lo cual equivale a un número de vidas humanas variable de 1 a 100 por suceso. Creemos que en general los movimientos del terreno no adquieren en nuestro país características tan catastróficas, salvo en algunos casos excepcionales, como el de Azagra, si bien el periodo de recurrencia de estos sucesos suele ser superior a 100 años.

A este respecto se ha considerado en el estudio que en la hipótesis de riesgo máximo el deslizamiento tiene lugar una vez cada 30 años, mientras que en la hipótesis de riesgo medio el período de retorno sería de 500 años.

Con las premisas expuestas se llega a unas valoraciones del coste del riesgo máximo de 0,14 billones de pesetas para el período de los próximos 30 años, mientras en la hipótesis de riesgo medio el coste sería de 8.300 millones para el mismo período.

Las cifras se distorsionan considerablemente si se introducen las pérdidas por daños a infraestructuras, ya que superan en mucho a las pérdidas ocasionadas en núcleos urbanos, con un total de 0,75 billones de pesetas. Esta circunstancia haría aconsejable un análisis mucho más detallado de las pérdidas en infraestructuras, pero es notable su dificultad. Sólo puede hacerse una estimación a partir de los gastos en obras de reparación de carreteras y ferrocarriles.

6. CAUSAS DE LOS MOVIMIENTOS

6.1. Introducción

En general resulta muy difícil conocer a priori el riesgo de deslizamiento de una determinada formación o terreno, salvo cuando se trata de zonas ya movidas que pueden haber alcanzado un equilibrio temporal.

Actualmente, se dispone para varias zonas españolas de cartografía de movimientos del terreno, clasificando éstos en activos o potenciales. Esta cartografía ha sido realizada en gran parte por el Servicio de Geotecnia del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, pero también existe cartografía preparada por el Instituto Tecnológico y Geominero de España y por algunas comunidades autónomas.

Esta cartografía o la que se podría elaborar expresamente permite detectar aquéllas zonas donde ya se han producido movimientos y conocer la extensión de las formaciones más susceptibles por cuanto constituyen masas potencialmente inestables.

A veces es la simple toponimia de una zona la que debe alertarnos sobre este riesgo. Denominaciones como "bujeo" "argañoso", "hundidero", etc. son de por sí suficientemente explicativas.

Desgraciadamente la cartografía de carácter nacional o incluso regional suele estar elaborada a escala 1/50.000 ó como mucho 1/25.000, la cual puede resultar insuficiente para muchas de las aplicaciones prácticas. Ello resalta la importancia de recurrir a estudios específicos a escala de una ciudad, una urbanización, obra pública, etc. Ya se han hecho algunos avances en este sentido y se dispone de una metodología suficientemente avanzada al respecto.

6.2. Causas de los movimientos

Entre las causas o factores naturales debe prestarse atención a:

- Las lluvias intensas
- La socavación producida por corrientes de agua
- La oclusión de manantiales o destrucción de las redes de drenaje natural
- La progresión de la erosión hídrica por escorrentías.

Respecto a los factores antrópicos se pueden citar:

- Excavaciones
- Riegos excesivos
- Roturas de conducciones y canales
- Fugas de depósitos
- Voladuras de cantera
- Implantación de rellenos o vertederos
- Alteración de redes de drenaje
- Deforestación
- Incendios

Existen por último diversos fenómenos no controlables pero que también inciden en la producción de movimientos, como son:

- Terremotos
- Acciones tectónicas (Neotectónica)
- Modificación regional de acuíferos, por ejemplo por efecto de grandes presas
- Fenómenos kársticos
- Subsistencia regional.

6.3. Análisis de los factores antrópicos

Existen numerosos movimientos del terreno que pueden atribuirse a causas naturales y que constituyen un eslabón más de la cadena de procesos geodinámicos que van modelando la superficie terrestre. En estos procesos juegan un papel importante las condiciones hidrogeológicas, los agentes erosivos y la naturaleza de los materiales. En algunos casos inciden también de manera clara las acciones sísmicas.

No vamos a entrar en el análisis de estos fenómenos naturales ya que se trata muchas veces de movimientos de gran magnitud cuyo control se escapa a una posible acción humana, al igual que lo hacen otras catástrofes naturales. Sólo en algunos casos de limitada envergadura es posible adoptar medidas preventivas, pero esto constituye una práctica poco usual.

Considerando pues únicamente aquéllas acciones de tipo antrópico, podemos enumerar como más frecuentes las siguientes:

a) Excavaciones

El recorte del pie de un talud para alojar una estructura, viales, edificios, etc. suele ser una causa muy frecuente de deslizamientos. En efecto, en la base del talud es donde se concentran las mayores tensiones de corte y por tanto es donde se requiere una mayor resistencia. El terreno situado al pie del talud hace en parte de contrafuerte frente a los empujes de la parte superior y constituye una masa estabilizadora en el caso de movimientos rotacionales.

En algunos casos las excavaciones hacen también que la superficie freática aflore en el talud o quede muy próxima al mismo, empeorando notablemente las condiciones de estabilidad y pudiendo iniciarse procesos de erosión interna.

Es importante señalar que a veces la inestabilidad se produce con excavaciones muy reducidas, del orden del 10% de la altura del talud, y al no ser intuitiva esta consecuencia, ello hace que se de con frecuencia este tipo de actuaciones.

b) Saturación accidental del terreno

En zonas habitadas o urbanas es muy frecuente la existencia de conducciones, depósitos, redes de saneamiento, canalizaciones industriales, que pueden ser origen del paso al terreno de agua u otros fluidos a través de fugas o roturas.

Como es sabido, la infiltración de agua en un talud produce por un lado un aumento del peso efectivo del terreno, y por otro, crea presiones intersticiales positivas que reducen la resistencia al corte. En algún caso el afloramiento de las fugas en la superficie del talud puede también iniciar procesos erosivos.

El principal problema radica en lo insidioso del proceso, ya que por producirse bajo la superficie del terreno, permanece oculto hasta que se manifiestan sus efectos en forma más o menos espectacular.

Una de las características del proceso es su carácter progresivo. A veces, son los propios movimientos del terreno, de carácter muy lento, los que van deformando las canalizaciones que acaban provocando las fugas. Estas pueden ser casi imperceptibles al principio, pero, según va saliendo agua, se va debilitando el apoyo de la conducción y aumenta la apertura de las juntas o fisuras de forma irreversible. El proceso es especialmente grave cuando el terreno tiene baja resistencia, como puede ser el caso de suelos flojos o zonas de relleno.

Especialmente frecuente es el caso de los depósitos de agua, que por deficiencias de cimentación o falta de mantenimiento sufren agrietamientos en la solera y particularmente en el contacto de ésta con los muros de contorno, mucho más rígidos. Pequeñas fugas a lo largo de mucho tiempo pueden saturar un volumen importante de terreno y movilizar deslizamientos de ladera de considerable magnitud, afectando en muchos casos a las edificaciones situadas en la misma.

c) Socavación

La acción de las corrientes de agua en la base de los taludes produce efectos análogos a los de excavación artificial, si bien suele estar acompañada de una saturación de márgenes que todavía empeora más la situación.

En principio podría decirse que se trata de un fenómeno natural y de hecho éste es uno de los factores más frecuentes de producción de movimientos. Sin embargo, el fenómeno también se da en zonas urbanas donde los cauces han podido ser modificados creando condiciones de erosión y ataque más graves que con la configuración original. Aún subsisten muchas zonas en que los cauces carecen de protección de márgenes o éstas son insuficientes. Lógicamente las peores condiciones se producen en época de avenidas, cuando la fuerza erosiva del agua es mayor. Al mismo tiempo se producen sobreelevaciones importantes del nivel de agua, con lo cual, al descender la crecida, se presentan condiciones análogas a las de un vaciado rápido quedando en el terreno presiones intersticiales descompensadas que pueden provocar con facilidad el deslizamiento. Fenómenos de este tipo son por ejemplo muy frecuentes en el área de Alcoy.

Lógicamente la socavación es más intensa en las zonas cóncavas en que la corriente de agua tiene una componente hacia la ladera. Al ser el fenómeno progresivo, puede conducir probablemente al deslizamiento de no adoptarse antes medidas de protección oportunas.

Este es quizá uno de los pocos casos en que la progresión del proceso permite actuar a tiempo.

d) Debilitamiento de taludes por cavidades

En determinadas zonas las laderas se aprovechan para excavar cuevas, bodegas, minas de extracción de materiales, areneros, etc. Estos procesos equivalen a una excavación de pie si bien de tipo difuso, pero a veces con una penetración importante en la ladera. La situación más desfavorable es cuando las galerías excavadas corren paralelamente al pie del talud y pasan por la zona de mayor concentración de tensiones.

Se conocen bastantes casos en que antiguos minados, generalmente cargados de agua, han provocado movimientos importantes de taludes.

Lógicamente el tratamiento consiste en un relleno preventivo de las cavidades y un drenaje de las mismas, pero es necesario reconocer que esto rara vez se hace antes de iniciado el movimiento.

e) Vertidos sobre estratos inclinados

La construcción de carreteras y obras lineales o incluso el desarrollo de urbanizaciones importantes, producen un considerable volumen de materiales que deben depositarse en vertederos o escombreras.

Si estos vertederos se apoyan sobre laderas en equilibrio estricto, pueden provocar con facilidad deslizamientos.

En el caso de suelos o materiales poco competentes pueden iniciarse movimientos rotacionales con el vertedero en su mitad superior debido al desfavorable efecto volcador que puede producir una sobrecarga importante en cabecera de un talud.

En el caso de estratos con buzamiento hacia la ladera pueden inducirse deslizamientos planos de los estratos superficiales sobre los profundos, con aparición de grietas de tracción a considerables distancias ladera arriba.

Estos deslizamientos son muy difíciles de estabilizar, ya que las contenciones necesarias pueden ser incluso superiores a las fuerzas adicionales introducidas por los vertidos.

f) Acciones dinámicas

Diversas acciones dinámicas producen aceleraciones horizontales y verticales que, transmitidas a la masa de un talud, pueden provocar la inestabilidad del mismo.

Entre estas acciones la más usual es el terremoto, al que lógicamente se le debe asignar un carácter de riesgo natural.

Sin embargo, existen también acciones dinámicas de tipo antrópico como son las derivadas de voladuras, vibraciones de maquinaria, etc.

Debe reconocerse que la energía transmitida al terreno por estas acciones tiene que ser muy elevada para movilizar masas importantes, pero no obstante la energía puede ser suficiente para provocar desprendimientos de bloques inestables, rodadura de piedras, etc. que en algunos casos pueden afectar de modo importante a edificaciones situadas al pie de la ladera.

g) Ascenso del nivel freático

Ya hemos visto antes la nociva incidencia de la entrada de agua al terreno a través de fugas de canalizaciones o depósitos. El fenómeno puede tener mucha más envergadura cuando el talud constituye una frontera de salida de importantes volúmenes de agua almacenados en el macizo adyacente. Se sabe que unas lluvias intensas pueden provocar ascensos de bastantes metros del nivel freático, con lo cual las condiciones de estabilidad de los taludes pueden llegar a ser insuficientes.

Aunque este fenómeno puede caracterizarse como de tipo natural, a veces son las acciones humanas las que favorecen su desarrollo, por ejemplo por labores de eliminación de la cobertera de suelo permitiendo una más fácil infiltración del agua de lluvia y reduciendo la escorrentía natural hacia los cauces superficiales.

h) Deforestación o incendio

Como es sabido, las raíces de los árboles proporcionan una trabazón a la capa superficial del terreno, que es precisamente la de menor resistencia y la más susceptible de deslizamiento. Por otro lado, mediante la evapotranspiración, la vegetación extrae humedad del terreno, reduciendo las presiones intersti-

ciales en la masa del mismo y, en algunos casos, provocando succiones importantes.

Todos estos efectos se pierden en el caso de una tala o deforestación del talud, siendo todavía peor el caso de un incendio, ya que con él se pierde gran parte de la capacidad regenerativa de las plantas.

7. ACTUACIONES Y ANALISIS DEL MOVIMIENTO

Una vez producido un deslizamiento es importante conocer las causas y características del mismo para adoptar las medidas correctoras más idóneas.

Este tipo de análisis no es fácil y requiere bastante experiencia, pero no obstante pueden darse algunas indicaciones de tipo general, incluyendo diversas actuaciones en fases sucesivas del proceso.

7.1. Medidas a corto plazo

Dentro de este grupo podrían considerarse las siguientes:

a) Auscultación primaria

Se denomina así aquella que se puede ejecutar con la simple inspección de la zona afectada, la cual debe ser realizada, sin embargo, por técnicos especializados. En esta operación se debe intentar valorar principalmente la extensión y velocidad del movimiento, con objeto de planificar las actuaciones siguientes. Es también importante llegar a caracterizar el tipo de movimiento, ya que ello puede servir para adoptar las medidas correctoras idóneas.

b) Actuaciones en la zona de influencia

A la vista de la auscultación primaria deberá delimitarse la zona afectada por movimientos, así como aquella con riesgo potencial de serlo en plazo más o menos breve.

Si los movimientos suelen afectar a viviendas, lo más probable es que éstas sufran agrietamientos capaces de provocar su ruina.

Los técnicos correspondientes deberán evaluar la velocidad de este proceso juzgando si puede llegar hasta la ruina de los edificios y aconsejando en tal caso la evacuación de los mismos. Esto puede plantear graves problemas

de realojamiento que en una primera fase pueden resolverse con edificios públicos, albergues, familiares de los afectados, etc., pero debe pensarse inmediatamente en la conveniencia de habilitar viviendas permanentes, lo cual puede conseguirse en breve plazo mediante módulos prefabricados de fácil montaje. Dichas viviendas, lógicamente, deberán colocarse en una zona suficientemente segura y que no pueda ser afectada por los movimientos.

Al mismo tiempo que la protección de las personas, debe pensarse en la protección de los servicios y vías de comunicación.

Todos aquellos servicios que corran el riesgo de rotura, generalmente con consecuencias graves para las personas o para la propia dinámica del movimiento, deberán anularse, buscando abastecimientos sustitutorios. Se prestará especial atención a las redes de agua y saneamiento.

En el caso de vías de comunicación se habilitarán los desvíos de carreteras y caminos que sean necesarios para el servicio de la zona, anulando aquéllos afectados por el movimiento. En algún caso habrá que recurrir a maquinaria de obras públicas o forestal para abrir pistas provisionales cuando la red existente sea insuficiente.

El problema es mucho más complicado en el caso de ferrocarriles, ya que no es posible buscar trazados alternativos.

Los propios técnicos de la empresa de transportes, deberán decidir si se puede mantener la vía aunque sea en forma provisional, o si es necesario interrumpir definitivamente el servicio.

Cuando se trate de canales o tuberías de conducción, debe procederse a la mayor urgencia a la interrupción del caudal mediante los oportunos cierres aguas arriba. Cuando éstos queden muy alejados de la zona afectada, deberán habilitarse aliviaderos para que la descarga del agua no se haga de forma incontrolada sobre el propio terreno en movimiento.

c) Medidas estabilizadoras

Desde los primeros momentos y una vez caracterizado el movimiento, pueden adoptarse algunas medidas conducentes a frenar la velocidad del mismo y a su estabilización parcial. Entre ellas pueden citarse:

- La captación y vertido fuera de la zona deslizada de surgencias o manantiales, así como de cualquier arroyo o cauce de aguas superficiales que pueda aportar agua al deslizamiento.
- Sellado de grietas por donde pueda infiltrarse el agua cuando haya amenaza de lluvia.
- Descarga de tierras en la parte alta de la ladera cuando los movimientos sean de tipo rotacional.
- Recarga en el pie o zona de salida del deslizamiento, mediante escolleras y terraplenes para favorecer la estabilización del mismo.
- Excavación y retirada del frente o lengua del deslizamiento para evitar que éste se extienda de modo no deseado.

A este respecto debe prestarse especial atención a evitar que se formen presas en cursos de agua, ya que por tratarse de material suelto el agua acumulada puede romper dichas presas de forma más o menos brusca, dando lugar a olas de avenida, muy peligrosas para los terrenos situados aguas abajo.

d) Iniciación del estudio geotécnico

Desde las primeras fases del movimiento deberá pedirse la colaboración de expertos geotécnicos, los cuales podrán fijar el plan de auscultación y de prospecciones más adecuado para caracterizar el deslizamiento y proponer las medidas correctoras más idóneas.

Los mismos expertos podrán asesorar mejor que nadie sobre las medidas a adoptar en la fase de desarrollo del movimiento.

7.2. Estudios y trabajos de detalle.

La corrección de un problema de estabilidad o movimiento del terreno supone, como en cualquier caso de patología, una detallada información previa sobre:

- Tipología del movimiento.
- Geometría (en especial la posición de la superficie de rotura).
- Estratigrafía o estructura del macizo.
- Propiedades geotécnicas del terreno.
- Condiciones hidrogeológicas.
- Velocidad del movimiento.

Parte de esta información varía poco a lo largo de la vida del talud inestable mientras que otros datos pueden sufrir variaciones apreciables por lo que requieren un seguimiento (auscultación mediante una instrumentación adecuada).

Los estudios a realizar pueden dividirse típicamente en las siguientes fases:

- Recopilación de antecedentes.
- Definición de características. Geometría.
- Encuadre geológico y caracterización geotécnica.
- Auscultación.
- Reconocimientos geotécnicos. Prospecciones.

Comentaremos brevemente cada una de estas fases.

a) Recopilación de antecedentes.

Salvo en casos muy evidentes siempre es interesante analizar qué causas - han podido motivar un problema de inestabilidad. En algunos casos éste se debe a excavaciones realizadas al pie, zanjas de abastecimiento, desmontes de viales, etc. En otros casos, y éstos son más difíciles de detectar, puede haberse producido una fuga en una red de abastecimiento o seneamiento en cabecera de talud que

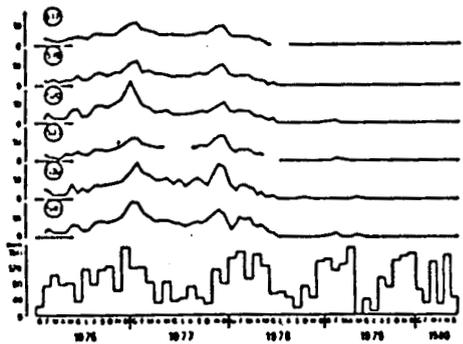


FIG. 7.1. - RELACION PLUVIOMETRICA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO.

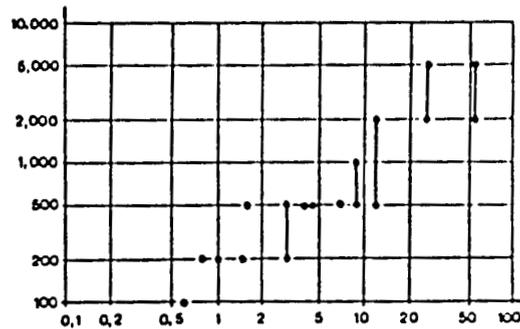


FIG. 7.2. - ESCALAS UTILIZADAS EN ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO

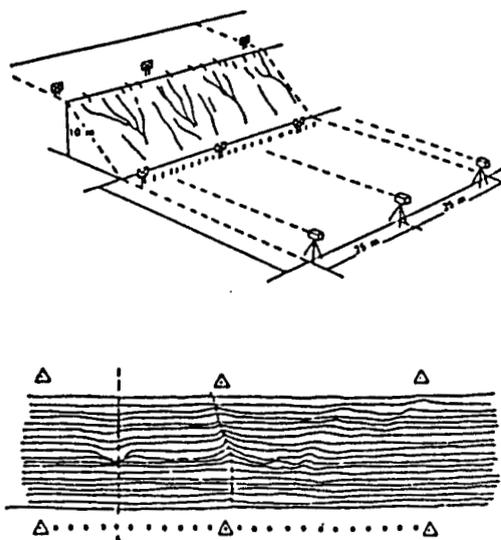


FIG. 7.3.- FOTOGRAMETRIA TERRESTRE.

quizá no ha sido todavía advertida en el momento de iniciarse los estudios. Este problema es particularmente importante en zonas urbanas. En bastantes casos el problema puede detectarse por el análisis de las aguas freáticas al encontrarse en ellas elementos bacterianos u orgánicos correspondientes a aguas de saneamiento.

A veces los antecedentes son más sutiles como una determinada poda o eliminación de vegetación, sacudidas sísmicas de importancia media, voladuras de cantera, etc.

Dentro de esta información puede incluirse la de tipo climático y en especial la pluviometría previa al deslizamiento. Los controles pluviométricos deben continuarse en las fases siguientes de estudio o estabilización, sobre todo cuando existe una clara relación con los niveles piezométricos (fig. 7.1.)

b) Geometría.

Es interesante una definición detallada del área afectada por el deslizamiento, generalmente detectable a partir de la fisuración observable en superficie. A veces esta geometría es muy clara, como cuando se han formado escarpes de cabecera, conchas de deslizamiento, etc., pero en otros casos los detalles externos son mucho más sutiles. Tal es el caso de reptaciones lentas, deformaciones de fluencia, etc. La observación suele complicarse cuando existen zonas pavimentadas recubiertas, vegetación intensa, etc. En deslizamientos de gran magnitud y movimiento esta delimitación geométrica puede hacerse a partir de fotografía aérea y su restitución a escalas de trabajo del orden de 1/1.000 a 1/5.000 (fig. 7.2.). En otros casos suele ser necesario un recorrido de la eventual zona deslizada situando mojones en los puntos donde exista evidencia de movimientos, los cuales pueden ser luego traspasados a planos mediante coordenadas tomadas por topografía convencional de manera aproximada por el propio técnico que realiza el recorrido.

En este recorrido debe tenerse especial atención en batir una zona suficientemente amplia, ladera arriba y abajo, con objeto de delimitar zonas que pueden estar en diverso grado de desplazamiento, en algunos casos casi imperceptible. En el plano-inventario es importante caracterizar de alguna forma la apertura y orientación de las grietas, la profundidad observable, la presencia o no de agua en las mismas y todos aquellos detalles que podrian ser útiles para una interpretación posterior del movimiento.

En el caso de taludes escarpados de altura importante puede ser un problema disponer de una topografía adecuada ya que las restituciones fotogramétricas adolecen en estos casos de errores apreciables. Puede recurrirse a la fotogrametría terrestre, con lo cual se consigue un alzado suficientemente preciso para levantar los cortes geológicos y estratigráficos necesarios (fig. 7.3.). En bastantes casos lo más práctico suele ser utilizar fotografías tomadas a lo largo del talud procurando no introducir distorsiones entre tomas sucesivas. A partir de las fotografías puede obtenerse un calco transparente de forma manual marcando las capas, paquetes o detalles geológicos de mayor interés (fig. 7.4.).

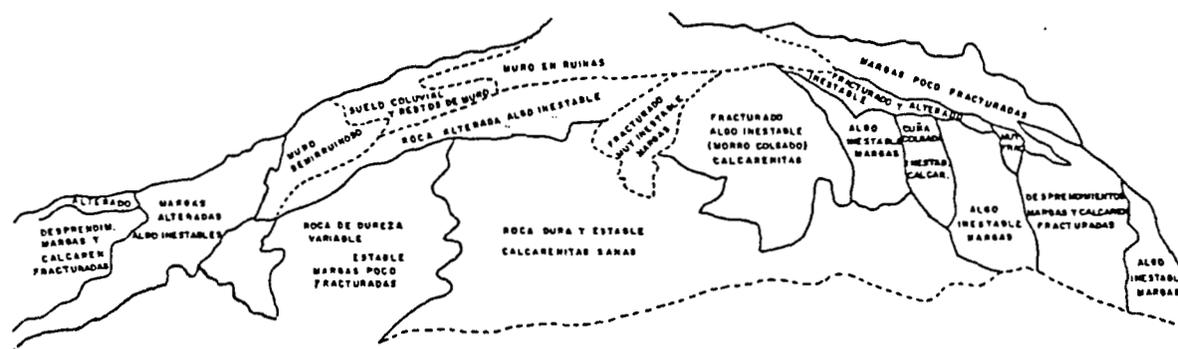


FIG. 7.4.- DESCRIPCION GEOTECNICA DE UN TALUD EN SUPERPONIBLE A FOTOGRAFIA.

c) Encuadre geológico y caracterización geotécnica

La necesidad de una adecuada definición litológica y estratigráfica es análoga a la del proyecto de nuevos taludes, con la facilidad en este caso de estar el desmonte ya realizado o tratarse de una ladera natural.

En macizos rocosos debe hacerse el inventario de fracturas, diaclasas, milonitas, o discontinuidades que puedan haber influido en la inestabilidad detectada. Es importante extraer muestras de las zonas a través de las cuales se haya desarrollado la rotura para determinar los parámetros de resistencia. Esta operación suele ser difícil dado el pequeño espesor de las bandas de rotura. Además de las propiedades del material ya roto suelen ser muy diferentes de las del terreno inalterado.

En suelos o rocas blandas debe estudiarse la masa del talud en profundidad, tanto para definir correctamente la estratigrafía y condiciones hidrogeológicas como para determinar las correspondientes propiedades geomecánicas, sobre todo en las proximidades de la rotura. El muestreo y los ensayos geomecánicos deben ir orientados al modelo de cálculo que se piense utilizar, el cual puede variar de unos problemas a otros. Habitualmente se determina:

- El peso específico aparente del terreno
- Los parámetros de resistencia al corte de pico y residual (ensayos de corte con grandes deformaciones, triaxiales con o sin drenaje, etc.).

además de la identificación de cada estrato y el régimen piezométrico en la masa del talud.

Puede ser también útil la observación de la misma formación en zonas con distintas condiciones de estabilidad.

Debe tenerse en cuenta que incluso en escarpes donde aparezca clara la estratificación, ésta puede tener variaciones en profundidad que por potencia, humedad, cementación, etc. sean determinantes del comportamiento general (fig. 7.5.).

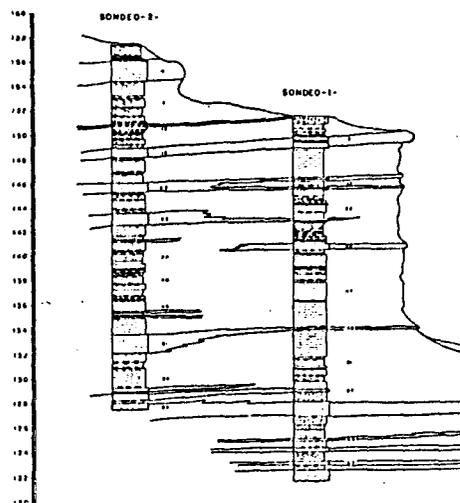


FIG. 7.5.- CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE UN TALUD VERTICAL.

d) Auscultación del movimiento

El control de los movimientos de una gran masa deslizante requiere el auxilio de técnicas especiales, unas de las cuales permiten seguir los desplazamientos superficiales y otras los de los puntos de una misma vertical (fig. 7.6.).

Además de los datos que pueden aportar testigos presenciales, es importante determinar la velocidad real del deslizamiento, ya que de la misma dependerá la viabilidad de determinadas medidas de estabilización. Los sistemas de control varían notablemente según la magnitud de estas velocidades. Así por ejemplo cuando las velocidades son importantes, del orden de $cm/semána$ a cm/mes pueden establecerse medidores de desplazamientos en grietas, generalmente combinados con hitos topográficos controlables taquimétricamente. Cuando los desplazamientos son de fluencia lenta (del orden de mm/mes o inferiores) el control tiene que ser mucho más delicado y las medidas taquimétricas se complican extraordinariamente requiriendo aparatos de alta precisión o controles de tipo inclinométrico.

Normalmente los medidores de desplazamiento de grietas plantean bastantes problemas, ya que se trata de zonas rotas en las que es difícil establecer bases fijas y además muy sujetas a la erosión, vandalismo, etc. (fig. 7.7.). Por otra parte las medidas taquimétricas tropiezan en muchos casos con la dificultad de visualizar la zona deslizada desde zonas estables, bien porque la zona corresponda a un área convexa o no existan enfrente del talud zonas

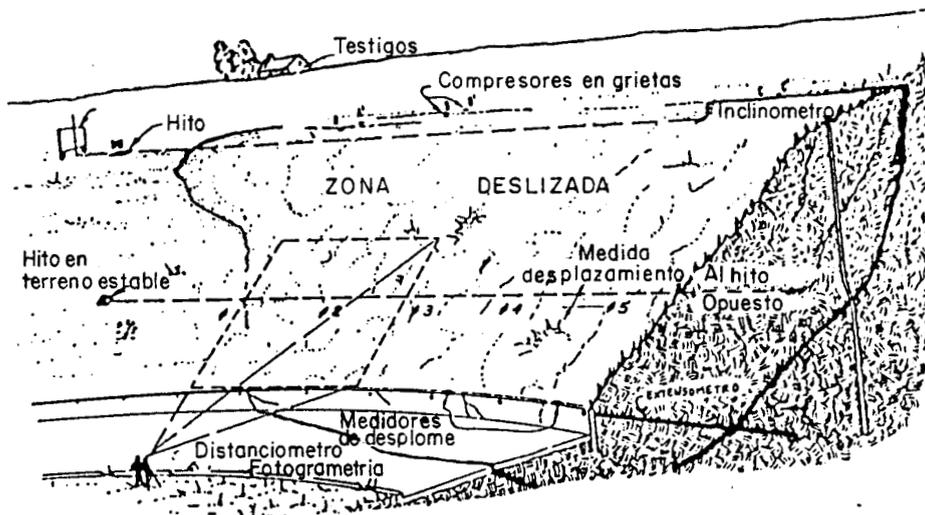


FIG. 7.6.- AUSCULTACION E INSTRUMENTACION DE UN DESLIZAMIENTO.

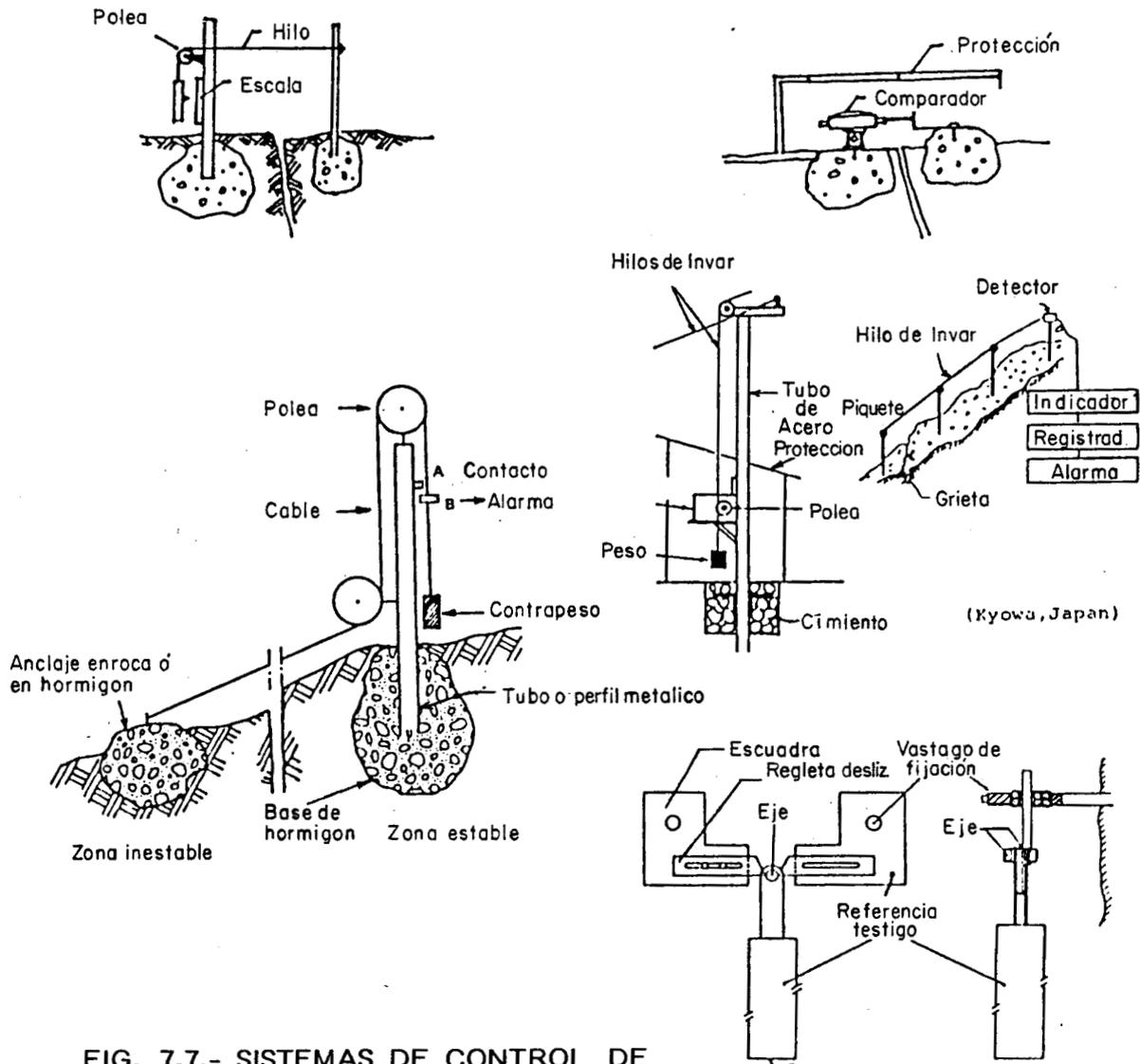


FIG. 7.7.- SISTEMAS DE CONTROL DE APERTURA DE GRIETAS.

a distancia razonable. En estos casos deben establecerse itinerarios taquimétricos o bien establecerse bases a distancias importantes, con lo que los errores de medida pueden fácilmente entrar en el rango de los desplazamientos que se quieren medir. Podemos señalar que con bases distantes más de 100 m de los puntos a medir es casi imposible afinar desplazamientos de 5 mm con taquímetros tipo T-2 y en general habría que recurrir a taquímetros tipo T-3 con hitos de alta precisión (fig. 7.8.).

Como orientación de la precisión alcanzable con distintos métodos de medida pueden considerarse los valores siguientes:

Control directo en grietas (Comparadores, regletas extensométricas, etc.)	$\pm 0,1$ mm en 20 cm
Cinta de convergencia	± 1 mm en 10 m
Nivelación	$\pm 3 D$ (m)/10 mm
Teodolito	$\pm D$ (m)/10 mm
Distanciómetro	± 5 mm en $D < 500$ m
Fotogrametría terrestre	± 20 mm en 100 m

En la fig. 7.9. se muestran los errores de localización de puntos en función de la distancia y del método taquimétrico utilizado.

Como es sabido, los deslizamientos pasan por fases de crisis y de reposo, por lo que el control debe ser cuidadoso y prolongado para deducir la tendencia real. La frecuencia usual de medidas es cada 10 ó 15 días con velocidades normales, pudiendo descender al mes en movimientos lentos o llegar a ser casi diaria cuando existe riesgo de fenómenos acelerados o catastróficos.

A este respecto se cita la utilización, como seguimiento y control, de la emisión acústica o control de la intensidad de impulsos recogidos por captadores introducidos en la masa del talud (fig. 7.10.).

Para evaluar movimientos antiguos y lentos puede ser útil la dendrocronología o análisis de los anillos asimétricos de crecimiento de los árboles desarrollados sobre el talud, los cuales suelen presentar una curvatura con concavidad hacia la parte superior del mismo al intentar compensar los desplazamientos de su base.

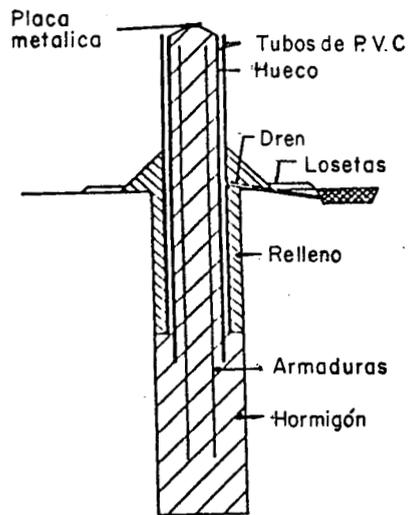


FIG. 7.8.- HITO DE PRECISIÓN.

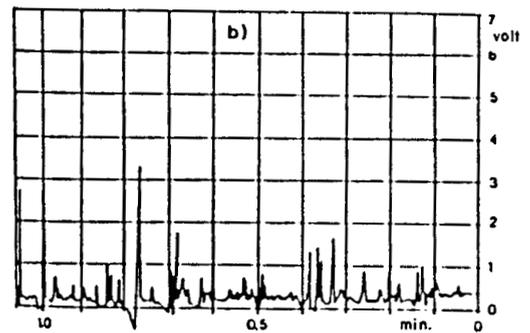


FIG. 7.10. - REGISTRO DE EMISION ACUSTICA.

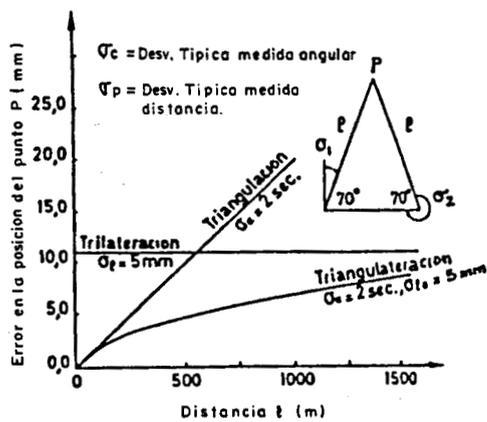


FIG. 7.9. - ERRORES EN EL SEGUIMIENTO DE DESPLAZAMIENTOS.

En general es interesante además de la magnitud absoluta de desplazamiento, definir éste en forma vectorial ya que en deslizamientos complejos puede movilizarse la masa acompañada de rotaciones y giros de difícil interpretación.

En el caso de deslizamientos combinados puede ser muy difícil establecer la compatibilidad de los desplazamientos medidos en diversos puntos, siendo necesario hacer varias hipótesis de compatibilidad geométrica.

e) Prospecciones y controles en profundidad

Aunque a veces suele ser suficiente con realizar catas encajadas en las grietas de contorno para definir adecuadamente la profundidad de las mismas y su curvatura o dirección, en general suele ser necesario recurrir a sondeos profundos. En el caso de las masas deslizantes estos sondeos deben servir también para la instalación de determinados aparatos de auscultación, fundamentalmente inclinómetros, piezómetros, péndulos invertidos, etc.

No debe olvidarse que una de las metas fundamentales de las prospecciones es la localización correcta de la superficie de deslizamiento o eventuales superficies implicadas en la misma. Si el movimiento es suficientemente rápido esto puede constituir incluso un problema para la ejecución de los sondeos, ya que la entubación puede quedar atrapada en torno a la zona de rotura. En otros casos sin embargo esta localización resulta mucho más dudosa. Al respecto podemos recordar que existen métodos muy diversos para definir estas zonas rotas, como pueden ser:

- La ejecución de pozos con revestimiento discontinuo (fig. 7.11.).
- La introducción de testigos al fondo y cabeza de un tubo de plástico, estudiando el atranque con longitudes diversas (fig. 7.12.).
- La instalación de inclinómetros (fig. 7.13.).

Recientemente se han desarrollado detectores lineales, formados por una sucesión de láminas de 1 m de longitud que llevan un circuito electrónico cuya rotura se puede detectar en superficie, con movimientos de 1 mm a 5 cm (fig. 7.14.).

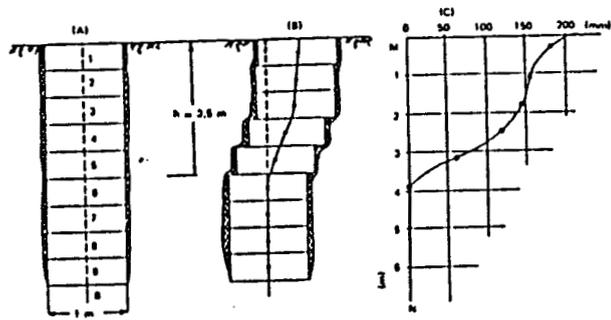


FIG. 7.11. - POZO DE CONTROL.

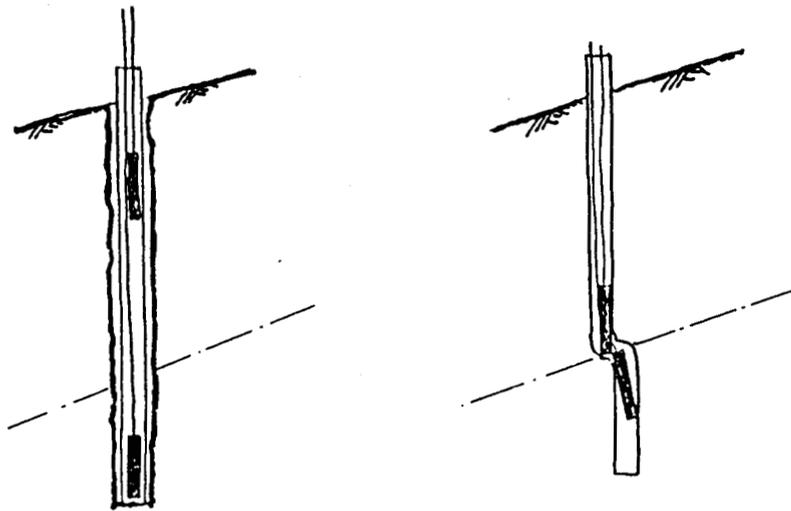


FIG. 7.12. - TUBO CON TESTIGOS PARA DETECCION DE ROTURA.

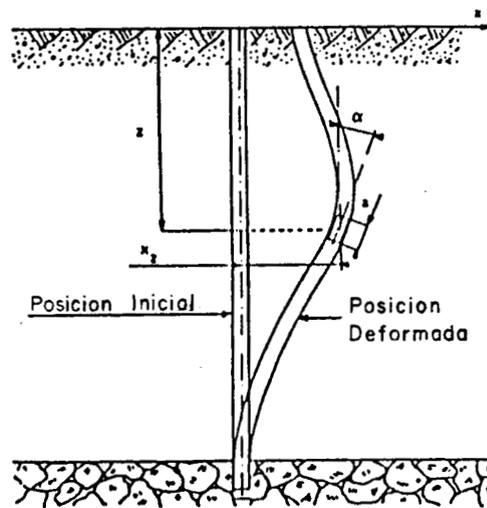


FIG. 7.13. - INCLINOMETRO.

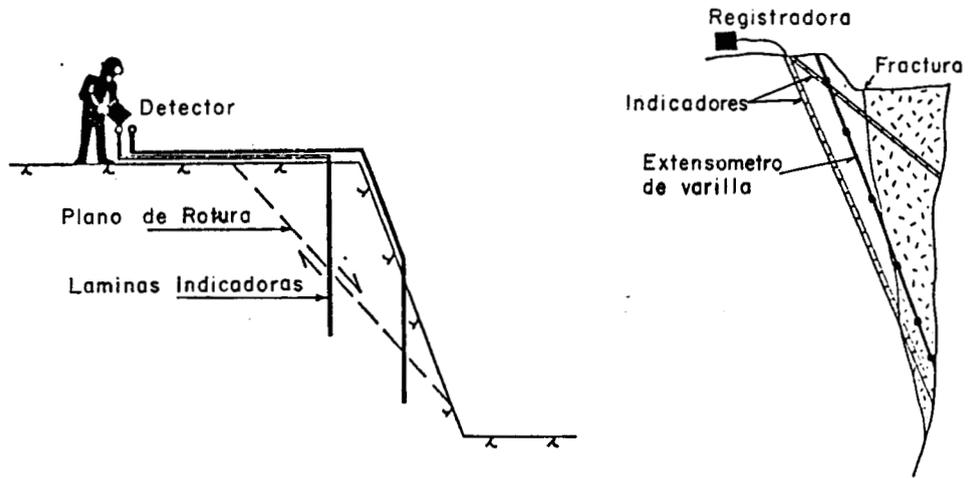


FIG. 7.14. - EL SISTEMA BEMEK

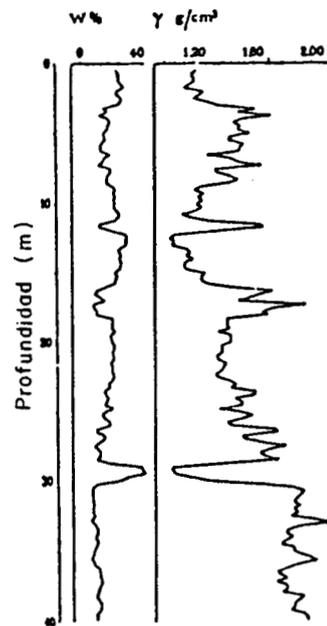


FIG. 7.15. - REGISTROS DE HUMEDAD Y DENSIDAD.

En la localización de las zonas de deslizamiento o dislocación pueden desempeñar un importante papel los métodos nucleares (fig. 7.15.) como la medida de :

- radiación gamma, para detectar variaciones de densidad
- emisión neutrónica, relacionable con la mayor humedad
- dilución de trazadores radioactivos, asociable a una mayor permeabilidad.

También se han utilizado con frecuencia los métodos geofísicos (sísmica, eléctrica, microgravimetría, etc.) para detectar la potencia de las masas movidas, si bien pueden plantear problemas de definición cuando las diferencias litológicas son pequeñas.

8. MEDIDAS CORRECTORAS

Con base en el análisis del deslizamiento podrán seleccionarse aquellas actuaciones más adecuadas, teniendo en cuenta la naturaleza del mismo, y la urgencia necesaria, los bienes definidos y las oportunas consideraciones de coste.

Las soluciones difieren, según la naturaleza del terreno existiendo tratamientos específicos para suelos y para rocas, si bien pueden presentarse multitud de situaciones intermedias.

8.1. Movimientos en suelos.

En la Tabla 8.1.se han intentado sintetizar los métodos más utilizados para corregir deslizamientos en suelos o rocas alteradas.

Algunos tipos de movimientos como flujos o coladas de barro no admiten actuaciones durante el desarrollo de los mismos, sino, como mucho, un acondicionamiento de la masa movida una vez que ésta ha alcanzado el reposo.

Sobre los métodos indicados pueden hacerse las siguientes observaciones:

TABLA 8.1. - METODOS DE ESTABILIZACION DE DESLIZAMIENTOS

1. Modificación de geometría	{ Recorte en cabecera Rebaje del talud Recarga al pie	
2. Drenaje	{ Superficial Interno	{ Cunetas de desvío Vegetación Sellado de grietas Pozos Pantallas drenantes Zanjas-dren Drenes California Galerías Electroósmosis
3. Contención	{ Rígida Semiflexible Flexible	{ Muros de hormigón armado Elementos anclados Pasadores (pilotes, micropilotes, enclavamientos) Muro de gabiones Repiés de escollera Muros-criba
4. Mejora de resistencia del terreno	{ Cosido o claveteado Inyecciones Tratamientos térmicos	

a) Modificaciones de geometría

En los casos en que sea factible, la solución más económica consiste en reperfilear el talud excavado o rellenando de forma que se contribuya a mejorar la estabilidad (Fig. 8.1.)

La solución más evidente puede ser el rebajamiento general de la inclinación del talud, ya que evidentemente cuanto mayor sea la inclinación peores son las condiciones de estabilidad.

A veces, un tratamiento general no es posible y entonces puede recurrirse a retirar tierras de la parte superior del talud, donde su efecto desestabilizador es máximo. Debe tenerse en cuenta, no obstante, que sólo es cierto en movimientos de tipo rotacional, no resultando eficaz en movimientos de tipo plano.

Conviene advertir que si el movimiento se ha producido por excavación de un volumen V al pie, el volumen a descargar en cabecera para la estabilización será mayor, ya que el terreno roto funciona con la resistencia residual.

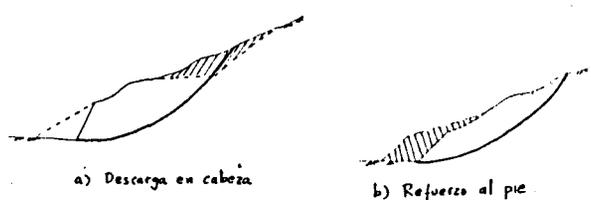


FIG. 8.1. MODIFICACIONES DE GEOMETRICAS

Debe prestarse atención a las condiciones en que queda la zona excavada para no provocar inestabilidades ladera arriba. En algunos casos habrá que disponer estructuras de contención para sujetar la parte de talud que ha podido ser descalzada por las excavaciones. Es importante que estas excavaciones se hagan con cuidado y preferentemente por bataches construyendo al mismo tiempo las estructuras de contención y aprovechando así la resistencia de pico del terreno. Si las estructuras se difieren mucho pueden iniciarse roturas, con descenso de la resistencia del terreno, a valores residuales, generando un nuevo deslizamiento y obligando a una contención mucho más importante.

En la zona central del deslizamiento existe un área neutra en la que no tiene interés modificar la geometría, ya que su contribución al equilibrio de momentos en movimientos rotacionales es mínima. Mediante oportunos estudios puede establecerse la extensión de esta zona.

El tema ha sido estudiado por Hutchinson (1984) quien concluye que para condiciones no drenadas el punto neutro es el de tangente horizontal a la superficie de deslizamiento, (fig. 8.2.) mientras que para drenaje completo queda algo más alto, donde la tangente vale

$$\alpha n = -\frac{\text{tg. } \phi'}{F_0}$$

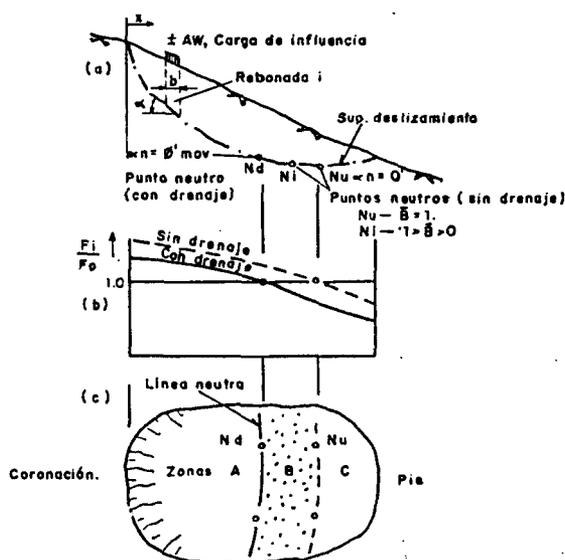


FIG. 8.2. LOS PUNTOS NEUTROS
(HUTCHINSON, 1984)

siendo F_0 el coeficiente de seguridad del talud original. El mismo autor deduce que resulta más eficaz cargar al pie que excavar en cabeza pero esto casi nunca es posible por razones de espacio.

También llama la atención sobre el riesgo de que un rebajamiento de talud para corregir deslizamientos superficiales induzca un movimiento rotacional profundo, ya que en realidad supone una reducción de las fuerzas estabilizadoras al pie del talud (fig. 8.3.)

Se plantea con frecuencia cual debe ser el coeficiente de seguridad del talud una vez estabilizado (el cálculo debe hacerse con parámetros residuales), adoptándose en general valores $F=1,1$ a $1,3$ según la importancia de los bienes afectados o el riesgo para las personas. Debe tenerse en cuenta que cuando las masas inestables o las fuerzas movidas son de gran envergadura un incremento de $0,1$ en el coeficiente de seguridad puede dar lugar a inversiones costosísimas, por lo que debe elegirse con gran cuidado el valor F de proyecto.

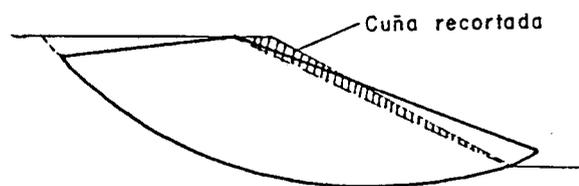
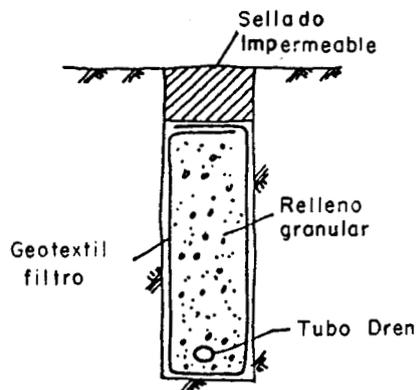
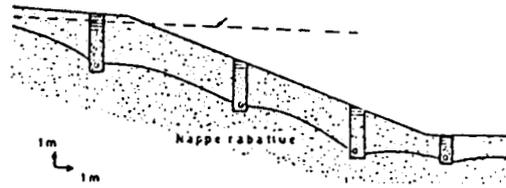


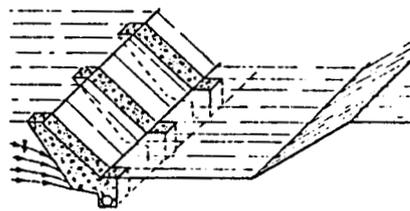
FIG. 8.3. - DESLIZAMIENTO PROVOCADO POR UN REBAJAMIENTO DEL TALUD.



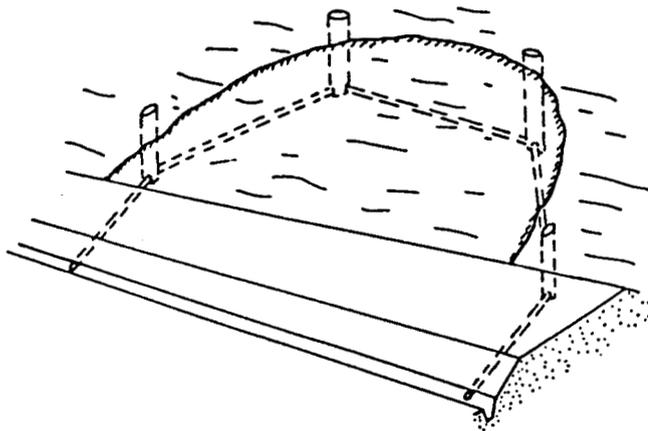
a) Zanja drenante.



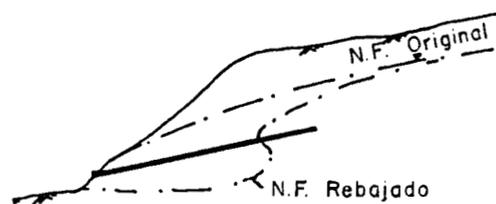
b) Zanjas paralelas al talud.



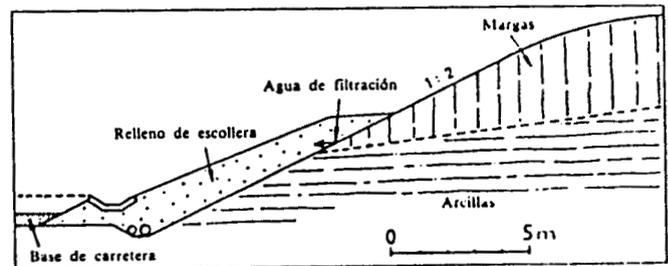
c) Zanjas transversales.



d) Pozos drenantes



f) Dren tipo California.



e) Espaldón drenante (Zaruba y Menci, 1982).

FIG. 8.4. - SISTEMAS DE DRENAJE DE TALUDES.

Otra posible actuación consiste en aumentar el peso estabilizador al pie del deslizamiento, bien restituyendo los volúmenes excavados, o bien sobrecargando el pie hasta obtener el coeficiente de seguridad deseado.

La solución habitual consiste en colocar piedras de gran tamaño o escollera hasta conseguir el peso deseado.

La ventaja de los materiales granulares gruesos es su elevado ángulo de rozamiento y sus condiciones de drenaje. Sin embargo, cuando hay afloramiento de agua en el pie del talud, pueden producirse arrastres de finos a través de la escollera y provocarse un fenómeno de erosión interna. En estos casos es conveniente colocar entre la escollera y el terreno una capa-filtro que retenga las partículas de éste pero permita la salida del agua.

b) Drenaje

Es un hecho ampliamente reconocido que la reducción de presiones intersticiales en la masa de un talud contribuye notablemente a su estabilidad, por lo que pueden calificarse de positivas todas las medidas conducentes a rebajar o deprimir el nivel freático en las proximidades de las superficies potenciales de deslizamiento. Los métodos son muy diversos si bien pueden diferenciarse dos grandes grupos:

-Drenaje superficial

Pretende captar y extraer las aguas aflorantes al frente del talud, separando del mismo la superficie freática libre si bien esta separación suele estar limitada a 2 ó 3 m. como máximo.

Las soluciones usuales consisten en zanjas paralelas al pie del talud o contrafuertes perpendiculares al mismo (fig. 8.4, a,b,c,). Estos últimos tienen una salida natural por su base mientras que las zanjas pueden llevarse paralelamente al talud hasta un colector por donde se extraen las aguas.

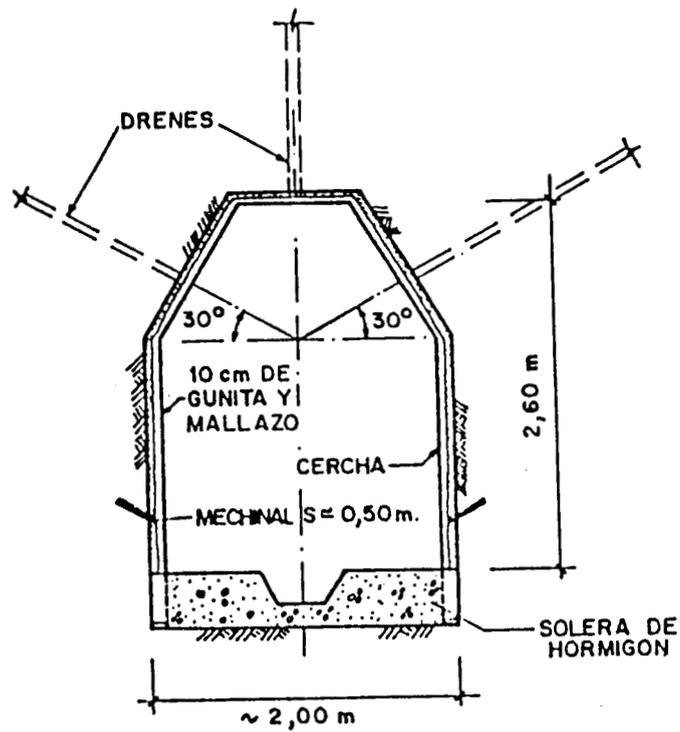


FIG. 8.5. - GALERIA DE DRENAJE (R. ORTIZ ET AL.)

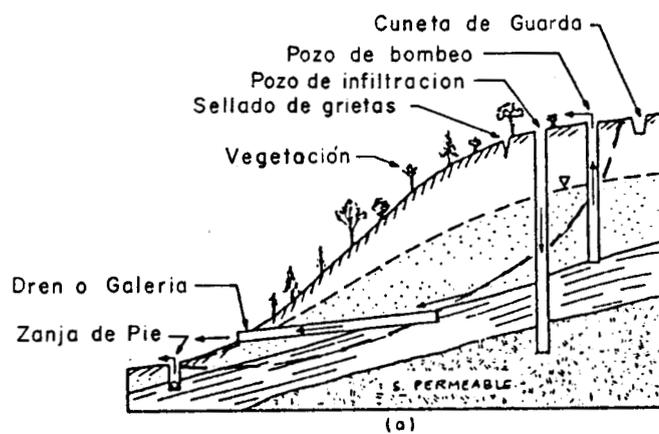


FIG. 8.6. - COMBINACION DE SISTEMAS DE DRENAJE.
(Hunt, 1984).

También existen variantes oblicuas o disposiciones en espina de pez cuya eficacia es función de la superficie atravesada.

Dentro de este grupo podría incluirse el recubrimiento completo de taludes mediante mantos de grava o encachados de piedra. Estos mantos son muy eficaces para evitar la erosión superficial e impedir el flujo por saturación de materiales cohesivos.

-Drenaje profundo.

Con el se pretende un rebajamiento importante del nivel freático, incluso por debajo de las superficies potenciales de deslizamiento. Los sistemas tradicionales son:

- Pozos o pantallas drenantes de la profundidad, necesaria para alcanzar el rebajamiento deseado (fig. 8.4. d.). Esta solución requiere la extracción de agua mediante bombeo. En el caso de pozos puede unirse la base de los mismos mediante un tubo colector para concentrar el bombeo en uno o dos puntos. Este problema no existe en el caso de las pantallas cotínuas, si bien debe tenerse en cuenta que su ejecución no es viable cuando en el terreno existen niveles cementados o rocosos.

La técnica de las pantallas drenantes se basa en realizar la extracción mediante lodos bentoníticos y el relleno de la zanja así creada con grava filtrante. Los lodos se hacen flocular mediante una solución ácida y se extraen quedando la grava limpia y con condiciones drenantes.

- Galerías de drenaje (fig. 8.5.). Son excavaciones realizadas en mina en las proximidades de la superficie de rotura, aunque preferentemente en el terreno sano exterior a la misma. Normalmente las galerías van revestidas y el drenaje se consigue mediante una serie de perforaciones radiales que desaguan a la misma. Se trata de una solución muy costosa pero de gran eficacia por el importante volumen que puede drenarse.

- Drenes californianos (Fig. 8.4.f). Son perforaciones de pequeño diámetro (100-150 mm.) y longitudes generalmente inferiores a 30 m. que, realizadas desde el pie del talud, alcanzan la superficie de deslizamiento extrayendo el agua concentrada en torno a la misma. Resulta también una solución costosa y de difícil conservación ya que al cabo de algunos años los drenes suelen cegarse. En estos casos el único recurso consiste en perforar nuevos drenes juntos a los anteriores.

e) Estructuras de contención

En el caso de deslizamientos planos afectando a una limitada potencia de terreno, puede pensarse en construir estructuras de contención que aporten la resistencia pasiva necesaria para restituir las condiciones de equilibrio.

Según la importancia de la zona, la velocidad del movimiento y las tolerancias a movimientos adicionales de los edificios o estructuras afectadas puede optarse por contenciones flexibles o rígidas.

Dentro de las contenciones flexibles la solución más usual es el muro de gaviones (fig. 8.7.) o incluso la mera acumulación de piedras o escollera (fig. 8.8.). Estas contenciones resultan bastante deficientes desde el punto de vista estético, por lo que recientemente se han desarrollado muros flexibles compuestos por piezas prefabricadas articuladas (muros-criba o muros jaula) que permiten cierto ajardinamiento, con un aspecto bastante satisfactorio (fig. 8.9.).

La filosofía de estas contenciones es más la de frenar el deslizamiento que conseguir detenerlo totalmente, lo cual supondría en algunos casos, muros extraordinarios de gran coste.

La ventaja de estos muros es su reducido coste, pero su principal inconveniente son los movimientos residuales de la masa deslizada.

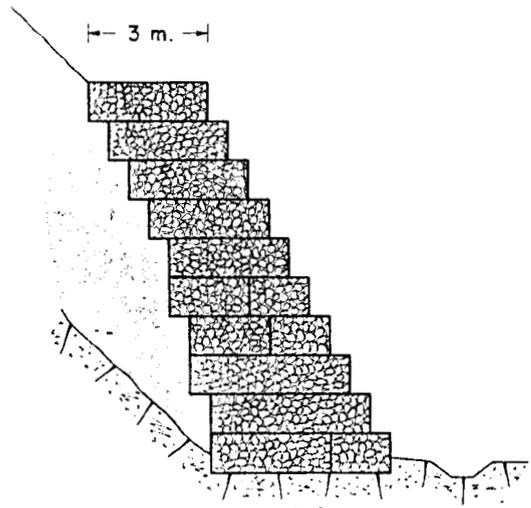
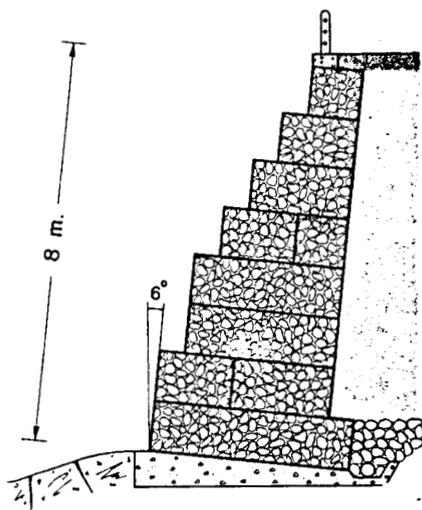


FIG. 8.7. - MUROS DE GAVIONES.

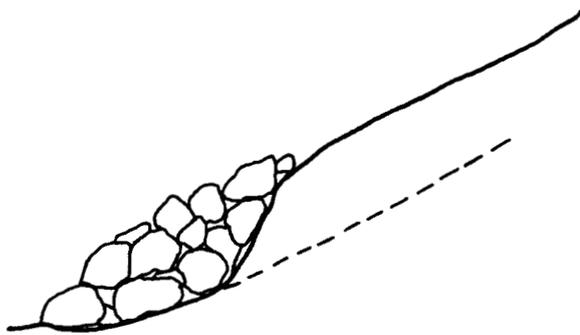


FIG. 8.8. - REPIE DE ESCOLLERA.

SECCION

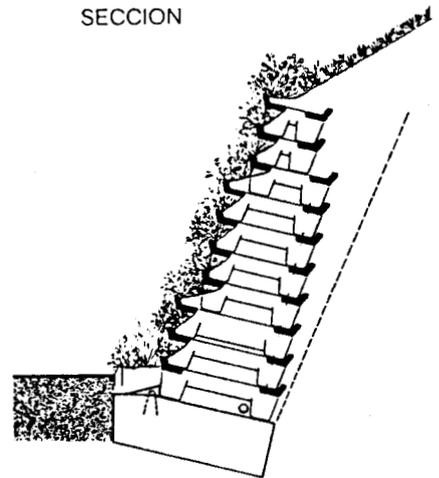


FIG. 8.9. - MURO - CRIBA.

La velocidad de ejecución de estos muros es alta, por lo que pueden construirse incluso en deslizamientos con cierta velocidad y su gran flexibilidad y permeabilidad facilita su instalación en el caso de masas saturadas con consistencia viscosa.

Las contenciones rígidas constan habitualmente de un muro (fig. 8.10) o pantalla de hormigón (fig. 8.11.) que bien por su peso o a través de elementos de anclaje, es capaz de proporcionar la reacción necesaria para la estabilización del talud. Además del hormigón pueden utilizarse fábricas diversas como la mampostería o el ladrillo, o fábricas mixtas como el acero y la madera.

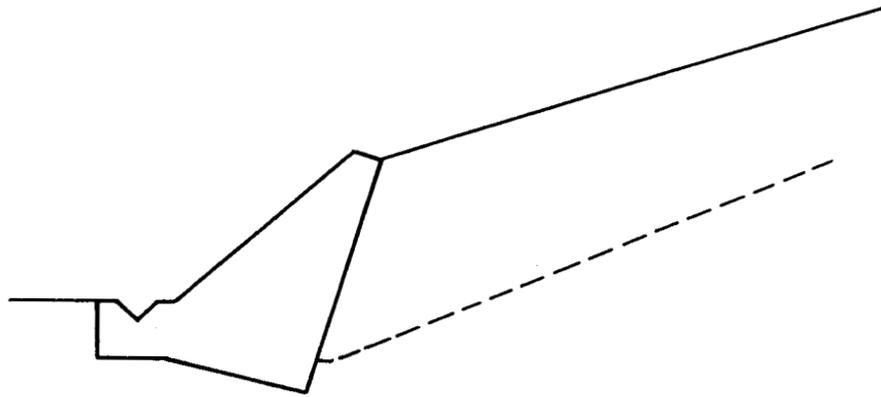
La principal dificultad para el éxito de estas contenciones es el correcto cálculo del empuje a resistir, el cual debe deducirse de cálculos geométricos bastante precisos.

En deslizamientos pequeños, las necesidades de contención pueden ser de 5 a 10 t/m pero en movimientos importantes se superan con facilidad las 100 t/m, las cuales sólo se pueden conseguir mediante anclajes.

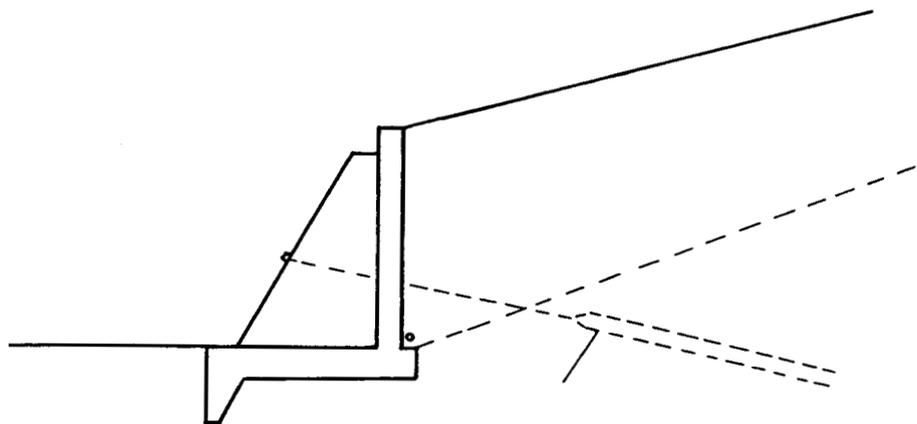
Debe tenerse en cuenta que si la velocidad del movimiento es apreciable las soluciones rígidas son poco aconsejables ya que los primeros elementos instalados no podrán absorber los grandes empujes desarrollados.

Al ubicar las pantallas o elementos de contención deberá comprobarse que el terreno no puede romperse por encima de los mismos (fig 8.11), disponiendo si es necesario, varias líneas de intercepción (fig 8.12.), con lo cual existe una función de "cosido", tal como se describe en el apartado siguiente.

Cuando la contención se plantea mediante pantallas discontinuas de pozos o pilotes es necesario que el terreno posea cohesión suficiente para puentear los vanos intermedios. Si el terreno es muy blando esta solución no es válida ya que puede fluir entre los elementos resistentes. En la fig. 8.13. se muestra una solución de pozos con paneles de cerramiento.

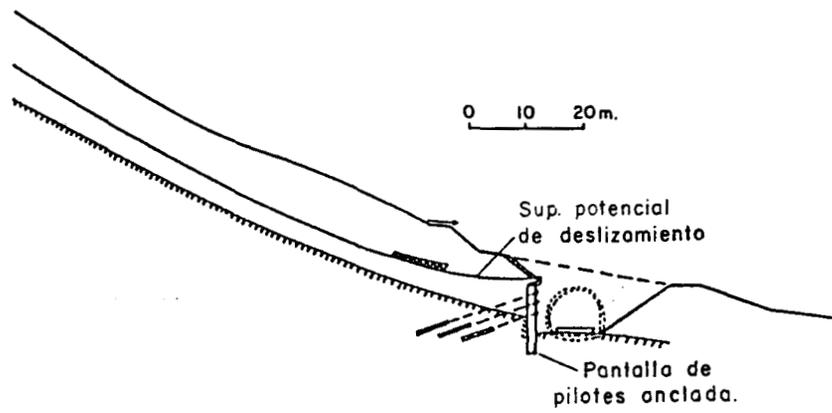


a) Muro de gravedad

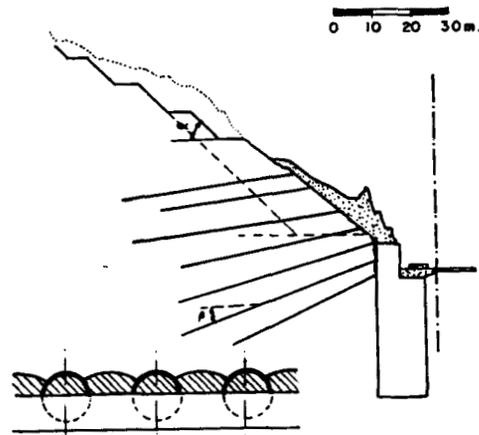


b) Muro de contrafuertes,
eventualmente anclado.

FIG. 8.10. - MUROS DE CONTENCIÓN DE HORMIGÓN
EN MASA O ARMADO.



a) Pantalla de pilotes anclada (Huder y Duerst, 1981)



b) Pozos anclados, de 13 m. de diámetro (Baldovin y Fattore, 1974).

FIG. 8.11. - CONTENCION MEDIANTE PANTALLAS ANCLADAS.

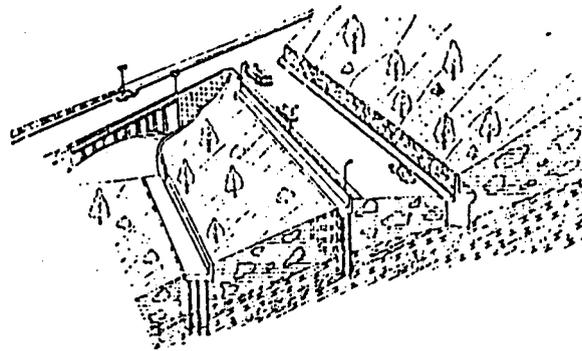


FIG. 8.12. - CONTENCIÓN ESCALONADA.

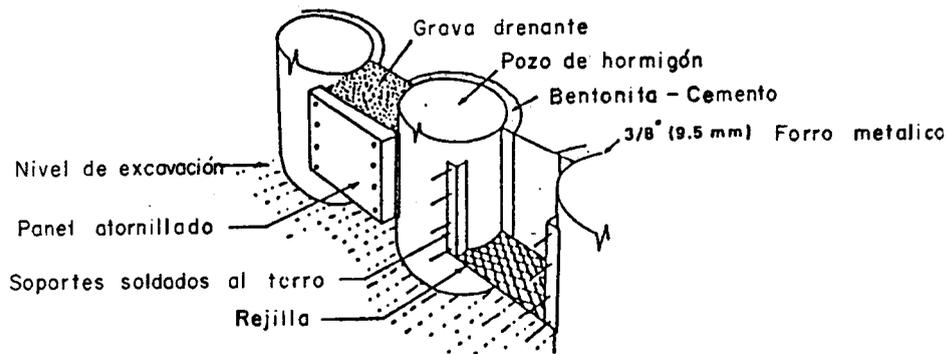


FIG. 8.13. - CONTENCIÓN MEDIANTE POZOS DE 1,20 M.
 (Hovland y Willoughby, 1982).

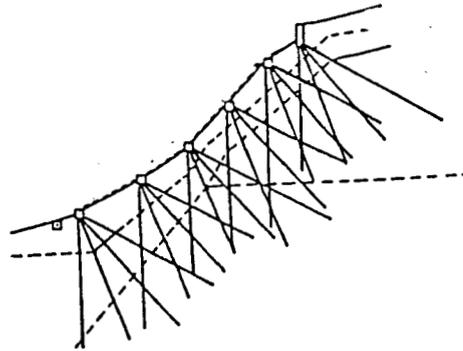
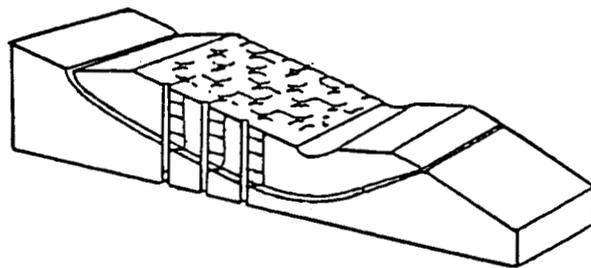
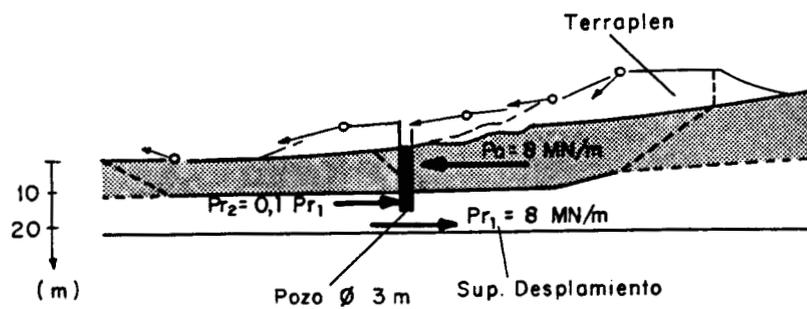


FIG. 8.14. - COSIDO MEDIANTE MICROPILOTES.
(Cortesía de Fondedile, S.A.)



a) Pilotes (Winter et al.).



b) Pozos (Sommer, 1979).

FIG. 8.15. - COSIDO MEDIANTE GRANDES PASADORES.

f) Mejora de la resistencia al corte del terreno

Actuando al nivel de la superficie de deslizamiento se puede mejorar la resistencia al corte del terreno y alcanzar condiciones de seguridad suficientes. Entre los posibles tratamientos puede citarse:

- Pasadores de cosido

Se trata de elementos puntuales que atraviesan verticalmente la masa deslizante y la superficie de deslizamiento empotrándose en el terreno firme subyacente. Fundamentalmente son elementos que trabajan a flexión, con cortantes importantes en la zona de paso de la superficie de deslizamiento, y su rigidez puede ser muy variable en función de la contención a suministrar. Así en algunos casos, es suficiente con la hincada de micropilotes (fig. 8.14) o carriles mientras que en otros hay que recurrir a pilotes de gran diámetro (1,50 a 2 m.) o incluso a pozos de 3 a 8 m. de diámetro (fig. 8.15).

En los casos en los que la deformabilidad del pasador puede ser excesiva es frecuente anclar la cabeza del mismo, generalmente conectando las cabezas mediante una viga de atado.

Salvo en casos extremos de rigidez esta solución debe considerarse "flexible" por cuanto su entrada en carga requiere desplazamientos de cierta magnitud y el tiempo necesario para que éstos se desarrollen.

La solución tiene el inconveniente, como otras muchas, que la entrada en carga es progresiva, según se van construyendo los pasadores y si esto no se hace con suficiente rapidez, los instalados en primer lugar pueden romperse al tener que soportar todo el empuje. Es conveniente por tanto un sobredimensionamiento de los pasadores para tener en cuenta además la incertidumbre del cálculo.

- Inyecciones

Es un tratamiento de difícil aplicación, ya que en terrenos saturados puede producir un aumento desfavorable de las presiones intersticiales. Su objetivo es reforzar la zona afectada por la superficie de deslizamiento con un entramado más resistente de material cementado, rellenando huecos en el caso de materiales permeables o abriéndolos por la presión de inyección en la técnica denominada de "claquage".

Actualmente se consiguen resultados muy satisfactorios con la técnica de inyección a alta presión y mezcla con el terreno denominada "jet-grouting", con la que se crean en el terreno columnas o pasadores de suelos reforzados.

- Tratamientos térmicos

Mediante lanzas térmicas puede conseguirse la eliminación de la humedad en la superficie de deslizamiento y su entorno así como una rigidización del terreno transformándolo en un material de características pétreas con alta cohesión.

Este método puede tener interesantes aplicaciones en materiales blandos cohesivos pero los elevados costes suelen hacerlo prohibitivo.

8.2. Tratamiento de taludes rocosos

En muchos casos los tratamientos indicados en el capítulo anterior para los suelos (cambios de geometría, drenaje, contenciones, etc.) son también aplicables a las masas rocosas. Incluso puede decirse que muchas rocas blandas o muy fracturadas tienen un comportamiento en grandes masas bastante próximo al de los suelos, con superficies de rotura poco condicionadas por su estructura. En estos casos, los métodos generales de tratamiento siguen siendo aplicables.

Por el contrario, describiremos en este apartado aquéllos tratamientos característicos de las masas rocosas, condicionados por la estructura de éstas y morfológicamente diferentes de los aplicados a los suelos.

Como tratamientos específicos de los macizos rocosos pueden considerarse los del cuadro siguiente:

Métodos específicos de macizos rocosos	Sujeción de bloques o cuñas inestables	-	Anclaje puntual	
			Anclaje repartido-Vigas	
	Apeo de cornisas			
	Contrafuertes	-	Con o sin anclaje	
	Protección superficial	-	Gunitado	
	Tratamientos profundos		{ Inyecciones Voladuras	

En la fig. 8.16. se muestra un esquema de algunos de estos tratamientos.

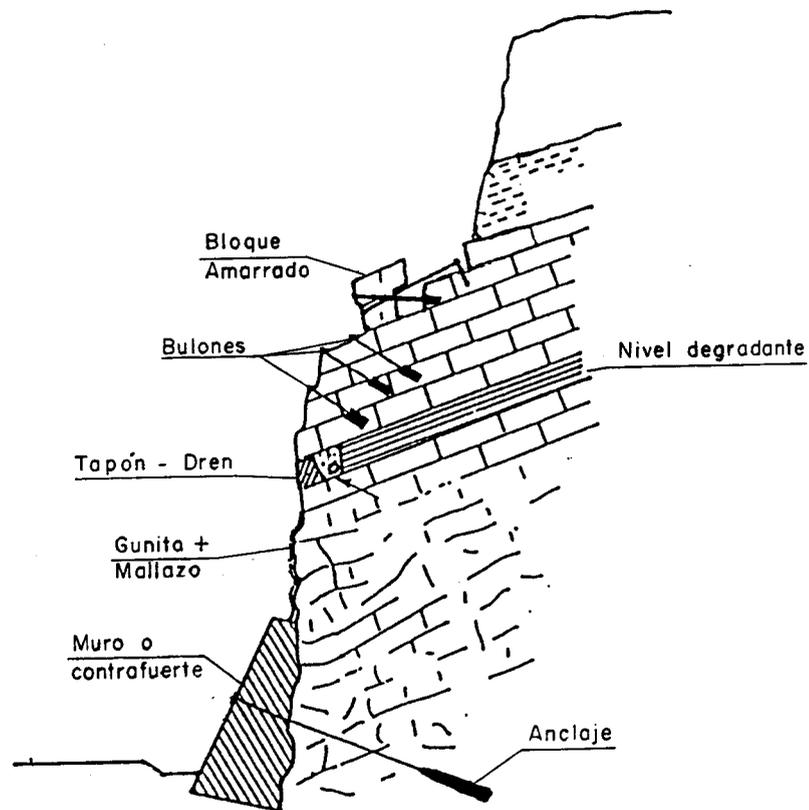


FIG. 8.16. - ESQUEMA RESUMEN DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN MACIZOS ROCOSOS (Finlayson y Statham, 1980).

a) Sujeción de cuñas o estratos inestables

La excavación de taludes rocosos puede hacer que afloren al talud planos de discontinuidad que configuren cuñas inestables. En estos casos la solución habitual consiste en el anclaje de la cuña, aportando artificialmente la fuerza de contención eliminada por la excavación (fig. 8.17.).

Esta misma solución puede ser útil para el cosido de estratos subverticales afectados por el fenómeno de vuelco o flexión hacia el exterior.

Según las dimensiones de las cuñas inestables, el cosido se hace mediante bulones o anclajes.

Los bulones son barras de acero con una resistencia a tracción de 15 a 25 t y longitudes de 3 a 6 m, por lo que son útiles para refuerzos superficiales, cosido de bloques inestables, conexión de estratos delgados, etc.

Los anclajes suelen estar constituídos por cables de acero de alta resistencia embebidos en una vaina protectora de lechada de cemento. Pueden hacerse con longitudes importantes (10-50 m) y poseen una gran capacidad resistente (15-500 t). Pueden introducir una fuerza conocida (anclajes activos) o colocarse con una tensión baja e ir entrando en carga bajo los movimientos del macizo (anclajes pasivos).

En el caso de rocas competentes la sujeción puede ser discontinua, ya que la propia masa rocosa reparte las fuerzas puntuales aplicadas. Sin embargo en el caso de rocas blandas o deleznales, es necesario repartir las cargas lo cual se consigue mediante vigas o placas de hormigón armado, generalmente formando emparrillados (fig. 8.18.).

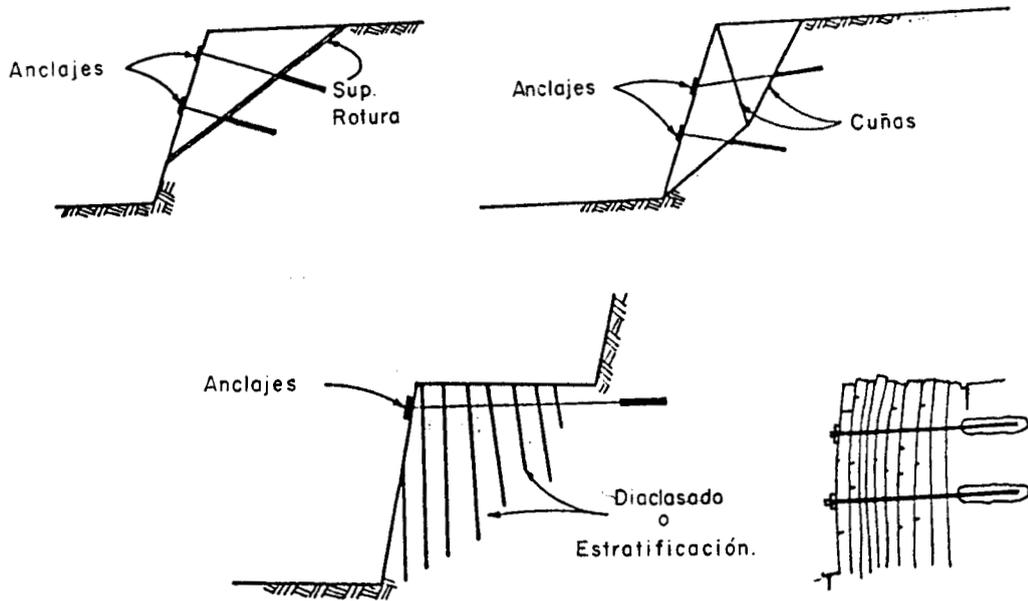


FIG. 8.17. - DISPOSICIONES DE ANCLAJES.

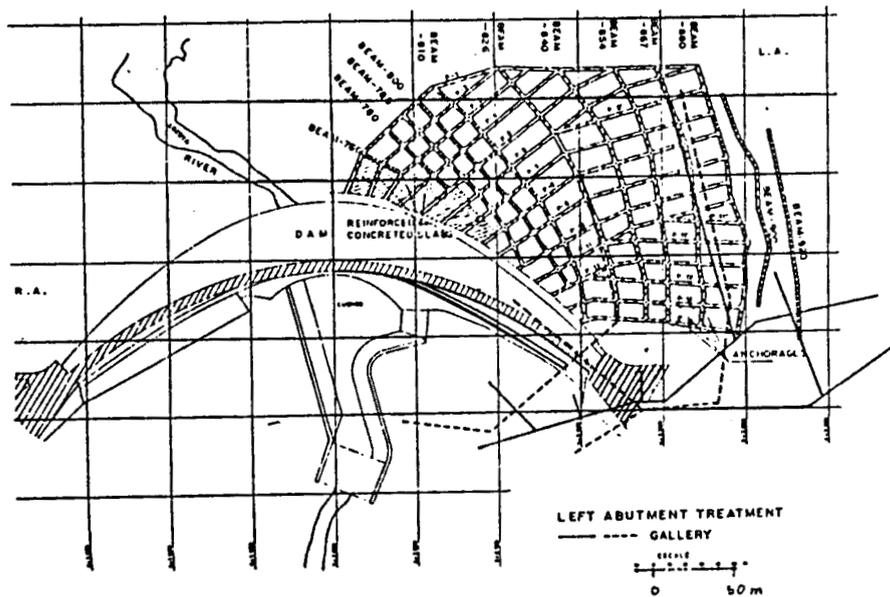


FIG. 8.18. - EMPARRILLADO ANCLADO EN EL ESTRIBO IZQUIERDO DE LA PRESA DE EL ATAZAR (Uriel, 1978).

b) Apeo o eliminación de cornisas

Cuando en un talud elevado se han formado cornisas cuyo desprendimiento podría causar daños a personas o bienes situados al pie, es conveniente eliminar el peligro, lo cual puede hacerse de varios modos.

La solución más evidente consiste en el recorte y eliminación de la cornisa, por ejemplo mediante voladura, sierra de diamante, precorte, etc. Sin embargo, estos métodos no suelen ser aceptables cuando existen viviendas en la zona de caída, por lo que en estos casos debe recurrirse a la consolidación de la cornisa y del cantil subyacente.

Cuando el vuelo es pequeño y se produce por degradación de estratos más blandos subyacentes puede frenarse la alteración de éstos y restituir el apoyo mediante un tapón o murete de fábrica, generalmente de hormigón (fig. 8.19.a). También se ha utilizado el sellado de las capas alterables con mallazo anclado y recubrimiento mediante gunita (fig. 8.20.).

Cuando las cornisas son importantes y los taludes son de altura moderada, puede recurrirse a disponer contrafuertes de hormigón o mampostería que apeen las partes salientes (fig. 8.19.c).

c) Protección frente a la caída o rodadura de piedras (fig. 8.21.)

La degradación de taludes rocosos suele dar lugar a bloques o piedras más o menos grandes que pueden iniciar una rodadura sobre los mismos alcanzando velocidades considerables y afectando a personas o edificios situados en las proximidades.

En el caso de taludes artificiales, gran parte del peligro se evita saneando el frente excavado y sujetando o anclando aquéllos bloques de mayor volumen que amenacen con desprenderse.

Cuando se trate de taludes naturales puede conseguirse una protección aceptable mediante barreras metálicas preferentemente flexibles, con dispositivos elásticos para absorber la energía del impacto.

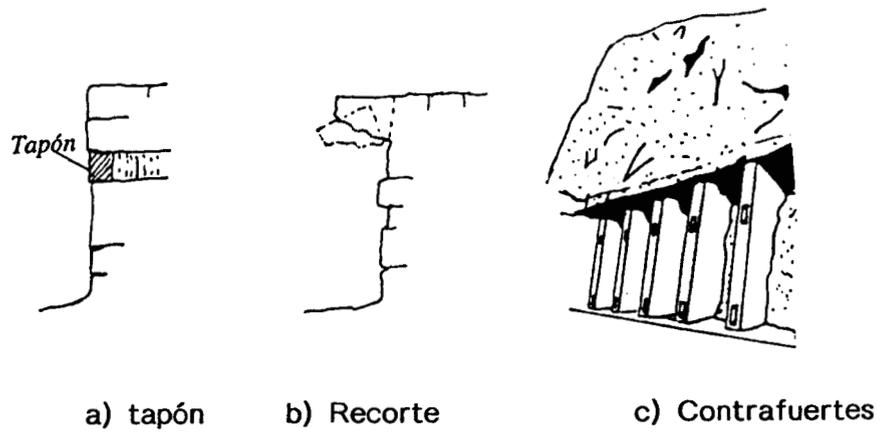


FIG. 8.19. - APEO O ELIMINACION DE CORNISAS.

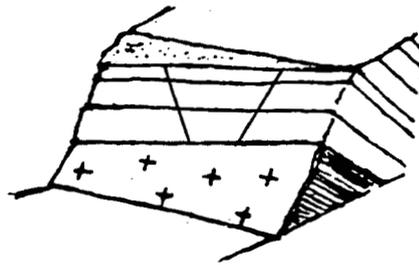


FIG. 8.20. - SELLADO DE UNA CAPA ALTERABLE CON GUNITA SOBRE MALLAZO ANCLADO CON BULONES

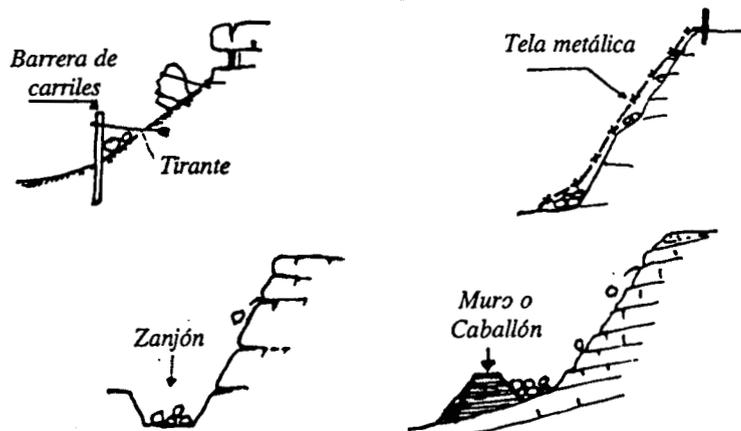


FIG. 8.21. - PROTECCION FRENTE A LA CAIDA O RODADURA DE PIEDRAS.

Cuando el talud tiene una intensa degradación con piedras de tamaño moderado suele estar indicada la colocación de telas metálicas, suspendidas de la coronación, que impiden el vuelo de las piedras y las acumulan al pie.

Cuando la geometría de la zona lo permite, la solución más económica es construir al pie del talud un zanjón, bien por excavación, o con ayuda de un caballón de tierras, dimensionando el conjunto para captar las trayectorias de los posibles desprendimientos.

d) Tratamientos profundos

En los casos de grandes masas rocosas deslizantes a favor de superficies muy fracturadas puede conseguirse una mejora de estabilidad inyectando dichas zonas y creando con ello una cohesión apreciable en la base del deslizamiento. Debe prestarse atención a no crear en el proceso de inyección sobrepresiones intersticiales que puedan empeorar las condiciones de estabilidad.

Cuando el deslizamiento se produce según espejos de falla o superficies de muy bajo rozamiento, podría mejorarse éste mediante voladuras actuando sobre dichas superficies y transformando éstas en una capa de fragmentos aleatoriamente dispuestos los cuales, por dilatación y rozamiento, pueden desarrollar una resistencia considerable. Este tipo de aplicaciones, sin embargo, ha sido muy poco frecuente.

9. REFERENCIAS

- ALONSO, E. (1986): "Movimientos del terreno. Roturas en suelos. Casos reales". In "Riesgos Nat. en Ing. Civ.". Univ. Polyt. Catal. p. 45-97.
- AVCI, M. (1978): "Airphoto interpretation of mass movements with special reference to the Spanish Pyrenees, Tremp, Northern Spain". Proc. AIGI, Madrid. Sec. IV. Vol. 2, p. 72-81.
- AYALA, F.J., APARICIO, V. Y SANZ PEREZ, E. (1987): "Análisis del deslizamiento de Inza (Navarra) de 1714-15". Bol. Geol. y Min. T. XCVIII, p. 404-414.
- BALDOVIN, G. Y FATTORE, A. (1974): "Example of slope stabilization in marly sandstone flysch". Proc. 3rd. Int. Conf. I.S.R.M., Denver, II-B, p. 759-764.
- COROMINAS, J. Y ALONSO, E. (1988): "Riesgos derivados de la inestabilidad de laderas". Servei Geològic de Catalunya. (En prensa).
- COROMINAS, J. et al. (1988): "El comportamiento de las coladas de barro". II Simp. sobre Taludes. Andorra, p. 183-194.
- DURAN, J.J. Y DEL VAL, J. (1984): "Incidencia de la disolución kárstica en taludes con materiales hipersolubles. El deslizamiento de Sta. Cruz de Moya (Cuenca)". Mem. VIII Simp. Nac., Madrid, vol. 2, p.159-172.
- FACI, E. et al. (1988): "Estabilización y establecimiento de medidas preventivas en un talud rocoso en Azagra (Navarra)". II Simp. sobre Taludes, Andorra, p. 485-496.
- FINLAYSON, B. Y STATHAM, I. (1980): "Hillslope analysis". Butterworths.

- GARCIA YAGUE, A. (1977): "Informe sobre el proyecto de muros de defensa en Alcalá del Júcar". (Informe no publicado).
- HOVLAND, H.J. Y WILLOUGHBY, D.F. (1982): "Slide stabilization at the Geysers Power Plant". En "Application of walls to landslide control problems", ASCE, Las Vegas.
- HUDER, J. Y DUERST, R. (1981): "Safety considerations for cut in unstable slope". Proc. 10th Int. Conf. SMFE, Estocolmo, Vol. 3, p. 431-436.
- HUNT, R.E. (1984): "Geotechnical Engineering Investigation Manual", McGraw Hill, New York.
- HUTCHINSON, J.N. (1984): "An influence line approach to the stabilization of slopes by cuts and fills". Can. Geot. J. Vol. 21, p. 363-370.
- LENGLET, J. (1976): "Appareils et méthodes de surveillance des glissements de terrain". Bull. Liais. Lab. Ponts et Ch. N^o Especial III, Vol. 1, p. 166-174.
- LLORCA, J. Y DELGADO, C. (1988): "Problemática del trazado de una carretera nacional a través de un valle inestable". II Simp. sobre Taludes, Andorra, p. 433-444.
- M.O.P.U., Servicio de Geotecnia: Varios informes no publicados.
- RAT, M. (1976): "Drainages". Bull. Liais. Lab. Ponts et Ch. Número Especial III "Stabilite des Talus". Vol. 2, p. 151-160.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. et al. (1984): "Slope stabilization in weathered schists and shales by excavation, piles and drainage". IV Int. Symp. Landslides, Toronto, Vol. II, p. 173-178.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. et al. (1978): "Regional studies on mass movements in Spain". Proc. AIGI, Vol. I, Sec. I, Madrid, p. 272-277.

- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. et al. (1987): "El deslizamiento de Los Olivares (Granada) de Abril de 1986". IGME, Madrid, 57 p.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. et al. (1988): "El deslizamiento de Pont de Bar (Lérida) de octubre de 1982". II Simp. sobre Taludes, Andorra, p. 693-703.
- SERRAT, D. et al. (1985): "Recursos Geológicos i Sol". Hª Nat. dels Països Catalans. Vol. 3, Barcelona, p. 227-252.
- SOMMER, H. (1979): "Stabilization of a creeping slope in clay with stiff elements" 7ª Conf. Europea SMFE. Brighton, Vol. 3, p. 269-274.
- WINTER, H. et al. (1983): "Stabilization of clay slopes by piles" 8th Europ. Conf. SMFE. Helsinki, p. 545-550.
- ZARUBA, Q. Y MENCL, V. (1982): "Landslides and their control". Elsevier, 2ª Ed.

ANEXO

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

PROPUESTA DE DIRECTRIZ DE PROTECCION CIVIL

MOVIMIENTOS DEL TERRENO

INDICE

Pag.

1.- INTRODUCCION	96.
2.- DEFINICION Y TIPOLOGIA	97.
3.- OBSERVACIONES GENERALES	99.
4.- MEDIDAS PREVENTIVAS	101.
5.- ACTUACIONES UNA VEZ DETECTADO O PRODUCIDO EL MOVIMIENTO	104.

PROPUESTA DE DIRECTRIZ DE PROTECCION CIVIL
MOVIMIENTOS DEL TERRENO

1. INTRODUCCION

Esta Directriz tiene por objeto indicar de forma concisa y resumida aquellas medidas preventivas o correctoras a aplicar en zonas con riesgo de movimientos del terreno con el fin de eliminar o reducir dicho riesgo.

La Directriz va destinada a pequeñas comunidades, con limitado soporte técnico y cubre las cosas más usuales o convencionales, dejando para estudios especializados los movimientos de gran complejidad o envergadura.

2. DEFINICION Y TIPOLOGIA

Se denominan movimientos del terreno, los desplazamientos de masas de suelo o roca, con volúmenes y velocidades muy variables producidos al superar las fuerzas gravitatorias, en determinadas superficies, la resistencia del material.

Existen tipos muy diversos de movimientos.

En los deslizamientos planos, el terreno sufre un movimiento de traslación sobre una superficie sensiblemente paralela a la superficie del terreno. El material puede desplazarse en manto o desintegrarse en bloques muchas veces conectados por las raíces de los árboles y la vegetación. Las velocidades de desplazamiento están en el orden del cm/día.

Los deslizamientos rotacionales rompen el terreno según una superficie cóncava hacia arriba. El material girado suele conservar su integridad salvo en la zona del pie, donde suele abrirse con grietas radiales. En la parte superior se forman grietas y escarpes. Las velocidades de desplazamiento son muy variables, desde el cm/año al m/día.

Los flujos o coladas son movimientos de materiales disgregados, generalmente saturados de agua y que se comportan como un fluido viscoso. En el caso de materiales pétreos (aludes de piedras), los materiales descienden a altas velocidades arrastrados por el agua. Las velocidades varían del cm/minuto al m/segundo.

Los desprendimientos son caídas libres de bloques de roca situados en acantilados, cornisas, etc. por pérdida de soporte o adherencia en el macizo rocoso donde están encajados. Las velocidades de caída son de varios metros por segundo.

En otros casos se desprenden cuñas de roca deslizando sobre planos de fractura o discontinuidad.

También son característicos los movimientos y desprendimientos por flexión o vuelco de estratos subverticales.

En muchos casos los movimientos se producen según esquemas complejos, combinación de varios de los tipos reseñados, lo cual explica la dificultad de su clasificación.

3. OBSERVACIONES GENERALES

Para una mejor comprensión de los movimientos como riesgo geológico debe tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- El terreno tiende a alcanzar taludes de equilibrio semejantes a los que se observan en la naturaleza.
- Cualquier excavación o corte con talud, superior al natural, es potencialmente inestable.
- El riesgo aumenta cuando el terreno está saturado o la excavación corta el nivel freático.
- La posición del agua freática puede sufrir ascensos importantes en época de lluvias o como consecuencia de aportes accidentales (fugas, riesgos, etc.)
- Las condiciones climáticas y concretamente la pluviometría de una zona es un factor determinante en la producción de movimientos.
- En el caso de movimientos rotacionales, la masa deslizada es proporcional a la altura y longitud del frente excavado. En los deslizamientos plantos pequeñas excavaciones pueden movilizar toda una ladera.
- La aplicación de cargas (terraplenes, edificios, etc.) sobre un talud puede inducir la inestabilidad del mismo.
- Las laderas arcillosas, en cuya parte superior existe una montera rocosa permeable se cargan de agua y deslizan con facilidad.
- En las laderas arcillosas, en las que existen depresiones o rellanos que permiten la acumulación de agua pueden producirse coladas de barro al fluir la arcilla mezclada con abundante cantidad de agua.
- Macizos rocosos, aparentemente muy resistentes, pueden deslizar a favor de delgadas capas de material arcilloso saturado al quedar estas descubiertas por la excavación.
- Cuando los estratos rocosos están inclinados hacia el interior del macizo cortado por una excavación esta es mucho más estable que en el caso contrario.

Sin embargo, en el caso de estratos muy verticales, estos pueden romperse a flexión y volcar hacia la excavación.

- Una excavación en roca de gran estabilidad puede presentar inestabilidades locales por presencia de fallas, combinación de fracturas, concentración de agua, etc. Cuanto más grande sea la excavación mayor probabilidad hay de encontrar estas zonas de debilidad.
- Los acantilados rocosos fracturados suelen sufrir desprendimientos por descalce, penetración de agua en las fisuras, raíces de árboles, etc.
- Los canchales y acumulaciones de piedras sobre laderas empinadas, pueden deslizarse en forma de talud, si se cargan de agua por efecto de fuertes lluvias.

4. MEDIDAS PREVENTIVAS

Para reducir el riesgo es necesario conocerlo, delimitarlo y eliminar los factores desfavorables que pueden contribuir al mismo. Es por tanto conveniente:

a) Conocer el riesgo de la zona

- La existencia de antecedentes o problemas de este tipo, en la zona, es un claro indicador de la vulnerabilidad de la misma.
- Diversos organismos (MOPU, ITGE, etc.) han elaborado mapas de zonas con movimientos, aunque por el momento sólo cubren áreas limitadas de la península.
- Con alguna experiencia pueden detectarse zonas inestables del terreno, por simple observación de:
 - . Grietas en superficie
 - . Ondulaciones, árboles con tronco curvado.
 - . Cambios de pendiente en un mismo terreno.
 - . Saltos o escarpes con aparición del terreno existente bajo la capa vegetal.
 - . Bloques caídos al pie de acantilados.
 - . Grietas en edificios, tapias, carreteras, etc.
- La susceptibilidad de los distintos terrenos frente a los movimientos es muy variada, pudiendo señalarse al respecto:
 - . Las arcillas plásticas saturadas, deslizan con inclinaciones muy pequeñas incluso inferiores a 15° .
 - . Los suelos residuales de alteración que recubren laderas rocosas con fuerte pendiente ($> 25^\circ$), suelen estar en equilibrio muy estricto.

- Los suelos limosos y arenosos fluyen con facilidad cuando están sometidos a circulación de agua o saturación.

b) Zonificación del territorio

Los Planes de Urbanismo deben tener en cuenta los problemas potenciales de inestabilidad asociados a las distintas áreas, excluyendo o limitando la edificación en las zonas con riesgo elevado.

c) Eliminación de factores de riesgo

Las Ordenanzas Municipales o los documentos que rijan las actuaciones de Edificación y Urbanismo, indican las precauciones a observar en cada zona para no provocar o inducir fenómenos de inestabilidad.

A tales fines debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- Antes de abrir una excavación en una ladera debe examinarse la misma por si - presentará indicios de inestabilidad.
- Conviene previamente algunos bataches o pequeñas excavaciones para conocer la naturaleza del terreno, presencia o no de agua, etc.
- Debe evitarse abrir grandes frentes de excavación. Conviene avanzar por tramos de 10-15 m, colocando al avance las obras de contención necesarias.
- Cualquier excavación de más de 3 m, en una ladera de suelo o material poco competente debe ser supervisada por un técnico.
- Las excavaciones de gran altura ($H > 8m$) en laderas deberán ser objeto de un estudio de estabilidad.
- Deben extremarse las precauciones cuando las excavaciones quedan próximas a edificaciones o servicios.
- Los manantiales en laderas deben captarse y encauzarse, evitando que las aguas saturen el terreno bajo los mismos.
- No deben colocarse rellenos o terraplenes que obturen o taponen sugerencias manantiales o redes naturales de drenaje.

- Las zonas de ataque de los ríos deben protegerse mediante obras de fábrica para evitar la socavación de cantiles y pies de laderas.
- Los arroyos encajados deben regularizarse para que la erosión no produzca deslizamientos en sus márgenes.
- La deforestación puede provocar deslizamientos en laderas en equilibrio estricto. Lo mismo puede suceder como consecuencia de incendios.
- Los jardines situados en laderas y sometidos a intenso riego deben tener sistemas de recogida de filtraciones para evitar que éstas afecten al talud aguas abajo .
- Las fugas de depósitos de agua semienterrados, situados en promontorios son causa frecuente de deslizamientos de las laderas subyacentes. Debe garantizarse su estanqueidad y llevar un sistema de drenaje o detección de fugas.
- Debe esmerarse el mantenimiento de las redes de abastecimiento y saneamiento, acequias, etc. que crucen zonas en ladera.
- Determinadas edificaciones con sótanos pueden interrumpir el drenaje natural de la ladera y provocar una elevación de niveles que conduzca a la inestabilidad
- Deben evitarse colocar grandes rellenos o vertederos sobre taludes sin un estudio de la estabilidad de estos.
- Debe prohibirse la edificación al pie de cantiles rocosos escarpados o cerca del borde superior de los mismos, salvo que se haga un estudio detallado de estabilidad.
- Cuando el cantil se continúe por una ladera en la que existan o se vayan a construir edificaciones deberá evaluarse el riesgo de caída y rodadura de piedras, disponiendo, en su caso, elementos de contención, defensa, o intercepción de los mismos. Como alternativa deberá considerarse la consolidación y fijación del cantil.
- Deberán prohibirse las voladuras de gran intensidad (> 1 kg de carga instantánea), en las proximidades (< 50 m), de escarpes rocosos. Se tendrá en cuenta al respecto la Especificación Técnica 0380-1-85, del Ministerio de Industria y Energía.

5. ACTUACIONES UNA VEZ DETECTADO O PRODUCIDO EL MOVIMIENTO

En los movimientos de alta velocidad, como los desprendimientos de rocas, los aludes de piedra o las coladas de barro rápidas, no existe prácticamente tiempo para adoptar medidas de estabilidad por lo que las únicas actuaciones posibles son:

- Inventarán los daños.
- Delimitar la extensión del movimiento.
- Comprobar que en el entorno de la zona movida no existen masas susceptibles de movilizarse a corto plazo.
- En caso contrario, eliminar dichas masas, o aplicar a las mismas medidas estabilizadoras.

En los movimientos de velocidad moderada cabe adoptar diversas medidas, generalmente en fases sucesivas:

a) Caracterización del movimiento

Pueden considerarse en esta fase las actuaciones siguientes :

- Delimitar en el terreno la extensión del movimiento, acotando la zona y colocando vallas protectoras para impedir el acceso.
- Medir la velocidad del movimiento, generalmente por métodos topográficos. Estas medidas permiten predecir si el movimiento tiende a estabilizar o a acelerarse.
- Intentar establecer la geometría en profundidad del movimiento.

b) Edificaciones y servicios afectados

- Se inspeccionarán las viviendas y edificios existentes en el area del movimiento

inventariando sus daños y procediendo a su desalojo, apeo o demolición si fuera necesario.

- Cuando se afecten vías de comunicación o servicios no dependientes del Ayuntamiento, se avisará inmediatamente a los organismos o compañías correspondientes para que adopten las medidas oportunas. Se incluyen en este caso los tendidos eléctricos y telefónicos, las carreteras y ferrocarriles, los canales y conducciones de agua, etc.
- Se buscarán rutas alternativas a los caminos o calles cortados o desplazados por el movimiento.
- Se cortarán las redes de abastecimiento o saneamiento que crucen la zona y cuyas aguas puedan aumentar la inestabilidad del movimiento.

c) Actuaciones a corto plazo

Salvo en los casos en que sea evidente la causa y el tratamiento del movimiento se recabará con urgencia la opinión de especialistas, con el fin de que éstos hagan las observaciones oportunas y planteen la campaña de auscultación, reconocimientos y estudios más apropiada.

Entre los centros especializados de ámbito nacional pueden citarse:

- El Instituto Tecnológico GeoMinero de España
- El Servicio Geológico de Obras Públicas.
- El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX

En esta fase deben llevarse a cabo diversas actuaciones como:

- Drenar o desviar las aguas superficiales o los manantiales que puedan fluir hacia la zona movida.
- Sellar las grietas o vías de penetración del agua de lluvia.
- Desprender o eliminar las piedras o masas terrosas que hayan quedado en equilibrio inestable y que puedan sufrir un desprendimiento brusco.
- Evitar que las masas en movimiento obstruyan cursos de agua creando situaciones de peligro por las ondas de rotura de las represas así formadas.

d) Medidas correctoras

Una vez estudiado el movimiento y analizadas sus causas deberá procederse a su estabilización definitiva en aquellos casos en que se pretendan conservar los usos del suelo y mantener viales y servicios o cuando la progresión del movimiento, por no actuar sobre el, pueda afectar a zonas más amplias o poner en peligro áreas ocupadas.

En otros casos, puede resultar más económico dejar que el movimiento alcance un estado natural de equilibrio, declarando la zona como no urbanizable o destinándola a usos, como el agrícola, compatibles con un cierto grado de desplazamiento.

No se deben aplicar medidas correctoras, sin una justificación técnica previa, ya que las soluciones pueden variar según el tipo y características del movimiento.

A título orientativo pueden hacerse las indicaciones siguientes:

- En deslizamientos de tipo plano, o en manto debe intentarse cortar las afluencias de agua al talud, mediante zanjas interceptoras, pozos, etc. Y colocar al pie una contención proporcional a la masa en movimiento. Se utilizan para ello repies de escollera, gaviones, muros de hormigón anclados, etc.
- En deslizamientos de tipo circular, el terreno puede alcanzar un nuevo estado de equilibrio después de un cierto giro. Según los casos, la estabilidad puede mejorarse con:
 - Drenaje profundo (pozos, galerías, drenes horizontales, etc)
 - Descarga en cabecera
 - Rebajamiento general del ángulo del talud.
 - Recarga al pie con tierras, escollera, etc.
- En taludes de desarrollo mixto, deben combinarse las medidas correctoras anteriores.

- En los escarpes rocosos, deben evitarse la formación de cornisas inestables protegiendo de la alteración los estratos deleznable, mediante tapones de sellado.
- Si las cornisas existen y ofrecen peligro, pueden cortarse y hacerlas caer, o, en caso contrario, apearlas con contrafuertes de hormigón o reforzar su resistencia mediante anclajes.
- En los taludes rocosos fracturados pueden producirse desplazamientos de cuñas o bloques a favor de planos de discontinuidad. El tratamiento usual consiste en la sujeción de dichas cuñas potencialmente inestables mediante bulones o anclajes.
- Cuando la roca está tan fracturada o es tan deleznable, que es imposible la sujeción de cuñas individuales deben preverse medidas protectoras frente al desprendimiento y rodadura de piedras como telas metálicas, barreras, zanjones de recogida, etc.