

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

A la Libertad por la Universidad !!



INGENIERÍA GEOLÓGICA II

Taludes

Dr. Ingeniero Tupak Obando R., Geólogo
Doctorado en Geología y Gestión Ambiental
Celular: 84402511
Website: <http://blogs.monografias.com/>

Managua, 2010

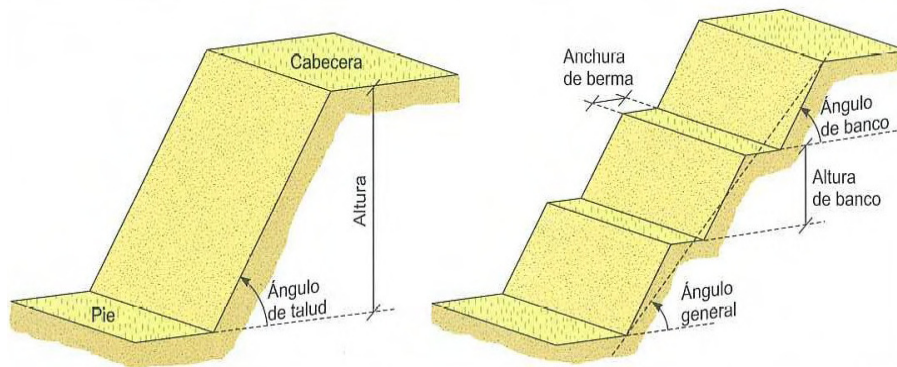
CONTENIDO

1. Introducción
2. Investigaciones *in situ*
3. Factores influyentes en la estabilidad
4. Tipos de rotura
5. Análisis de estabilidad
6. Medidas de estabilización
7. Instrumentación y control
8. Exvacación de taludes

Introducción

Las obras de infraestructura lineal (carreteras y ferrocarriles), canales, conducciones, explotaciones mineras, y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisan la excavación de taludes (**desmontes** si dan lugar a un solo talud y **trincheras** si la excavación presenta un talud a cada lado). Los taludes (Figura 9.1) se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo unas condiciones aceptables de estabilidad.

En general, los taludes en ingeniería civil alcanzan alturas máximas de 40 ó 50 m (Figura 9.2), y se proyectan para ser estables a largo plazo. Sin embargo las cortas mineras pueden alcanzar profundidades de varios centenares de metros (Figura 9.3).



Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos.

Los estudios geológicos y geotécnicos de taludes están dirigidos al **diseño de taludes estables** en función de las condiciones requeridas (corto, medio o largo plazo, relación coste-seguridad, grado de riesgo aceptado, etc.) así como a la **estabilización de taludes inestables**.

Los **análisis de estabilidad** permiten diseñar los taludes, mediante el cálculo de su **factor de seguridad**, y definir el tipo de medidas correctoras o estabilizadoras que deben ser aplicadas en caso de roturas reales o potenciales. Es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.



Excavación de un talud para construcción de una carretera (foto M. Ferrer).

Investigaciones *in situ*

- Como punto de partida para planificar las investigaciones *in situ* se efectuará un reconocimiento geológico previo. Se realizará una cartografía geológico-geotécnica a una escala que puede variar entre 1/2.000 y 1/500, según el tipo de proyecto y su alcance, y la toma de datos estructurales mediante estaciones geomecánicas en afloramientos, si se trata de macizos rocosos.
- Calicatas en suelos o rocas muy meteorizadas, con el fin de observar los materiales y tomar muestras inalteradas.
- Sísmica de refracción a lo largo del perfil del talud. Al ser ésta una técnica de bajo coste y que proporciona datos necesarios para estimar la ripabilidad, espesor de materiales alterados, etc., debe realizarse en toda la longitud del talud. o al menos en tramos representativos.
- Sondeos a lo largo del talud, de forma que se investigue tanto la zona de coronación como la parte inferior del talud. El número dependerá de la complejidad geológica y de la longitud del talud. En los sondeos se tomarán muestras para realizar ensayos de laboratorio y se instalará tubería piezométrica para medida de los niveles de agua.
- En excavaciones donde se precisen bombeos o drenajes, se realizarán ensayos de permeabilidad.

Las propiedades resistentes de los materiales, suelos o macizos rocosos, se obtienen mediante los ensayos *in situ* y de laboratorio adecuados y la aplicación de criterios y correlaciones empíricas. Los ensayos de laboratorio más característicos para el diseño o estudio de taludes son los de clasificación, identificación, corte directo en suelos y discontinuidades y compresión simple, entre otros.

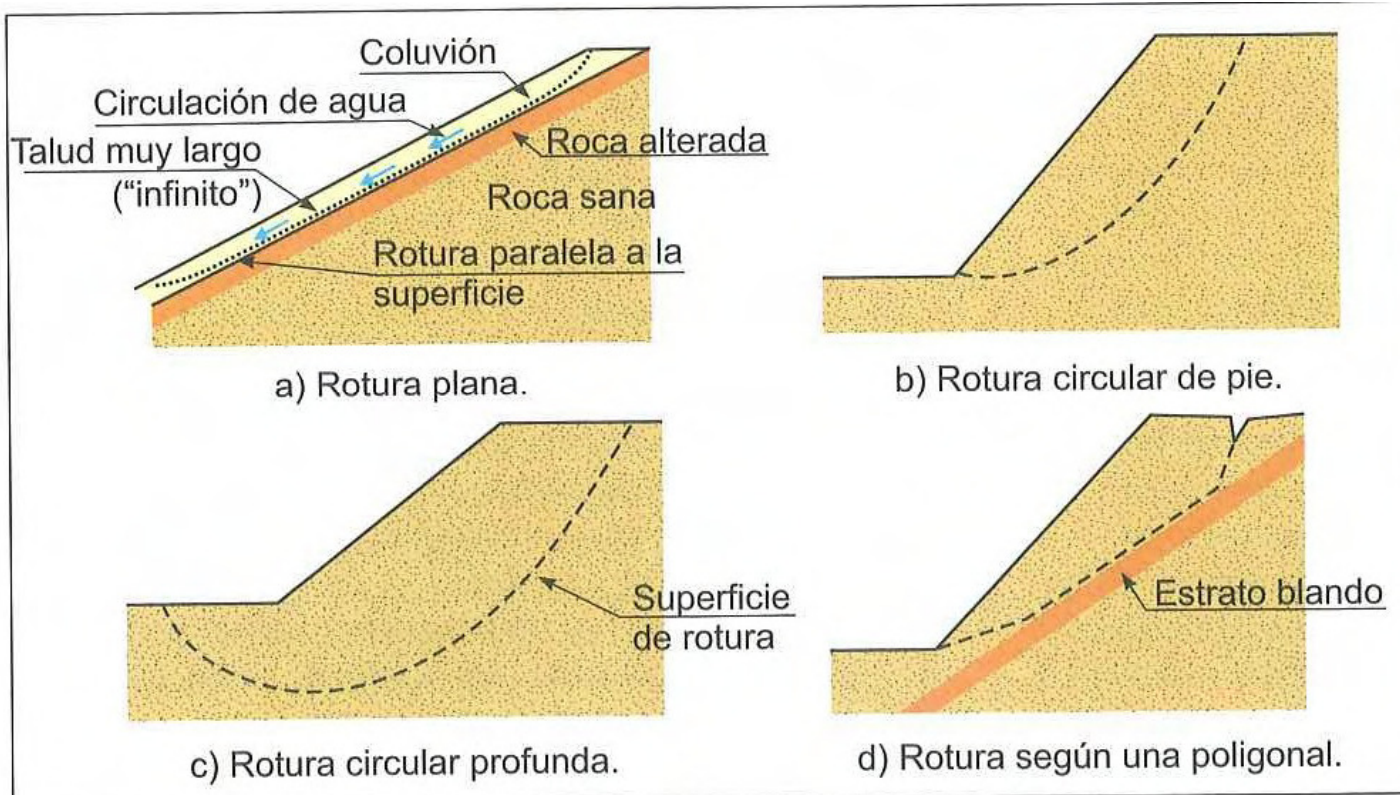
Factores influyentes en la estabilidad

Factores influyentes en la inestabilidad de los taludes

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
<ul style="list-style-type: none">- Estratigrafía y litología.- Estructura geológica.- Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.- Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.- Tensiones naturales y estado tenso-deformacional.	<ul style="list-style-type: none">- Sobrecargas estáticas.- Cargas dinámicas.- Cambios en las condiciones hidrogeológicas.- Factores climáticos- Variaciones en la geometría.- Reducción de parámetros resistentes.

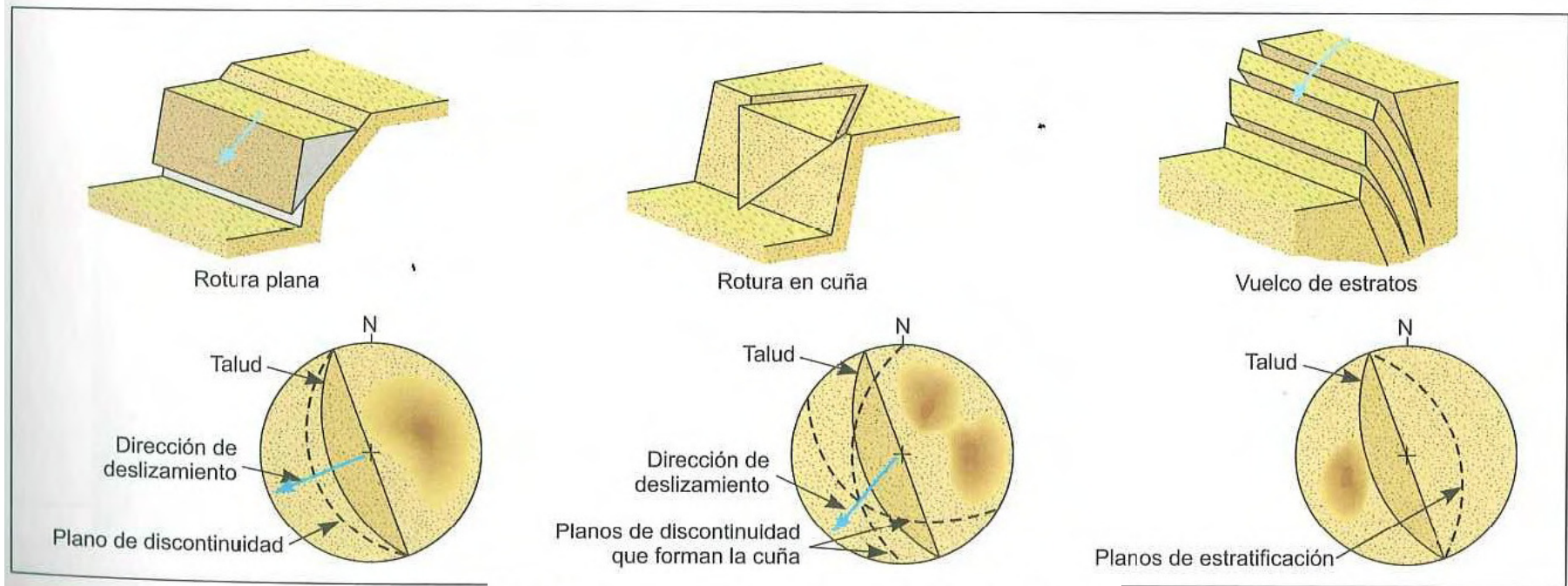
Tipos de rotura

Taludes en suelos



Tipos de superficies de rotura en suelos.

Taludes en rocas



Tipos de rotura en taludes rocosos,



Roturas planas



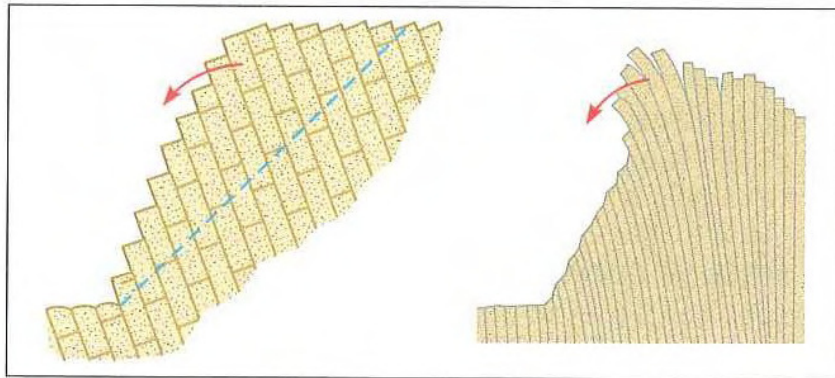
Planos de una cuña deslizada en un talud



Bloques rocosos de un talud que han sufrido proceso de vuelco (foto L. González de Vallejo).

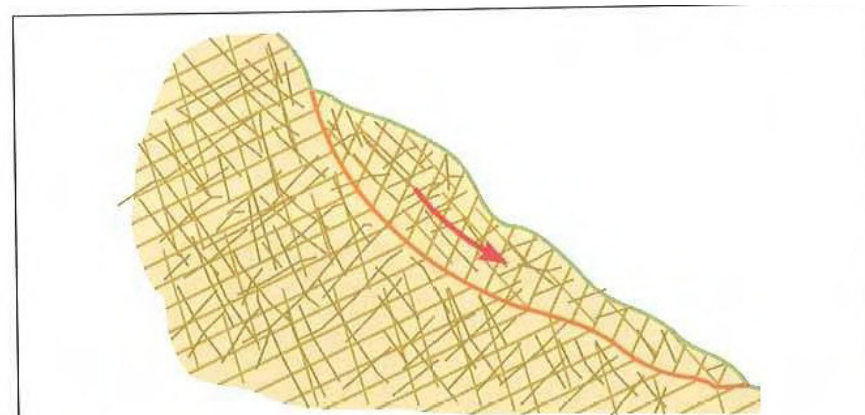
Rotura por pandeo

Este tipo de rotura se produce a favor de planos de estratificación paralelos al talud ($\alpha = \psi$), con buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno ($\alpha > \phi$). La rotura puede ocurrir con o sin flexión del estrato; la condición necesaria es que los estratos sean suficientemente esbeltos, en relación con la altura del talud, para poder pandear (Figuras 9.23).



Rotura curva

La rotura curva puede ocurrir en macizos rocosos blandos poco competentes y en macizos muy alterados o intensamente fracturados, que presentan un comportamiento isótropo y donde los planos de discontinuidad no controlan el comportamiento mecánico (Figura 9.25); en este caso, el macizo se comporta como un suelo. No obstante, la existencia de zonas singulares de debilidad y de grandes planos de discontinuidad en este tipo de macizos, como fallas, pueden condicionar modelos de rotura con otras tipologías.



Esquema de rotura curva en macizos rocosos intensamente fracturados.

Análisis de estabilidad

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, etc. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores.

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de:

- Las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos rocosos).
- Los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, etc.).
- Alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

Métodos de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- La definición de «coeficiente de seguridad».

$$F = \frac{\text{Fuerzas estabilizadoras}}{\text{Fuerzas desestabilizadoras}}$$

o expresado en términos de tensiones:

$$F = \frac{\text{Tensiones tangenciales resistentes}}{\text{Tensiones tangenciales deslizantes}}$$

$$F = (R_c + R_\phi)/S$$

siendo:

$$R_c = \text{fuerzas cohesivas} = cA$$

$$R_\phi = \text{fuerzas friccionales} = W \cos \alpha \operatorname{tg} \phi$$

$$S = \text{fuerzas que tienden al deslizamiento} = W \operatorname{sen} \alpha$$

$$A = \text{área del plano de rotura}$$

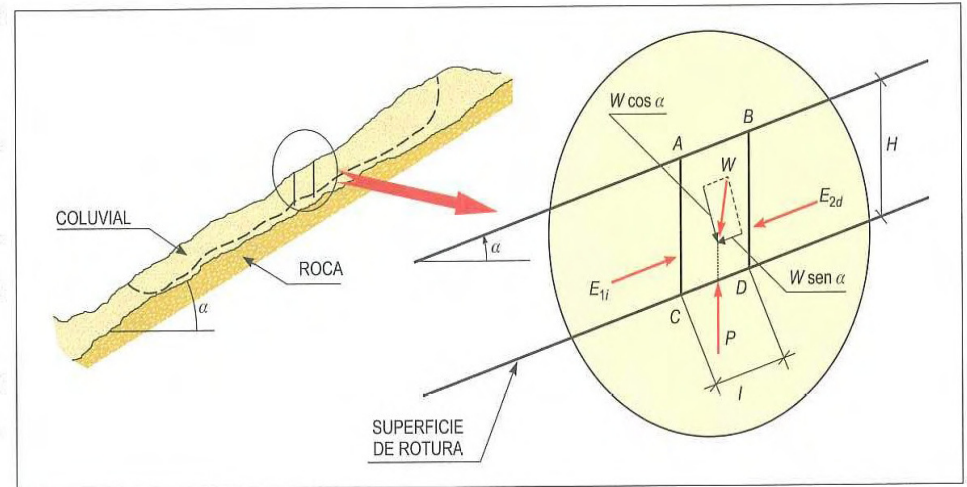
en caso de existir presión de agua sobre la superficie de rotura, siendo U la fuerza total debida al agua sobre la superficie A :

$$R_\phi = (W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \phi$$

Taludes en suelos

Como métodos clásicos para análisis de estabilidad en suelos se pueden considerar:

- El análisis de roturas planas en taludes «infinitos».
- El análisis de varios bloques de terreno que interaccionan entre sí, aplicable a superficies de rotura de tipo poligonal (método de las cuñas).
- Los métodos que analizan el equilibrio total de una masa deslizante, de desarrollo circular o logarítmico, para análisis de roturas curvas.
- Los métodos de rebanadas.



■ TALUD INFINITO

$$F = \frac{\tau}{S} = \frac{\sigma_n \operatorname{tg} \phi'}{S} = \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

siendo:

$$\sigma_n = \frac{W \cos \alpha}{l} = \gamma H \cos^2 \alpha$$

$$S = \frac{W \sin \alpha}{l} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha$$

donde l es la longitud de la base de la rebanada, ϕ' es el rozamiento efectivo y γ es el peso específico aparente del terreno.

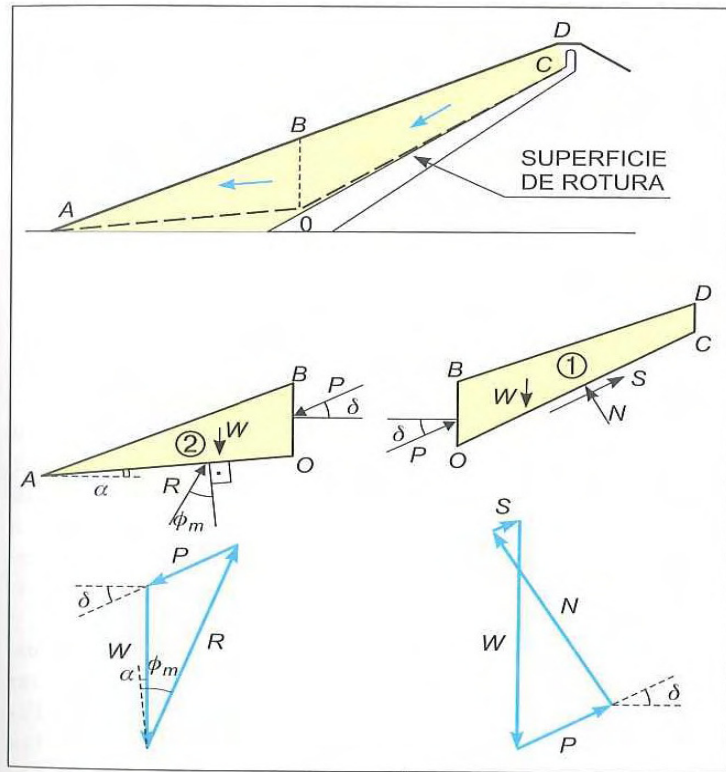
con lo que la expresión final puede escribirse:

$$F = A \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \alpha} + B \frac{c'}{\gamma H}$$

siendo $B = 1/(\cos \alpha \sin \alpha)$ un parámetro que depende de la inclinación del talud, α (Figura 9.28).

■ MÉTODO DE LAS CUÑAS

Para este tipo de análisis (denominado «método de las cuñas», aunque no tiene ninguna relación con la rotura tipo cuña en macizos rocosos fracturados) la masa deslizante se divide en varios bloques mediante líneas verticales, tal como muestra la Figura 9.29, para los que se establece el equilibrio de fuerzas verticales y horizontales. El coeficiente de seguridad es la relación entre la resistencia tangencial disponible y la requerida para el equilibrio. El método se aplica de la

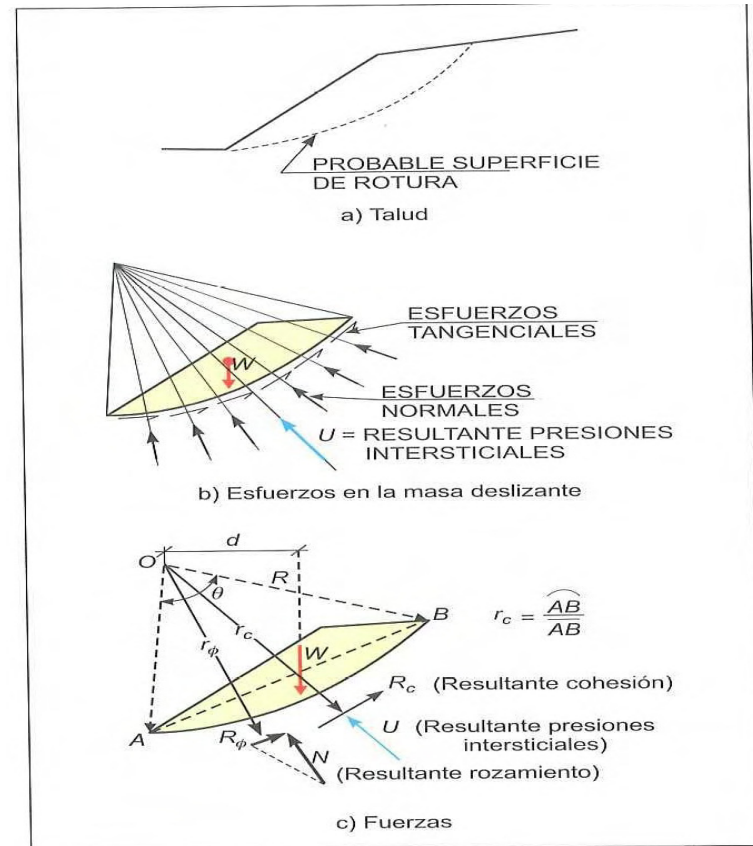


Método de las cuñas para análisis de rotura poligonal.

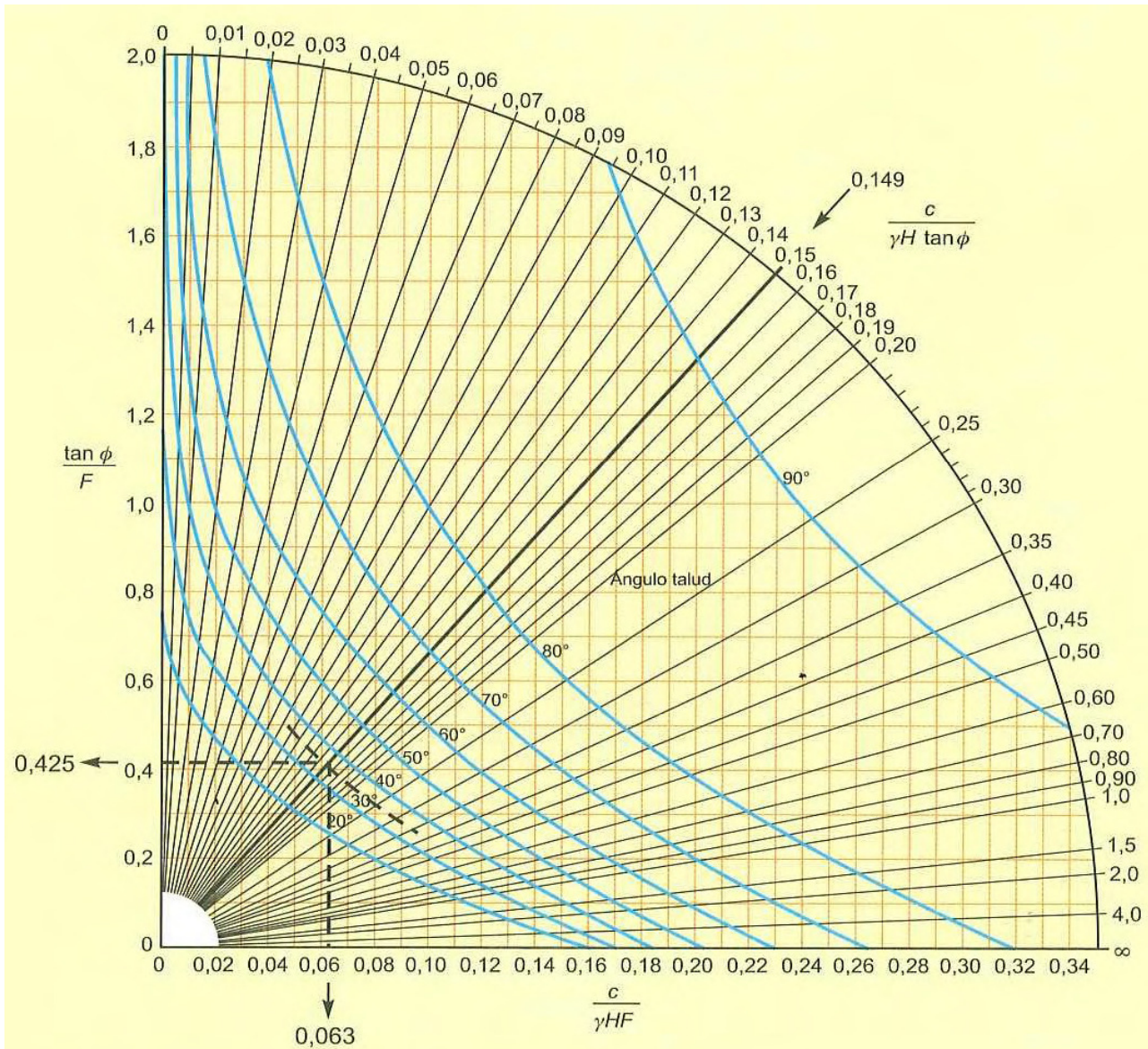
■ MÉTODOS DE LA MASA TOTAL. MÉTODO DE TAYLOR

Con la definición del coeficiente de seguridad, F , ya indicada, considerando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y un terreno homogéneo, la resistencia tangencial movilizada para llegar al equilibrio estricto ($F = 1,0$) será:

$$S = \frac{\tau}{F} = \frac{c}{F} + \sigma_n \frac{\text{tg } \phi}{F}$$

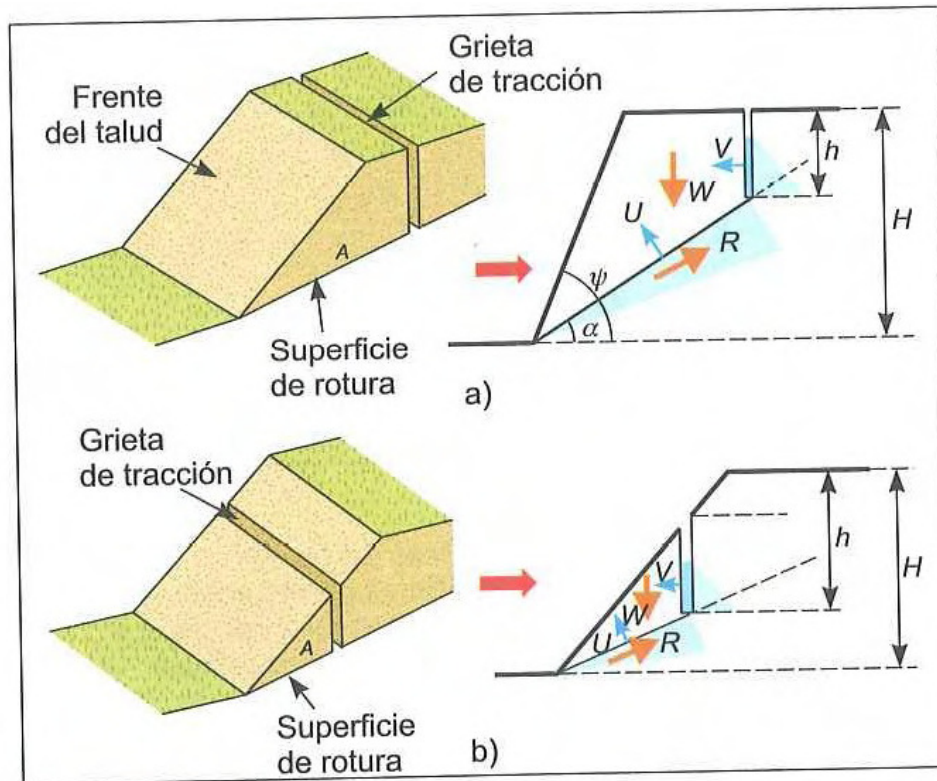


ÁBACOS DE HOEK Y BRAY



Taludes en rocas

■ ROTURA PLANA



$$F = \frac{cA + (W \cos \alpha - U + T \cos \delta) \operatorname{tg} \phi}{W \operatorname{sen} \alpha - T \operatorname{sen} \delta}$$

donde:

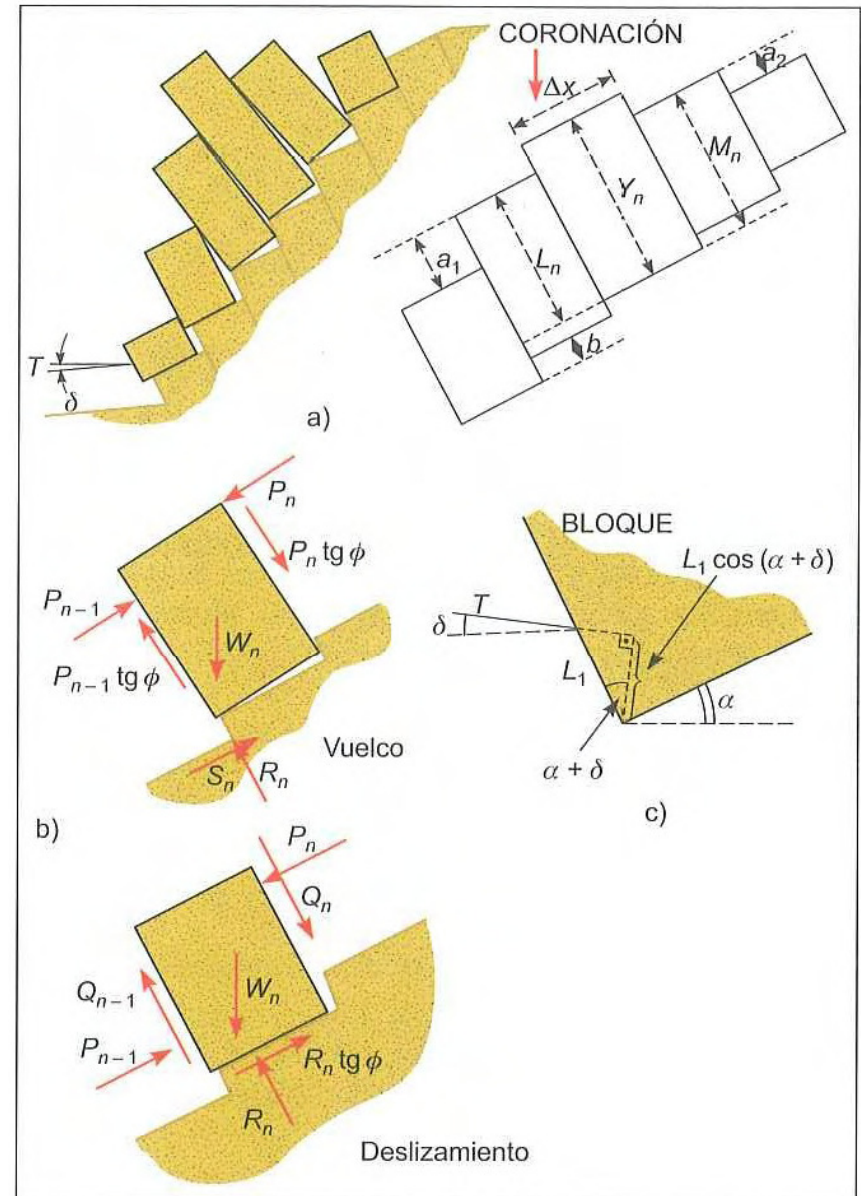
- cA = fuerza debida a la cohesión en el plano de deslizamiento.
- $(W \cos \alpha - U) \operatorname{tg} \phi$ = fuerza debida al rozamiento en el plano.
- $W \cos \alpha$ = componente estabilizadora del peso (normal a la superficie de deslizamiento).
- U = fuerza total debida a la presión de agua sobre la superficie de deslizamiento.
- $W \operatorname{sen} \alpha$ = componente del peso tendente al deslizamiento (paralela a la superficie de deslizamiento).

■ ROTURA POR VUELCO

El análisis de la rotura por vuelco de bloques se lleva a cabo estudiando las condiciones de equilibrio de cada uno de los bloques que forman el talud. Para realizar los cálculos se establecen las relaciones entre todos ellos considerando sus acciones mutuas y las relaciones geométricas de los bloques y del talud.

Goodman y Bray (1976) y Hoek y Bray (1981) han desarrollado el análisis para casos sencillos y taludes con bloques esquemáticos. Los casos más complejos no pueden ser representados por modelos simples y no pueden ser analizados mediante métodos de equilibrio límite. A continuación se describe el procedimiento para realizar el análisis de estabilidad para roturas por vuelco en un talud con las características y condiciones necesarias para que se produzca este tipo de rotura.

a) Modelo geométrico para análisis por equilibrio límite del vuelco de bloques en un talud. b) Fuerzas actuando sobre uno de los bloques frente al vuelco y al deslizamiento. c) Fuerza de anclaje aplicada al bloque del pie del talud. (Modificado de Hoek y Bray, 1981).

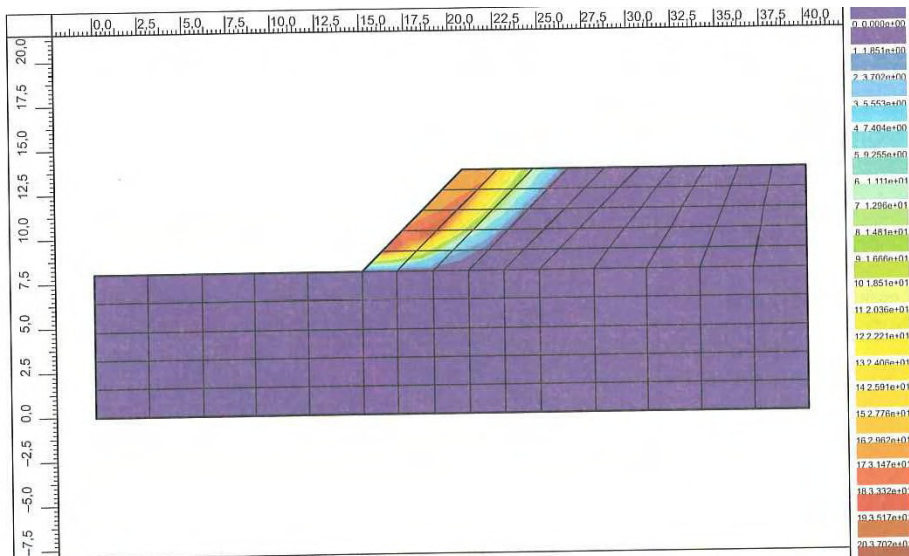


Métodos tenso-deformacionales

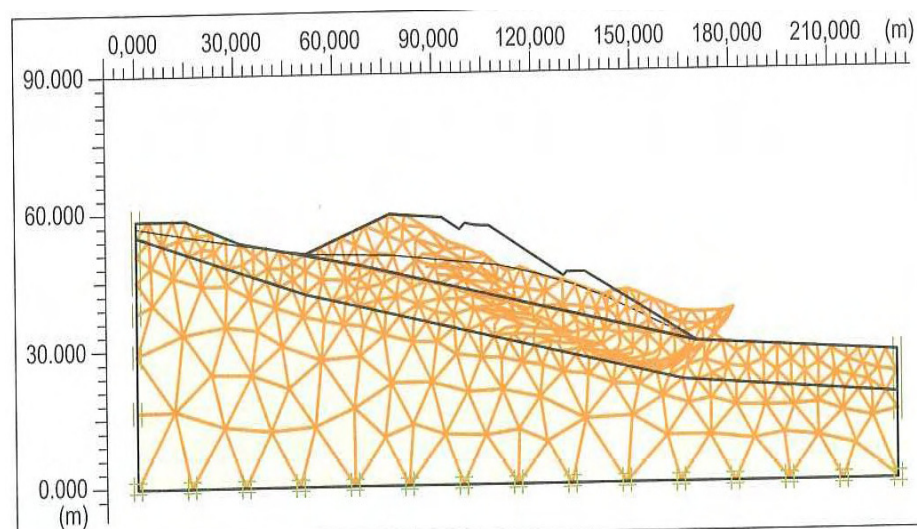
Estos métodos constituyen una alternativa a los métodos de equilibrio límite, siempre y cuando su utilización esté justificada y sea apropiada para el análisis del talud considerado. Su principal ventaja es que consideran las **relaciones tensión-deformación** que sufre el material durante el proceso de deformación y rotura, siendo estas relaciones las que dan la pauta de su comportamiento y las que controlan su resistencia.

Ante unas determinadas cargas, el terreno se deforma en función de sus propiedades resistentes y deformacionales, siguiendo su ley de comportamiento hasta alcanzar, en su caso, la rotura, a la vez que se van generando diferentes estados tensionales en las distintas zonas del talud. Los métodos tenso-deformacionales permiten modelizar esta evolución a partir del modelo geométrico representativo de la estructura, estratigrafía e hidrogeología del talud o ámbito de estudio considerado (debiéndose aplicar unas determinadas condiciones de contorno al modelo), de la aplicación de la ley de comportamiento adecuada del material y de las propiedades resistentes y deformacionales de las diferentes litologías involucradas en el modelo. La resolución de las ecuaciones de la elasticidad o plasticidad (u otro modelo de comportamiento) mediante el método de los elementos finitos, u otro método matemático, aporta los valores de los desplazamientos, deformaciones y tensiones que se van generando en todo el modelo analizado, proporcionando la naturaleza y magnitud de los desplazamientos del material compatibles con el estado de equilibrio del talud.

A diferencia de los métodos de equilibrio límite, que consideran únicamente las fuerzas que actúan sobre uno o varios puntos de la superficie de rotura, y



Representación gráfica de las zonas con diferente grado de deformación en un talud homogéneo; programa Zsoil.



Análisis a posteriori tenso-deformacional de un terraplén inestable sobre arcillas azules andaluzas, con el código Plaxis (De la Fuente, 1997).

Medidas de estabilización

Para diseñar y aplicar estas medidas es necesario conocer:

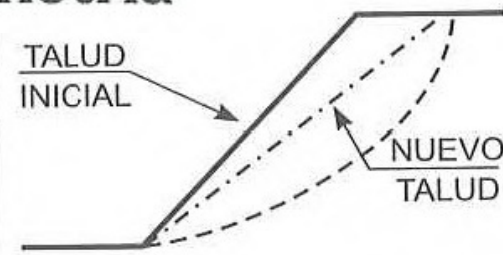
- Las propiedades y el comportamiento geomecánico del terreno.
- El mecanismo y tipología de las roturas, incluyendo la velocidad y dirección del movimiento y la geometría de la rotura.
- Los factores geológicos, hidrogeológicos y de otro tipo influyentes en la inestabilidad, que de-

terminan las causas de la misma y, por tanto, las medidas más adecuadas para la estabilización, siendo de especial importancia los datos referentes a situación de niveles freáticos, presiones de agua y permeabilidad de los materiales.

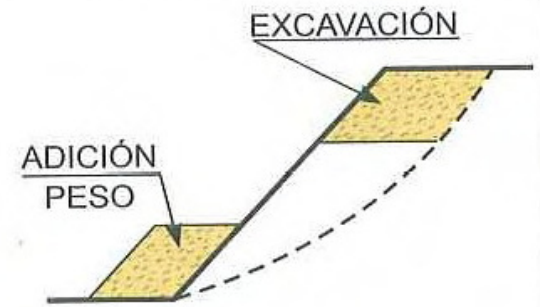
Para el diseño de las medidas de estabilización deben tomarse en consideración:

- Los medios económicos y materiales disponibles.
- La urgencia de intervención.
- La magnitud y dimensiones de la inestabilidad.

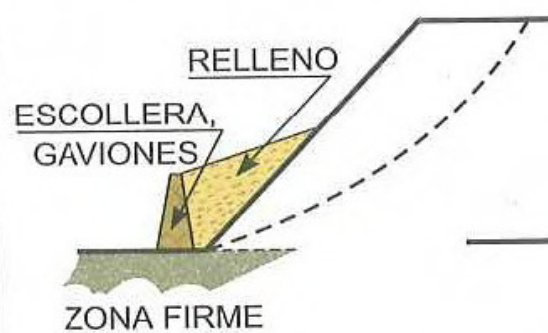
Modificación de la geometría



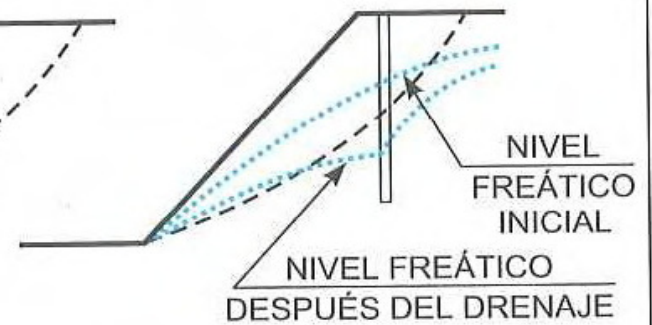
a) Disminución del ángulo del talud.



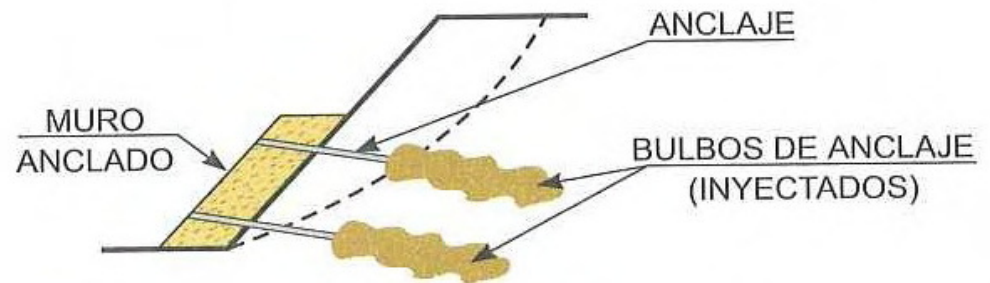
b) Eliminación de peso en cabecera y adición al pie.



c) Refuerzo y peso en el pie del talud.



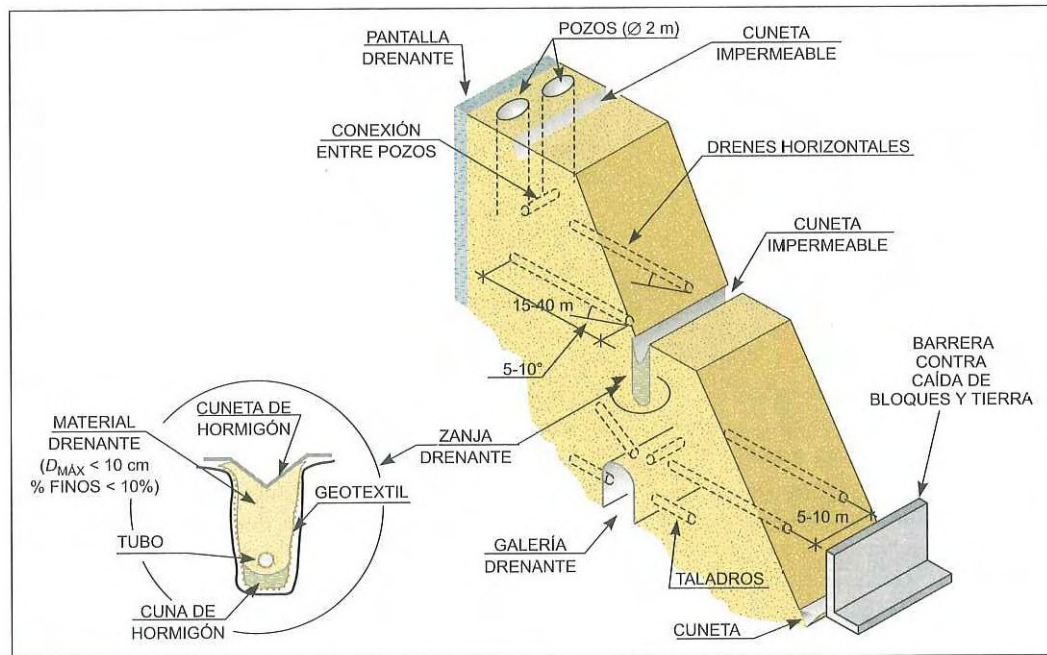
d) Drenaje, rebajamiento del nivel freático.



e) Refuerzo con anclajes y muro.

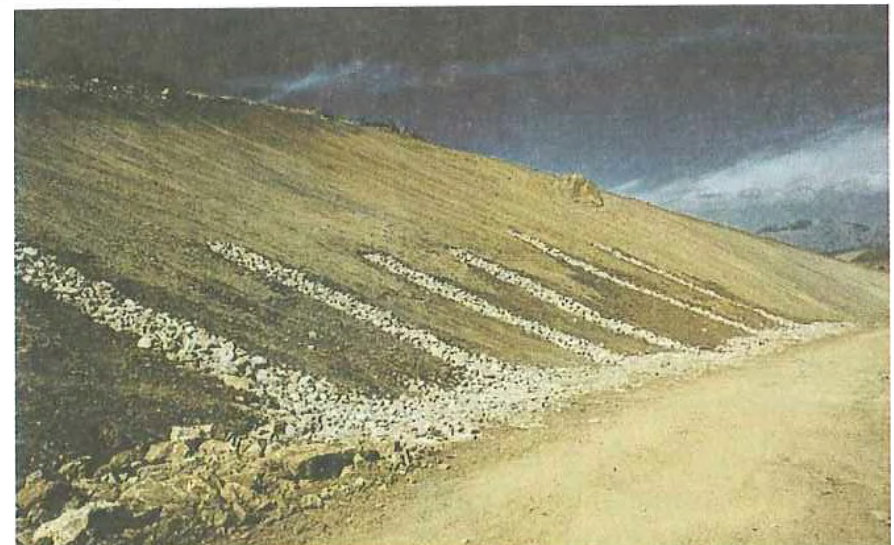
Métodos para aumentar el coeficiente de seguridad de taludes en suelos.

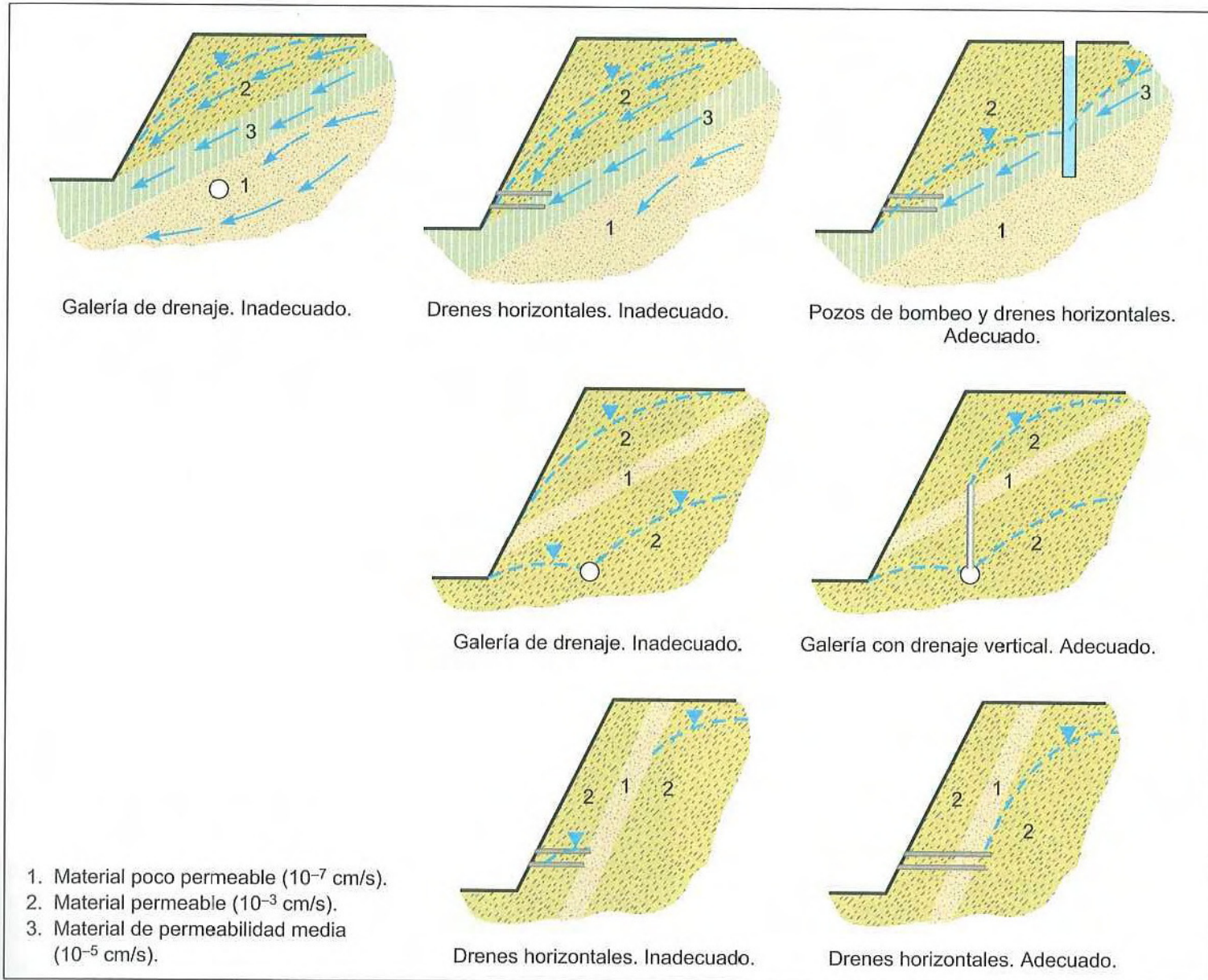
Medidas de drenaje



Medidas de drenaje y protección en taludes (

Drenes transversales al talud





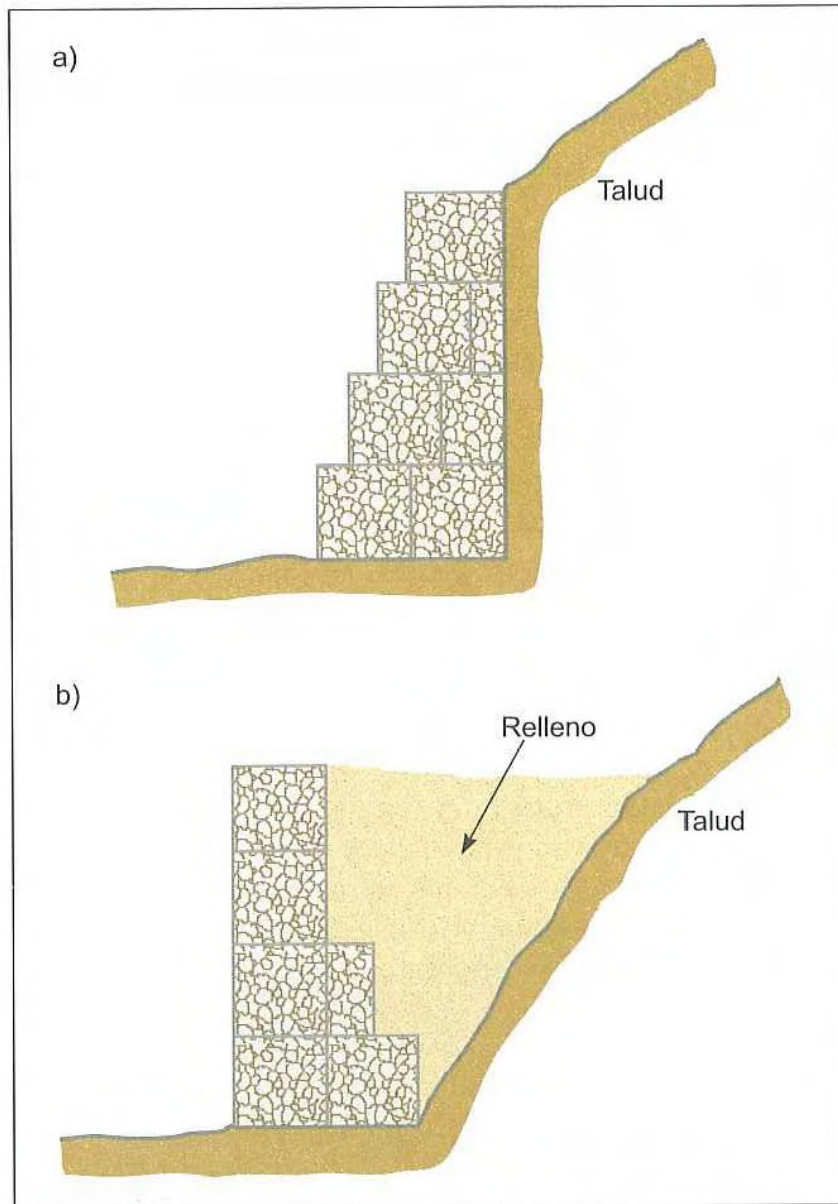
Disposición y eficacia de los sistemas de drenaje en un talud



Pantalla anclada de micropilotes, norte de Italia
to L. González de Vallejo).



Instalación de anclajes para reforzar el talud, uni-
dos mediante vigas de hormigón armado para que
trabajen de forma solidaria, Asturias (foto L. Gon-
zález de Vallejo).



Muros de gaviones con el intradós escalonado (a) y con el trasdós escalonado, con relleno entre el muro y el talud (b).

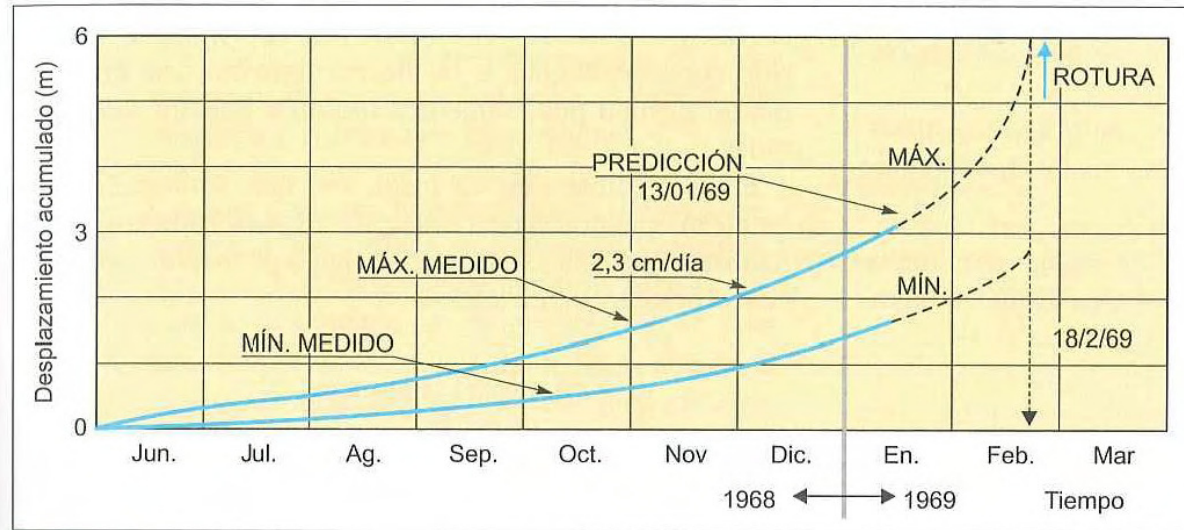


Muro de gaviones a pie de talud y cuneta de drenaje (foto L. González de Vallejo).

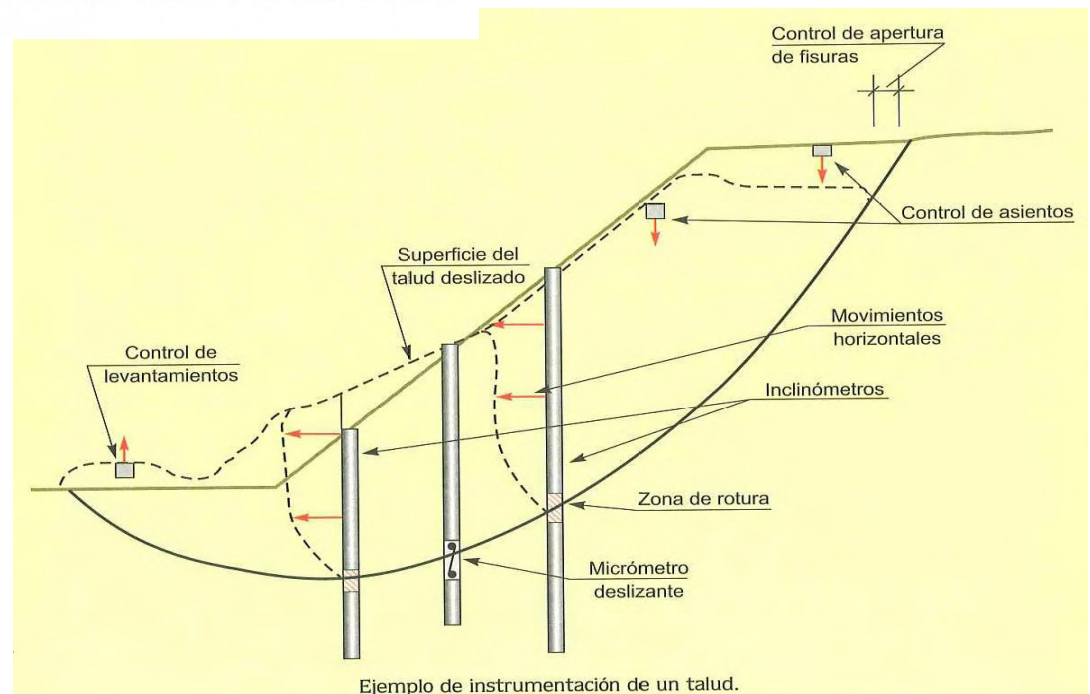


Protección superficial de taludes con mallas metálicas. A pie de talud se ha instalado una barrera para evitar la caída de rocas a la carretera (foto M. Ferrer).

Instrumentación y control



Predicción de la rotura de un talud en la mina de Chuquicamata, Chile (modificado de Hoek y Bray, 1981).



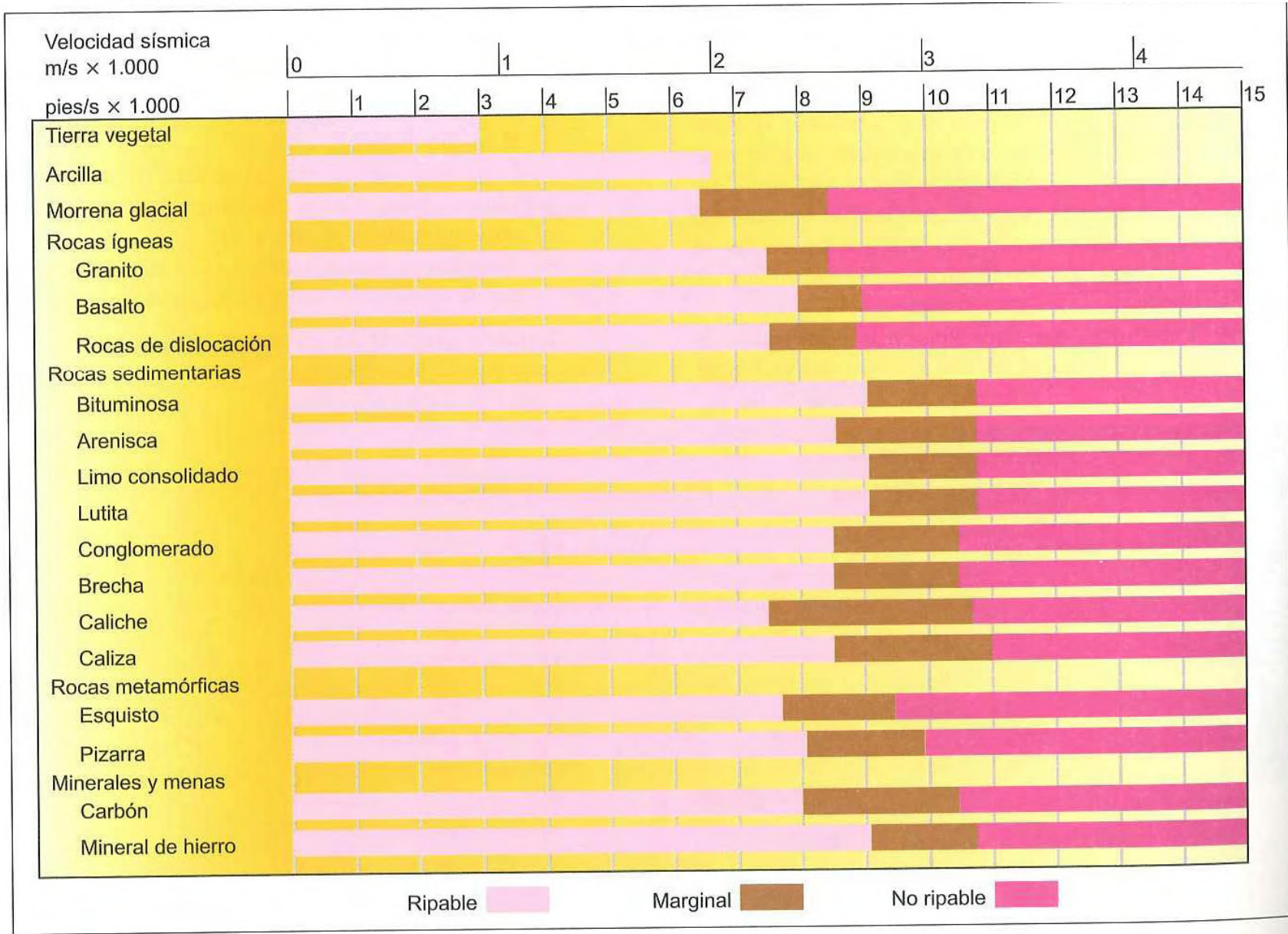
Ejemplo de instrumentación de un talud.

Excavación de taludes

Criterio general de ripabilidad basado en la velocidad de ondas sísmicas

Velocidad sísmica (m/s)	Excavabilidad
< 1.500	Rocas excavables con mototrallas, excavadoras o tractores. No precisan voladura.
1.500-2.000	Ripado fácil. Excavación de estratos sin volar, algo difícil para excavadoras o tractores con riper.
2.000-2.500	Ripado algo costoso. Voladuras ligeras (grandes longitudes de retacado, bajos consumos específicos).
2.500-3.000	Se precisan voladuras ligeras. Prevoladuras.
> 3.000	Voladuras importantes (esquemas de perforación cerrados, pequeñas longitudes de retacado, altos consumos específicos).

Crterios de excavabilidad



Ripabilidad de distintas rocas para maquina ripadora tipo D10R de Caterpillar (modificado de Finanzauto, 2001).

GRACIAS POR SU ATENCIÓN