

4.4.) Parámetros a determinar en el estudio de un deslizamiento

Tema	Parámetro	Características
Topografía	Localización con coordenadas	Planta de localización de ríos, cañadas, depresiones, humedades, vegetación, vías, escarpes, áreas de deslizamiento, etc.
	Líneas de nivel	Levantamiento con líneas de nivel que permitan determinar las áreas deslizadas o en proceso de movimiento. Identificar los escarpes, levantamientos y otras anomalías.
	Cambios topográficos	Localizarlos y correlacionarlos con la geología, aguas lluvias o subterráneas, posibles deslizamientos anteriores, procesos antrópicos, etc.. Localizar focos de erosión, evidencia de movimientos, hundimientos o levantamientos del terreno. Ratas de cambio de la topografía con el tiempo.
	Perfiles	Curvatura, convexidad. Correlacionarlos con la geología y con el plano de líneas de nivel. Calcular pendientes y alturas. Localizar los perfiles en el plano en planta.
	Drenaje superficial	Si es continuo. Si es intermitente. Parámetros del sistema.
Geología	Formación Geológica	Litología y características de cada formación. Secuencia de las formaciones. Profundidad a la cual aparece roca sana. Presencia de coluviones. Caracterización del suelo residual. Presencia de minerales susceptibles a alteración.
	Estructura en tres dimensiones	Estratificación. Espesor y características de cada manto. Plegamiento. Rumbo y buzamiento de los planos o foliaciones. Cambios de Rumbo o Buzamiento. Relación entre Rumbos y Buzamientos con la pendiente del talud. Fallas, brechas y zonas de corte.
	Discontinuidades	Rumbo. Buzamiento. Separación entre discontinuidades. Aspereza. Abertura. Material de relleno. Continuidad. Fricción y Cohesión.
	Meteorización	Profundidad. Características (químicas y mecánicas). Elaboración de perfiles de meteorización.
	Fracturación	Tamaño de los bloques. Forma de los bloques. Posibilidades de deslizamiento o volteo.
Agua superficial	Precipitación	Precipitaciones máximas mínimas y promedio, anuales mensuales y diarias. Lluvia máxima en una hora. Forma (lluvia granizo o nieve). Horario y duración de las lluvias.
	Cuenca tributaria	Area. Pendiente. Cobertura vegetal.
	Escorrentía	Tiempo de concentración y calculo del caudal máximo para diseño
	Infiltración	Infiltración en % relacionada con la precipitación.

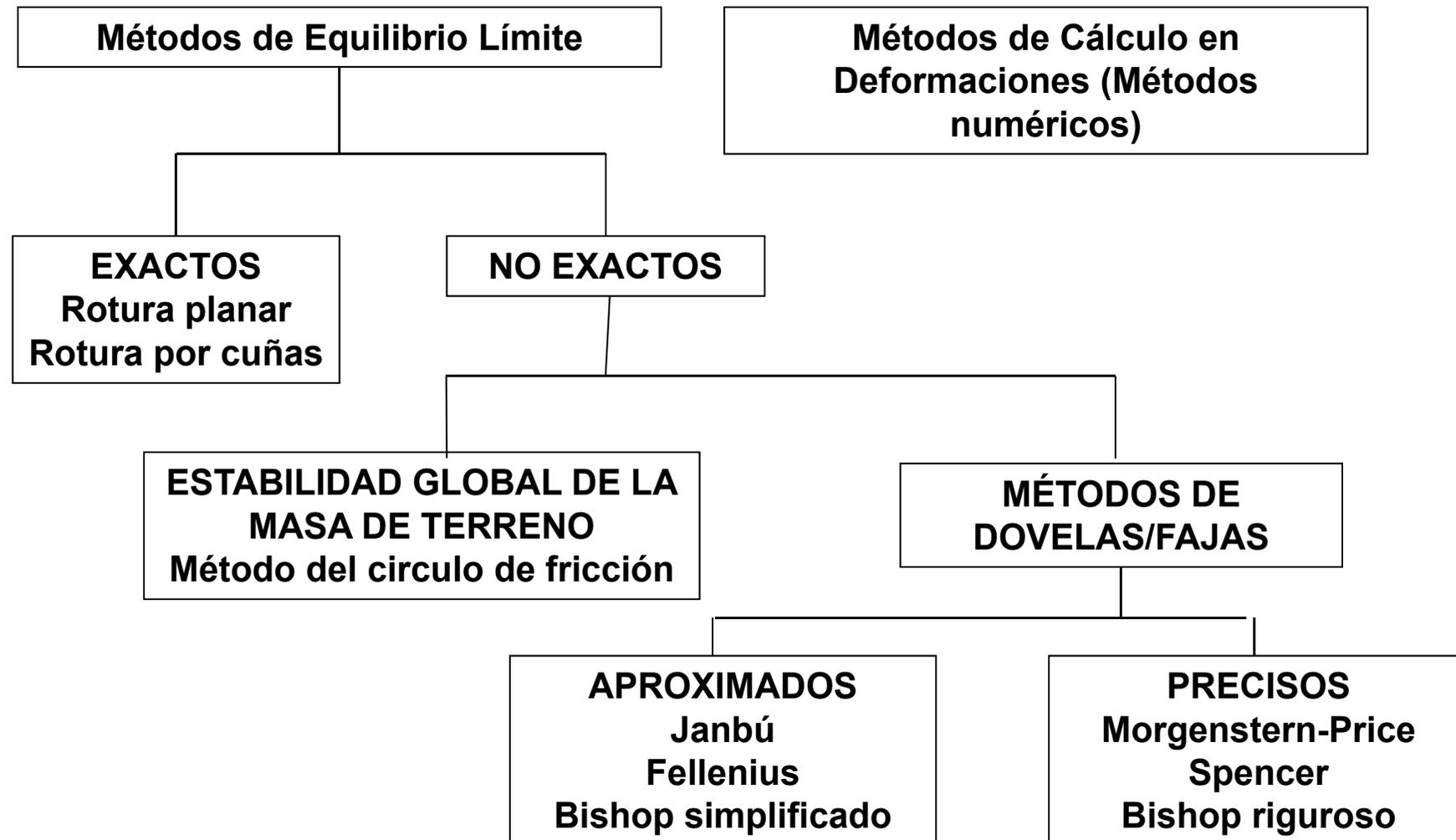
4.4.) Parámetros a determinar en el estudio de un deslizamiento

Tema	Parámetro	Características
Agua subterránea	Altura del nivel de agua	Niveles normales, aislados y suspendidos. Planos de líneas de nivel freático y líneas de flujo
	Fluctuaciones	Fluctuaciones del nivel de agua con el tiempo y su relación con las lluvias. Variación de los niveles en el momento exacto de una lluvia. Fluctuaciones a lo largo del año. Fluctuaciones de año en año
	Caracterización.	Altura capilar. Presión de poros y presiones artesianas. Velocidad y dirección del movimiento del agua. Indicaciones superficiales de afloramientos de agua, zonas húmedas y diferencias en la vegetación. Química de las aguas subterráneas. Sales disueltas, contaminación, presencia de aceites. Efecto de las actividades humanas sobre el nivel freático. Posibilidad de fugas de ductos de servicios públicos. Características del drenaje interno.
Mov. de falla	Tipo de falla	Caído, flujo, deslizamiento de rotación o traslación, etc. y caracterización.
	Caracterización	Profundidad y forma de la superficie de falla. Dirección del movimiento Rata de movimiento. Area y volumen.
Factores Externos	Sísmica	Aceleración de diseño – Intensidad y Magnitud, Profundidad de epicentros. Distancia de los epicentros. Relaciones con fallas geológicas cercanas, cambios sísmicos con el tiempo, presencia de suelos susceptibles a sufrir cambios por vibraciones. Presencia de volcanes.
	Vegetación	Especies presentes, Cobertura, características del follaje y las raíces. Comportamiento de evapotranspiración.
	Clima general	Clima. Lluvias. Vientos. Temperatura (media y extremos horaria y diaria) – Cambios barométricos.
	Intervención antrópica	Modificaciones causada por el hombre, áreas de deforestación, localización de piscinas, tuberías de acueducto y alcantarillado, irrigación, minería, cortes y rellenos etc. Utilización del agua Subterránea y restricciones. Empozamientos y adición de agua. Cambios en la dirección del agua superficial. Cambios en la cobertura del suelo que afectan la infiltración. Deforestación. Movimiento de vehículos, detonación de explosivos, Maquinaria Vibratoria. Cortes, rellenos, pavimentos etc.
Mecánica de suelos	Propiedades mecánicas	Erosionabilidad. Granulometría-Plasticidad – Clasificación. Resistencia al corte (ángulo de fricción y Cohesión). Permeabilidad. Sensitividad. Expansibilidad.

4.5.) Análisis de estabilidad en suelos

- Se define la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS)
- **La ROM exige FS > 1,2 a 1,3 para situaciones transitorias y FS > 1,4 a 1,5 para persistente o transitoria a largo plazo**
- El estudio de estabilidad se suele centrar en determinar los siguientes valores; EL FACTOR DE SEGURIDAD, LA ALTURA (H) y/o LA PENDIENTE (β)
- Se realiza el análisis en términos de presiones efectivas
- Para suelos con permeabilidades superiores a 10^{-4} cm/sg, y atendiendo a la velocidad de aplicación de las cargas –generalmente semanas y/o meses–, se pueden considerar condiciones drenadas.
- Para suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/sg se realizará el estudio en condiciones NO drenadas
- Duncan (1996) recomienda;
 - Para taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión en los poros debida a las lluvias, se analice el problema como condición drenada
 - Si T_v (factor tiempo, teoría de la consolidación) > 3; CONDICIÓN DRENADA
 - Si $T_v < 0,01$; CONDICIÓN NO DRENADA
 - Para situación intermedia; ANALIZAR AMBAS CONDICIONES
- MÉTODOS DE CÁLCULO;
 - *Equilibrio límite*
 - *Métodos numéricos*
- Los métodos más utilizados; Simplificados de Bishop y Janbú (métodos de equilibrio límite).

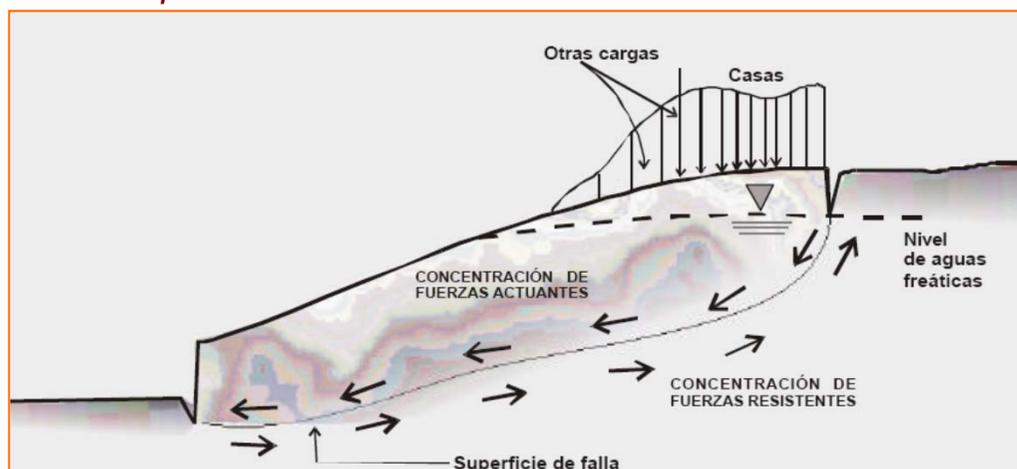
4.5.1.) Métodos de cálculo



4.5.1.) Métodos de cálculo / Equilibrio límite

–**MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE**; *Supone que en el caso de falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, equivalentes a un factor de seguridad igual a la unidad*

- El análisis puede realizarse estudiando la totalidad de la longitud de la superficie de falla (Globales) o dividiendo la masa deslizada en porciones o dovelas (Parciales)
- El criterio de falla adoptado es el de Coulomb



–**Fellenius (1927); FS = Resistencia al corte / Esfuerzo al cortante**

–En superficies circulares donde existe centro de giro;

$$\text{FS} = \text{Momento resistente} / \text{Momento actuante}$$

–Al dividir en dovelas y considerar el equilibrio de cada tajada por separado, se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria;

$$\text{FS} = \Sigma \text{Resistencias al corte} / \Sigma \text{Esfuerzos al cortante}$$

4.5.1.) Métodos de cálculo / Análisis límite (métodos numéricos)

–**MÉTODOS NUMÉRICOS**; *Análisis de esfuerzos-deformaciones, considerando el medio elasto-plástico*

•**ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS**
(Introducido por Clough y Woodward)

–Se divide la masa del suelo en unidades discretas “elementos finitos”.
Análisis en 2 dimensiones

–La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo donde no todos los elementos fallan simultáneamente

–Se han de satisfacer las condiciones de esfuerzos en frontera y el equilibrio de esfuerzos en cada punto

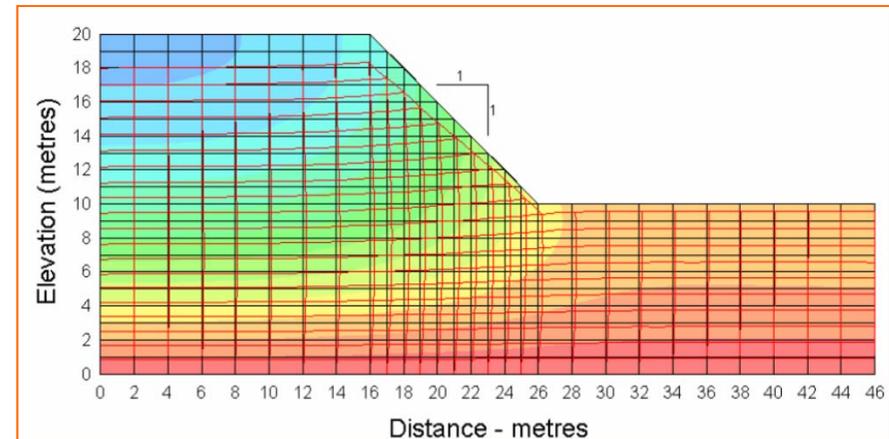
–Muy útiles para analizar fallas en las cuales no existe una superficie continua de cortante como es el caso de fallas por “volteo”

–De gran utilidad para simular diversas posibilidades de falla

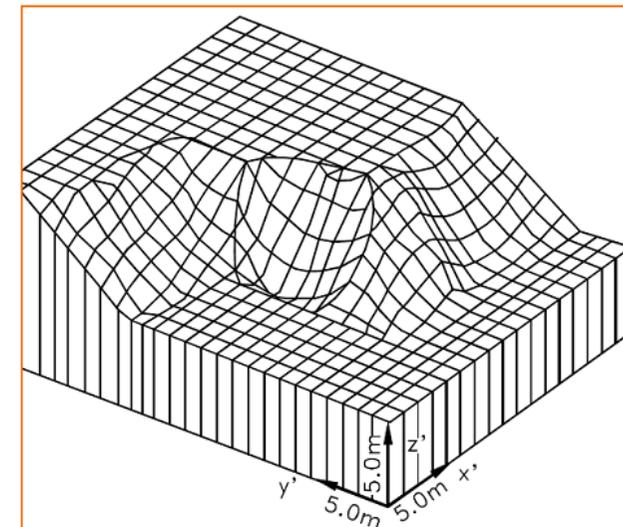
»P.e; PLAXIS

•**ANÁLISIS EN TRES DIMENSIONES**

–Más destacado en de Yamagami y Jiang (1996)



Malla típica de elementos finitos



Grafismo modelo 3D

4.5.1.) Métodos de cálculo

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.

4.5.1.) Métodos de cálculo

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

4.5.2.) Rotura plana

- Los métodos de rotura plana son;

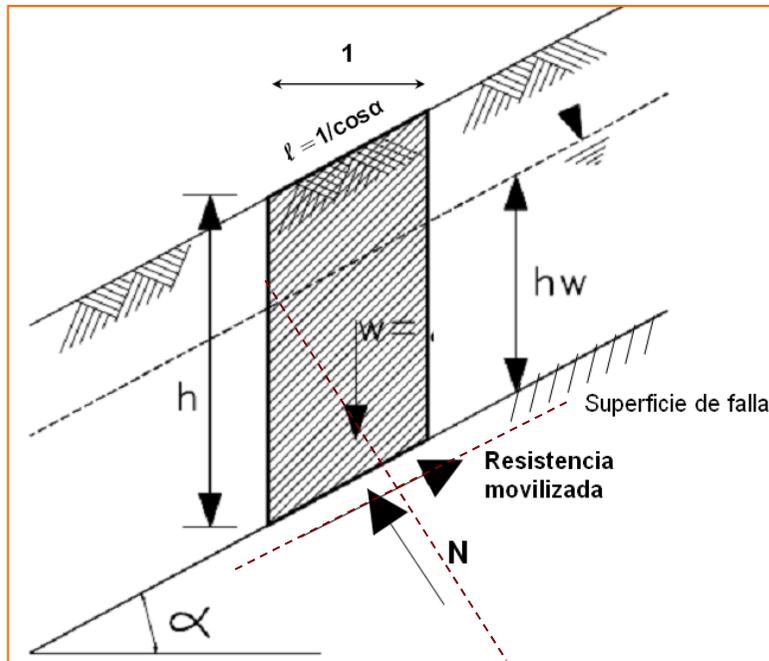
– **MÉTODO DEL TALUD INFINITO**

- *De aplicación cuando se da una falla paralela a la superficie del talud, a una profundidad somera, y la longitud de la falla es larga comparada con su espesor*
- *Deslizamiento de suelos sobre rocas u otros suelos más firmes*
- *Se presenta generalmente en suelo de baja o nula cohesión*
- *Asimilables a deslizamientos traslacionales*
- **Suposiciones del método;**
 - *Suelo isotrópico y homogéneo*
 - *Talud infinitamente largo*
 - *Superficie de falla paralela al talud*
 - *Los efectos de borde son despreciables*

– **MÉTODO DEL BLOQUE DESLIZANTE**

- *De aplicación cuando existe a una determinada profundidad, una superficie de debilidad relativamente recta y delgada*
- *Se presenta cuando existe un manto débil o cuando aparece un manto muy duro sobre el cual se puede presentar el deslizamiento*

4.5.2.1.) Método del talud infinito



•Las fuerzas actuantes;

- W; peso de la rebanada = $\gamma \text{Volumen} = \gamma h$
- N; normal a la superficie = $W \cdot \cos\alpha = \gamma h \cdot \cos\alpha$
- Resistencia movilizada = $W \cdot \text{sena} = \gamma h \cdot \text{sena}$

CRITERIO DE MOHR-COULOMB; $\tau = c' + \sigma_v' \text{tg}\Phi$

donde $\sigma_v' = \sigma_v - u = N/\text{Area} - u$

El área de contacto = $l * 1 = 1/\cos\alpha$

Sustituyendo:

$$\sigma_v' = (\gamma h \cos\alpha) / (1/\cos\alpha) - \gamma_w h_w \cdot \cos\alpha / (1/\cos\alpha)$$

$$= (\gamma h - \gamma_w h_w) \cos^2\alpha$$

$$\tau = c' + \sigma_v' \text{tg}\Phi = c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \cos^2\alpha \cdot \text{tg}\Phi$$

El coeficiente de seguridad es $FS = F_{\text{resist}} / F_{\text{motor}}$

$$FS = \tau \cdot \text{Area} / F_{\text{motor}} = \tau / \cos\alpha \cdot F_{\text{motor}}$$

$$FS = (c' + (\gamma h - \gamma_w h_w) \cos^2\alpha \cdot \text{tg}\Phi) / \gamma h \cdot \cos\alpha \cdot \text{sena}$$

•Se analiza el equilibrio de un elemento unitario por equilibrio de fuerzas, mediante el criterio de rotura de Mohr-Coulomb

$$\Sigma F_{\perp} \text{ al plano de deslizamiento} = 0$$

$$\Sigma F_{\parallel} \text{ al plano de deslizamiento} = 0$$

•Los empujes laterales en la rebanada se compensan y no se consideran

Este método puede particularizarse para:

- Suelos granulares secos
- Suelos secos con cohesión

4.5.2.1.1.) Estabilidad de taludes en suelos granulares secos

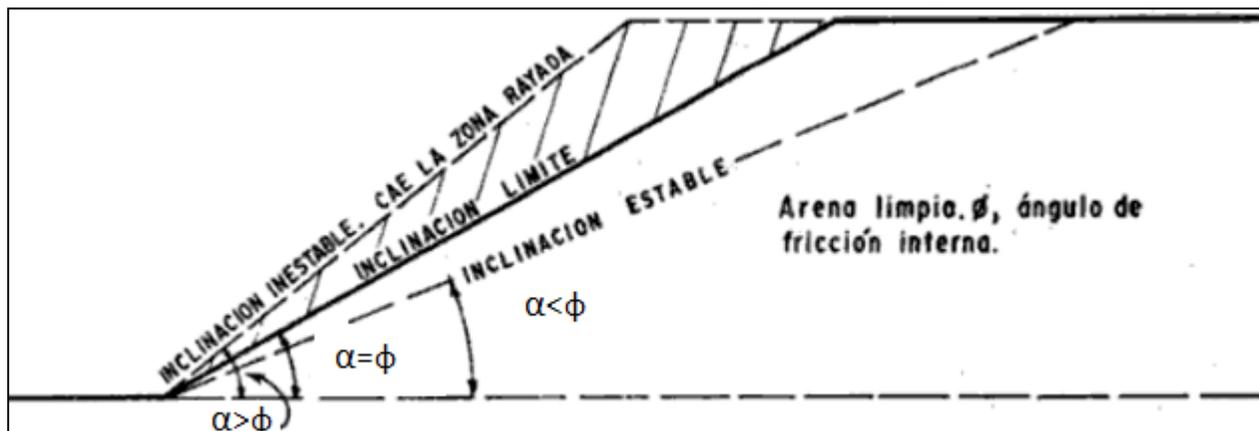
- En el caso particular de un talud granular ($c=0$) en ausencia de agua que forma un ángulo α , según el método del talud infinito, se obtendría como Factor de Seguridad;

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (\text{la estabilidad es independiente de la altura del talud})$$

- Si además el talud es subacuático (está sumergida en agua);

$$FS = \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma \tan \alpha} \approx 0,5 \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (\text{en caso de presencia de agua se reduce a la mitad el coeficiente de seguridad})$$

- En arenas finas húmedas podrán presentar, fundamentalmente en el borde del talud por el efecto de la evaporación, presiones intersticiales de succión (reducción de u o incluso u negativas), incrementándose los esfuerzos efectivos entre los granos, ayudando a la estabilidad del talud



Taludes en arenas limpias

4.5.2.1.2.) Estabilidad de taludes en suelos secos

- En el caso de un talud seco ($u=0$);

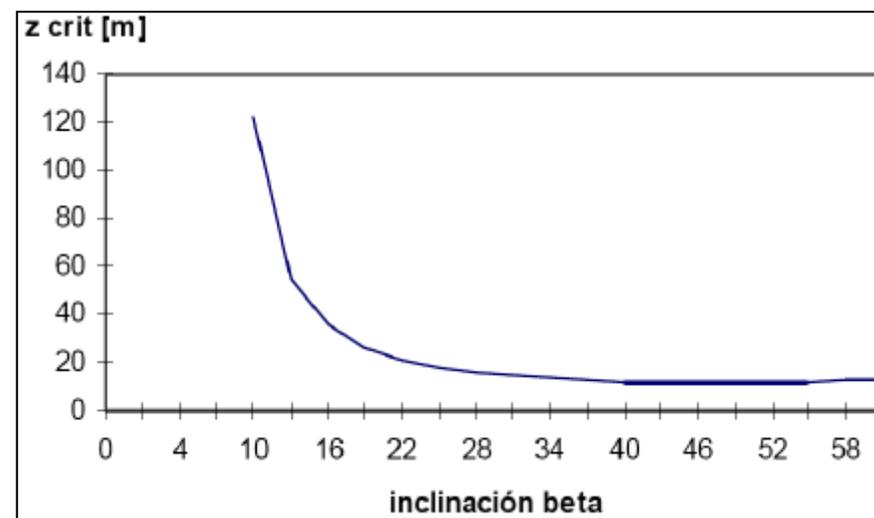
$$FS = \frac{2c}{\gamma z \cdot \sin(2\beta)} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

- Hay una **profundidad crítica** a la que ocurriría la falla ($FS = 1$);

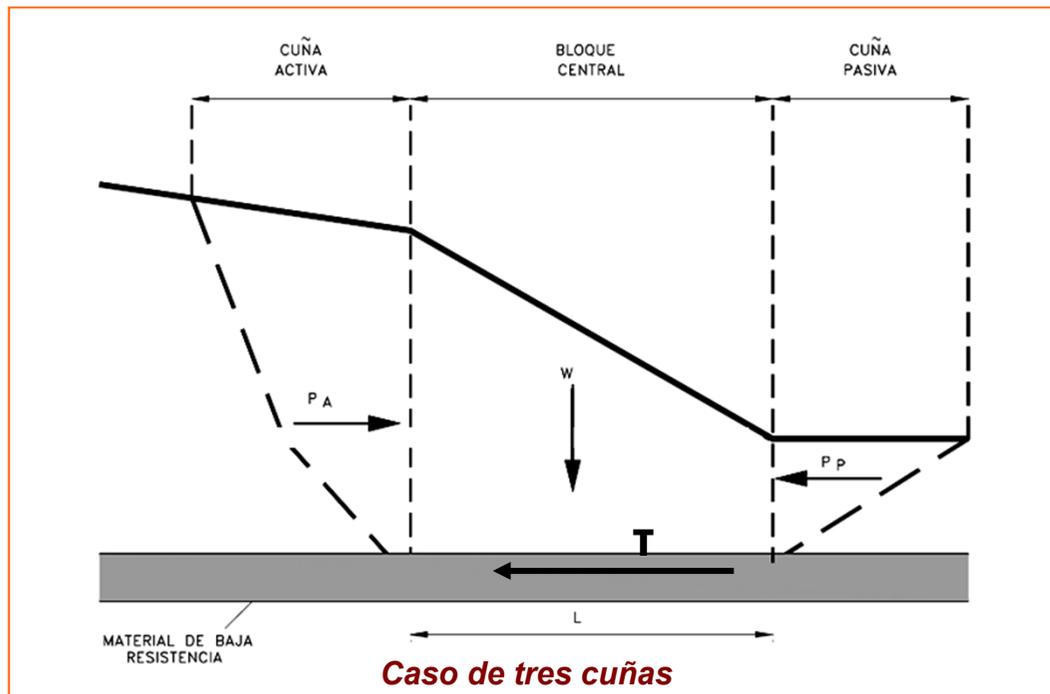
$$Z_{\text{crítica}} = \frac{c \cdot \sec^2 \beta}{\gamma \cdot (\tan \beta - \tan \phi)}$$

- Obsérvese que el factor de seguridad disminuye con la profundidad, por lo que puede producirse el deslizamiento sobre un estrato paralelo de mayor profundidad que posea mejores propiedades mecánicas;

Es habitual graficar $Z_{\text{crítica}} / \beta$ para valores constantes de c , ϕ y γ



4.5.2.2.) Método del bloque deslizante



- La masa que se mueve puede dividirse en dos o más bloques y el equilibrio de cada bloque se considera independientemente, utilizando las fuerzas entre bloques
- No se considera la deformación de los bloques
- En el caso de tres bloques;
 - La superior, al estar a favor de movimiento; *Cuña activa.*
 - La *cuña central*
 - La inferior, se opone al movimiento; *Cuña pasiva*

$$F.S. = \frac{P_p + c'_m L + (W - u) \tan \theta'_m}{P_a}$$

• Los empujes pasivos y activos según la teoría de Coulomb o de Rankine

Donde:

P_p = Fuerza pasiva producida por la cuña inferior.

P_a = Fuerza activa producida por la cuña superior.

c'_m = Cohesión efectiva del suelo blando en la base del bloque central.

L = Longitud del fondo del bloque central.

W = Peso total del bloque central.

u = Fuerza total de poros en el fondo del bloque central.

θ'_m = Fricción del suelo en el fondo del bloque.

4.5.3.) Rotura circular

- Las fuerzas actuantes son;

- W ; peso (fuerza conocida en magnitud y posición)
- Reacciones por fuerzas normales y tangenciales debidas a la fricción (N y R_ϕ) (son normales entre si pero desconocidas tanto en magnitud como en posición. $R_\phi = (N \tan \phi) / FS$, donde FS es el factor de seguridad ligado al círculo, también desconocido)
- Reacción de la cohesión (R_c) (determinada en posición, y su magnitud se podría saber en términos de c y FS)
- Resultante de las fuerzas intersticiales actuantes (U)

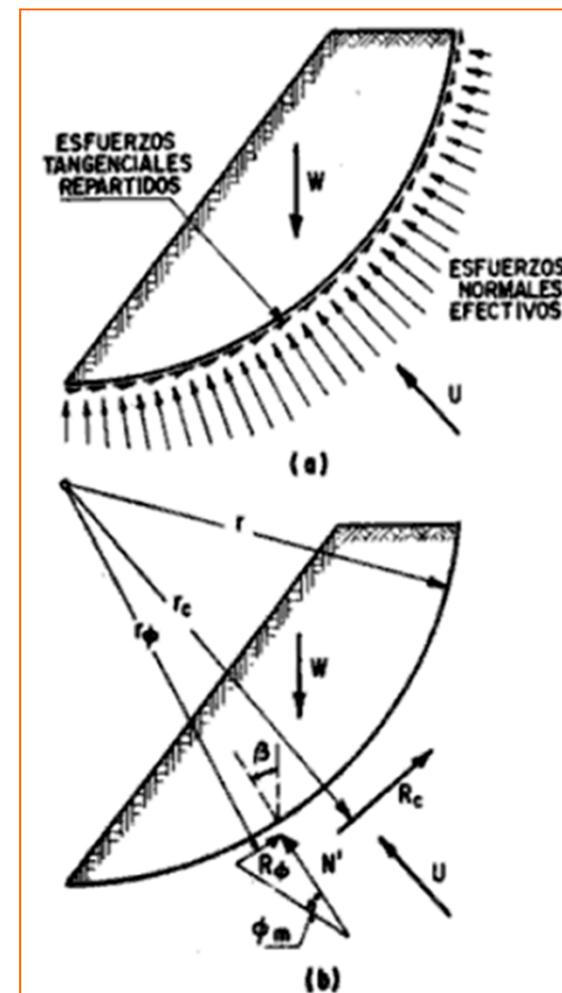
- Existen 4 incógnitas;

- N (magnitud y posición)
- R_ϕ (magnitud)
- FS

- La estática únicamente tres ecuaciones, por lo que será preciso hacer simplificaciones (definen el método de resolución del autor)

- Los más destacados;

- **MÉTODO SUECO, ORDINARIO O DE FELLENIUS** (no tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas)
- **BISHOP** (asume fuerzas entre dovelas aunque con simplificaciones, fuerzas de cortante entre ellas = 0)
- **CÍRCULO DE FRICCIÓN**
- **ABACO DE TAYLOR**



Fuerzas que actúan sobre una masa deslizante de límite circular

a) Esfuerzos normales y tangenciales distribuidos sobre el contacto

b) Fuerzas resultantes

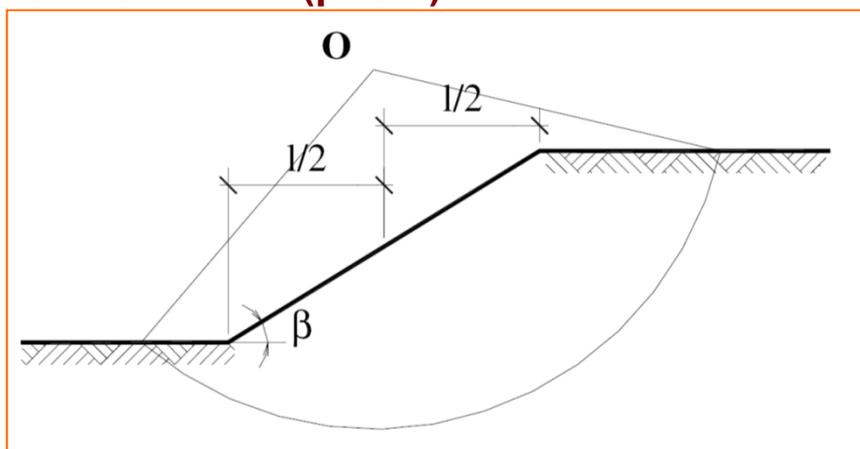
4.5.3.1) Tipos de círculos de rotura críticos

- La forma del deslizamiento circular parece que viene controlada principalmente por la relación de los parámetros resistentes de suelo y de la geometría del talud (Spencer, 1967; Bromhead, 1992)
- En materiales **más cohesivos; CÍRCULOS MÁS PROFUNDOS** *(ver apartado 4.5.4.2, círculos crítico según el número de Janbú)*
- En **materiales friccionales; CIRCULOS MENOS PROFUNDOS**
- Este hecho es debido a que la componente de la fricción aumenta con las tensiones normales, esto es, con la profundidad, mientras que la cohesión no depende del nivel de tensiones
- Cuanto mayor es la diferencia entre el ángulo del talud y el ángulo de rozamiento del material del talud, la superficie de deslizamiento resulta más profunda

4.5.3.1) Tipos de círculos de rotura críticos

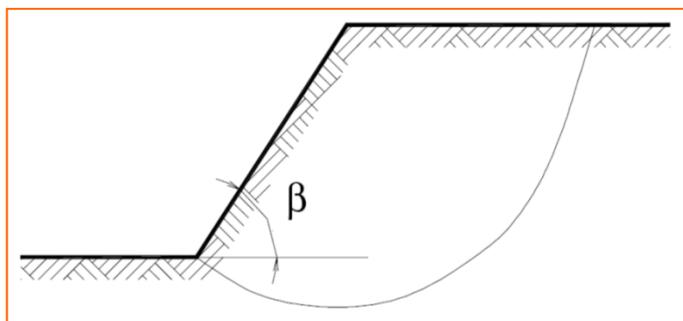
EN SUELOS HOMOGÉNEOS

•FALLA PROFUNDA, DE BASE O DE PUNTO MEDIO ($\beta < 53^\circ$)



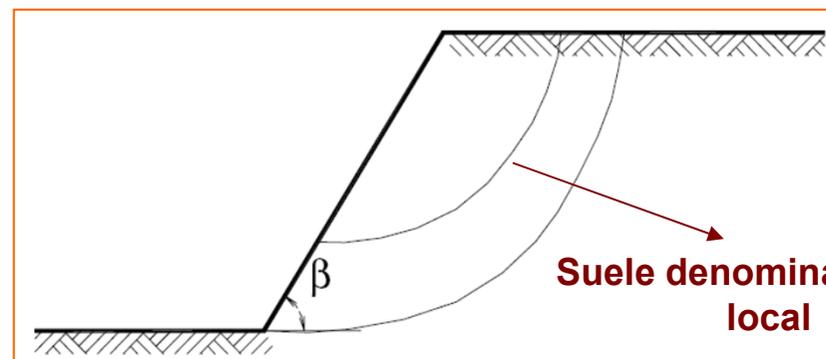
•Se da en;
–Arcillas con Φ muy bajo y β bajo

•FALLA PROFUNDA DE PIE



•Se da en;
–Suelos intermedios entre los dos casos anteriores

•FALLA DE PIE (CÍRCULO DE PIE) ($\beta > 53^\circ$)



•Se da en;
–Gravas con Φ medio-alto y β alto
–En arenas con Φ bajo y β muy alto

4.5.3.2) Método Sueco

• Suele utilizarse el apelativo de método sueco al procedimiento de cálculo que haga uso de la **hipótesis de falla circular** (aunque esta hipótesis se maneja en distintos métodos)

• **PRINCIPALES HIPÓTESIS DEL MÉTODO;**

1. Superficie de falla circular
2. Estado de deformación plana (Análisis bidimensional)
3. Ley de resistencia de Mohr-Coulomb
4. La resistencia al esfuerzo cortante se moviliza por completo y al mismo tiempo en todos los puntos de la superficie de deslizamiento
5. En análisis con flujo de agua, se acepta que el suelo se encuentra consolidado bajo la condición de régimen establecido, siendo la presión de poro de la red de flujo la única actuante

• Se estudia el método para los siguientes supuestos;

– **SUELOS PURAMENTE COHESIVOS ($\Phi = 0$; $c \neq 0$) (*Estudio Global*)**

• **CONDICIÓN NO DRENADA ($c = c_u$)**

• **CONDICIÓN DRENADA (c')**

– **SUELOS CON COHESIÓN Y ROZAMIENTO ($\Phi' \neq 0$; $c' \neq 0$) *Fellenius (Estudio Parcial, en dovelas)***

4.5.3.2.1.) Suelos puramente cohesivos

- Método desarrollado por Casagrande
- Procedimiento de cálculo mediante tanteos
- Hipótesis; La resistencia máxima al esfuerzo cortante se está produciendo a la vez a lo largo de toda la superficie de deslizamiento
- Ley de resistencia del suelo; $\tau = c$
- Para el cálculo, se trabaja con una cohesión minorada; $c_d = c / F$, con $F = 1,5$ ó 2
- Condición de equilibrio; $\Sigma M_0 = 0$

$$-M_{\text{resistentes}} = cLR$$

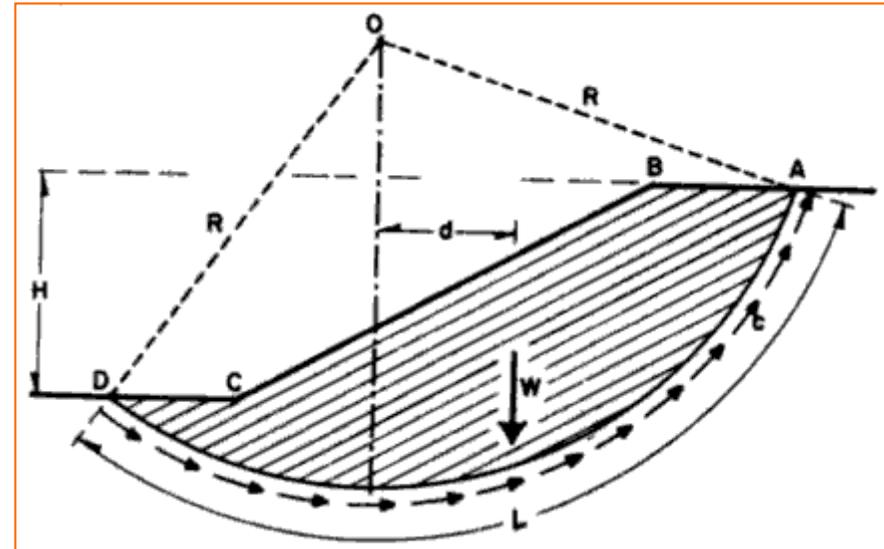
$$-M_{\text{volcadores}} = Wd$$

• $FS = cLR/Wd$, Si $FS > 1,5$ \Leftrightarrow estable

• Sistematización del cálculo;

- Establecer una retícula de centros posibles
- Determinar el mínimo FS para los posibles círculos de rotura de pie
- Determinar el mínimo FS para los posibles círculos de rotura de base
- Repetir el proceso para los demás centros de la retícula
- El círculo crítico será el de los dos casos y para todos los tanteos de centro, el de menor FS

CONDICIÓN NO DRENADA ($c = c_u$, donde $\tau = c_u \approx q_u/2$)



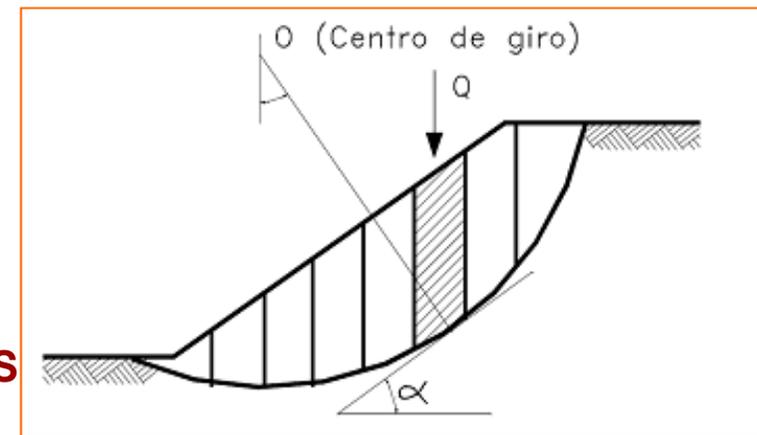
Esquema de rotura circular para talud en suelo con cohesión únicamente

4.5.3.2.2.) Suelos con cohesión y rozamiento / Método de Fellenius

- Método desarrollado por Fellenius (1927)
- Divide el área de falla en **tajadas verticales**, obteniéndose las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada

$$FS = \frac{\sum M_{resistentes}}{\sum M_{motores}}$$

- Ley de resistencia; $\tau = c + \sigma \tan(\Phi)$
- La resistencia máxima se desarrolla al unísono
- **En condiciones drenadas; $u = 0$, TENSIONES TOTALES**
- **En el caso de $u \neq 0$, TENSIONES EFECTIVAS**



División del deslizamiento en dovelas

• Método por tanteos;

- Se propone un círculo de falla a elección, dividiéndose éste en dovelas. A mayor número de divisiones, más precisión en la obtención del FS
- Ha de aplicarse en general a círculos de falla de base y por el pie
- El círculo crítico será aquel cuyo FS sea el mínimo de todos los casos

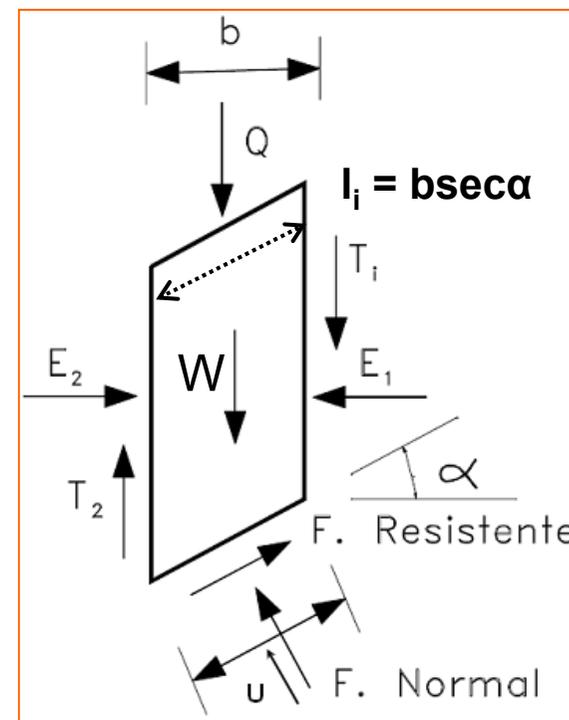
4.5.3.2.2.) Suelos con cohesión y rozamiento / Método de Fellenius

- Las fuerzas actuantes sobre una dovela;
 - W , el peso
 - **Fuerzas resistentes de cohesión y rozamiento** (tangentes a la superficie de falla)
 - U ; **resultantes sobrepresiones de poro** (normales en su base)
 - N ; **fuerzas normales en su base**
 - **Fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas** (Fellenius no las considera; las de presión se contrarrestan y el momento producido por las de cortante despreciable. Bishop si considera las de presión de tierras pero no las de cortante)

$$\Sigma F_{\text{dirección normal } i} = 0; \implies N = W \cos \alpha - u(b \sec \alpha)$$

$$M_{\text{resistente } i} = \tau * r = (c l_i + N * \tan \phi) * r$$

$$M_{\text{motores } i} = r * w \sin \alpha$$



Fuerzas que actúan sobre una dovela

$$F.S. = \frac{\sum [C' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - u b \sec \alpha) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha}$$

α = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.
 W = Peso total de cada tajada.
 u = Presión de poros = $\gamma_w h_w$
 b = Ancho de la tajada
 C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

4.5.3.3.) Método de Bishop / versión simplificada

- Superficie de falla circular
- Método de dovelas

$$F.S. = \frac{\sum [C' b + (W - ub) \tan \phi' / ma]}{\sum W \sin \alpha}$$

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right)$$

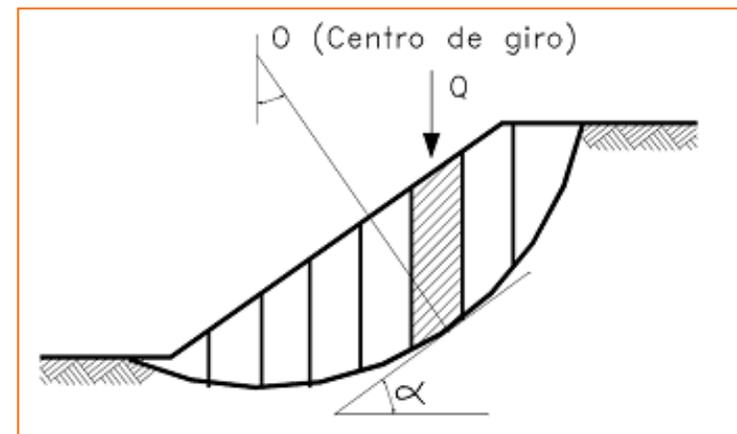
b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.



División del deslizamiento en dovelas

- Los factores de seguridad determinados por el método de Bishop difieren aproximadamente un 5% respecto a soluciones más precisas

4.5.3.4.) Círculo de fricción

74

• **Aplicable a suelos homogéneos**, pudiéndose representar éste con precisión suficiente mediante unos valores medios de Φ

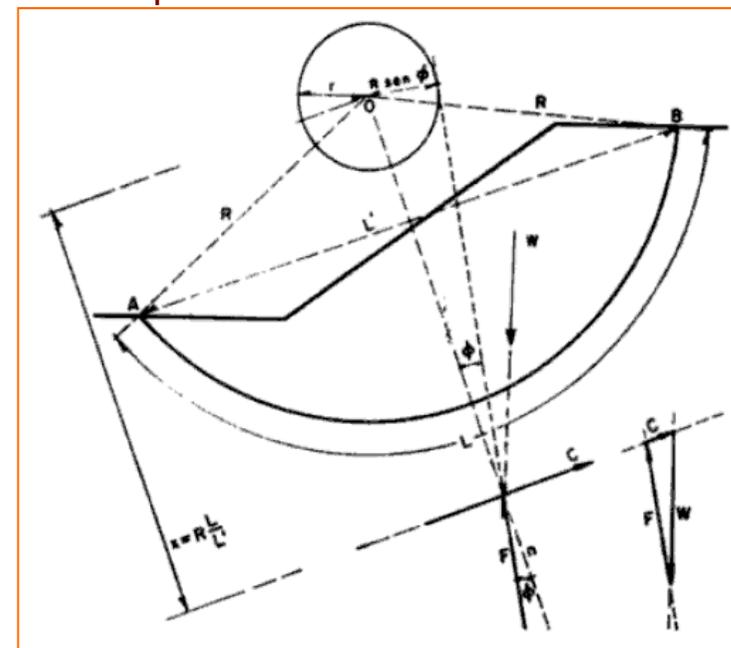
• **Para la figura**; con un círculo de falla escogido con centro del círculo en O , puede trazarse desde O el círculo de fricción de radio $r = R \text{sen} \Phi$, con Φ el ángulo de rozamiento del material constituyente del talud

• Si f es la resultante de la reacción normal y de rozamiento en un elemento de arco de la superficie de falla supuesta, formará con la normal a esta superficie un ángulo Φ , siendo por tanto **tangente al círculo de fricción**

• El equilibrio de la masa de suelo deslizante depende de la acción de las siguientes fuerzas;

• W , peso de la masa de suelo, pasa por el centro de gravedad de dicha masa

• C , fuerza total de cohesión desarrollada a lo largo de toda la superficie de deslizamiento



Aplicación del círculo de fricción a taludes

$$C = c_e * L'$$

c_e :cohesión del suelo requerida para el equilibrio

L' : longitud de la cuerda del arco de deslizamiento propuesto

La línea de acción de C debe ser paralela a la cuerda AB , pues esta cuerda es la línea que cierra el dinámico de las fuerzas de cohesión que se desarrollan a lo largo de la superficie de falla propuesta

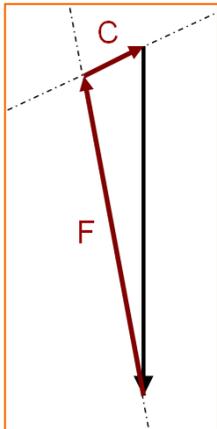
–Tomando momento en el punto O ; $c_e LR = c_e L'x$, resultando $x = RL/L'$

4.5.3.4.) Círculo de fricción

• F , resultante total de las reacciones normales y de rozamiento (f)

– Las fuerzas f (tangentes al círculo de fricción) no constituyen un sistema concurrente y por ello la fuerza F no será tangente al círculo de fricción

– La posición de F respecto de O puede definirse; $d = KR \text{sen} \Phi$, donde K es un factor de proporcionalidad mayor de 1. (ver gráfico de Taylor)



• Conocido el W en magnitud y posición, y las direcciones de F y C , se construye el triángulo de fuerzas → determinar C (necesaria para el equilibrio)

• La cohesión necesaria en el talud para que sea estable será;

$$c_e = C/L' \quad \text{con } c, \text{ la cohesión del suelo determinada según laboratorio}$$

$$F_c = c/c_e, \text{ factor de seguridad en términos de cohesión}$$

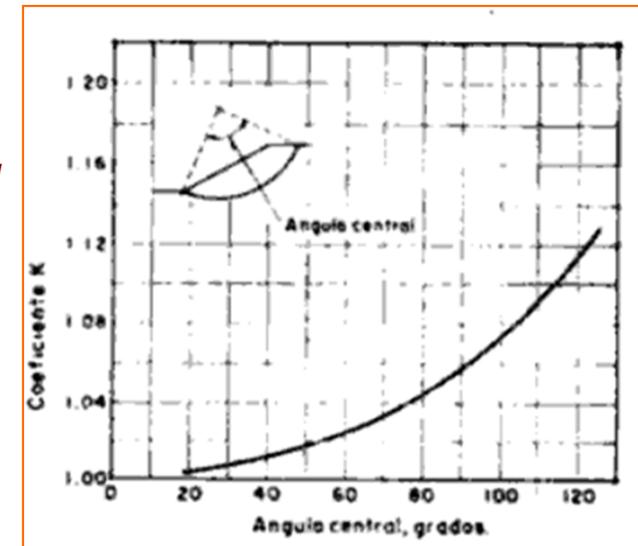


Gráfico de Taylor para obtener K

• Si el valor Φ con el que se ha construido el círculo de fricción es el real del suelo → F_ϕ sería el factor de seguridad del talud, el que estaría trabajando en condición límite respecto a la fricción

• Para que el talud trabaje con seguridad a cohesión y rozamiento, el círculo de fricción se realizará escogiendo un $\Phi_e < \Phi$, definiéndose $F_\phi = \text{tg} \Phi / \text{tg} \Phi_e$, factor de seguridad en términos de fricción

4.5.3.4.) Círculo de fricción

76

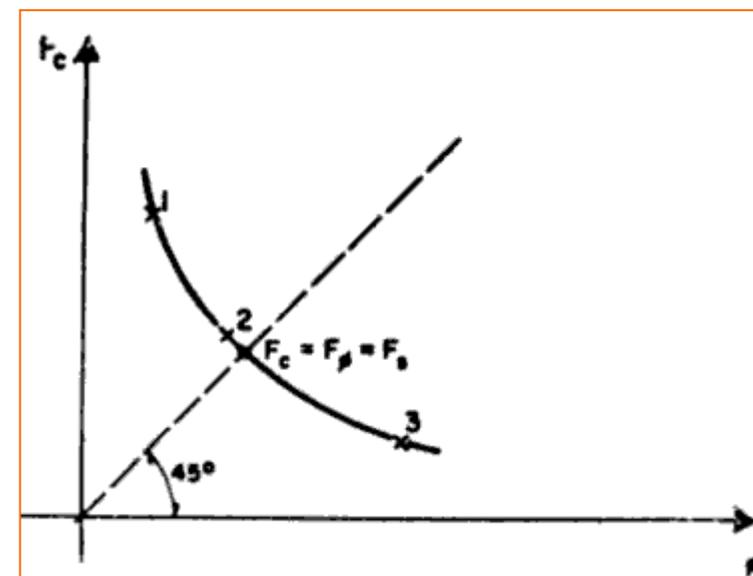
•Existen pues infinitas combinaciones de F_c y F_ϕ asociados a un talud determinado

•Taylor aporta un método para manejar un único FS ligado a un talud, $F_c = F_\phi = FS$, factor de seguridad respecto a la resistencia al esfuerzo cortante del suelo;

–Para distintos valores de Φ_e , obtenemos los distintos F_c

–Grafica la curva $\Phi_e - F_c$

–El punto de corte de esa curva y la recta que forma 45° con los ejes será el valor de Φ_e cuyo $F_\phi = F_c = FS$



Método gráfico de Taylor para obtener $F_\phi = F_c = FS$

•En un suelo homogéneo sin fuerzas de filtración y con círculo crítico de falla de base, una vertical tangente al círculo de fricción pasa por el punto medio del talud

•Solución particular son los **ÁBACOS DE TAYLOR**, para arcillas homogéneos con rozamiento interno (apartado 5.4.1.)

4.5.3.4.) Círculo de fricción

El proceso de cálculo del FS según el círculo de fricción debería seguir los siguientes pasos:

- Se obtiene el vector resultante del peso (W), la fuerza del agua (U) y de las acciones externas (A)**
- Se determina el punto “D”, intersección del vector resultante anterior y de la línea de acción de la resistencia cohesiva R_c . Esta es paralela a la cuerda AB y situada a una distancia de “O” igual a $x = L \cdot R/L'$**
- Se supone un valor de Φ_e , suponiendo un $F_\phi = \text{tg}\Phi/\text{tg}\Phi_e$**
- Se traza desde “D” una línea de acción tangente al círculo (pues así habrá equilibrio de acciones) que denominaremos “P”**
- Desde el extremo de la resultante del inicio se traza una paralela a la cuerda cerrando el paralelogramo de fuerzas y obteniendo la magnitud de R_c y P .**
- Como $R_c = c_e \cdot L'$, y $c_e = c/F_c$, el factor será $F_c = c \cdot L'/R_c$**
- F_c y F_ϕ no coincidirán, pero proporcionan un punto en un gráfico en el que podemos obtener más puntos y en la intersección de la curva formada con una recta $F_c = F_\phi$ nos dará el factor de seguridad buscado**

4.5.4.) Método de tablas o número de estabilidad

• Para taludes simples homogéneos se han desarrollado tablas que permiten un cálculo rápido del FS

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	c_u c, ϕ	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Círculo de fricción	Análisis no drenado. Taludes secos solamente.
Bishop y Morgenstern (1960)	c, ϕ, r_u	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern (1960)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	c, ϕ, r_u	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	c_u c, ϕ, r_u	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	c, ϕ	20-90°	Análisis límite	
O'Connor y Mitchell (1977)	c, ϕ, r_u	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	c, ϕ c, ϕ	0-90° 0-90°	Círculo de fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	c, ϕ	0-45°	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
Charles y Soares (1984)	ϕ	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	c, ϕ, r_u	11-63°	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Listado de tablas para cálculo de estabilidad

4.5.4.1.) Ábaco de Taylor

•Basados en el círculo de fricción, para suelos homogéneos arcillosos con rozamiento y a corto plazo (condiciones no drenadas)

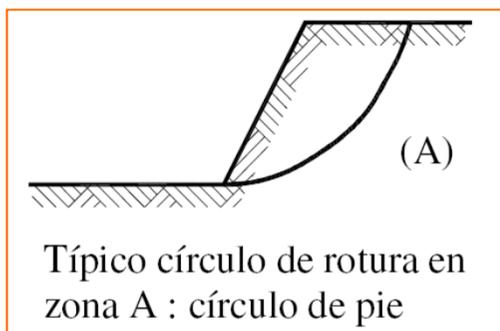
Número de estabilidad (adimensional); $N_s = c_d / \gamma H$

Con $c_d = c_u / F$, la cohesión es afectada por un coeficiente de seguridad $\rightarrow FS = c_u / N_s \cdot \gamma H$

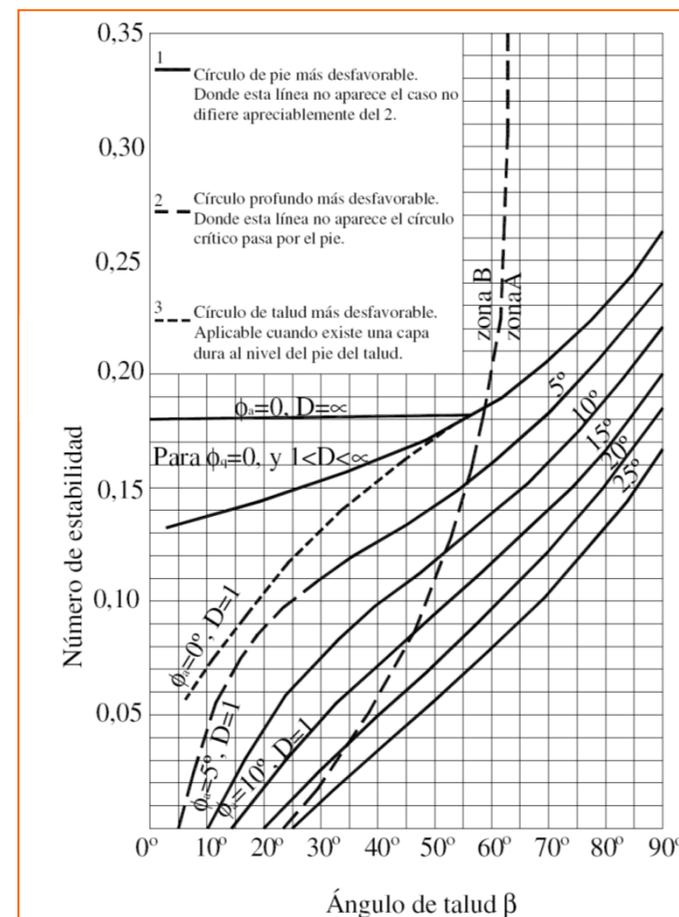
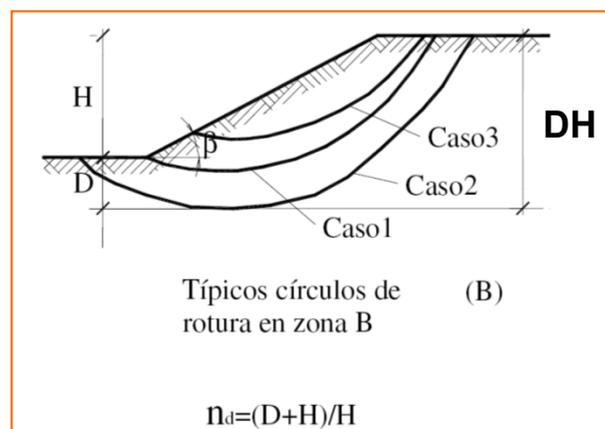
También tendremos un FS para el ángulo: $F_\phi = tg\phi / tg\phi_e$

•En el ábaco se distinguen dos zonas (A y B) para los siguientes clases de círculos de falla

Zona A; Círculo de pie que queda totalmente por encima del pie del talud



Zona B; Círculo de base o profundo



Ábaco de Taylor; abscisas β (en grados), ordenadas el número de estabilidad

4.5.4.1.) Ábaco de Taylor

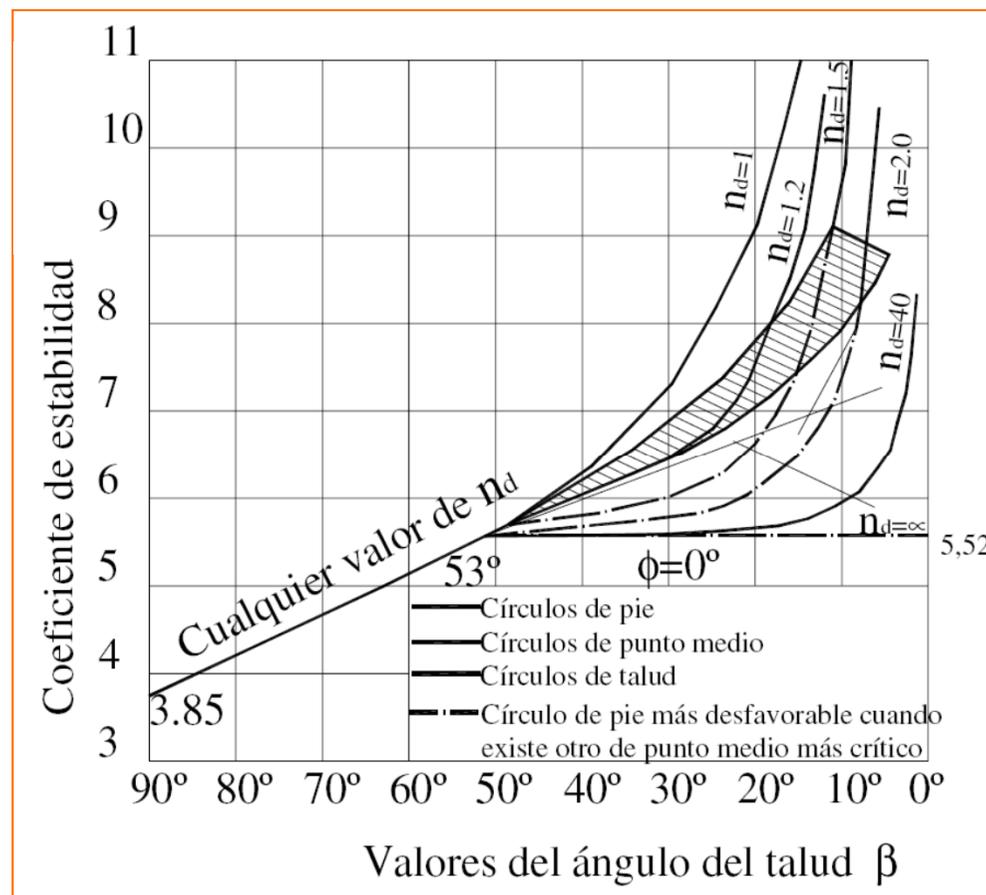
79

•El inverso del número de estabilidad, el coeficiente de estabilidad

•En la zona rayada y en su prolongación recta (recta correspondiente a ángulos de talud entre 53° y 90°), la rotura se produce según círculos de pie

•Así se puede obtener;

- La altura crítica; $H_c = c_d / \gamma N_s$
- El ángulo del talud; β



Ábaco de Taylor para suelos puramente cohesivos; abscisas β (en grados), ordenadas el coeficiente de seguridad

4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968)

Permiten el análisis de diferentes condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud, incluyendo niveles freáticos y grietas de tensión.

Presenta dos procedimientos:

- Para suelos cohesivos ($\Phi=0$)
- Para suelos friccionales ($\Phi \neq 0$)

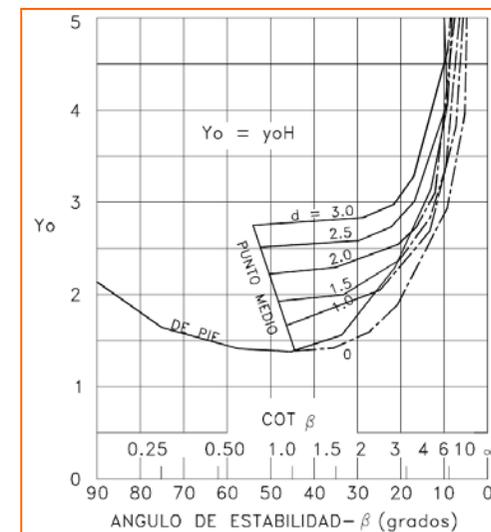
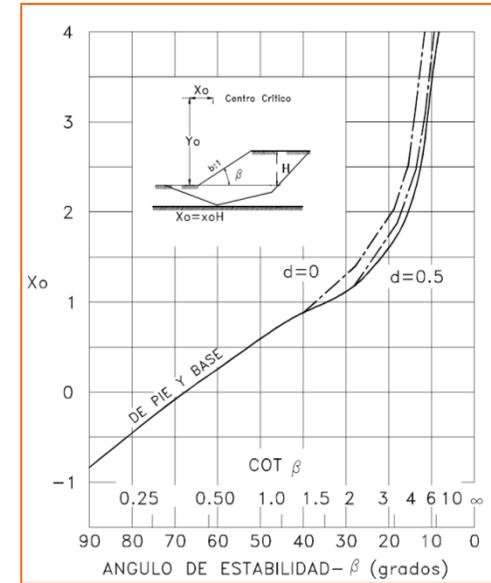
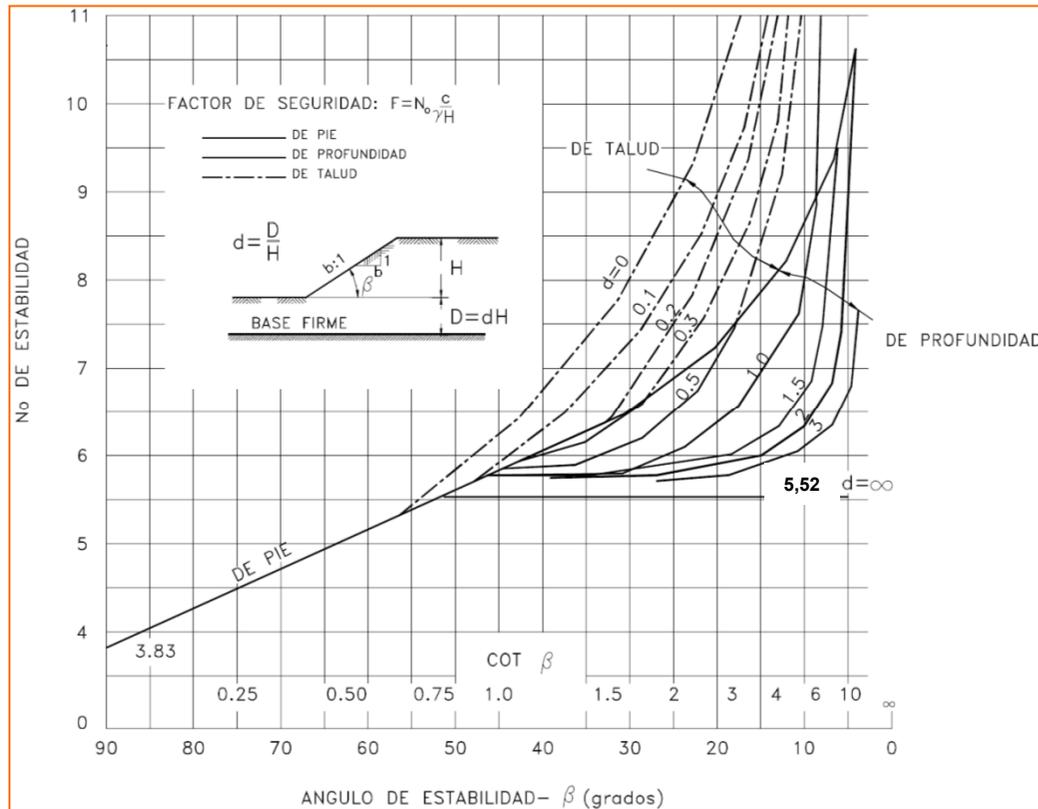
El procedimiento general:

- Se calcula el factor de profundidad “d”
- Se determina la posición del centro del círculo
- Se determinan los factores de corrección μ .
 - Si no hay sobrecarga $\mu_q=1$
 - Si no hay sumergencia $\mu_w=1$
 - Si no hay grieta de tensión $\mu_t=1$
- Se determina P_d
- Se determina P_e (si $\Phi=0$, entonces $P_e=P_d$)
- Se determina el parámetro adimensional $\lambda_{c\Phi}$ con los valores promedio de c y de $\tan \Phi$
- Se determina el número de estabilidad “ N_{cf} ”
- Se determina el FS

4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968) / $\Phi=0$

$$FS = N_0 c / (\gamma H)$$

Donde; N_0 valor que se obtiene de la tabla
 c ; cohesión
 γ ; peso específico
 H ; altura

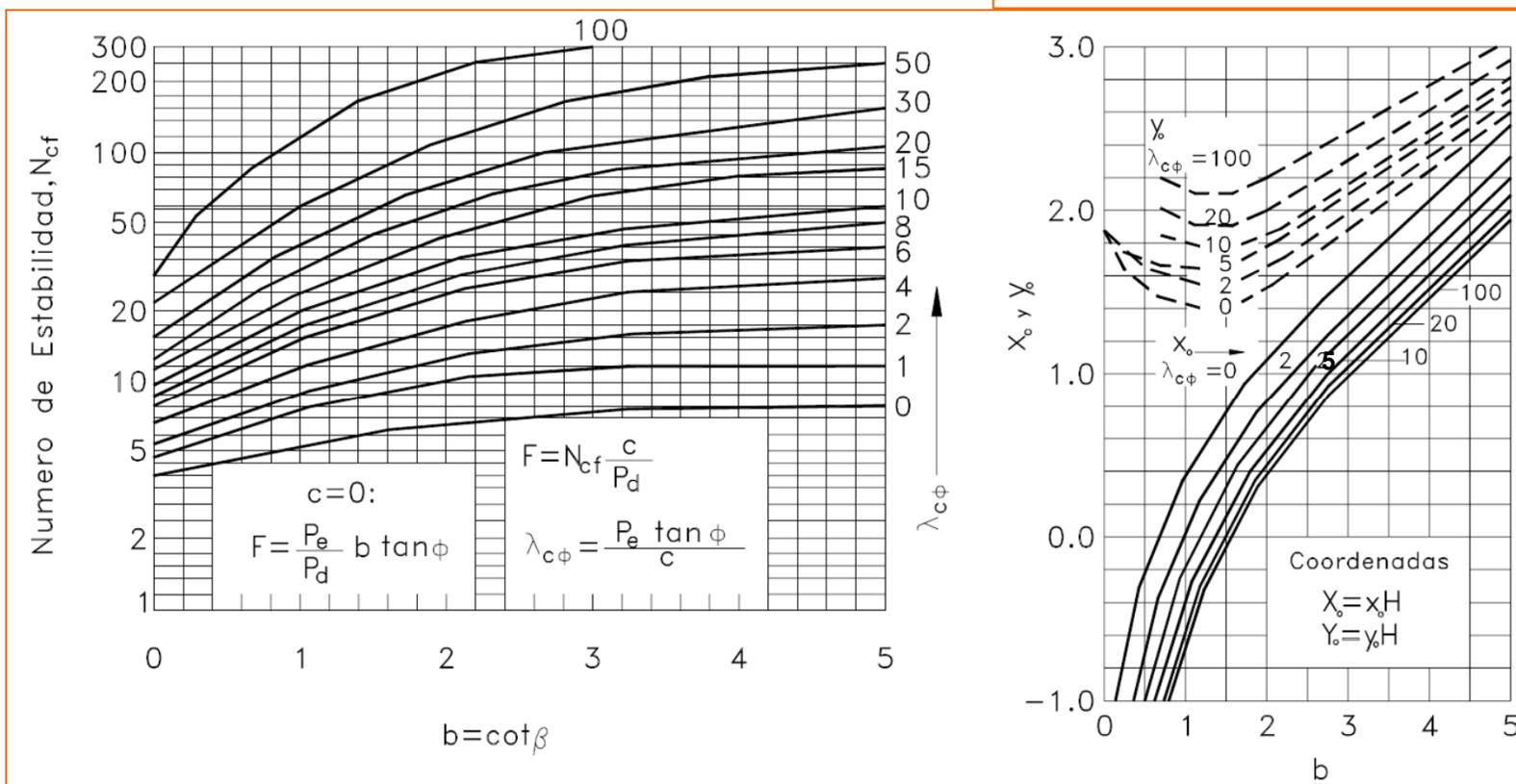
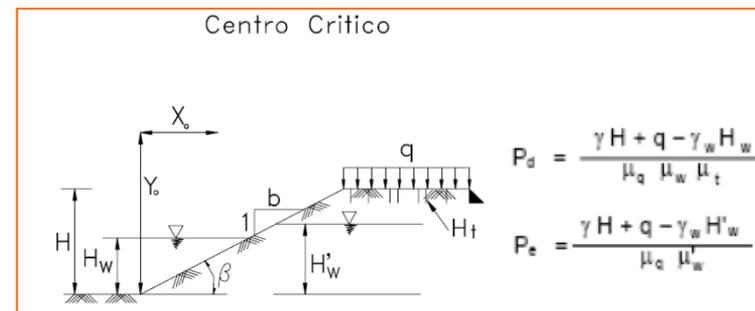


4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968) / $\Phi > 0$

• El círculo crítico pasa por el pie del talud, y la tabla de estabilidad se basa en esta suposición.

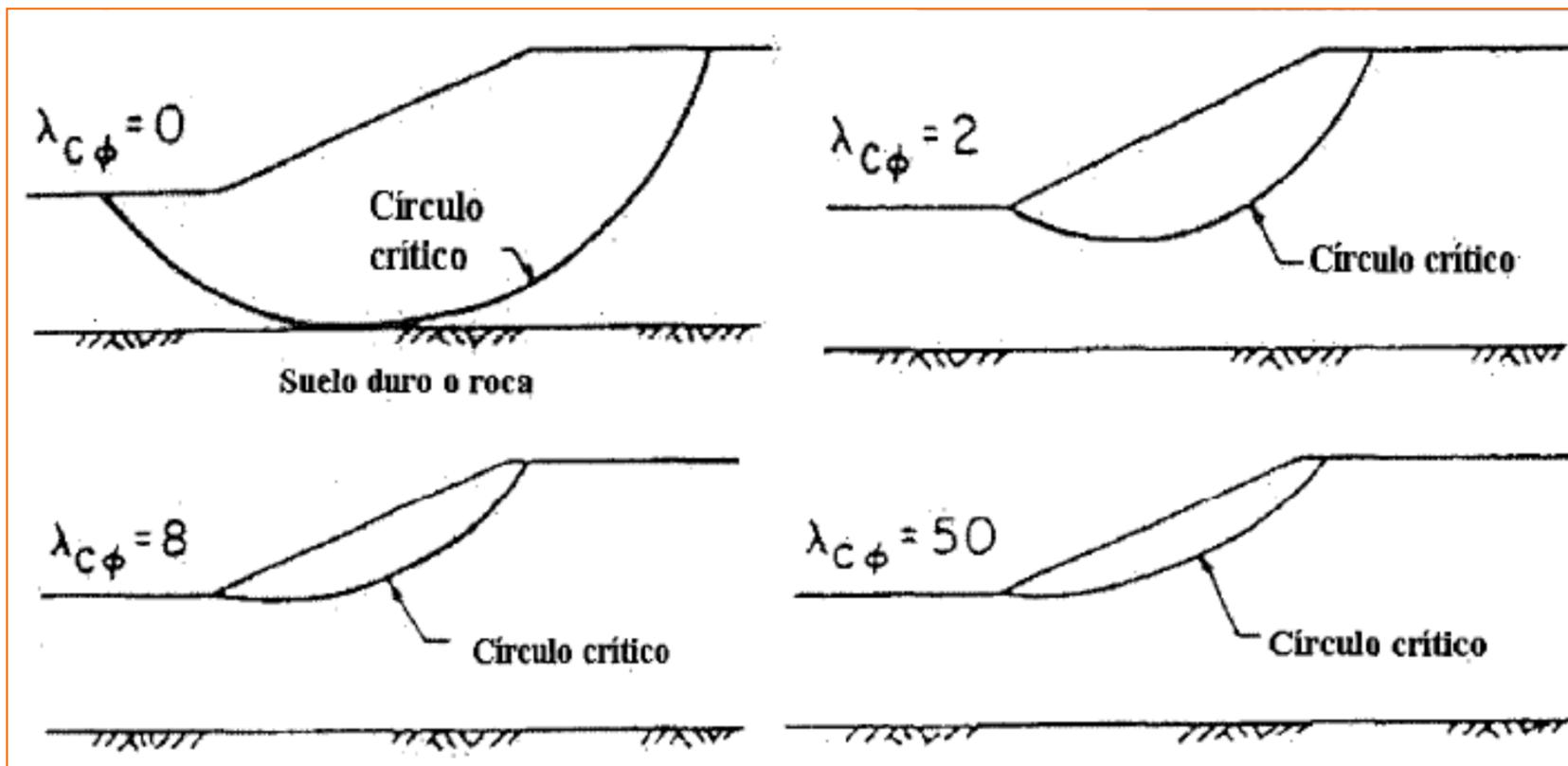
$$FS = N_{cf} c/P_d$$

Donde; N_{cf} y P_d son los obtenidos de la gráfica c ; cohesión promedio

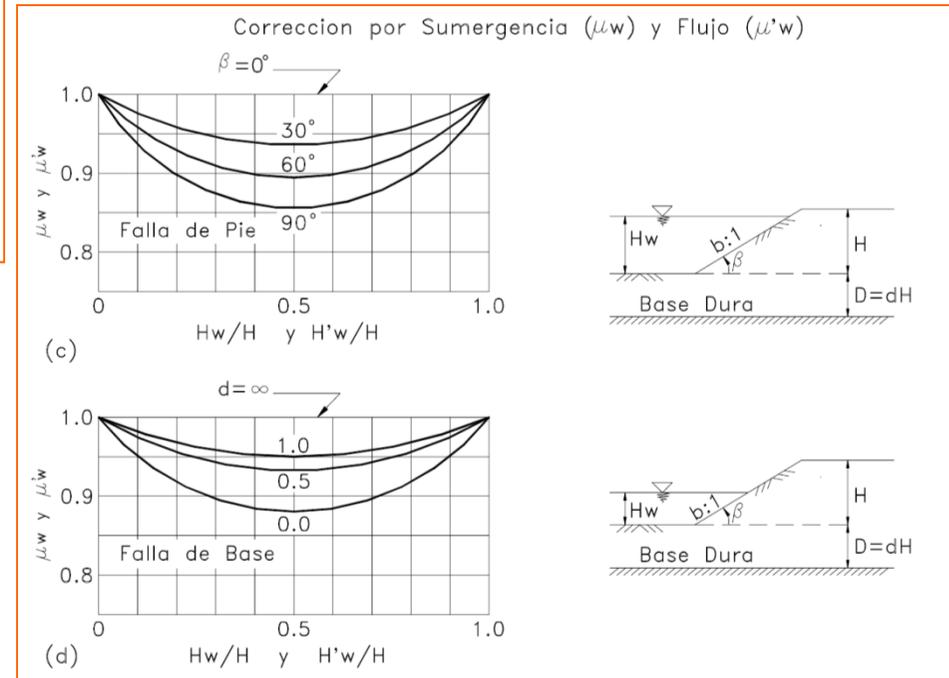
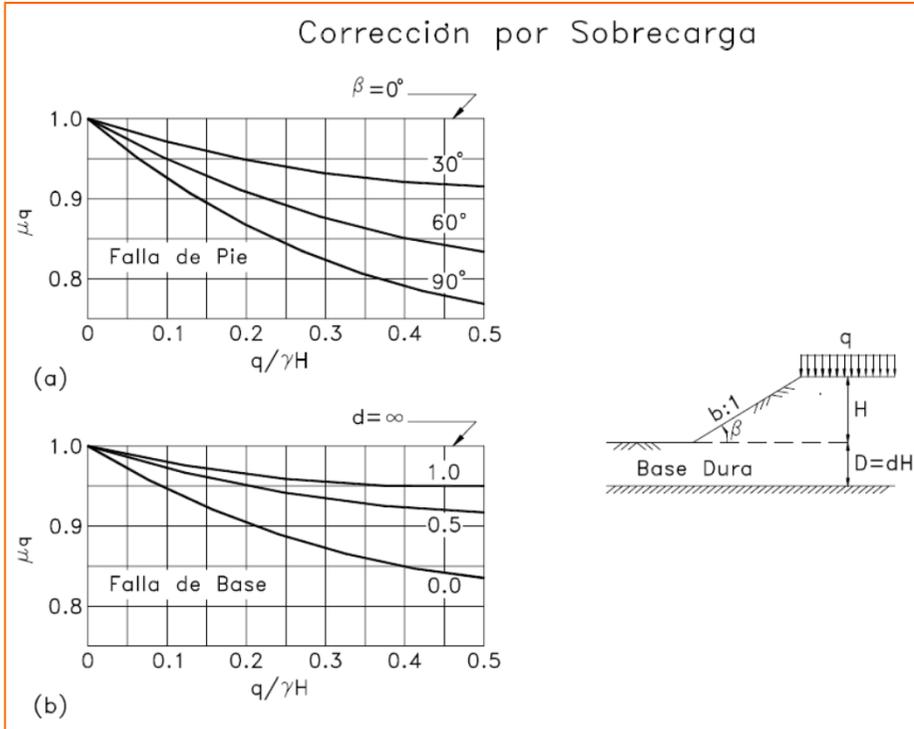


4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968) / $\Phi > 0$

- Forma y posición de la superficie de deslizamiento en función del número de Janbú ($\lambda_{c\phi}$)



4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968) / $\Phi > 0$



4.5.4.2.) Tablas de Janbú (1968) / $\Phi > 0$

• La profundidad de grietas de tracción (fenómeno que se da en suelos cohesivos únicamente) pueden determinarse;

$$z_c = 2c/\gamma\sqrt{K_a}$$

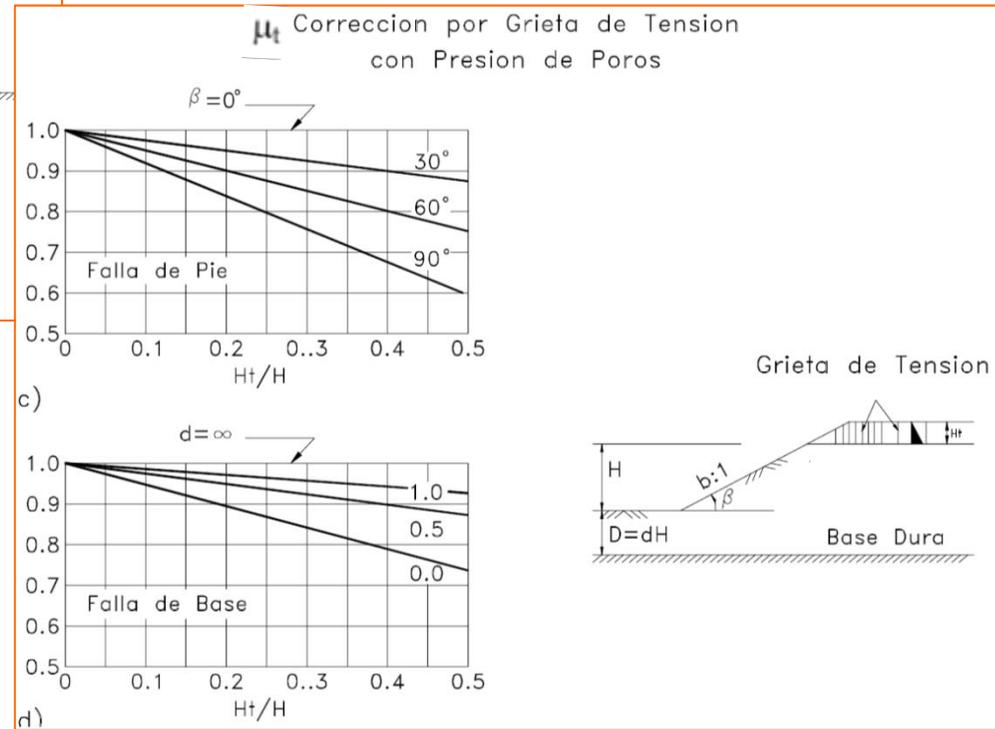
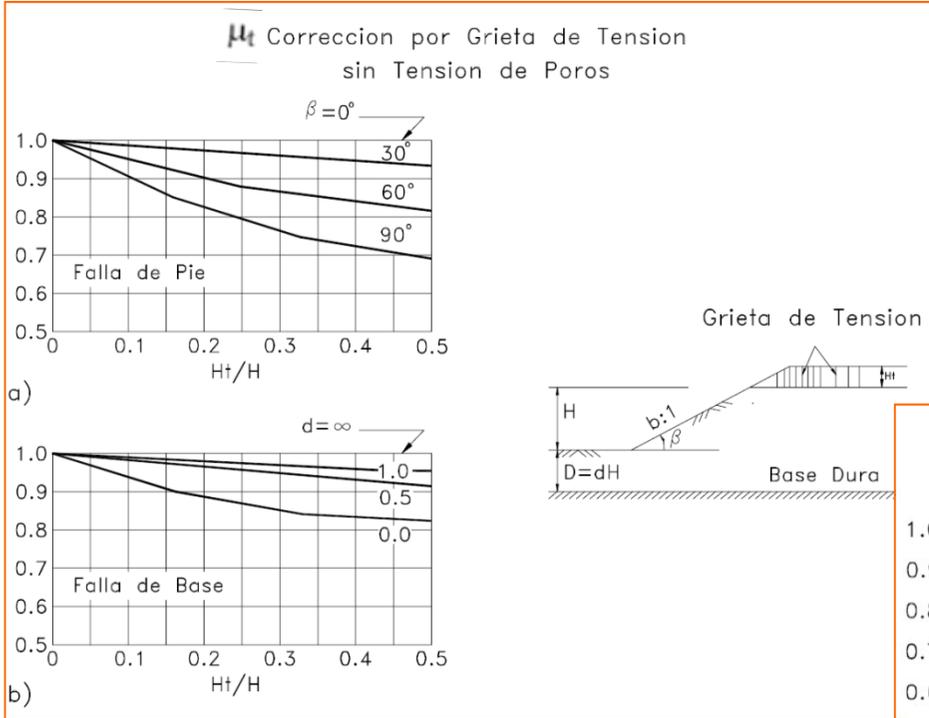
Donde:

z_c = Profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

γ = Peso unitario del suelo

ϕ = Angulo de fricción



4.5.5.) Rotura curva no circular / Método de Janbú

- Superficie de rotura curva, no circular
- Método de dovelas

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha ma} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)}$$

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right)$$

b = Ancho de la Dovela

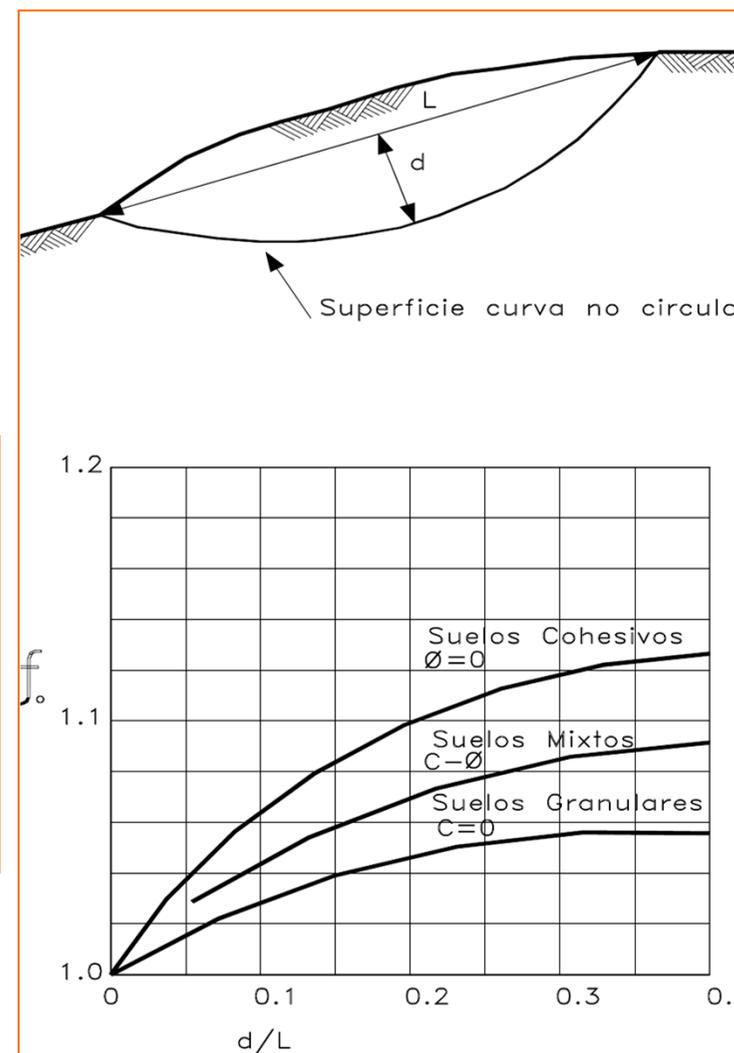
W = Peso de cada dovela

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

- El método de Janbú generalmente, subestima hasta un 30% el factor de seguridad



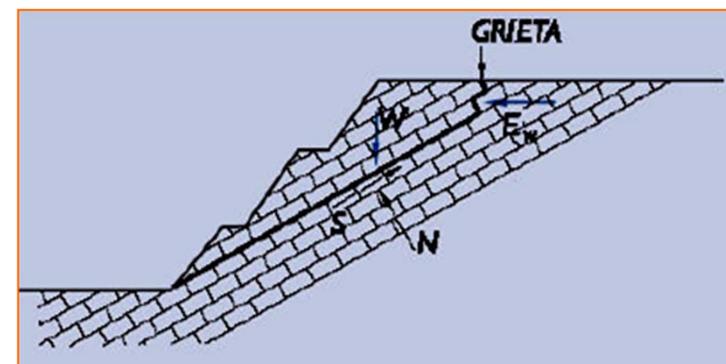
4.6.) Análisis de la estabilidad en taludes en roca

- Generalmente se realiza el **análisis bidimensional**, habiéndose comprobado que **el mínimo factor de seguridad del estudio tridimensional es mayor** que el mínimo en el bidimensional
- **Si la roca está muy fracturada**, o si no lo está pero es muy blanda, es decir que las discontinuidades no controlan la estabilidad, puede suponerse un comportamiento isótropo, aplicándose los **métodos convencionales de suelos** para el cálculo de estabilidad de taludes

• Los tipos de falla son;

–FALLA PLANA; Controlada por una sola discontinuidad

- *Es el mecanismo de rotura (por tanto el más crítico) cuando la dirección del plano del talud es sensiblemente paralela a la estratificación (o discontinuidad principal) y además el buzamiento de ésta resulta inferior al del plano del talud y del mismo signo, de manera que la estratificación buza hacia afuera*



Falla plana

–FALLA EN CUÑA; Controlada por dos discontinuidades

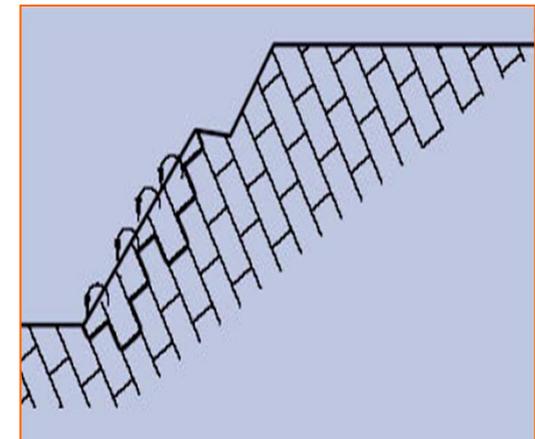
- Las direcciones de los planos de las discontinuidades principales y la dirección del plano del talud distan de ser paralelas

4.6.) Análisis de la estabilidad en taludes en roca

–**FALLA EN ESCALERA;** Controlada por varias discontinuidades a varios niveles

–**FALLA POR VOLTEO;** Involucra columnas de roca definidas por discontinuidades de buzamiento de gran magnitud

- Es el mecanismo de rotura más crítico cuando la dirección de la estratificación (o discontinuidad principal) resulte aproximadamente paralela al talud pero buzando hacia adentro



Falla por volteo

–**FALLAS CIRCULARES;** Ocurren en masas rocosas que están muy fracturadas o compuesta de material con muy baja resistencia al cortante

4.6.) Análisis de la estabilidad en taludes en roca

• **Se requiere conocer las siguientes propiedades** de la fábrica estructural del macizo rocoso para realizar un acertado análisis de su estabilidad;

– **Orientación**; representada por el rumbo (corte del plano horizontal con el geológico) y buzamiento (ángulo del plano geológico respecto al horizontal)

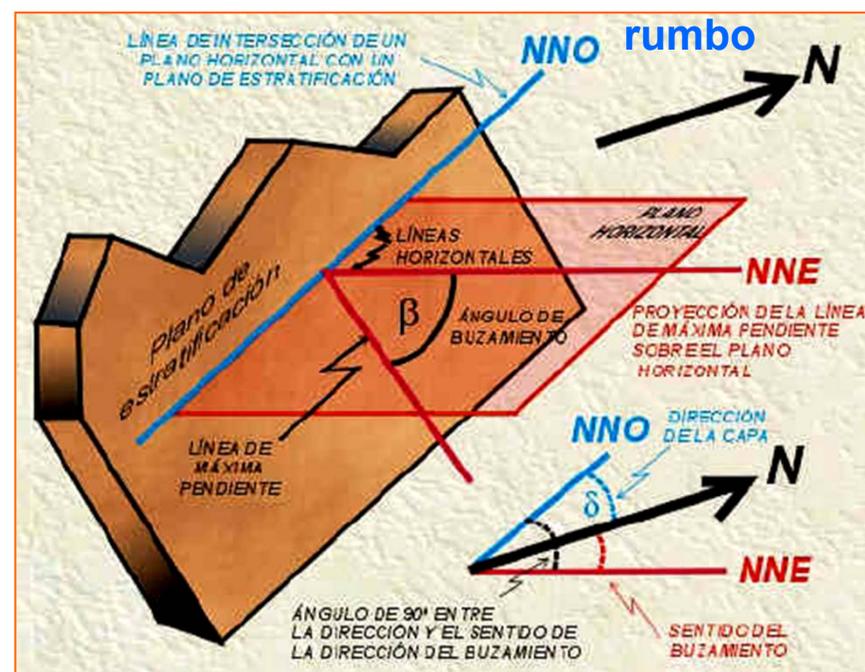
– **Persistencia o continuidad**; la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento.

– **Relleno**; La abertura y minerales de relleno, así como sus propiedades de resistencia, influyen en forma significativa en la estabilidad

– **Espaciamiento**; La distancia entre dos discontinuidades de la misma familia. Junto con la persistencia definen el tamaño de los bloques

– **Propiedades de la superficie de la discontinuidad**; La forma y rugosidad tienen un efecto importante en la resistencia a cortante, p.e la rugosidad, a mayor rugosidad más resistencia friccional

– **Relleno**; La abertura y minerales de relleno, así como sus propiedades de resistencia, influyen en forma significativa en la estabilidad



Caracterización de buzamiento



4.6.) Análisis de la estabilidad en taludes en roca

• Los métodos de cálculo aplicables al análisis de la estabilidad de taludes en macizos rocosos se pueden agrupar;

MÉTODOS DE CALCULO	
1 – Métodos completos	Método de elementos finitos
	Método de diferencias finitas
2 – Métodos incompletos	Métodos estáticos
	Métodos cinemáticos
3 – Métodos de equilibrio límite	
4 – Métodos empíricos	
5 – Métodos simplificados	Abacos

• **Los métodos de equilibrio límite:**

– Son de aplicación cuando se conoce el mecanismo de rotura o puede suponerse con facilidad previamente, y cuando el comportamiento de las superficies de rotura es dúctil.

– Son sencillos de uso y nos aportan el factor de seguridad.

– Existen dos procedimientos de aplicación dentro de ellos;

- Suponer una superficie de deslizamiento determinada y calcular su factor de seguridad
- Buscar la superficie de deslizamiento pésima y su factor de seguridad

– El principal problema radica en la **imposibilidad de conocer un conjunto de parámetros tensodeformacionales** relativos al comportamiento mecánico del macizo rocoso

– **no es adecuado para modelar efectos progresivos de rotura**

• **Para modelar efectos progresivos de rotura → Elementos finitos** (además son capaces de modelar situaciones complejas)

apéndice 1.) Análisis estereográfico de la estructura

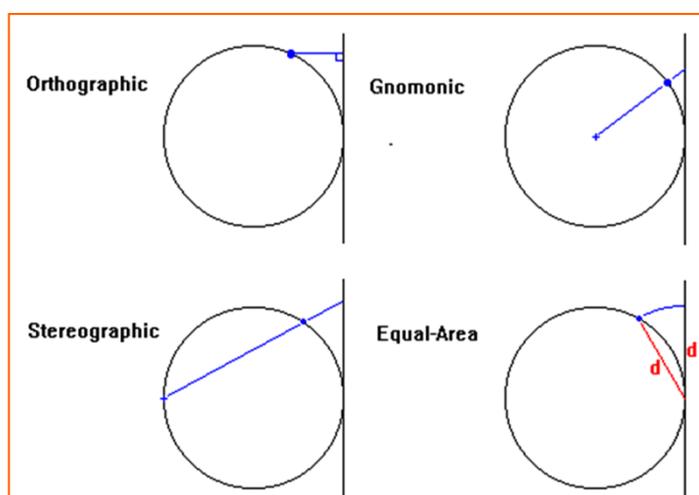
• La interpretación de los datos geológicos estructurales requieren el uso de **proyecciones estereográficas** que permiten la representación en dos dimensiones, de datos en tres dimensiones.

PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA

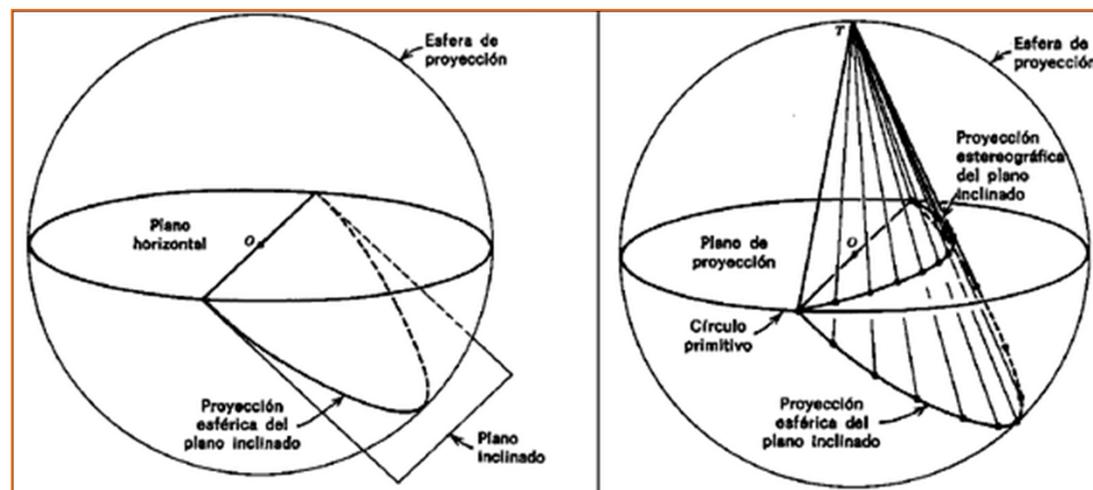
– Es un tipo de **proyección azimutal** (proyecta la esfera sobre un plano, que puede ser tangente a ella o que pase por el ecuador: proyección ecuatorial). Dependiendo de la posición del centro de proyección éstas serán; gnomónicas, estereográficas, equiareal y ortográficas

– La **proyección ecuatorial** es aquella en la que el azimut está en el punto opuesto al de tangencia y el plano de proyección es el ecuatorial. **Conserva ángulos, no las áreas.** Se utiliza la estereográfica ecuatorial para el **análisis cinemático**.

– La **equiareal (conserva áreas no ángulos)** se utiliza en geología estructural para el **análisis estadístico** de datos espaciales

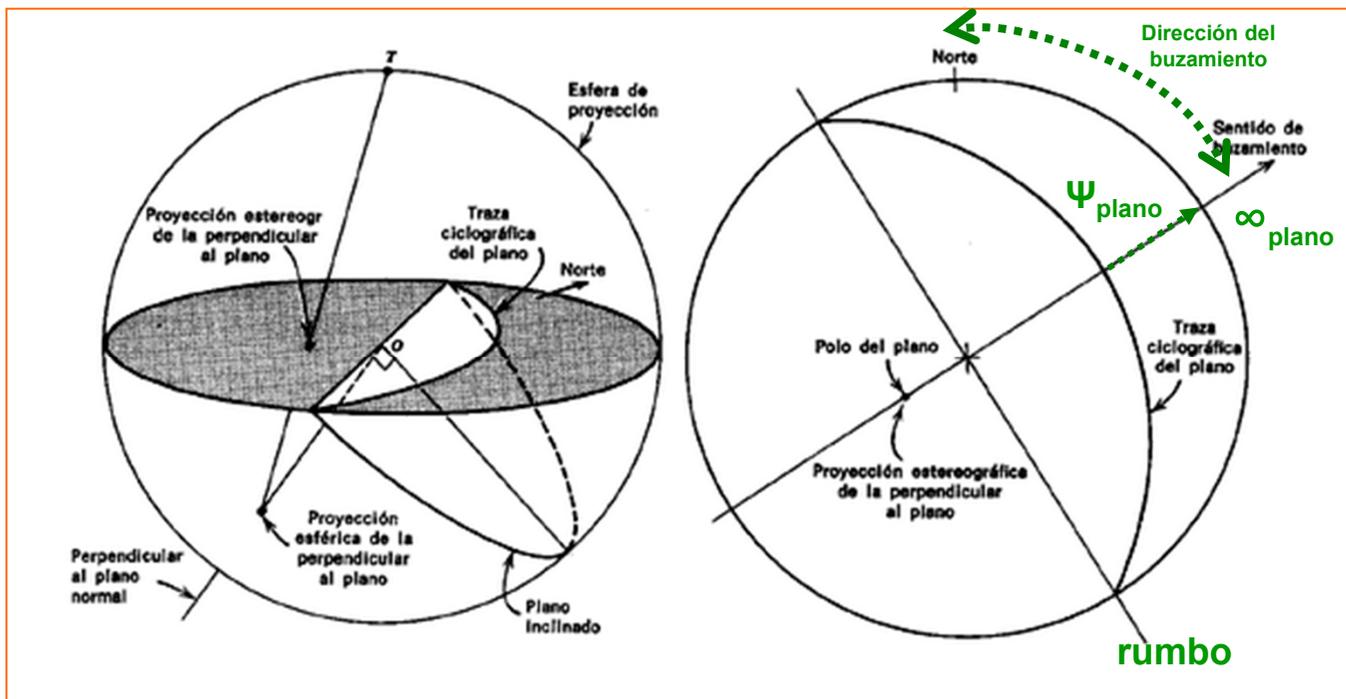
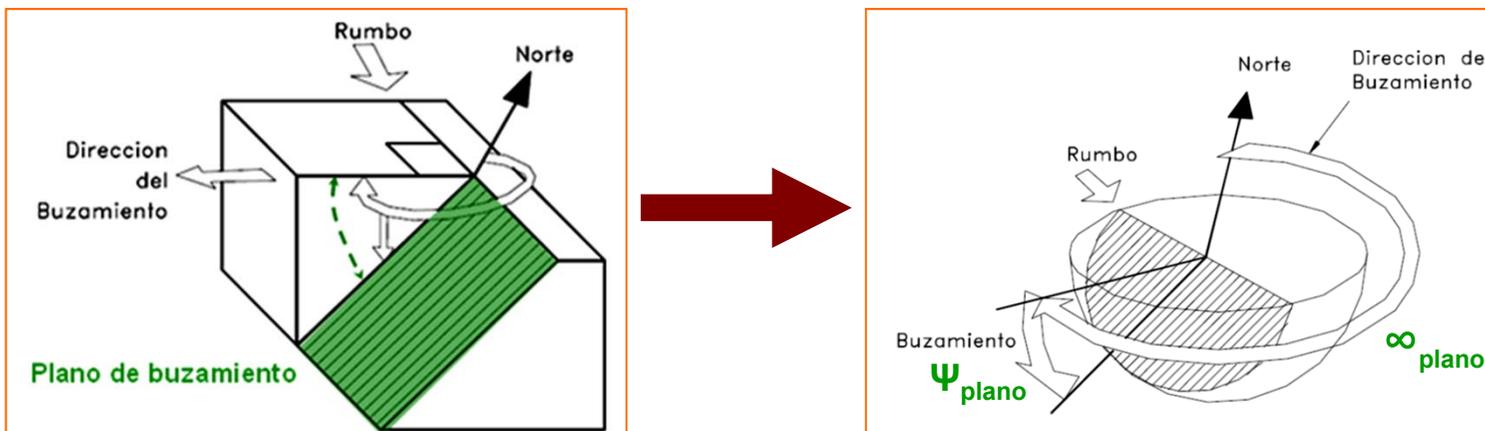


Proyecciones azimutales



Estereografía ecuatorial (Representación de un plano)

apéndice 1.) Análisis estereográfico de la estructura

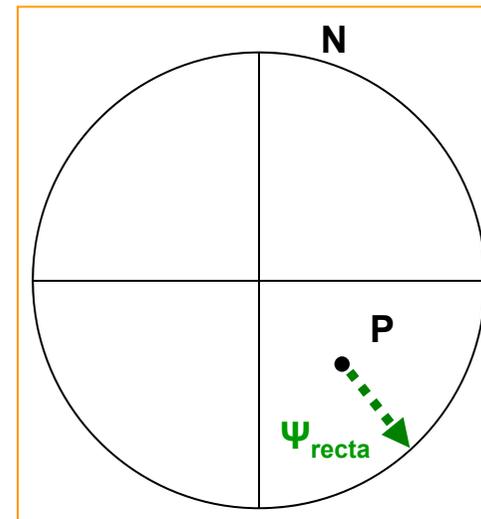
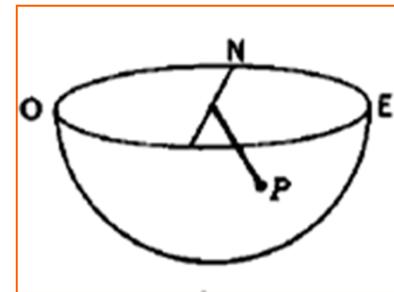
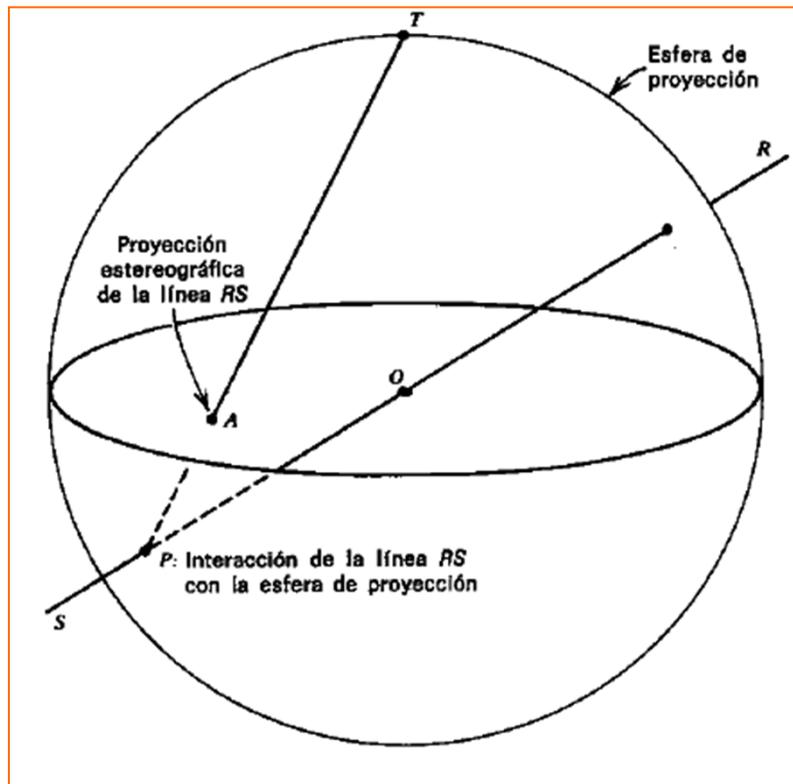


Representación estereográfica ecuatorial de un plano de buzamiento con su polo

Aplicación; Análisis cinemático de movimientos de masa en rocas

apéndice 1.) Análisis estereográfico de la estructura

Representación estereográfica ecuatorial de una recta



apéndice 1.) Análisis estereográfico de la estructura

•Las representaciones estereográficas más comúnmente utilizadas en geología estructural son la **DIAGRAMA DE POLOS Y LA CÍRCULOS MÁXIMOS**

DIAGRAMA DE POLOS

Se representan únicamente los polos de los planos o rectas, es decir la intersección de la recta con la esfera en el caso de elementos lineales o la intersección de la normal al plano con la esfera si se trata de elementos planos

De uso cuando las medidas a representar son **muy numerosas**, dificultando la lectura

DIAGRAMA DE CÍRCULOS MÁXIMOS (BETA)

Únicamente se utiliza para la **representación de elementos planos**. Se obtiene por proyección sobre el plano ecuatorial, del círculo máximo (la intersección del plano con la esfera) de la superficie plana considerada

*Planillas equiangular de Wulf
(estereografía ecuatorial)*

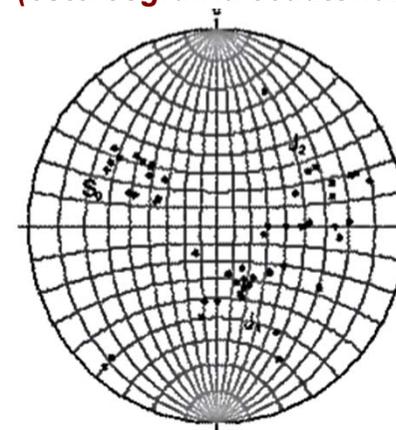
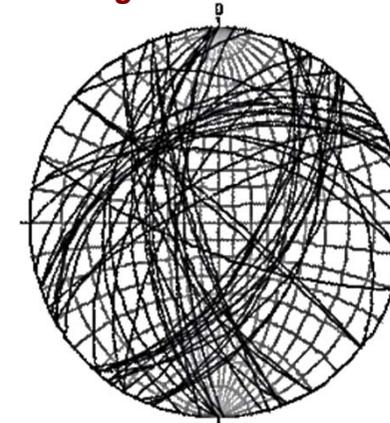


Diagrama de Polos



*Diagrama de
Círculos máximos.*

apéndice 1.) *Análisis estereográfico de la estructura*

- El análisis estadístico de una muestra grande de datos nos permitirá determinar con cierta precisión la dirección y buzamientos predominantes
- El análisis estadístico no se puede realizar mediante la proyección estereográfica (**falsilla de Wulf**), ya que se produce gran concentración de puntos en la parte central del diagrama.
- Para solventar este problema se recurre a la **proyección equiareal (falsilla de Schmidt)**, que nos permite el recuento directo de los polos, calcular su valor estadístico por unidad de superficie y determinar las direcciones y buzamientos predominantes

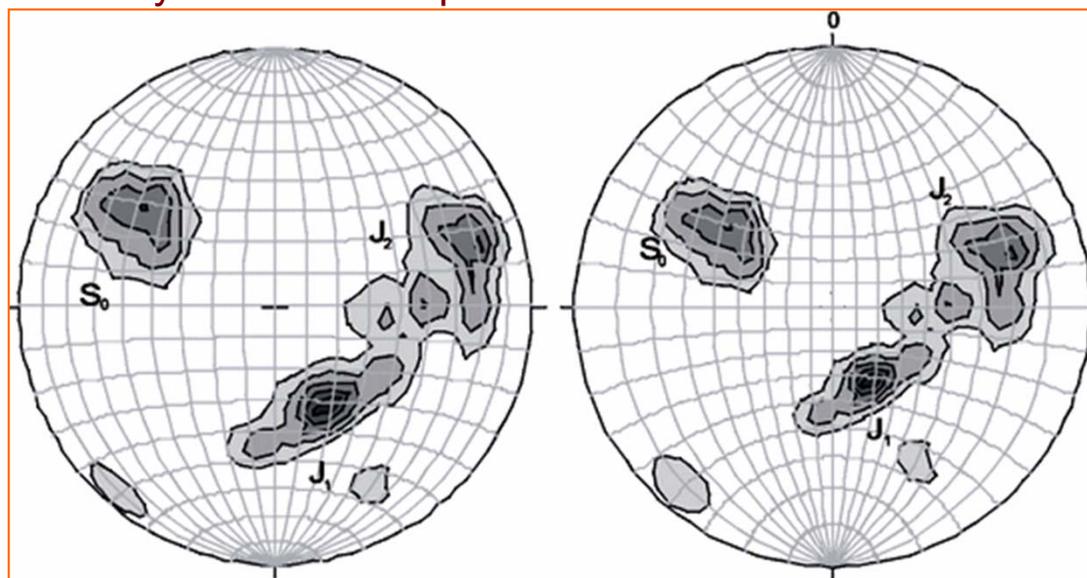


Diagrama de densidad de polos; izq) en proyección equiareal (falsilla de Schmidt) y dcha) en proyección estereográfica (equiangular) (falsilla de Wulf)

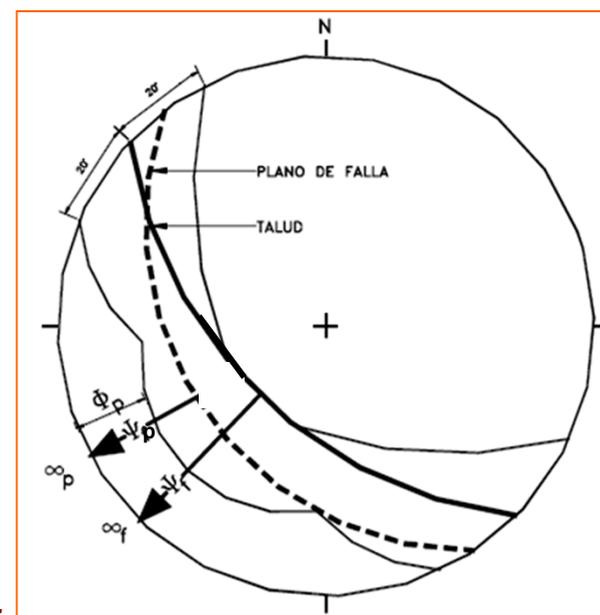
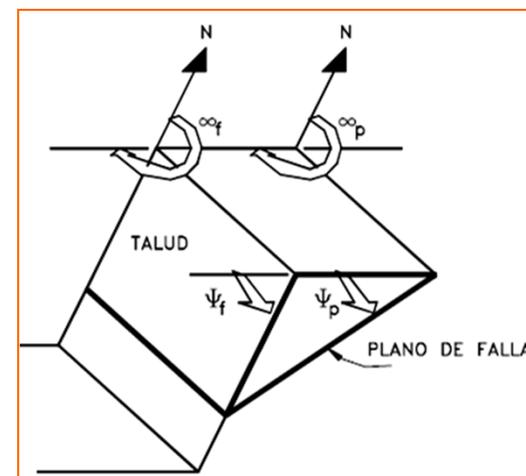
4.6.1.) Análisis de falla plana

95

- El tamaño de las fallas planas puede ir desde unos pequeños m^3 hasta montañas enteras
- Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie plana y se analizan como un **problema bidimensional**
- Se evalúa la estabilidad por el **método del equilibrio límite**
- Solo se tiene en cuenta el efecto de la **discontinuidad principal**

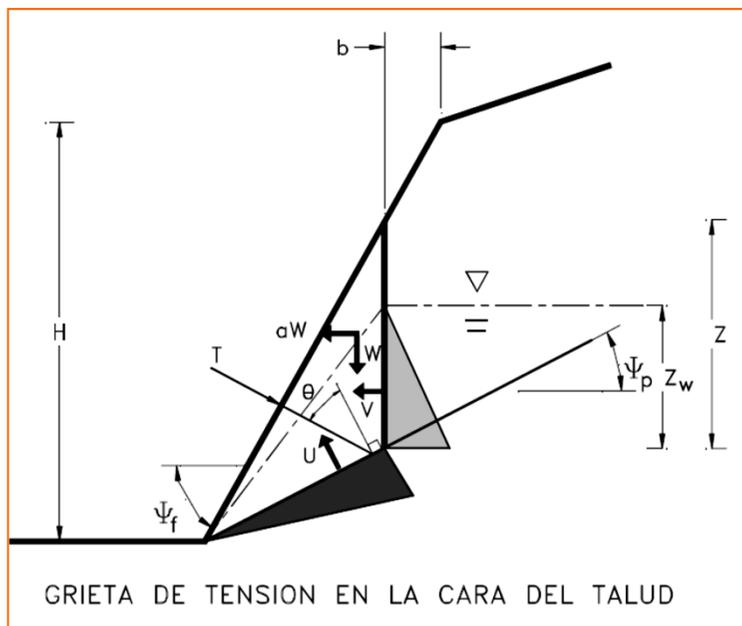
- El análisis cinemático tiene en cuenta las siguientes **condiciones estructurales**;
 - La dirección de la discontinuidad debe estar a menos de 20° de la dirección de la superficie del talud
 - El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud
 - El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de rozamiento
 - La extensión lateral de la masa potencial de falla debe ser definida por superficies laterales que no contribuyen a la estabilidad

- Se analizan los **dos siguientes esquemas de falla**;
 - **GRIETA DE TENSION EN LA CARA DEL TALUD, DEBAJO DE LA CABEZA**
 - **CON GRIETA DE TENSION ARRIBA DE LA CABEZA DEL TALUD**



Representación estereográfica

4.6.1.) Análisis de falla plana / Grieta en la cara del talud



- Profundidad de la grieta $Z = (H \cot \Psi_f - b) (\tan \Psi_f - \tan \Psi_p)$
- Peso del bloque $W = (\frac{1}{2}) \gamma_r H^2 [(1-Z/H)^2 \cot \Psi_p (\cot \Psi_p \tan \Psi_f - 1)]$
- Area de deslizamiento $A = (H \cot \Psi_f - b) \sec \Psi_p$

- Fuerza de subpresión del agua $U = (\frac{1}{2}) \gamma_w Z_w A$
- Fuerza de empuje del agua $V = (\frac{1}{2}) \gamma_w Z_w^2$

Donde:

- H = Altura de cara del talud
- Ψ_f = Inclinación del talud
- Ψ_s = Inclinación de la corona
- Ψ_p = Inclinación del plano de falla
- b = Distancia de la grieta
- a = Aceleración sísmica
- T = Tensión de pernos o anclajes
- θ = Inclinación de los tensores con la normal a la falla
- c = Cohesión
- ϕ = Angulo de fricción
- γ_r = Densidad de la roca
- γ_w = Densidad del agua
- Z_w = Altura de agua en la grieta
- Z = Profundidad de la grieta
- U = Fuerza de subpresión del agua
- V = Fuerza de empuje del agua
- W = Peso del bloque
- A = Area de la superficie de falla.

$$FS = \frac{\{cA + [W(\cos \psi_p - a \sin \psi_p) - U - V \sin \psi_p + T \cos \theta] \tan \phi\}}{[W(\sin \psi_p + a \cos \psi_p) + V \cos \psi_p - T \sin \theta]}$$

•Se ha de definir previamente la grieta de tensión, si el movimiento aún no se ha iniciado y no se detecta, ésta puede obtenerse la expresión de Hoek y Baray (1981);

$$B/H = \sqrt{(\cot \psi_f \cot \psi_f) - \cot \psi_f}$$

4.6.2.) Análisis de falla en cuña

98

•Ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud

•La formación de una falla en cuña depende fundamentalmente, de la litología y de la masa de roca

•El análisis cinemático de una falla en cuña es **controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos**

•Las **condiciones estructurales** que se deben cumplir;

–La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente perpendicular al rumbo del buzamiento de la superficie del talud

–El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud

–El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de rozamiento promedio de las dos superficies

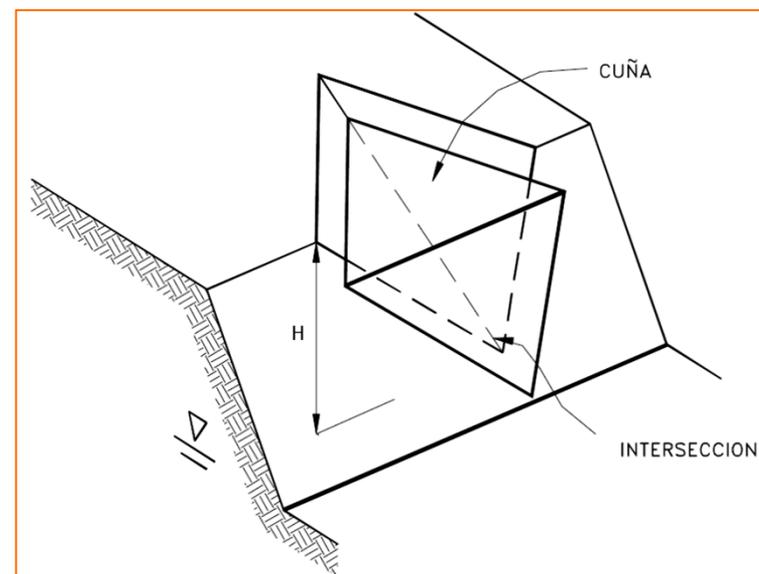
•Se estudian cuatro casos;

–**CASO GENERAL**

–**TALUD DRENADO**

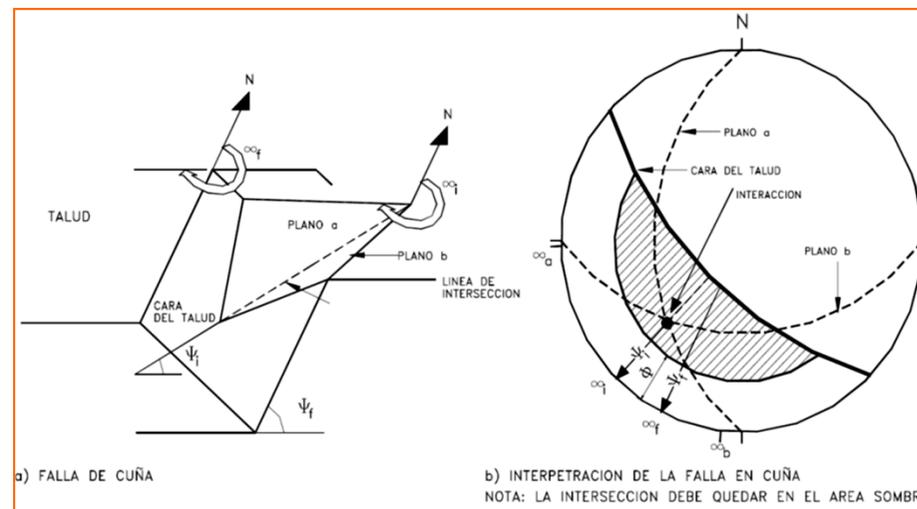
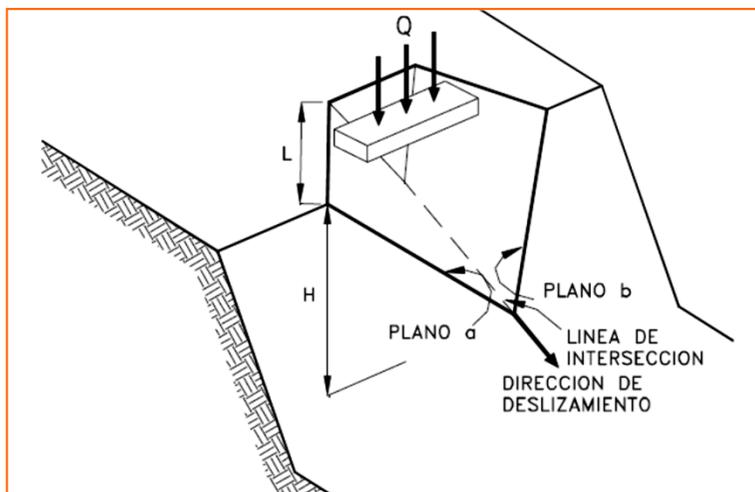
–**TALUD NO COHESIVO**

–**IGUAL ÁNGULO DE ROZAMIENTO EN LOS DOS PLANOS**



Esquema de falla en cuña

4.6.2.) Análisis de falla en cuña



CASO GENERAL

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_a \cdot X + c_b \cdot Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_b$$

TALUD DRENADO

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_a X + c_b Y) + A \tan \phi_a + B \tan \phi_b$$

TALUD NO COHESIVO (c=0)

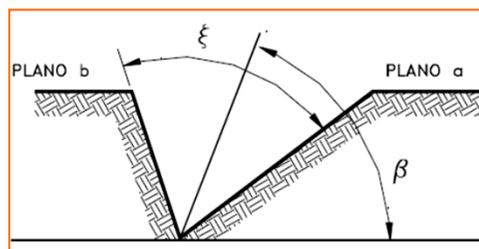
$$FS = a \tan \phi_a + B \tan \phi_b$$

Izq) Caso general de falla en cuña

Arriba) Análisis cinemático de la falla en cuña (Hoek y Bray, 1981) basado en métodos de proyección estereográfica

IGUAL ÁNGULO DE ROZAMIENTO ($\phi_a = \phi_b$)

$$FS = \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen}(\xi / 2)} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i}$$



Donde:

C_a y c_b = cohesiones

ϕ_a y ϕ_b = ángulos de fricción

γ_r = Peso unitario de la roca

γ_w = Peso unitario del agua

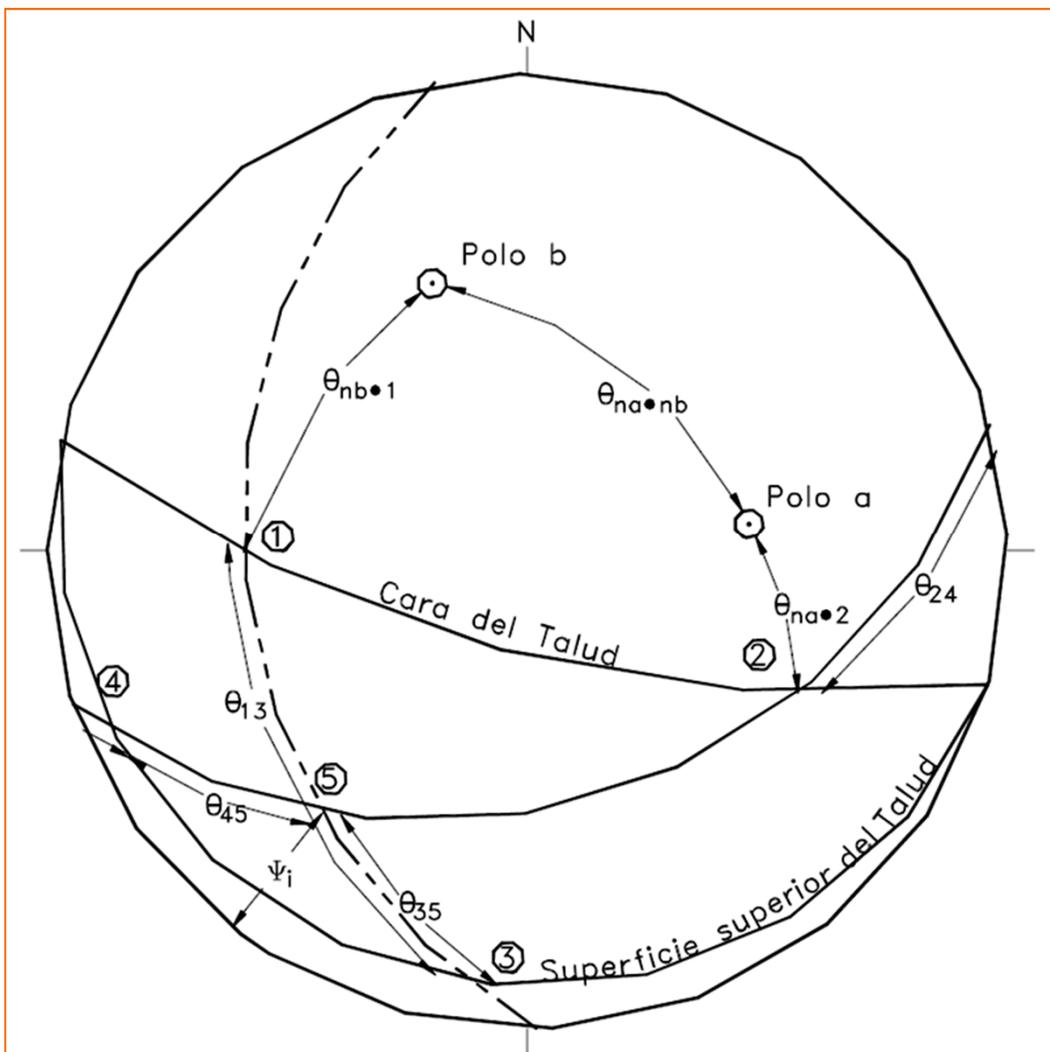
H = Altura total del bloque

X, Y, A y B dependen de la geometría

Ψ_a = Buzamiento de los planos a y b

Ψ_i = Buzamiento de la intersección

4.6.2.) Análisis de falla en cuña



Ejemplo de representación de una falla en cuña

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_a \cdot X + c_b \cdot Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_b$$

$$X = \frac{\text{sen } \theta_{24}}{\text{sen } \theta_{45} \cdot \text{Cos } \theta_{na} \cdot 2}$$

$$Y = \frac{\text{sen } \theta_{13}}{\text{sen } \theta_{35} \cdot \text{Cos } \theta_{NBa} \cdot 1}$$

$$A = \frac{\text{Cos } \psi_a - \text{cos } \psi_b \cdot \text{cos } \theta_{na} \cdot nb}{\text{sen } \psi_i \cdot \text{sin}^2 \theta_{na} \cdot nb}$$

$$B = \frac{\text{Cos } \psi_b - \text{cos } \psi_a \cdot \text{cos } \theta_{na} \cdot nb}{\text{sen } \psi_i \cdot \text{sen}^2 \theta_{na} \cdot nb}$$

Donde:

C_a y c_b = cohesiones

ϕ_a y ϕ_b = ángulos de fricción

γ_r = Peso unitario de la roca

γ_w = Peso unitario del agua

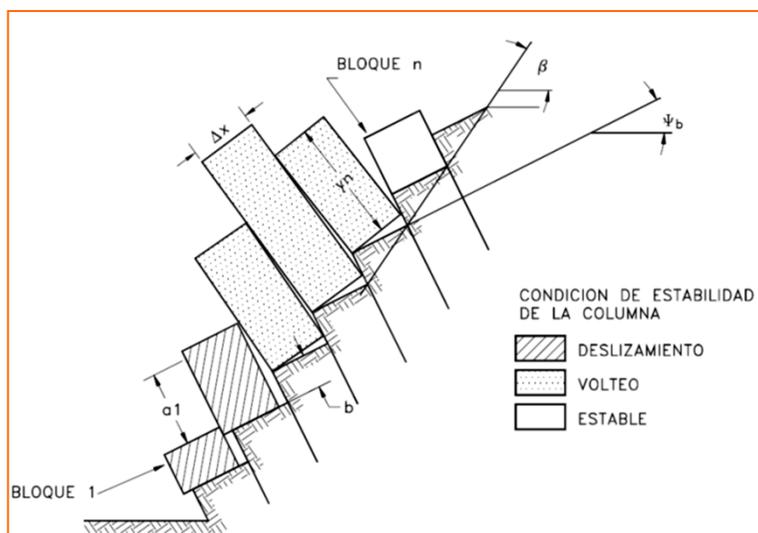
H = Altura total del bloque

X , Y , A y B dependen de la geometría

Ψ_a = Buzamiento de los planos a y b

Ψ_i = Buzamiento de la intersección

4.6.3.) Análisis de falla por volteo



Esquema general de falla por volteo

- Ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de **columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud**
- La columna de roca rota alrededor de un punto cerca de la base de la misma columna
- El análisis cinemático requiere que se presenten las siguientes **condiciones**;
 - El rumbo de las capas debe ser aprox. Paralelo a la superficie del talud. En ningún caso la diferencia ha de ser superior a 20°
 - El buzamiento debe cumplir; $(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \Phi_p)$

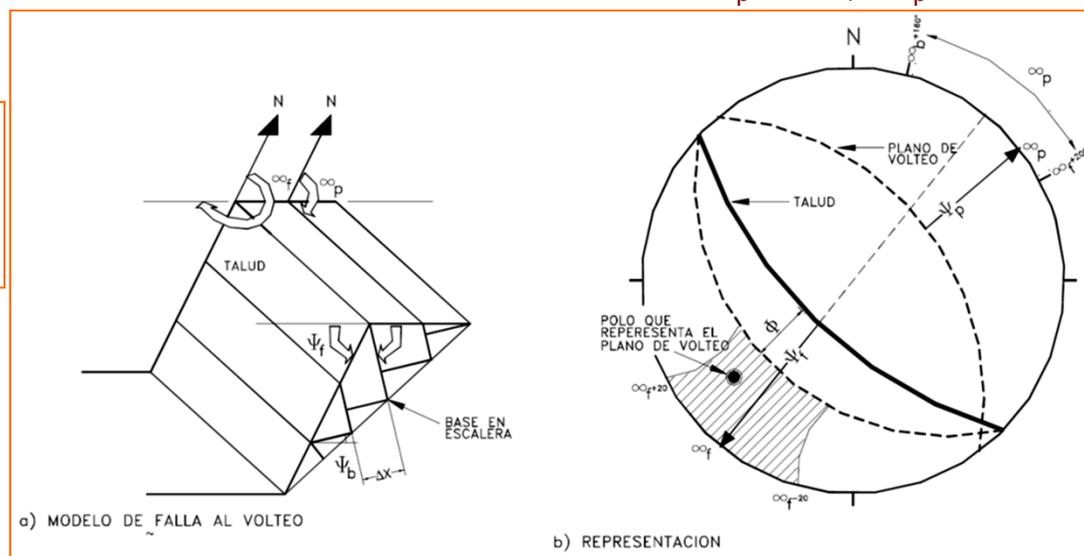
Donde:

Ψ_p = Buzamiento de las capas

Ψ_f = Buzamiento de la superficie del talud

Φ_p = Angulo de fricción a lo largo de los planos.

Análisis cinemático, mediante representación estereográfica



4.7.) Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad global

- La ROM exige $FS > 1,2$ a $1,3$ para situaciones transitorias y $FS > 1,4$ a $1,5$ para persistente o transitoria a largo plazo
- En términos generales, se considera aceptable que, en obras de ISA bajo (índice de repercusión social y ambiental), se admitan como coeficientes de seguridad mínimos;

Combinación de acciones	Coeficientes de seguridad, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,4
Fundamental, F_2	1,3
Accidental o Sísmica, F_3	1,1

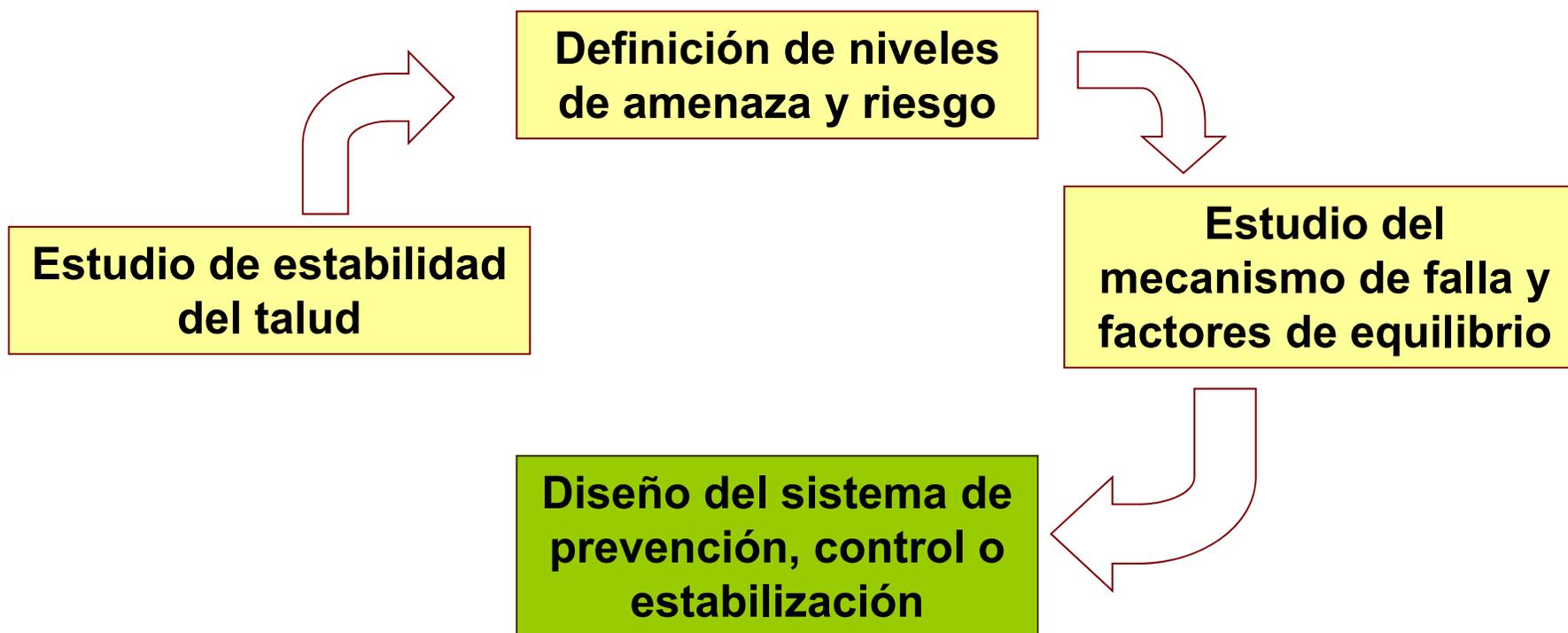
- Otro criterio en la elección del Factor de Seguridad, atendiendo a las consecuencias del fallo del talud, se establece en el siguiente cuadro;

Caso	Factor de Seguridad
Si puede ocurrir la pérdida de vidas humanas al fallar el talud	1.7
Si la falla puede producir la pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas consideradas importantes.	1.5
Si se pueden producir pérdidas económicas no muy importantes.	1.3
Si la falla del talud no causa daños.	1.2

4.8.) Prevención, estabilización y diseño

•El objetivo principal de un estudio de estabilidad de laderas o taludes es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo

METODOLOGÍA DE ACTUACIÓN



- **Cimentaciones**



4.8.1.) Prevención

MÉTODO	VENTAJA	DESVENTAJA y/o PROBLEMAS DE APLICACIÓN
<p>Desarrollo de mapas de amenaza, los cuales han de contener;</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Probabilidad de ocurrencia</i> • <i>Tipo de deslizamientos (cada tipo tiene un impacto y riesgo diferente)</i> • <i>Magnitud de los movimientos</i> • <i>Velocidad y sus características</i> • <i>Distancia de recorrido</i> • <i>Límite de progresión o retroprogresión</i> 	<p>Permite el desarrollo de medidas de prevención de riesgo;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ejecución de obras de contención • Actuación sobre los elementos que aumentan la vulnerabilidad, mejorando la estabilidad • Aporta información útil para la planificación futura de usos del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Se ha de aplicar de manera sistemática y con anticipación a la ocurrencia de los movimientos • Necesita de organismos oficiales involucrados en el tema (falta de concienciación) • Importante volumen de financiación
<p>Control del uso del suelo y planificación organizativa de su usos futuros</p>	<p>De forma legislada se evitan;</p> <ul style="list-style-type: none"> • los usos del suelo que incrementan la susceptibilidad al movimiento en masa • Disminuye el riesgo (pérdidas materiales y vidas humanas) 	<p>No tienen efecto sus ventajas si la aplicación es posterior a la existencia de la amenaza</p>
<p>Desarrollo de Códigos Técnicos y normativa</p>	<p>Presenta herramientas precisas para el control y prevención de amenazas</p>	<p>Deben existir organismos de control que exijan su cumplimiento (problema en países en vías de desarrollo)</p>
<p>Aviso y alarma</p>	<p>Disminuye de forma ostensible el riesgo cuando es inminente</p>	<p>Si su aplicación no es coordinada no evita los daños</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>El aviso debe darse con suficiente anticipación a la ocurrencia del fenómeno</i> • <i>Se ha de elaborar un plan rápido de evacuación</i> • <i>Disposición de un plan de medidas de ayuda posteriores</i>

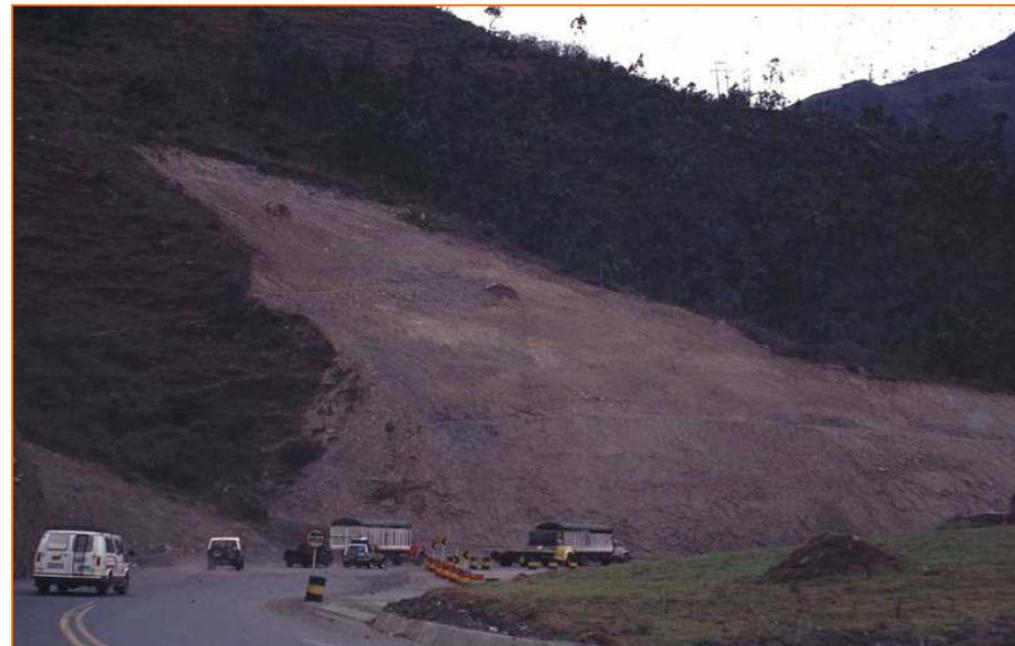
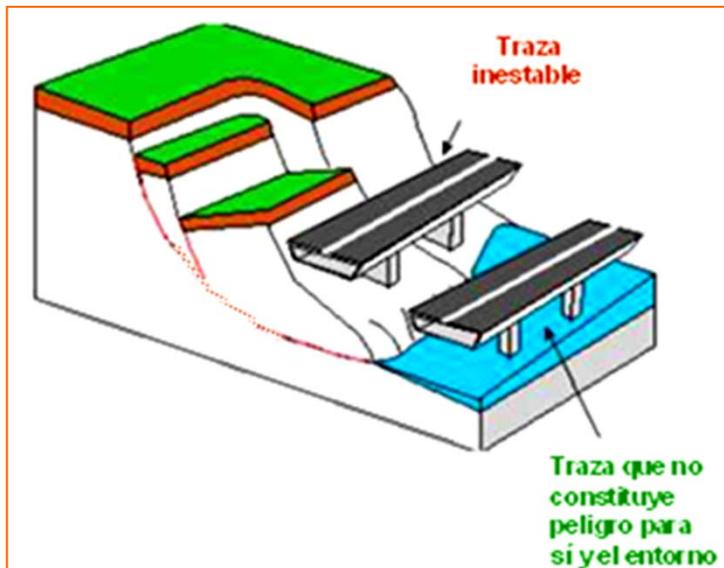
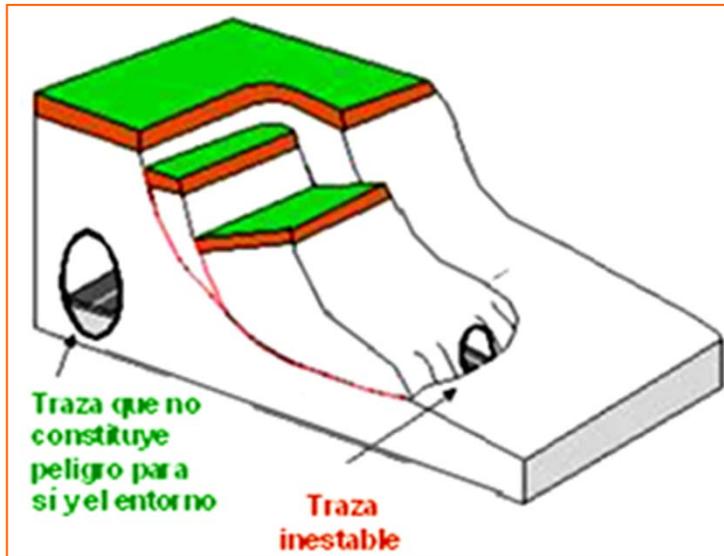
- **Cimentaciones**



4.8.2.) Elusión de la amenaza

MÉTODO	APLICACIONES	LIMITACIONES
Variantes o cambio de ubicación del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> •Recomendable cuando existe el riesgo de activar grandes deslizamientos difíciles de estabilizar o existen deslizamientos antiguos de gran magnitud •Recomendable en todo caso que sea más económico la recolocación que la estabilización de la masa 	<ul style="list-style-type: none"> •Puede ser imposibles la reubicación del proyecto •Costes ambientales, económicos, sociales etc..., por el cambio de ubicación
Eliminación total del deslizamiento	Destacables cuando; <ul style="list-style-type: none"> •Son racionales los volúmenes a mover •Es más económico que el resto de medidas posibles a adoptar 	<ul style="list-style-type: none"> •La eliminación de la masa vulnerable no asegura que no ocurran futuros deslizamiento •Costes elevados •Pueden generar problemas medioambientales
Eliminación parcial de los materiales inestables	Eliminación de los suelos subsuperficiales inestables cuando la potencia de la capa es pequeña	Si el NF es superficial, se dificulta enormemente la excavación de éstos
Modificación de proyecto (cambios de rasante en obras lineales, nueva ubicación de la traza de túneles)	Disminución de cortes del terreno y reducción de volúmenes de terraplén (disminuyendo el peso sobre las laderas)	Reducción de los estándares de calidad del proyecto (incremento de pendientes, reducción de radios de giro, etc...)
Construcción de viaductos y/o túneles sobre los movimientos en vez de terraplenes y/o desmontes	Elimina la construcción de grandes taludes o importantes desmontes, reduciendo la susceptibilidad	<ul style="list-style-type: none"> •Incremento de costes en los proyectos (necesaria concienciación de las Administraciones y Organismos Oficiales) •Estudio exhaustivo de la cimentación de los viaductos y estudio de estabilidad pormenorizado de los túneles

4.8.2.) Elusión de la amenaza



Eliminación total de la masa de un deslizamiento

Modificaciones de proyecto

4.8.3.) Control

- **Métodos tendentes a controlar la amenaza activa antes de que se produzca el riesgo a personas o bienes**
- **Un método efectivo de minimizar la amenaza de caídos de roca es permitir que éstos ocurran controladamente, utilizando sistemas de control en el pie del talud, tales como;**

Método	Ventajas	Desventajas
Bermas	Generalmente son económicas rápidas de construir.	Se requiere un espacio grande a mitad de talud.
Trincheras	Sirven al mismo tiempo para controlar las aguas lluvias.	Los cantos fácilmente pasan por encima.
Estructuras de retención	Retienen las masas en movimiento	Se pueden requerir estructuras algo costosas.
Cubiertas de protección	Son uno de los métodos más efectivos para disminuir el riesgo en carreteras.	Son muy costosas.

- **Un detalle común a todas ellas es la de la absorción de energía, bien parando el caído en una determinada distancia o desviándolo de la estructura a proteger**
- **2-3m de diámetro el tamaño máximo de caído para poder controlar su riesgo**
- **Los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de estas estructuras son;**
 - **Trayectoria de las piedras**
 - **Velocidad**
 - **Energía de impacto**
 - **Volumen total de acumulación**

4.8.3.1.) Bermas y trincheras

108

•El diseño de la berma debe tener en cuenta;

- Los caídos tienden a saltar en las bermas
- La excavación de bermas intermedias puede aumentar la amenaza de caídos

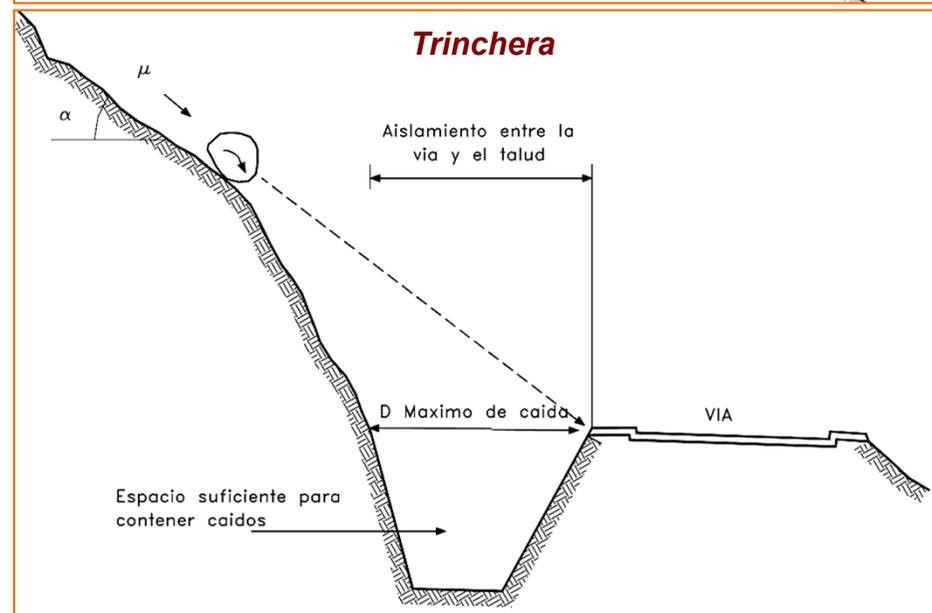
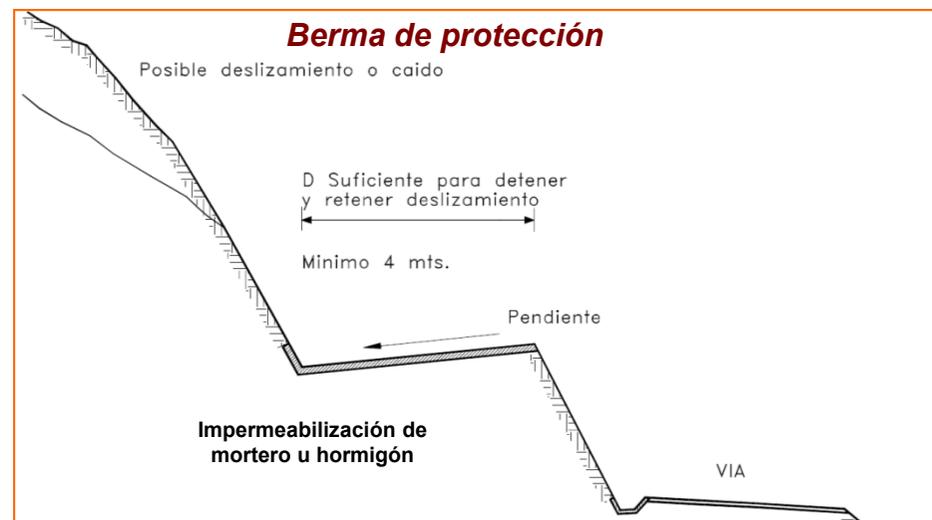
•Una **trinchera** es una excavación al pie del talud para impedir que los caídos de piedra afecten a la vía

•Solución muy efectiva si existe espacio para su construcción

•Para taludes $> 75^\circ$, los bloques tienden a permanecer cerca

• $75^\circ < \text{pendiente talud} < 55^\circ$, tienden los bloques a rodar, requiriéndose mayor dimensión de trinchera

• $40^\circ < \text{pendiente} < 55^\circ$, los bloques tienden a rodar, requiriéndose de barreras verticales – elementos de retención- junto a la trinchera



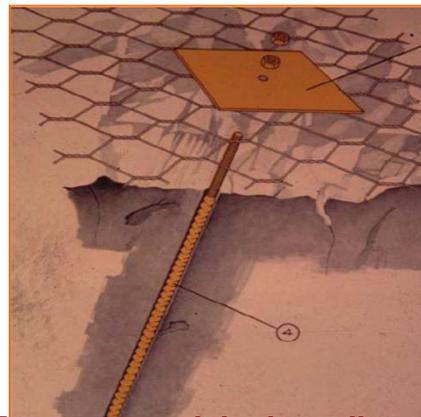
4.8.3.2.) Estructuras de retención

•Existe gran variedad de estructuras de retención, destacando;

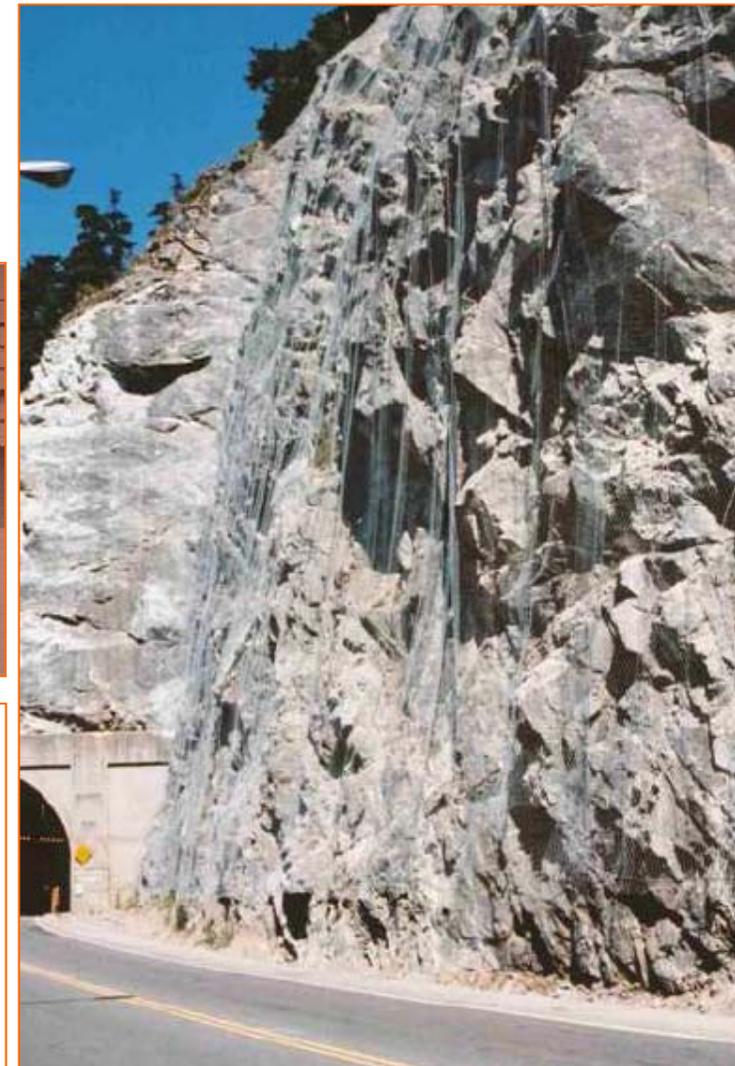
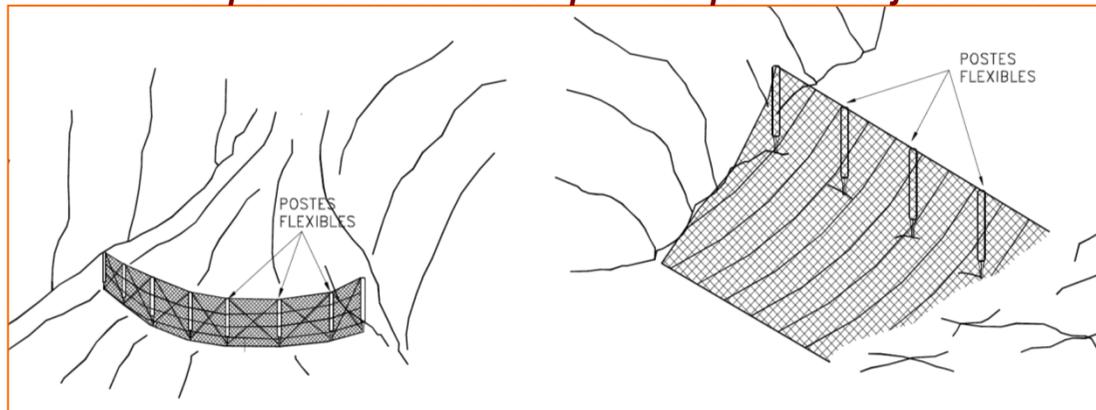
–**MALLAS**

–**BARRERAS**; *Produce un espacio o trinchera en el pie del talud que impide el paso del caído*

- Roca
- Suelo
- Tierra armada
- Muros de hormigón
- Pilotes
- Gaviones
- Bloques de hormigón



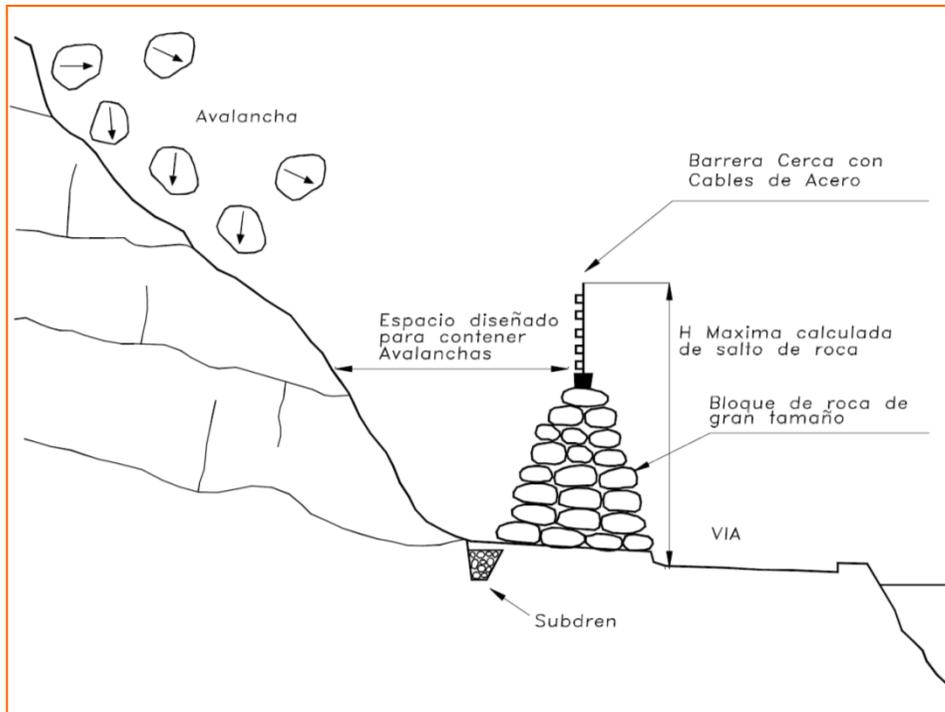
Uso de mallas para detención de bloques / Esquema anclaje de malla



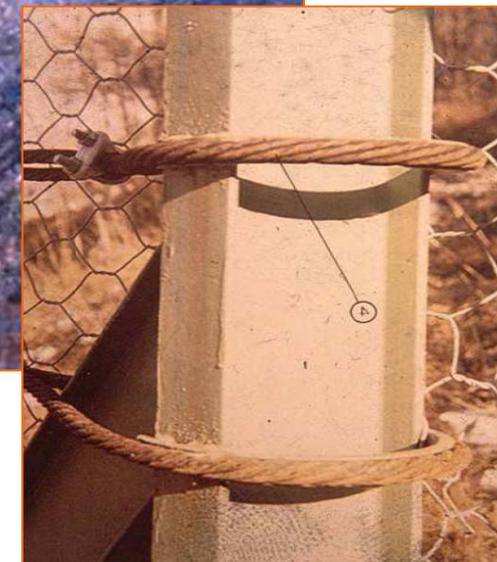
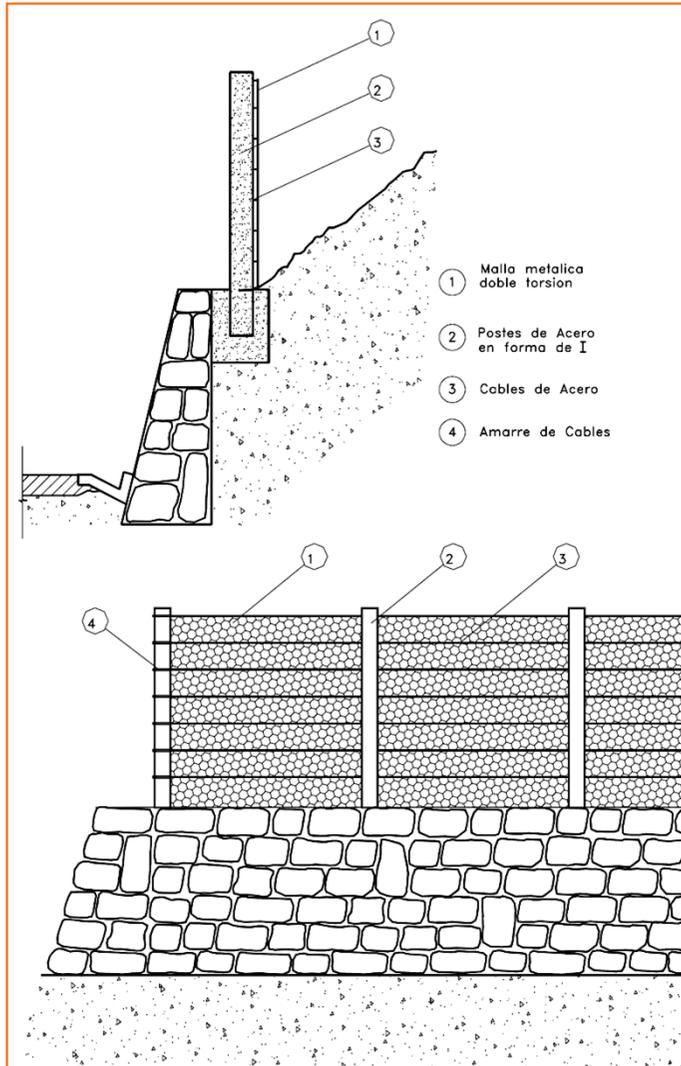
Malla anclada

4.8.3.2.) Estructuras de retención / Ejemplos de barreras

BARRERA DE MAMPOSTERÍA Y MALLA CON CABLES DE ACERO

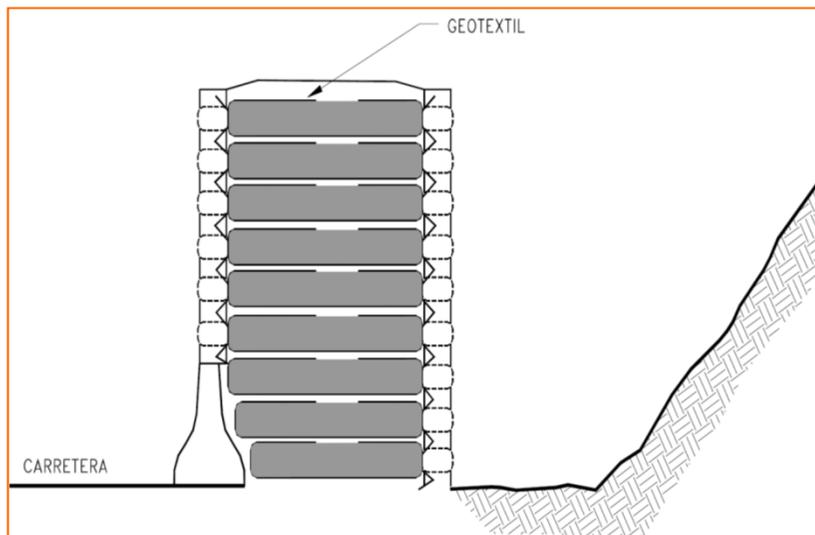


4.8.3.2.) Estructuras de retención / Ejemplos de barreras **SISTEMA DE BARRERA METÁLICA CON CABLES DE ACERO**



4.8.3.2.) Estructuras de retención / Ejemplos de barreras

BARRERAS DE TIERRA ARMADA CON GEOTEXTIL



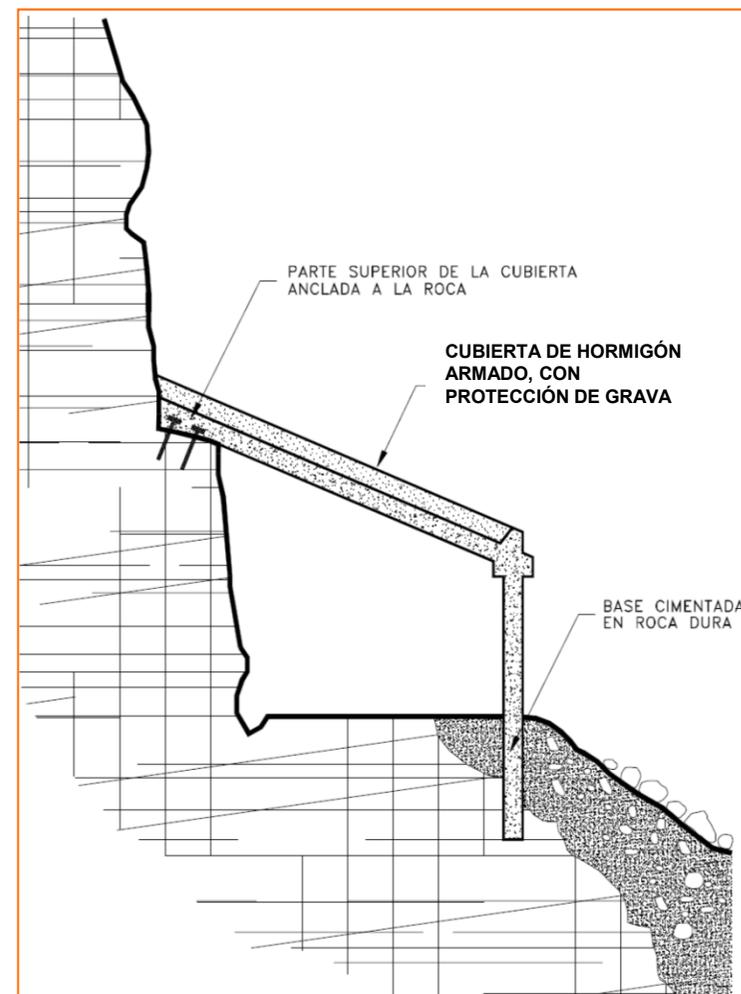
BARRERAS MURO ENCRIBADO



4.8.3.3.) Cubiertas

113

- Se emplea cuando existe amenaza de caídos de roca en taludes de gran pendiente
- Son estructuras de hormigón armado que evitan que confluyan la trayectoria del movimiento en masa y la infraestructura a salvaguardar
- Para su diseño se requiere calcular las cargas de impacto y el peso de los materiales que eventualmente van a pasar o retenerse sobre ella



Esquema y ejemplo de cubiertas sobre carretera

4.8.3.3.) Cubiertas



Cubierta en Noruega



Efectos del impacto de caído de bloques sobre cubierta

4.8.4.) Estabilización

- La estabilización de un talud/ladera comprende tres fases;
 1. Determinar el sistema o combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta las circunstancias del talud
 2. Ejecución de las obras diseñadas
 3. Instrumentación y control durante y después de la estabilización
- Los sistemas de estabilización pueden clasificarse en cinco categorías principales;
 1. *Conformación del talud o ladera*; sistemas que tienden a lograr un equilibrio de masas, reduciendo las fuerzas que producen el movimiento
 2. *Recubrimiento de la superficie*; métodos que tratan de impedir la infiltración o la ocurrencia de fenómenos superficiales de erosión, o refuerzan el suelo más subsuperficial
 3. *Control de agua superficial y subterránea*; sistemas tendentes a controlar el agua y sus efectos, disminuyendo las fuerzas que producen el movimiento y/o aumentando las fuerzas resistentes
 4. *Estructuras de contención*; métodos en los que se colocan fuerzas externas al movimiento aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes
 5. *Mejoras del terreno*; métodos que incrementan la resistencia del suelo

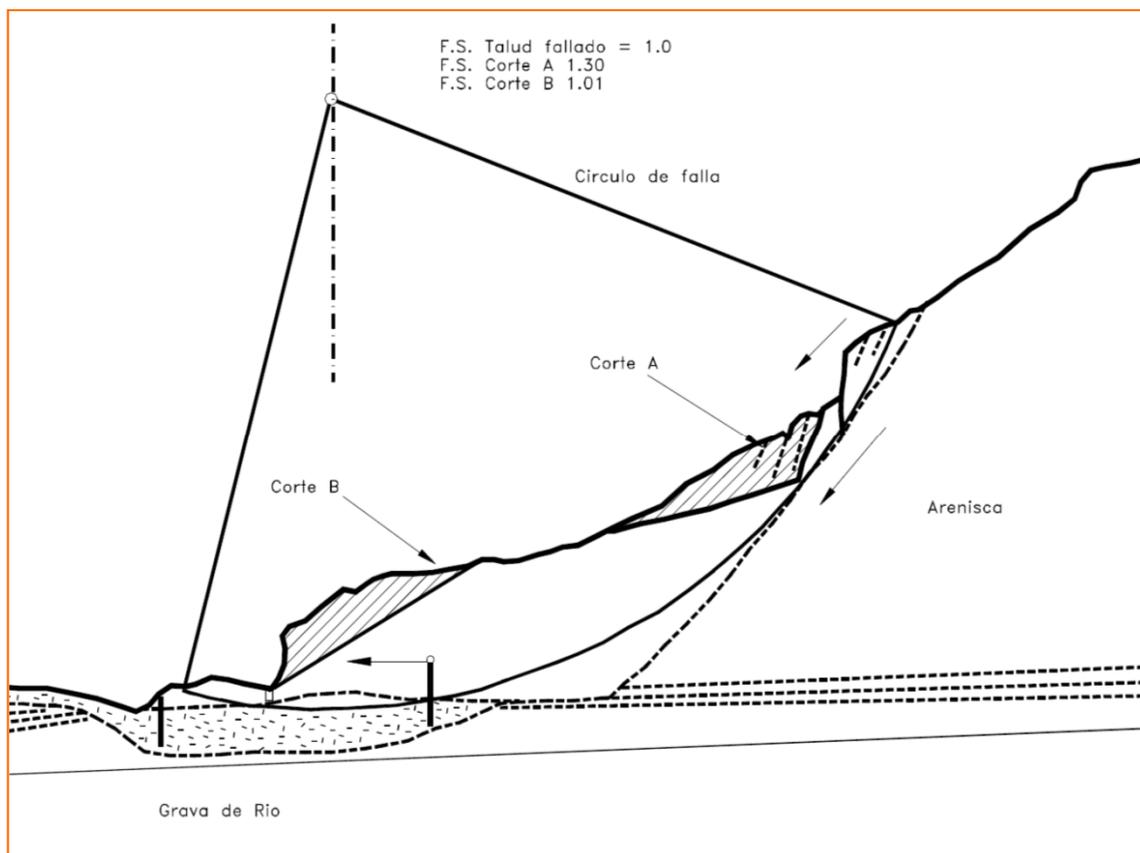
- **Cimentaciones**



4.8.4.1.) Conformación del talud o ladera

MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Eliminación de materiales de la cabeza del talud	Muy efectivo en la estabilización de deslizamientos rotacionales	En movimientos muy grandes, las masas de suelo a mover lo podrían hacer inviable (económicamente y medioambientalmente)
Abatimiento de la pendiente	Efectivo especialmente en suelos con rozamiento ($\Phi \uparrow$)	En taludes de gran altura podría ser inviable; <ul style="list-style-type: none"> •Económicamente, por volumen de tierras a mover •Medioambientalmente, por la colocación en vertedero de la masa de tierras, o su reubicación en trazas de obras lineales •Afecciones a otras infraestructural o asentamientos poblacionales (el abatimiento incrementa el área de ocupación del talud)
Terraceo de la superficie	Además de la estabilidad al deslizamiento, permite construir obras para controlar la erosión	Cada terraza ha de ser estable independientemente

4.8.4.1.1.) Eliminación de materiales de la cabeza del talud



- De gran utilidad en fallas activas
- La cantidad de material a retirar y su localización, depende del tamaño y características del movimiento y de la geotecnia del sitio

• Sus limitaciones;

- **Coste económico;** vendrá determinado por la cantidad de material a retirar y su dificultad de acceso
- **Coste ambiental -dificultad para recolocar el material extraído- y paisajístico**

Ejemplo de mejora del Factor de Seguridad con la retirada de material en distintos puntos de la masa. Obsérvese que la mayor eficacia se alcanza en la eliminación de material en la cabeza del deslizamiento (Caso A)

4.8.4.1.2.) Criterios generales para el diseño de pendientes y bermas

- La construcción de terrazas o bermas en la parte alta de un deslizamiento rotacional tiende a reducir el momento actuante y controlar el movimiento, de tal manera, que el círculo de falla se hace más profundo y largo, aumentándose el factor de seguridad
- Si el proceso se realiza en la parte inferior se puede lograr el efecto inverso, disminuyendo el factor de seguridad

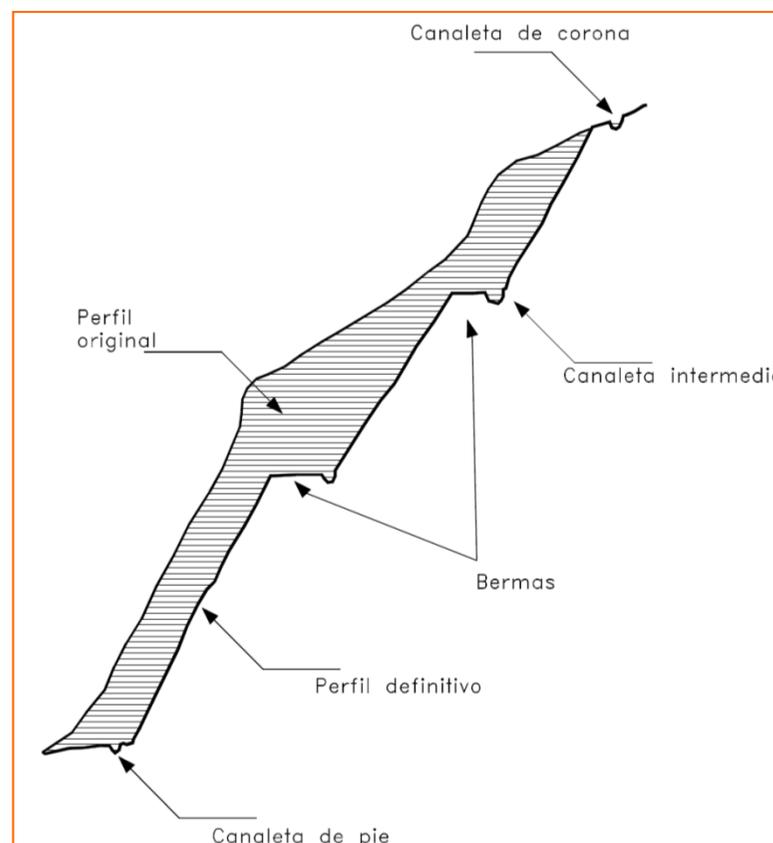
• **El terraceo** también se puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de vegetación

• En deslizamiento traslacionales y en ciertos flujos, no es efectivo este método de estabilización

• Con la construcción de terrazas, el talud puede quedar dividido en varios independientes, los cuales a su vez deben ser estables

CARACTERÍSTICAS

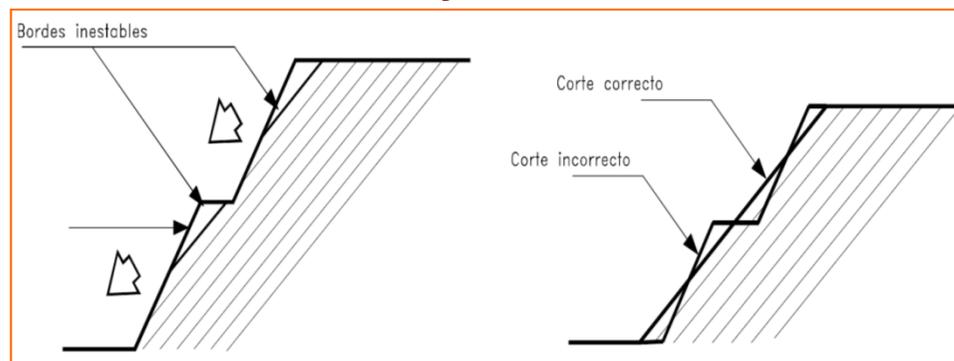
- **Altura de gradas; 5 a 7m**
- **Cada una con una cuneta** revestida para el control del agua superficial
- **El sistema de cuneta debe concluir en un sistema general de recolección**
- **La grada más alta suele tener pendiente inferior al resto, ya que el suelo subsuperficial es menos resistente**



Estabilización por conformación de talud y bermas

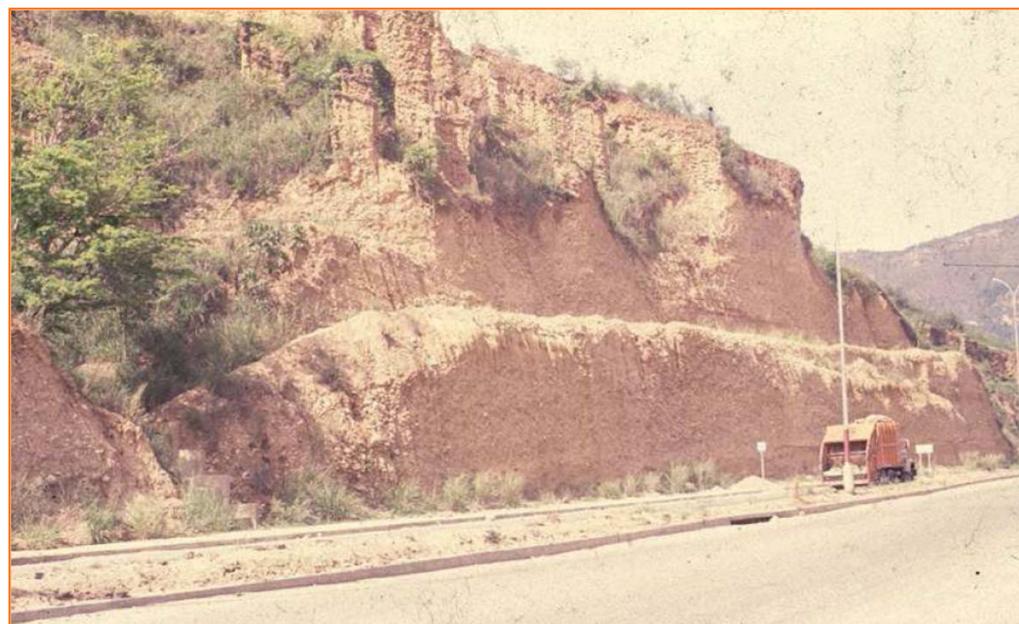
4.8.4.1.2.) Criterios generales para el diseño de pendientes y bermas

- Para el diseño de bermas y pendientes se debe tener en cuenta los siguientes criterios;
 1. **Formación geológica;** A mayor competencia de la roca, mayores pendientes y alturas
 - Areniscas, calizas y rocas ígneas duras y sanas → Taludes casi verticales
 - Esquistos y lutitas → No permiten taludes verticales (1/2H:1V a 2H:1V) y altura de grada máxima 10m
 2. **Meteorización;** A mayor meteorización, taludes más tendidos, mayores bermas y menores alturas de grada
 - Materiales muy meteorizados → taludes máximos 1H:1V, altura máx. 7m y anchos de berma mín. 4m. Para taludes de gran altura se permiten mayores pendientes en el pie que en la cabeza del corte
 3. **Microestructura y estructura geológica;** Los taludes no han de tener pendientes superiores al buzamiento de las diaclasas o planos de estratificación.
 - A menos espaciamiento de las discontinuidades → pendientes de menor altura
 - Materiales muy fracturados → taludes, alturas y bermas similares a los materiales meteorizados



4.8.4.1.2.) Criterios generales para el diseño de pendientes y bermas

4. **Minerales de arcilla;** Alturas de grada no superiores a 5m y ancho de berma 4m
 - Montmorillonita → taludes inferiores a 2H:1V
 - Kaolinita → taludes hasta 1H:1V
5. **Niveles freáticos y comportamiento hidrológico;** Los suelos saturados talud máx 2H:1V
6. **Sismicidad;** En zonas de amenaza sísmica, talud máx. $\frac{1}{2}$ H:1V, a menos que sean rocas muy sanas
7. **Factores antrópicos;** En zonas urbanas se recomienda taludes de pendiente máxima 1H:1V, y altura de grada máx. 5m
8. **Elementos en riesgo;** Los taludes con riesgo de vidas humanas deben tener factores de seguridad muy altos



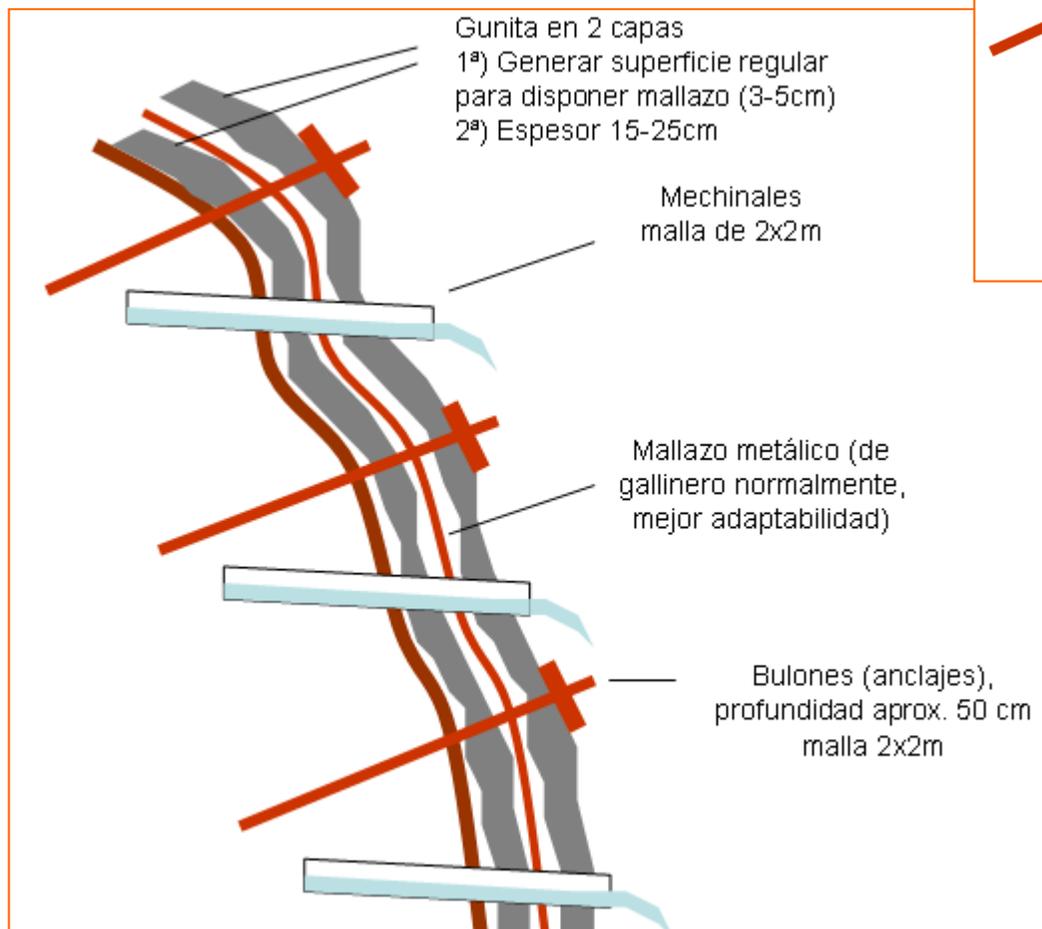
- **Cimentaciones**



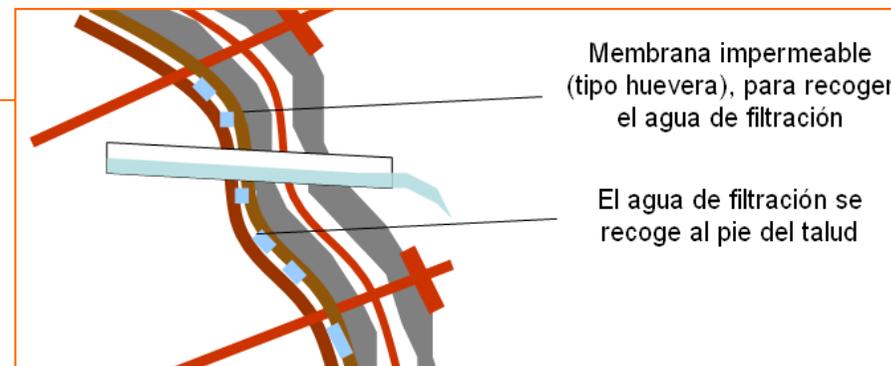
4.8.4.2.) Recubrimiento de la superficie

MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Recubrimiento de la superficie del talud <ul style="list-style-type: none"> •Gunitado (variante con anclajes; soil-nailing) •Mampostería •Rip-Rap; colocación de piedra suelta sobre el talud, generalmente bajo ella se coloca geotéxtil como elemento de protección adicional. •Geotextiles 	Reduce y controla la erosión	Se debe garantizar la estabilidad del recubrimiento
Conformación de la superficie <ul style="list-style-type: none"> •Suelo cemento; mejora las condiciones de permeabilidad haciéndolo impermeable •En el sureste asiático se utiliza “Chunam Plaster” (Cemento, cal y suelo) 	Mejoran las condiciones de drenaje superficial y reducen la erosión	Su efecto directo sobre la estabilidad es generalmente limitado
Sellado de grietas superficiales	Disminuye la infiltración del agua	Las grietas pueden abrirse nuevamente y se requiere mantenimiento por periodos importantes de tiempo
Sellado de juntas y discontinuidades	Disminuye la infiltración de agua y las presiones de poro en las discontinuidades	Gran número de discontinuidades a sellar
Cobertura vegetal (Bioingeniería)	<ul style="list-style-type: none"> •Mejoran la resistencia a cortante del talud, incrementando su estabilidad por; <ul style="list-style-type: none"> - Tiene a determinar el contenido de agua en superficie del talud - Consistencia por el entramado mecánico de sus raíces •Integración paisajística, buena solución visual •Inversión económica inicial baja 	<ul style="list-style-type: none"> •Requieren mantenimiento •Depende de la pluviometría de la zona (de difícil aplicación en zonas áridas, donde en cambio las lluvias suelen ser torrenciales y crean gran erosión. P:ej; levante español)

4.8.4.2.1.) Soil nailing



Esquema composición de soil-nailing



Variante con membrana impermeable



Ejemplo de aplicación de hormigón proyectado (gunita) en talud

Cimentaciones

4.8.4.2.2.) Mampostería y Rip-Rap



Universidad
Europea

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Cubrición con mampostería



*Geotextil bajo
Rip-RAP*

- En el Rip-Rap se ha de asegurar una capa mínima de piedra de recubrimiento de 30cm, colocando bajo éste, sobre el talud, geotextil, **no tejido impermeable**
- El Rip-Rap es sólo un elemento de cubrición que evita la erosión superficial, **no es un muro de escollera**
- La piedra de aporte debe ser **poco meteorizable**
- Una vez dispuesto el material de mayor tamaño se rellena el muro con piedras de tamaño menor – cerrar huecos.
- Existe normativa específica para la ejecución de muros de escollera; ***Guía para el proyecto y ejecución de muros de escollera en obras de carretera. Ministerio de Fomento (año 2006)***

Sistema de cubrición mediante Rip-Rap

4.8.4.2.3.) Aplicaciones de los geotextiles a la estabilización de laderas

FUNCIONES DE LOS GEOSINTÉTICOS

• **Separación;** Separan dos estratos o capas de suelo que tienen diferente huso granulométrico. Evitan el lavado de finos a favor de estratos granulares permeables

• **Filtración;** Utilizados para prevenir la migración de finos en el drenaje de suelos (p.ej: revistiendo los drenes subhorizontales)

• **Drenaje;** Conducen el flujo a través de suelos menos permeables (p.ej: drenes mecha)

• **Refuerzo;** Actúan como un elemento de refuerzo dentro de la masa de suelo o en combinación con el propio suelo para producir un compuesto que mejore las propiedades de resistencia y deformación (p.ej; geomallas en constitución de muros de contención)

• **Contención de fluido;** Actúan como barrera impermeable para fluidos (p.ej; bajo rip-rap para evitar la infiltración, también usado para el encapsulado de suelos expansivos)

• **Control de erosión;** Evitando el impacto de la escorrentía sobre la superficie, así como generando barreras (células) que retienen el material arrastrado

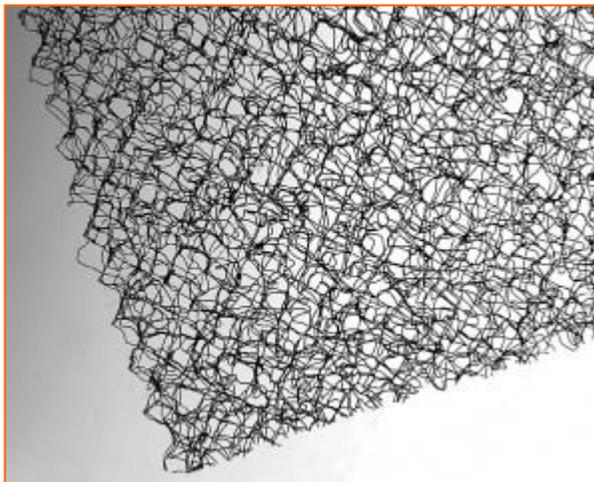


4.8.4.2.3.) Aplicaciones de los geotextiles a la estabilización de laderas



MANTAS ORGÁNICAS, fabricadas con fibras orgánicas de paja y/o coco que permiten;

- Crecimiento rápido y homogéneo de la vegetación
- Protege de la erosión



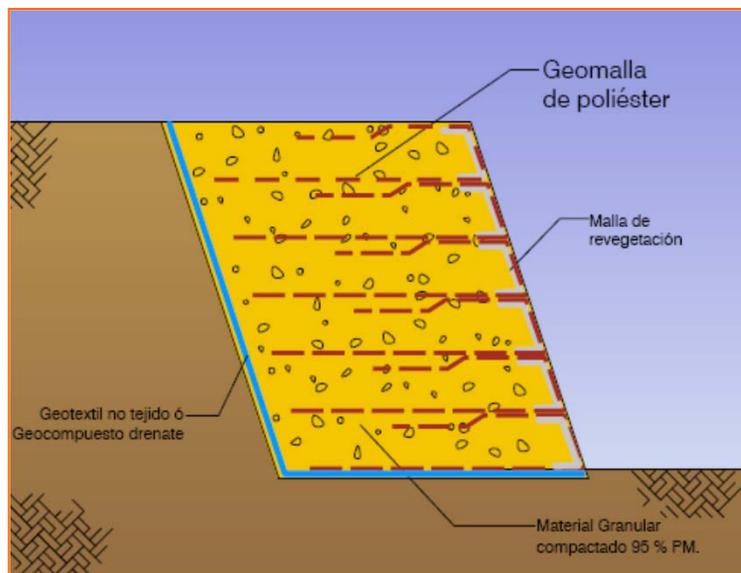
ESTERA TRIDIMENSIONAL formada por mono-filamentos de polipropileno.

- Ayudan a retener la vegetación, siendo una solución natural a la erosión



Aspecto final de un talud cubierto con estera tridimensional

4.8.4.2.3.) Aplicaciones de los geotextiles a la estabilización de laderas



Resultado final; muro de contención con geomalla y revegetación posterior

Estructura de muro con geomalla

- El apilamiento sucesivo de capas de tierra compactadas y reforzadas con geomallas, permite la construcción de estructuras de contención pseudo verticales
- Si la estructura es posteriormente hidrosemada, teniendo cobertura vegetal, se denominan; **MUROS VERDES**
- Sus principales características;
 - Estructura flexible
 - Protege de la erosión
 - Permite taludes casi verticales
 - Buena integración paisajística



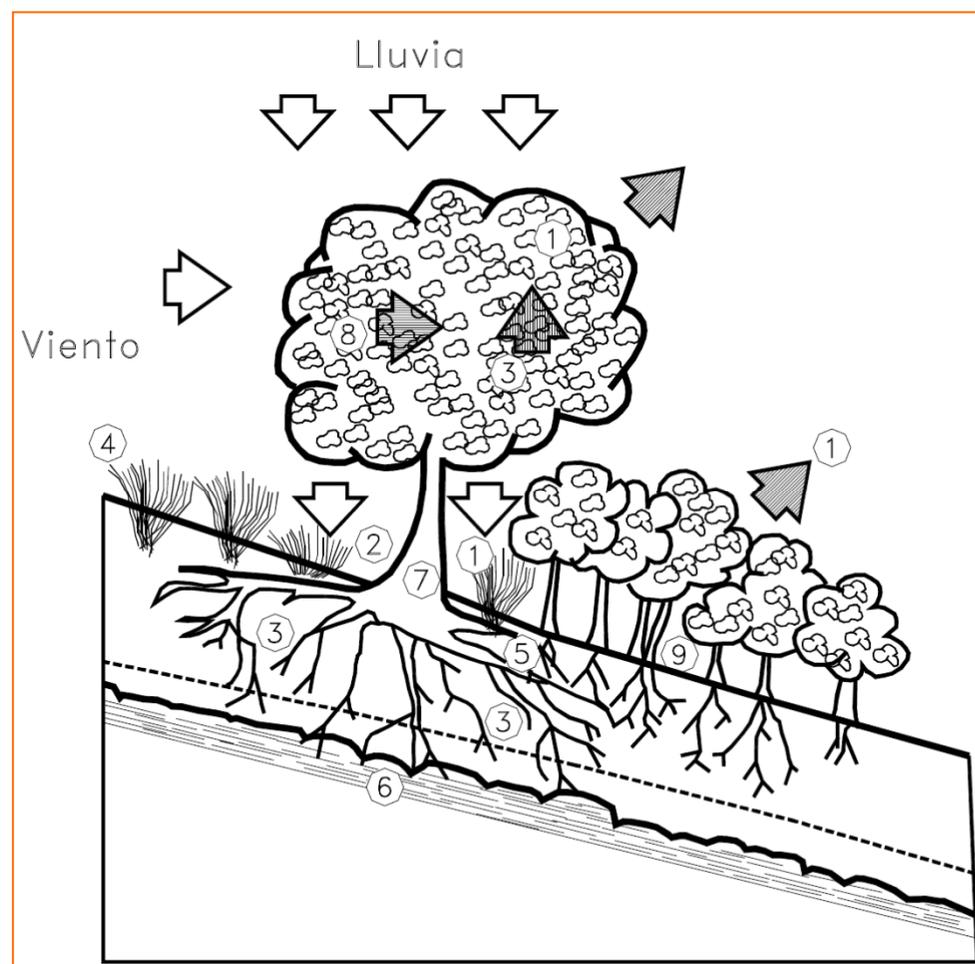
Muro de contención con geomalla

4.8.4.2.4.) Vegetación y Bioingeniería

• Aunque la protección vegetal no incrementa teóricamente el factor de seguridad de una ladera, en la práctica si se produce un efecto estabilizante

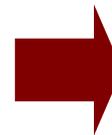
Los efectos de la vegetación sobre la ladera, son;

1. Intercepta la lluvia
2. Aumenta la capacidad de infiltración
3. Extrae la humedad del suelo
4. Grietas por desecación
5. Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante
6. Anclan el suelo superficial a mantos más profundos
7. Aumentan el peso sobre el talud
8. Transmiten al suelo fuerza del viento
9. Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión



4.8.4.2.4.) Vegetación y Bioingeniería

- El principal efecto positivo de la vegetación sobre una ladera;
 - **PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN**
- Los principales efectos negativos son;
 - **SOBRECARGA DEBIDO AL PROPIO PESO DE LA VEGETACIÓN**
 - **TRANSMISIÓN DE LAS FUERZAS DEL VIENTO SOBRE LA LADERA**
 - **LA APERTURA DE GRIETAS EN MACIZOS ROCOSOS**
 - **RETENCIÓN DE AGUA;** Por un lado reduce la erosión por escorrentía, pero por el otro incrementa la humedad del suelo por el aumento de infiltración.
 - **GRIETAS POR DESECACIÓN**



Recubrimiento vegetal de talud en Llinars del Vallés (España)

4.8.4.2.4.) Vegetación y Bioingeniería

•Ventajas y desventajas de los diversos tipos de plantas utilizados en bioingeniería;



Pastos (foto; Gramineae)

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer
Arboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.



Uso de arbustos en la mejora de estabilidad de taludes



Regeneración mediante el uso de Juncos en el río Sugata (Japón)



- **Cimentaciones**



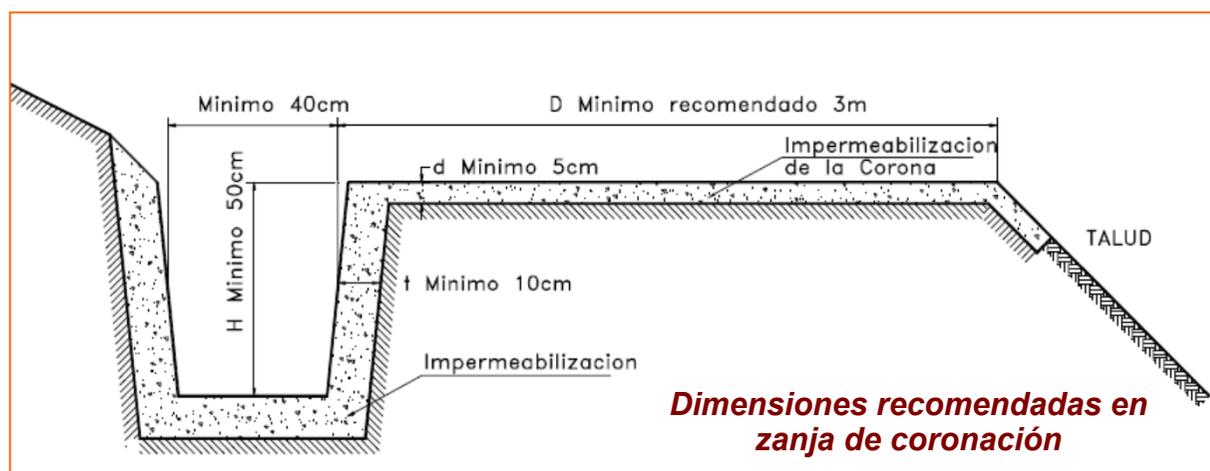
4.8.4.3.) Control de agua superficial y subterránea

MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Canales superficiales para control de escorrentía	<ul style="list-style-type: none"> •Se construyen, generalmente, arriba de la corona del talud •Obra complementaria 	Se deben construir estructuras para la entrega de las aguas y disipación de energía
Drenes de zanja	Muy efectivos para estabilizar deslizamientos poco profundos en suelos saturados subsuperficialmente	Poco efectivos para estabilizar deslizamientos profundos o deslizamientos con nivel freático profundo
Drenes horizontales	Muy efectivos para interceptar y controlar aguas subterráneas relativamente profundas	<ul style="list-style-type: none"> •En ocasiones es difícil interceptar las capas permeables del terreno para conseguir drenarlas •La vida útil de los drenes suele ser corta (colmatación del dren o del propio terreno)
Galerías o túneles de drenaje	Efectivos para estabilizar deslizamientos profundos en formaciones con permeabilidad significativa y aguas subterráneas	Coste muy elevado
Pozos profundos de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> •Útiles en deslizamientos profundos con aguas subterráneas •Efectivos para excavaciones no permanentes 	<ul style="list-style-type: none"> •Coste elevado •Requiere de mantenimiento posterior •Iguales desventajas que drenes horizontales

4.8.4.3.1.) Canales superficiales para control de escorrentía

- El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud, reduciendo la infiltración y evitando la erosión
- El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar la escorrentía tanto del talud como de la cuenca de drenaje arriba del talud, llevando el agua a un sitio seguro lejos del deslizamiento
- Los distintos elementos de drenaje superficial son;
 - Zanjas o cunetas de coronación
 - Canales de drenaje
 - Canales interceptores a mitad de talud
 - Canales colectores y disipadores

•El agua de escorrentía debe en lo posible, desviarse antes de que penetre el área del deslizamiento → **zanjas de coronación** (zanjas interceptoras en la cabeza del talud);

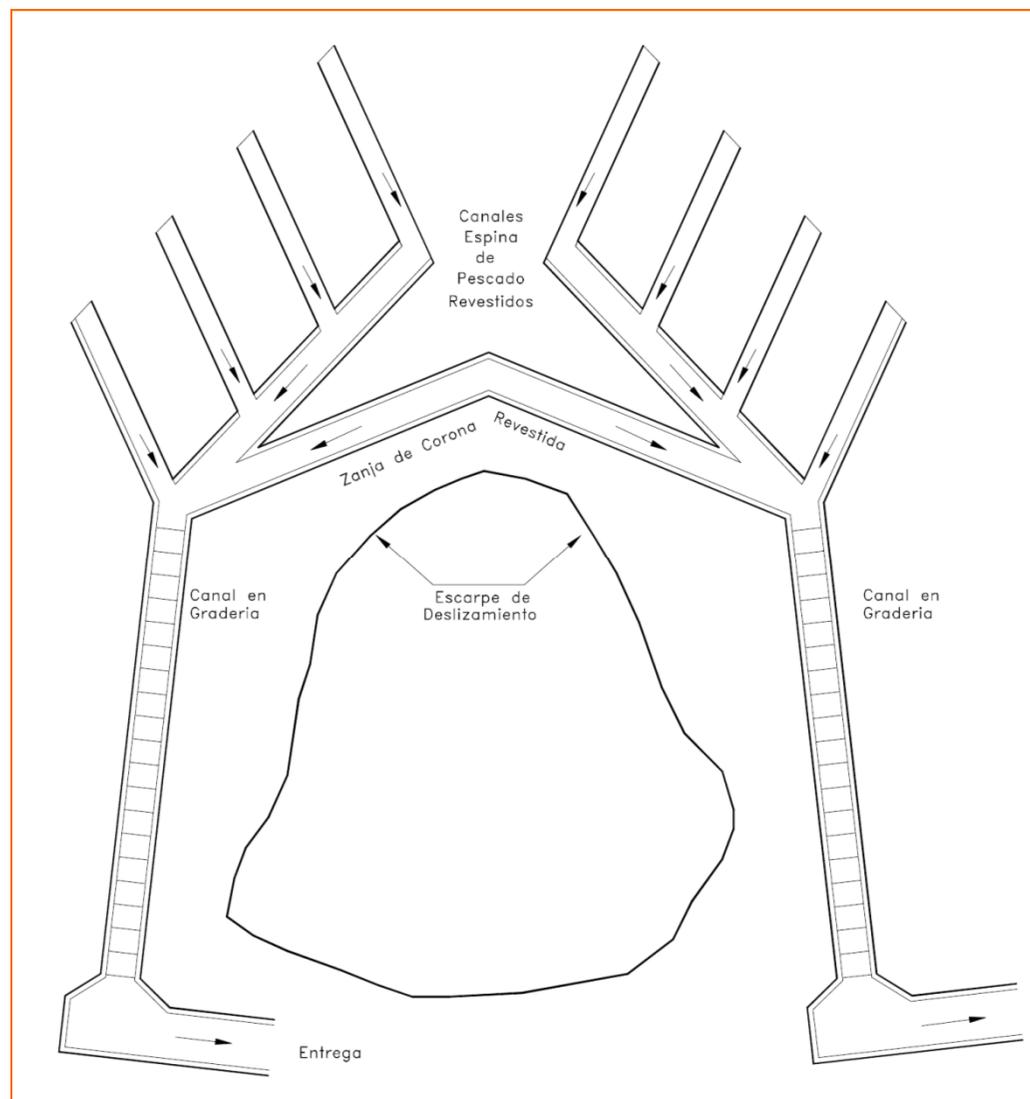


- No deben construirse muy cerca del borde del talud (evitar que se conviertan en guía de un deslizamiento)
- Han de estar impermeabilizadas
- Deben tener pendiente suficiente para garantizar un rápido drenaje del agua captada y evitar la sedimentación (mín. 2%)
- Ha de asegurarse un correcto mantenimiento para garantizar su estanqueidad

4.8.4.3.1.) Canales superficiales para control de escorrentía

CANALES DE DRENAJE

- **Pendiente mínima 2%**
- **Velocidad máxima 4 m/s, mínima 1,3 m/s**
- **Los radios de las curvas no menores de 3 veces el ancho del canal**
- **Se pueden disponer en forma de espina de pez arriba de la cabeza del talud para la recogida de aguas de la cuenca, entregándolas a canales de gradería**



Esquema en planta de canales colectores en espina de pez

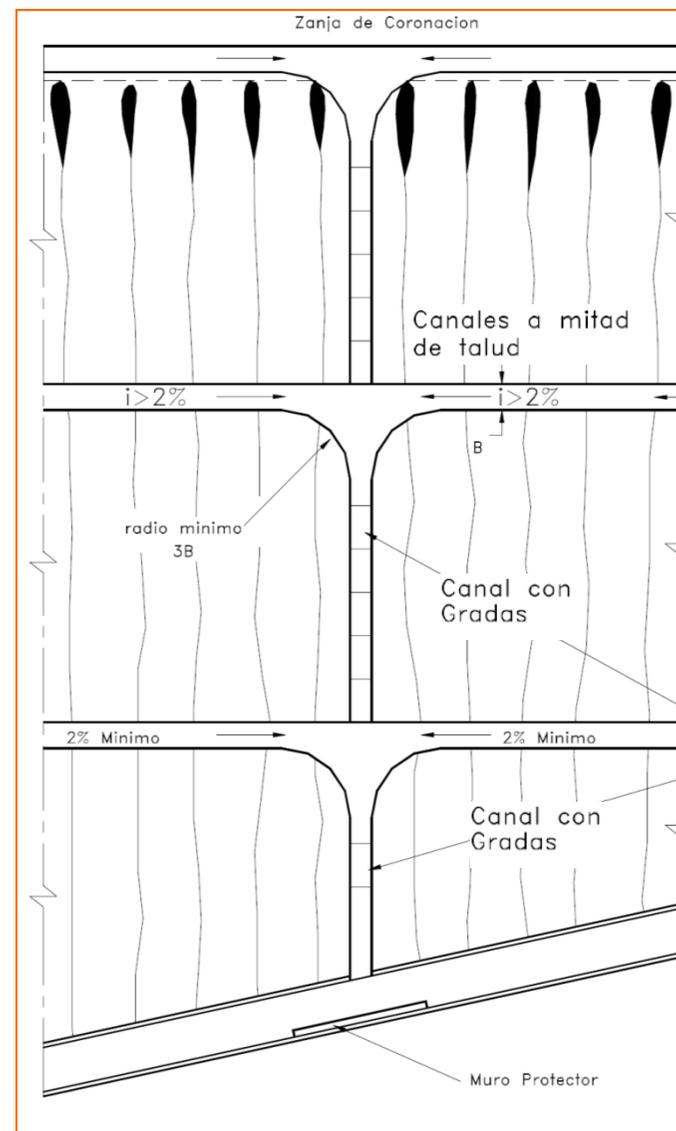
4.8.4.3.1.) Canales superficiales para control de escorrentía

CANALES INTERCEPTORES A MITAD DE TALUD

- *Recomendables en suelos susceptibles a la erosión*
- *Se recomienda construir en todas las bermas intermedias del talud*
- *Deben ser impermeables*
- *Conducen las aguas a canales*
- *Debe tener una pendiente tal que impida la sedimentación de materiales (2%)*



Esquema de entrega de canales interceptores a mitad de talud



4.8.4.3.1.) Canales superficiales para control de escorrentía

CANALES COLECTORES Y DISIPADORES

- *Conducen el agua recolectada a sitio seguro*
- *Existen dos tipos; Canal rápido y el canal en gradería*

•CANAL RÁPIDO

- *Pendiente igual a la del talud*
- *El sistema de cuneta de caces es rápido en ejecución, económico, y los salientes en su fondo disipan la energía*

•CANAL EN GRADERÍA

- *Es el más eficiente para disipar energía*
- *El flujo en el canal es turbulento, debiéndose construir un muro lateral para permitir la salpicadura*



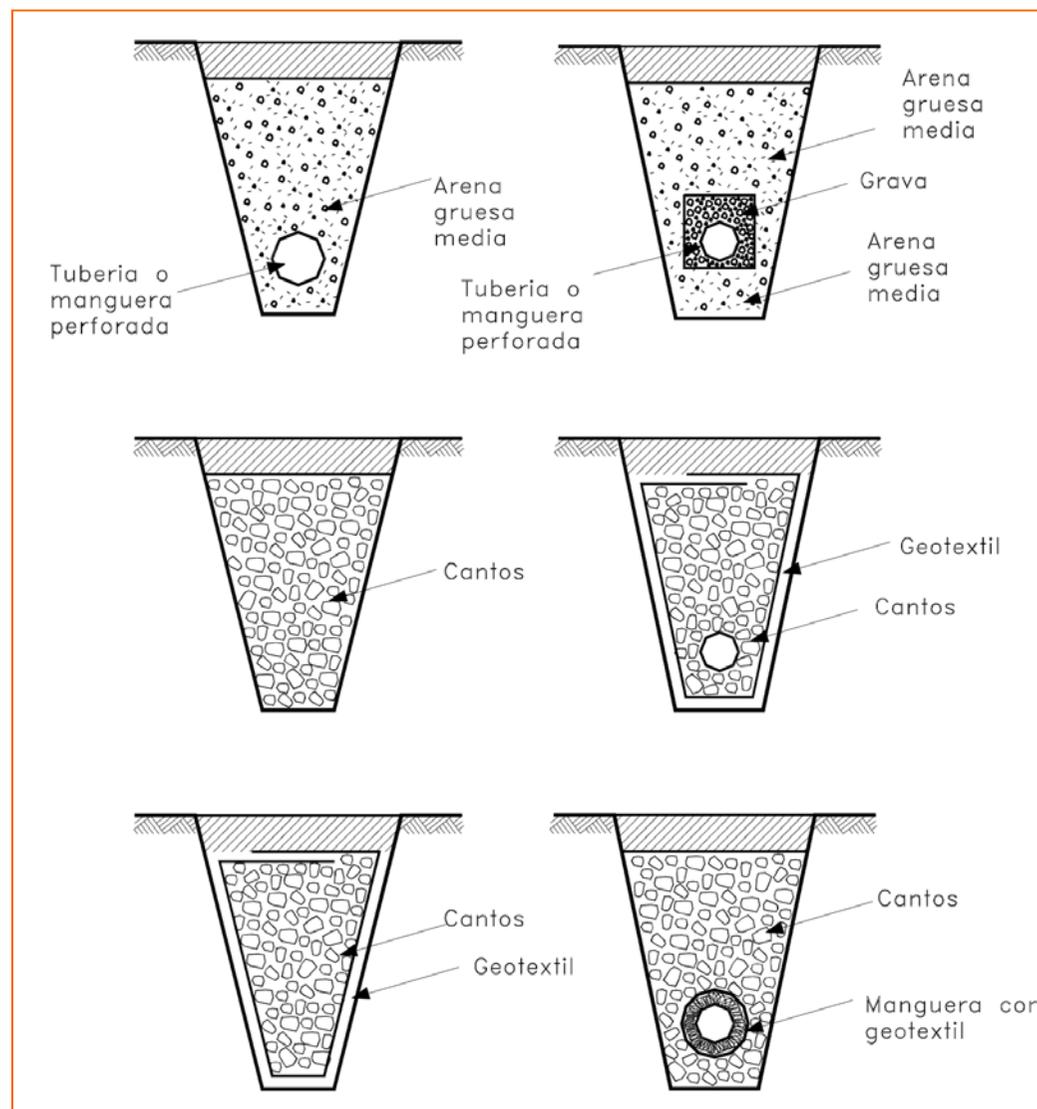
Canal en gradería



Canal rápido mediante caces

4.8.4.3.2.) Drenes de zanja

- El drenaje subterráneo tiene por objeto disminuir las presiones intersticiales o impedir que éstas aumenten
- La cantidad de agua recogida por un sistema de subdrenaje depende de la permeabilidad de los suelos y de los gradientes hidráulicos
- Los drenes en zanja suelen tener una profundidad de 6m, rellenas de material filtrante y elementos de captación y transporte del agua. Estos sistemas pueden presentar las siguientes variantes;
 - Con material de filtro y tubo colector
 - Con material grueso permeable sin tubo (filtro francés)
 - Con geotextil, material grueso y sin tubo colector
 - Con geotextil, material grueso y tubo
 - Tubo colector con capa gruesa de geotextil a su alrededor
 - Dren sintético con geomalla, geotextil y tubo colector



4.8.4.3.2.) Drenes de zanja / Diseño

- Los criterios que debe cumplir un material para ser filtro son;

–CRITERIO DE FILTRACIÓN O PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN INTERNA

- Terzaghi; $D_{15 F} / D_{85 S} \leq 4$, donde (D_{15} es el diámetro de partículas para el 15% de paso en la curva granulométrica, y el subíndice F filtro, y S el suelo natural)

- Geotechnical Engineering Office de Hong Kong determina que se ha de cumplir adicionalmente;

- $D_{15 F} / D_{15 S} < 40$

- $D_{50 F} / D_{50 S} < 25$

- El filtro no debe poseer más del 5% de finos (paso por el tamiz 200)

–CRITERIO DE PERMEABILIDAD O FACILIDAD DE FLUJO (para garantizar un drenaje fácil del agua a través del filtro)

- Terzaghi

- $D_{15 F} / D_{15 S} \geq 4$

- USA

- $D_{15 F} / D_{15 S} \geq 5$

- Geotechnical Engineering Office de Hong Kong recomienda que se ha de cumplir adicionalmente, para evitar la segregación;

- $4 < D_{60 F} / D_{10 F} < 20$

- Tamaño máximo de partícula no debe ser mayor de 75 mm

4.8.4.3.2.) Drenes de zanja

TAMAÑO DE ORIFICIOS DE LA TUBERIA COLECTORA

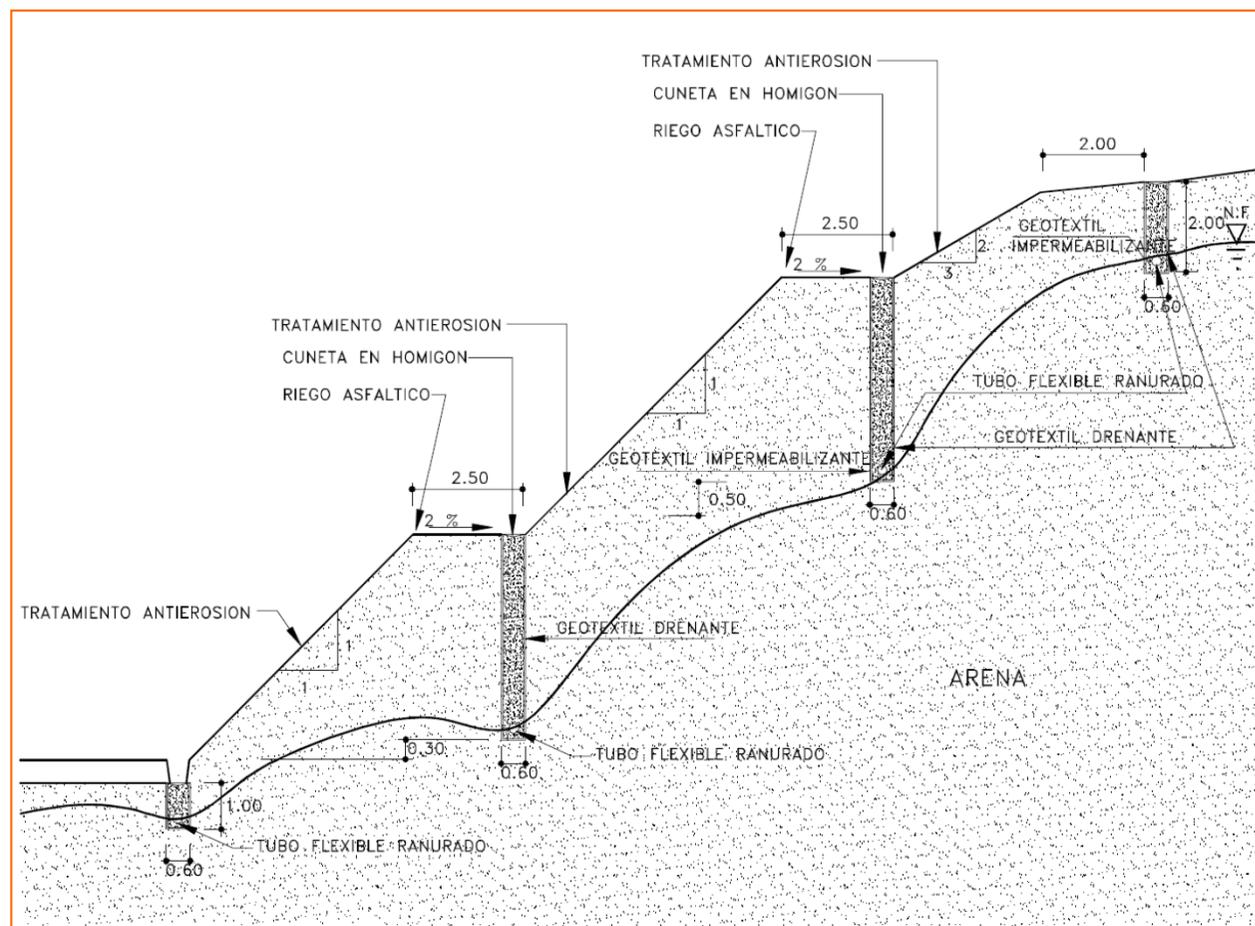
•Para huecos circulares;

$$-D_{15F} / \phi > 1$$

•Para ranuras

$$-D_{15F} / \text{ancho} > 1,2$$

•Para el diseño del espaciamiento, localización en planta, profundidad y ancho de zanja de los filtros debe analizarse la red de flujos de agua en el suelo

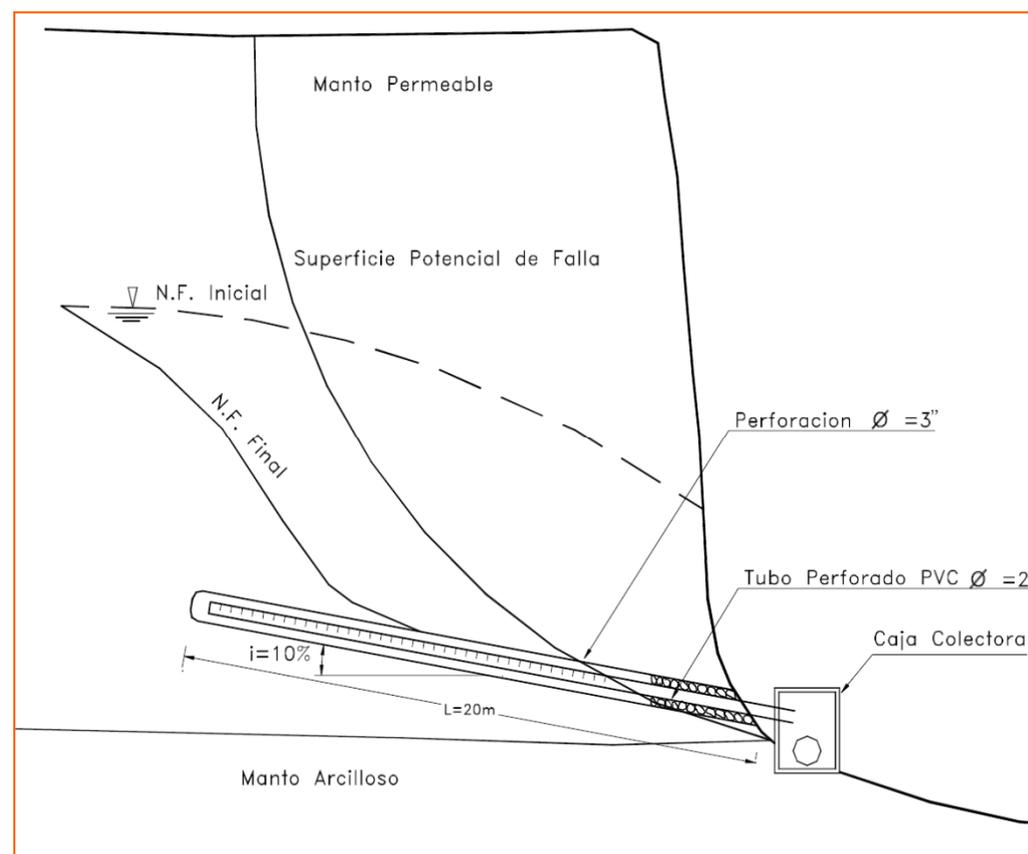


Esquema del efecto de los subdrenes interceptores sobre el Nivel Freático

4.8.4.3.3.) Drenes horizontales

139

- Consiste en una tubería perforada colocada a través de una masa de suelo mediante una perforación profunda subhorizontal (con ligera inclinación $\approx 5\%$), con la cual se busca abatir el Nivel freático hasta un nivel que incremente la estabilidad del talud, esto es, elimine el nivel de agua o la saturación por encima de la superficie potencial de falla
- Los tubos utilizados son metálicos o de PVC de 2" ó 3", con una perforación de 3 a 4"
- La tubería suele ser ranurada, introducida envuelta en un geotextil filtrante que evite el lavado de finos en el suelo y la colmatación del dren
- La longitud varía normalmente entre 10 y 40m



Esquema general de funcionamiento de un dren subhorizontal

4.8.4.3.3.) Drenes horizontales

140

- La pendiente del dren debe ser tal que cuando se profundice, éste no supere las cotas del Nivel Freático, de ser así sería inoperante
- En suelos de alta permeabilidad son muy efectivos (caudales de hasta 100 l/min para longitudes de dren de 40m) , siendo menor ésta en el caso de suelos arcillosos (caudales de 1 a 10 l/min)
- Los drenes exigen mantenimiento para prolongar su vida útil, consistente en; limpieza de la tubería e inyección de agua a presión para limpiar los orificios de drenaje



- El diseño de la red de drenaje exige un exhaustivo estudio geotécnico e hidrogeológico para determinar las características del régimen de aguas subterráneas

- Kozeny propone;

$$S = 2h\sqrt{k/q}$$

donde; S es la separación entre drenes

h la altura del nivel freático por encima del nivel de los drenes

k permeabilidad del suelo

q caudal unitario del subdren

- No es muy fiable este método de cálculo por si sólo, se debe apoyar en experiencias pasadas

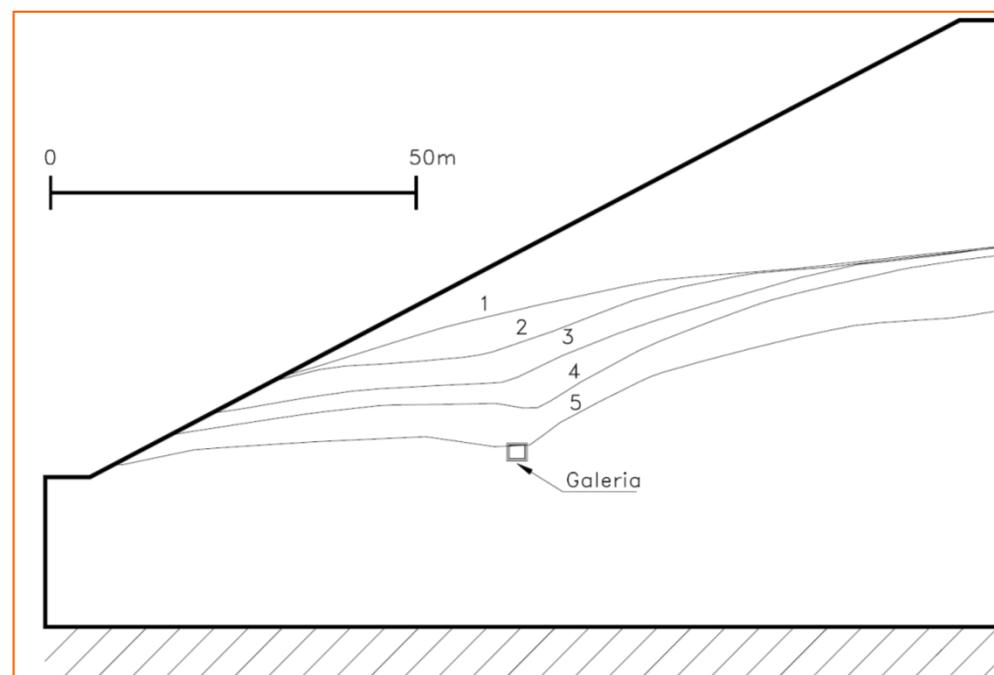
4.8.4.3.4.) Galería de drenaje

141

- Es un túnel cuyo objeto es el de disminuir al presión de poros y controlar las corrientes profundas de agua subterránea en un talud
- Las dimensiones y características son las definidas por la propia estabilidad del túnel

•Su aplicación en; taludes rocosos y para estabilización de laderas en la ejecución de proyectos de presas

•En el caso de ejecutarse en rocas meteorizables, se han de revestir mediante gunita, disponiendo entre la roca y el hormigón de una lámina de polietileno alveolar (huevera, tipo Delta PT) que permita la conducción del agua. Se reforzará el sistema de drenado con mechinales



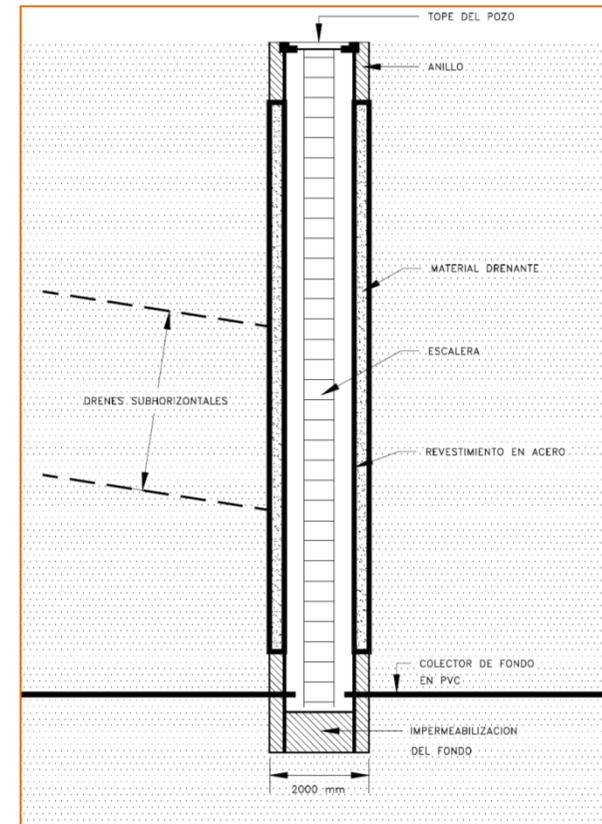
- Si el buzamiento de estratos es horizontal, es posible que el agua no penetre en la galería, debiendo ejecutar drenes subhorizontales para su captación. Cuando la permeabilidad vertical es elevada y el buzamiento es inclinado el agua fluye con facilidad hacia la galería
- Normalmente la galería drena por gravedad

4.8.4.3.5.) Red de drenaje mediante pozos

- Las redes de drenaje mediante pozos consiste en una serie de pozos, cada uno de ellos con una red radial de drenes subhorizontales y conectados todos los pozos hasta un extremo de salida
- Su aplicación; drenaje de laderas donde los acuíferos están confinados por materiales impermeables
- Los pozos verticales están revestidos de hormigón prefabricado o chapa galvanizada de 4", revistiéndose el espacio anular con material de filtro, variando su diámetro exterior entre 1,5 a 2,5m, con profundidades de hasta 50m.
- El pozo vertical se embebe en un tapón de 1 a 1,5m de hormigón, para asegurar su estanqueidad y evitar la inestabilidad del fondo debida a la subpresión



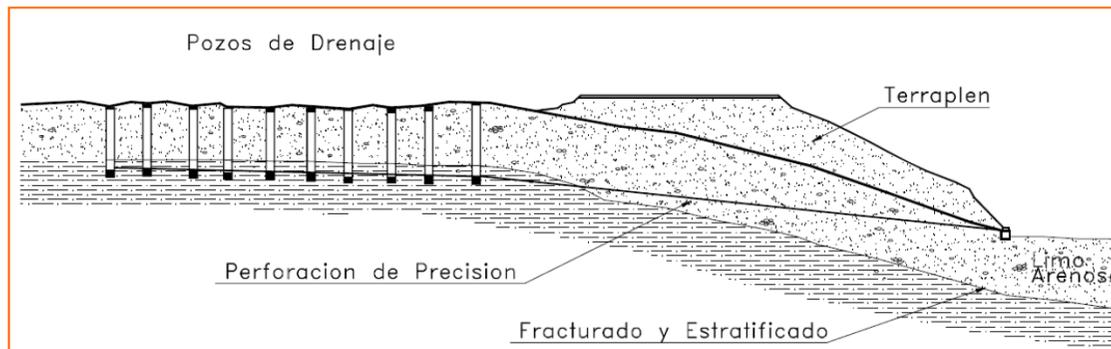
Elementos exteriores del equipo de perforación de subdrenes



Esquema pozo drenante

4.8.4.3.5.) Red de drenaje mediante pozos

- La red de drenes, generalmente, son de PVC ranurado de 2", con longitudes medias no superiores a 12m
- La conexión entre pozos se realiza mediante tubo ciego de PVC de 3 a 4"
- La red se dimensiona para drenar por gravedad
- Los espaciamientos entre pozos; 3 a 15 m



Esquema de red de drenaje mediante pozos



Cilindro metálico en el que se ubica el equipo de perforación para la ejecución de los subdrenes interiores del pozo

- **Cimentaciones**



4.8.4.4.) Estructuras de contención

MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Contrapeso de roca o suelo en la base del deslizamiento	•Efectivos en deslizamientos rotacionales no muy grandes	Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno
Muros de contención	Útiles para estabilizar masas pequeñas	•Se requiere una buena calidad de cimentación •Son poco efectivos en taludes de gran altura
Pilotes	Efectivos en movimientos poco profundos, en los cuales existe suelo debajo de la superficie de falla que sea competente para permitir el empotramiento de éstos	•No son efectivos en deslizamientos profundos •Poco efectivos en deslizamientos rotacionales
Anclajes	Efectivos en roca, especialmente cuando es estratificada	•Puede ser muy compleja su ejecución •Pueden llegar a ser muy caros
Pantallas ancladas	•Útiles como estructuras de contención de masas de tamaño pequeño a mediano	•Soluciones caras •En ocasiones, dudosa efectividad cuando hay aguas subterráneas

•En grandes deslizamientos, y en situaciones de movimientos complejos, se requiere de la combinación de diversos sistemas para generar estabilidad en la ladera