

13.1. Almacenamiento de materiales de desecho en minería

Las actividades mineras producen materiales de desecho que plantean el problema de su almacenamiento en condiciones de *estabilidad, seguridad e integración en el entorno*.

Los materiales a almacenar proceden, normalmente, de la labores mineras siguientes:

Minería de interior	→	labores de preparación.
Operaciones a cielo abierto	→	estériles de la cobertera.
Ambas (Interior y exterior)	→	ganga, menas no útiles, restos de leyes muy bajas.

Según el tipo de residuo obtenido (grueso o fino), la forma de presentación (disgregado, pulpa, etc.), y las estructuras realizadas en el proceso de almacenamiento, se distinguen dos tipos de almacenamiento minero, escombreras y balsas o presas de residuos.

Estas estructuras son necesarias desde un punto de vista minero, con mayor o menor volumen de terrenos ocupados. La explotación de un yacimiento produce un concentrado en la proporción de un 5%, 15%, 30%, etc., y la generación de residuos mineros (estériles del proceso) en la proporción inversa, 70%, 85%, etc., según la ley y la tecnología disponible para su aprovechamiento.

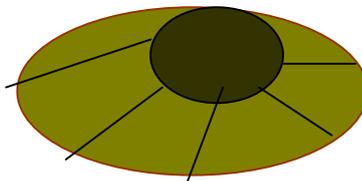
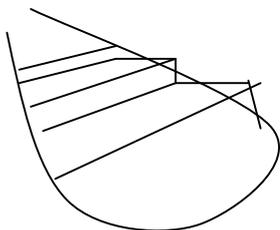
Están sometidas en su diseño y explotación a multitud de factores de tipo técnicos, geológico, medio ambientales, legales, etc., y correspondiendo el control de estas estructuras a la mina de forma general hasta que se finaliza el proceso completo minero y se autoriza y finaliza el plan de cierre minero y se concede el cierre legal de la mina.

A) Escombreras:

R.D. 975/2009: Escombrera: “Una instalación de residuos mineros construida para el depósito de residuos mineros sólidos en superficie”¹.

Almacenamiento de fragmentos gruesos y medianos, en forma de montón, (adaptado normalmente a la disponibilidad del terreno) y que no presentan por si mismos riesgos de desplazamientos. Se debe mantener en su deposición la pendiente máxima de estabilidad de los materiales durante su colocación para evitar desplazamientos incontrolados y suavizar esta pendiente cuando se abandona el almacenamiento definitivamente o este se realiza para un tiempo prolongado.

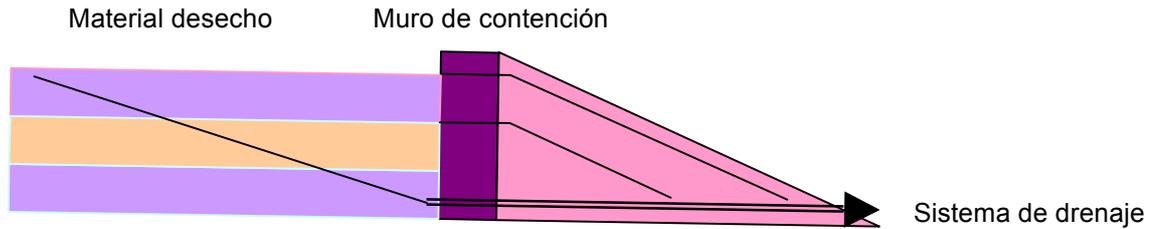
No necesita, normalmente, estructuras de soporte o resistentes con la excepción de aquellos elementos de limpieza y desaguado necesarios. Puede ser necesario, a veces, estructuras de cabeza para aumentar la capacidad de almacenamiento.



B) Presas de residuos:

Son necesarias para el almacenamiento de arenas y lodos que tienen un comportamiento plástico o semifluido. Los materiales no son estables en montones si no existe un medio de contención. (Rechazos de las plantas de tratamiento y concentración). Exigen estructuras o sistemas de vertido controlado para asegurar la estabilidad y el drenaje y responden al concepto del esquema siguiente.

¹ No se considera instalación cuando se rellenan huecos mineros, resultado de la explotación, aunque si estarán sujetos estos trabajos a las condiciones de seguridad y medidas para rehabilitar.



R.D.975/2009: Balsa: “una instalación de residuos mineros natural o construida para la eliminación de residuos mineros de grano fino junto con cantidades diversas de agua libre, resultantes del tratamiento y beneficio de recursos minerales y del aclarado y reciclado del agua usada para dicho tratamiento de beneficio”.

Presa: “una estructura construida y diseñada para contener agua o residuos mineros en una balsa”.

13.1.1. Estimación del volumen necesario

En una explotación de minería se obtiene una referencia mediante la expresión:

$$V_E = (V_{lp} + V_{trat}) \times C_s \times C_{fa}$$

- V_E = Volumen del estéril en unidades adecuadas.
- V_{lp} = Volumen del estéril resultante de las labores de preparación.
- V_{trat} = Volumen de los estériles, consecuencia de los procesos mineralúrgicos de concentración.
- C_s = Coeficiente de seguridad de tipo técnico, estima las desviaciones posibles.
- C_{fa} = Coeficiente de seguridad por ampliaciones o modificaciones de la producción (estimación holgada en el tiempo, años).

El volumen correspondiente a los tratamientos mineralúrgicos se obtiene de las leyes del mineral y de las características de la mena, se da una fórmula aproximada para estimación en base a la terminología mineralúrgica del proceso. La estimación debe considerar periodos de tiempo largos, varios años, según las previsiones mineras.

Información disponible del proceso:

- A: Toneladas de todo-uno tratadas (t/día).
- a: Ley del mineral en %, mena principal.
- b: Ley del mineral en %, segunda mena. c: tercera mena, etc.
- g: 100-a-b; ley de la ganga (%).
- R_a, R_b : Rendimiento ponderal en la mena a, b.
- B_a : Concentrado obtenido, producto principal (t/día).
- b_a : Ley del concentrado principal (%).
- B_b : Segundo concentrado (t/día).
- b_b : Ley del subproducto (%).
- p_a : Densidad del concentrado (t/m^3).
- p_b : Densidad del subproducto (t/m^3).
- p_e : Densidad del estéril (t/m^3).
- C_i : Coeficientes de esponjamiento correspondientes a la sustancia (i).
- C_s, C_{fa} : Ya definidos.

$$V_E = A \cdot (1 - R_a - R_b) \cdot (1/p_e) \cdot C_e \cdot C_s \cdot C_{fa} \cdot C_{asentamiento}$$

13.1.2. Selección del emplazamiento

El emplazamiento debe ser lo más próximo posible a la explotación minera, se movilizan muchas toneladas de material estéril, no útil económicamente, pero que debe almacenarse en condiciones adecuadas de seguridad y disponibilidad futura según el tipo de escombrera². Todo el gasto realizado en el tratamiento de estériles, aunque necesario, es un coste directo para la explotación de incidencia relevante.

- *Coste del terreno.*
- *Soportar el peso.* Capacidad portante del terreno, el suelo debe soportar, sin desplazamiento por la existencia de capas plásticas, las cargas y volúmenes a depositar.
- *Soportar el coste.* Costes de transporte y vertido, este parámetro puede condicionar la viabilidad económica del proyecto. Es un factor limitante y se debe minimizar.
- *Garantizar la seguridad.* Garantizar el drenaje, por motivos técnicos. Es un factor limitante, puede causar la ruina de la estructura.
- Garantizar el drenaje, por motivos ecológicos de no contaminación de acuíferos.
- *Garantizar la legalidad.* Impacto ambiental, sobre el hábitat (entorno visual, especies protegidas, etc.). Real Decreto Legislativo 1302/1986 de evaluación de impacto ambiental y Real Decreto Ley 9/2000. Anexo I y II. (Instalaciones de eliminación de residuos y depósitos de lodos).
- *Estudio del terreno.* Conocimiento mínimo de los parámetros: cohesión, ángulo de rozamiento interno, peso específico aparente (seco y saturado).
- *Tipo de escombrera.* El equipo minero de transporte y vertido condiciona el tipo de escombrera. Si el transporte es en forma de pulpas, serán necesarias balsas de decantación, desecado, y en general sistemas e instalaciones que durante un tiempo garanticen la eliminación adecuada del agua para eliminar los empujes de tipo hidráulico. Si el sistema de transporte es en forma sólida, hay que considerar el polvo, la segregación en el vertido, etc.
- La técnica de evaluación más sencilla es el **“Análisis de decisiones con objetivos múltiples”**.

Objetivo	Alternativa	a_1, a_2, \dots	a_j	a_m	Peso relativo
Costes		p_{11}			w_1
Superficie		p_{21}			
Obras		p_{31}	p_{3i}		w_3
Vistas		p_{41}			
Revegetación		p_{51}		p_{5m}	
Contaminación		p_{61}			
Legalidad		p_{71}			w_n
Otros, especificar		p_{81}			
Utilidad			$U_i = \sum p_{ij} \cdot w_j$		$\sum w_j = 1$

El método ordena de más a menos las diferentes soluciones. La más económica es aquella que implica un mínimo transporte y utiliza áreas abandonadas definitivamente de mina, pero esto no siempre se conoce ni es posible su realización por interferencia en las operaciones futuras mineras que en principio pueden no ser conocidas.

² Leyes de estériles no recuperables hoy pueden ser si recuperables en el futuro, ejemplo de escombreras de Cu o de carbón antiguas que hoy se explotan como menas de Cu o carbón.

13.2. Escombreras

Tamaño

El tamaño se corresponde con el *volumen de estéril* que es preciso mover para la extracción del mineral. Las ratios o relaciones entre la roca estéril y el mineral, expresados en m^3/t o t/t , son en la mayoría de las explotaciones metálicas y energéticas muy superiores a la unidad.

El ratio de estériles para una ley del 10% representa 90 unidades frente a 10 útiles, luego el ratio será $90/10 = 9 t/t$ y para una densidad media del estéril de 2,5 y un coeficiente de esponjamiento de 1,6, el vertido inicial tiene un ratio en volumen, al menos, de $(90/2,5) \cdot 1,6/10 = 5,8 m^3/t$.

Tipo, según ubicación:

- **Interior**, si se depositan dentro de los espacios liberados para la extracción del mineral.
- **Exterior**, otra ubicación, y que puede ser:
 - En vaguada.
 - En ladera.
 - En divisoria.
 - En llanura.
- **Combinaciones de ambas.**

Tipo, según construcción:

- *Vertido libre*. Los materiales tiende a adquirir la pendiente de equilibrio pero no existe control técnico sobre el sistema.
- *Vertido por fases adosadas*. Tiene el riesgo de movimientos por desprendimiento. Las superficies de contacto de las diferentes fases son potenciales áreas de desplazamiento y los periodos sin actividad producen una superficie menos segura.
- *Vertido por fases superpuestas ascendentes*. Es más segura a las roturas y de mayor capacidad por compactación, exige una planificación del área a utilizar.
- *Dique de retención en pie*. Exige de partida una estructura de contención y una definición del área utilizable.

Detalles de construcción y tipos (IGME)

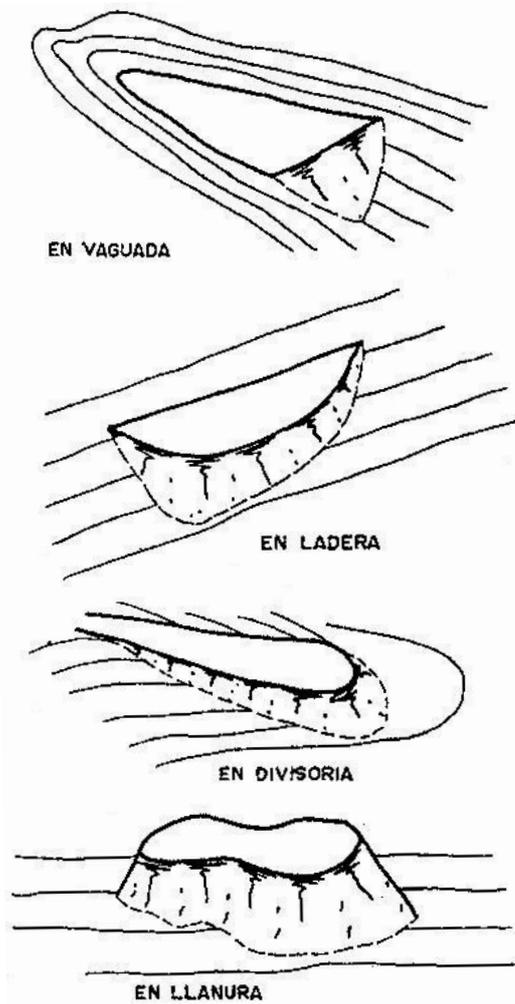


Figura 13.3. Tipos de escombreras exteriores.

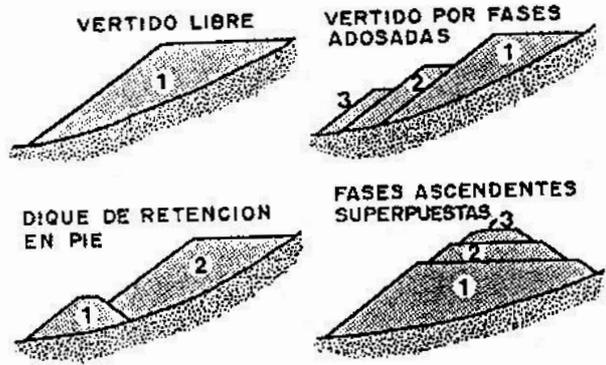


Figura 13.1. Tipos de escombreras según la secuencia de construcción.

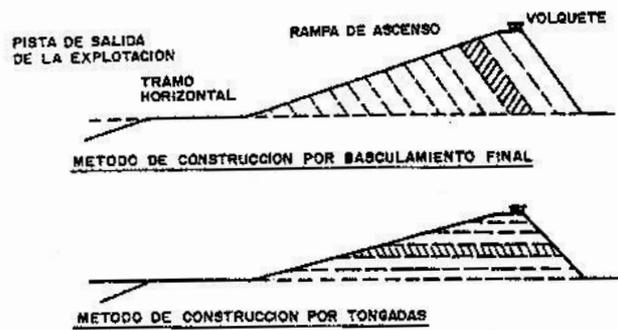


Figura 13.2. Métodos de construcción por basculamiento final y por tongadas.

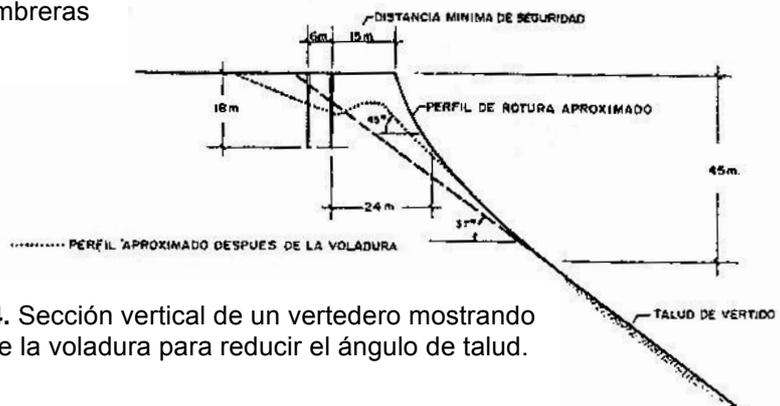


Figura 13.4. Sección vertical de un vertedero mostrando el diseño de la voladura para reducir el ángulo de talud.

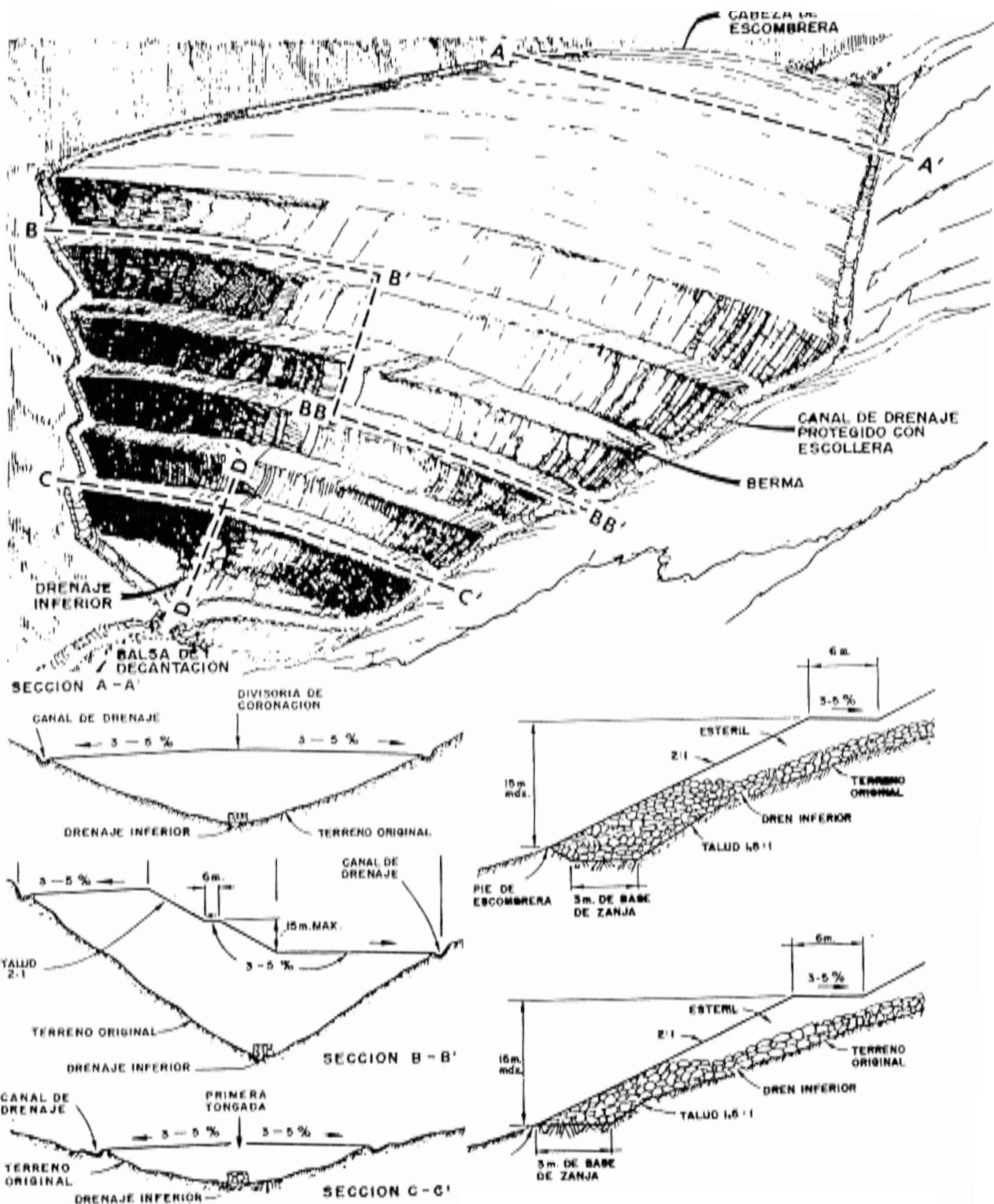


Figura 13.5. Detalles constructivos de una escombrera de vaguada.



Figura 3.12. Escombrera de vaguada construida por tongadas y con núcleo central de drenaje. (Robins, J. D.)

2. Para aumentar la eficiencia del drenaje se recomienda, en ciertos casos, que el dique de base se construya con bloques resistentes de arenisca. Pero cuando los ensayos de los suelos de base demuestran que la capacidad portante es suficiente, puede suprimirse el dique de contención.
3. En escombreras de más de $0,8 \text{ Mm}^3$ de capacidad, el dique de contención puede complementarse con con-

trafuertes o estribos para reforzar la estabilidad de la masa de material vertido.

4. En todos los casos, además de los drenajes considerados como principales, se construirán otros secundarios o laterales, de acuerdo con las recomendaciones de la Tabla 3.IV:

TIPO DE ESTERIL	CAPACIDAD DE LA ESCOMBRERA	
	< $0,8 \text{ Mm}^3$	> $0,8 \text{ Mm}^3$
Pizarras o similares	5 m x 2,5 m	5 m x 5 m
Areniscas o similares	2,5 m x 1,2 m	5 m x 2,5 m

La granulometría del material empleado en los drenajes debe ser tal que contenga menos del 10 % de bloques inferiores a 30 cm y no existir tamaños superiores al 25 % de la sección del drenaje.

Tanto los drenes principales como los laterales se diseñarán de acuerdo con la valoración de los factores geológicos y topográficos característicos del lugar.

5. El procedimiento para la colocación del estéril es el siguiente:
 - a) Si el 65 % o más del material es arenisca puede ser vertido sin compactación, pero se nivelará según la cota del banco al finalizar el relevo de trabajo.
 - b) Si el material contiene menos del 65 % de arenisca puede ser vertido en tongadas de 1,2 m, compactándolo a continuación.
 - c) En terrenos abruptos y de fuerte pendiente y siendo más del 90 % arenisca, los sistemas de drenaje se construirán basándose en la segregación natural que se produce en el vertido.
6. Cuando las escombreras son construidas por gravedad se recomienda compaginar el vertido en avance con el lateral, ya que de esta forma se evita la formación de planos diferenciados que pueden servir como posibles discontinuidades de deslizamiento o rotura.
7. El material de relleno se dispondrá formando bancales con el fin de incrementar la estabilidad. Se recomiendan las siguientes dimensiones finales:
 - Altura de banco: 15 m máximo.
 - Anchura de berma: 6 m máximo.
 - Pendiente de desagüe hacia el interior de las bermas: 3-5%.
 - Pendientes laterales de coronación: 3-5 %.
 - Superficie de estabilización: Revegetación coexistente con la construcción.
8. Todas las superficies de drenaje dispondrán de las pendientes adecuadas hacia ambos lados de la va-

Figura 13.6. Escombrera de vaguada construida por tongadas y con núcleo central de drenaje. (Robins, J.D).

Control. La deposición de materiales estériles procedentes de la minería Límite de Asentamiento de Vertederos.

<i>Velocidad de asentamiento</i>	<i>Acción requerida</i>
0 - 3 cm/h	Lectura de extensómetros cada 2 horas
> 3 cm/h	Lectura de ext. cada hora
> 5 cm/h	Cese del vertido

13.2.1. Estabilidad de escombreras: normas generales y precauciones

- a) Retirada de la vegetación. Su descomposición es una zona de rotura probable.
- b) Agua estancada. Drenaje antes de iniciar el vertido.
- c) Surgencias de agua. Captación o drenaje para:
 - Evitar presiones intersticiales.
 - Conservar fuentes y manantiales.
- d) Socavones de mina, precaución.
- e) Aguas de escorrentía, preparación y drenaje.

Vertido de estériles

- *Por basculamiento final;* el material tiene una segregación natural que favorece el drenaje. Los materiales de mayor tamaño van al fondo.
- *Por tongadas;* se aumenta la resistencia al corte y la capacidad del vertedero.

Recomendaciones en la construcción de escombreras

En las escombreras de llanura construidas en retroceso y vertido por tongadas, las normas a observar, recomendaciones del IGME, son:

- Altura de banco menor de 5 m.
- Anchura de berma: No inferior a 5 m.
- Talud general: Menor de 26° (2:1).
- Altura máxima de *escombrera*: 30 m si la humedad del material supera el 14%.

En las escombreras de ladera se recomiendan los siguientes parámetros de diseño:

- Talud general: Menor de 22° (2,5:1).
- Altura máxima de *escombrera*: 15 m.

En ambos casos se cuidará el sistema de drenaje mediante escollera u otros materiales en las zonas de fuertes pendientes con el objeto de reducir la velocidad de circulación del agua y evitar el arrastre de materiales.

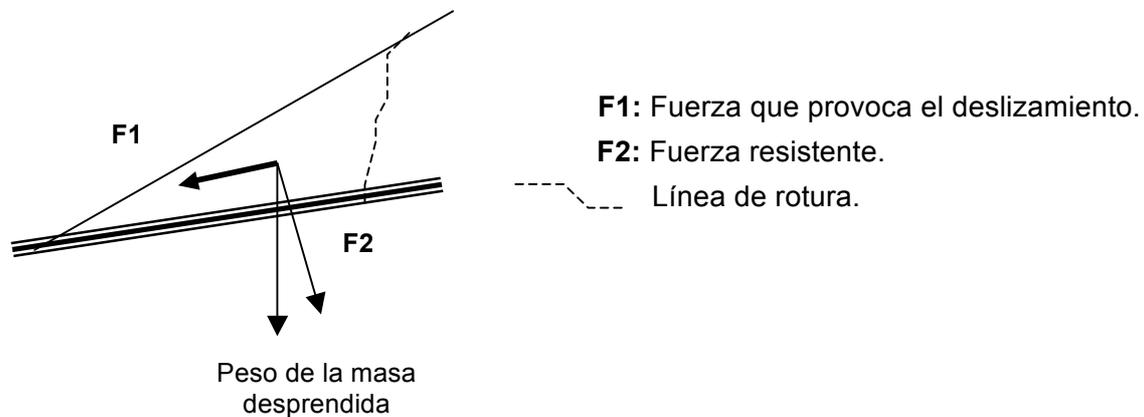
En la base del vertedero se levantará un dique de escollera, debidamente compactado, complementándolo con una tubería de drenaje del lado de aguas arriba.

Estabilidad de escombreras

Los materiales de *escombrera* son inestables en el momento del vertido y generan, con el paso del tiempo, fenómenos de consolidación. Los fenómenos de inestabilidad tienden a romper y segregar fracciones de la *escombrera*, por pérdida de estabilidad, generado roturas del tipo:

Circular: Cuando la masa desprendida tiene una sección circular interna de los materiales y la forma externa del macizo desprendido corresponde a la que tiene la escombrera. Se calcula el momento de vuelco respecto al centro de la circunferencia imaginaria prevista.

Cuña: Tiene forma de cuña y es característico de aquellos casos donde la base de apoyo no es suficientemente resistente para el peso de los estériles o constituye una línea de rotura. Se calcula la distribución de las fuerzas en la dirección de la línea de rotura y se compara con la resistencia de los materiales al deslizamiento.



Mixta: Combinación de las anteriores cuando la circunferencia corta a la base de la escombrera o a la línea posible e rotura.

Existe diversos métodos de cálculo de la estabilidad pero en su mayoría el fundamento del sistema compara las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de materiales a través de una hipotética superficie de rotura y las fuerzas resistentes estabilizadoras del sistema planteado.

Es importante indicar que la existencia de zonas de debilidad, grietas, capas inclinadas con zonas plásticas en la dirección del movimiento, estratos con zonas de arcillas plásticas, etc., con masas de tamaños críticos constituyen una fuente posible de línea de rotura.

13.2.2. Abandono de escombreras

- Cálculo de la estabilidad. Métodos de cálculo³. *Manual para el Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de residuos Mineros, 1986*; IGTE. Esta deberá ser en todo caso inferior al ángulo de rozamiento interno de los estériles, debidamente suavizado y aplicando técnicas de estabilización forestales, mecánicas, técnicas de control, etc.
- Acondicionamiento para el abandono. Métodos de estabilización.
- Previsión de incidentes, vigilancia. Las escombreras de mina de carbón tienen problemas de incendio (autoignición)⁴. Este efecto se puede producir cuando la humedad es muy baja o nula, se producen grietas en el macizo y circula el aire por el interior a la vez que se acumula calor por irradiación u otros efectos produciendo un punto caliente de autoignición.
- Reutilización de los estériles: rellenos, carreteras, briquetas, etc.
- Acondicionamiento de acuerdo con el entorno. Revegetación.

Legislación: Ley de Minas; R.D.L. 1302/1986 de evaluación de impacto ambiental; R.D.L. 9/2000 de actualización del anterior; Legislación Comunidad Autónoma; Ordenanzas Municipales; etc.

En el esquema siguiente se ofrecen algunas técnicas de estabilización de escombreras para su abandono definitivo indicando que siempre será necesario un cierto control del movimiento de la escombrera hasta que se asegure la estabilidad en el tiempo.

³ Se utilizan las técnicas de estabilidad de taludes en su concepción simplificada como reducción del ángulo, sistemas naturales de estabilidad, etc.

⁴ Autoignición de las tablas de Daimiel, 2009.

Las medidas corresponden a los grupos siguientes:

- a) Técnicas para mejorar la estabilidad del conjunto. Se basa, normalmente, en disminuir la pendiente media de tal forma que sea claramente inferior al ángulo de estabilidad del terreno. Si esto no es posible por cercanía de estructuras se debe disponer muros de contención de tal forma que la pendiente media se asegure para la parte superior del muro. Técnicas de micropilotes puede ser necesario si otros métodos no aseguran la estabilidad o por presencia de zonas próximas que impiden otras técnicas como la disminución de la pendiente.
- b) Técnicas de drenaje. Se debe asegurar la salida del agua mediante técnicas de drenaje, independiente de su procedencia, surgencias, de lluvia, escorrentías, etc.
- c) Técnicas especiales de estabilización. Si es necesario, para evitar movimientos del terreno, se pueden utilizar técnicas reconocidas de estabilización de obras civiles. Micropilotes, muros de contención, pilotes, batches, etc.
- d) Técnicas de revegetación. Estas deben estar acordes con el entorno y siempre son un procedimiento de estabilización deseable.

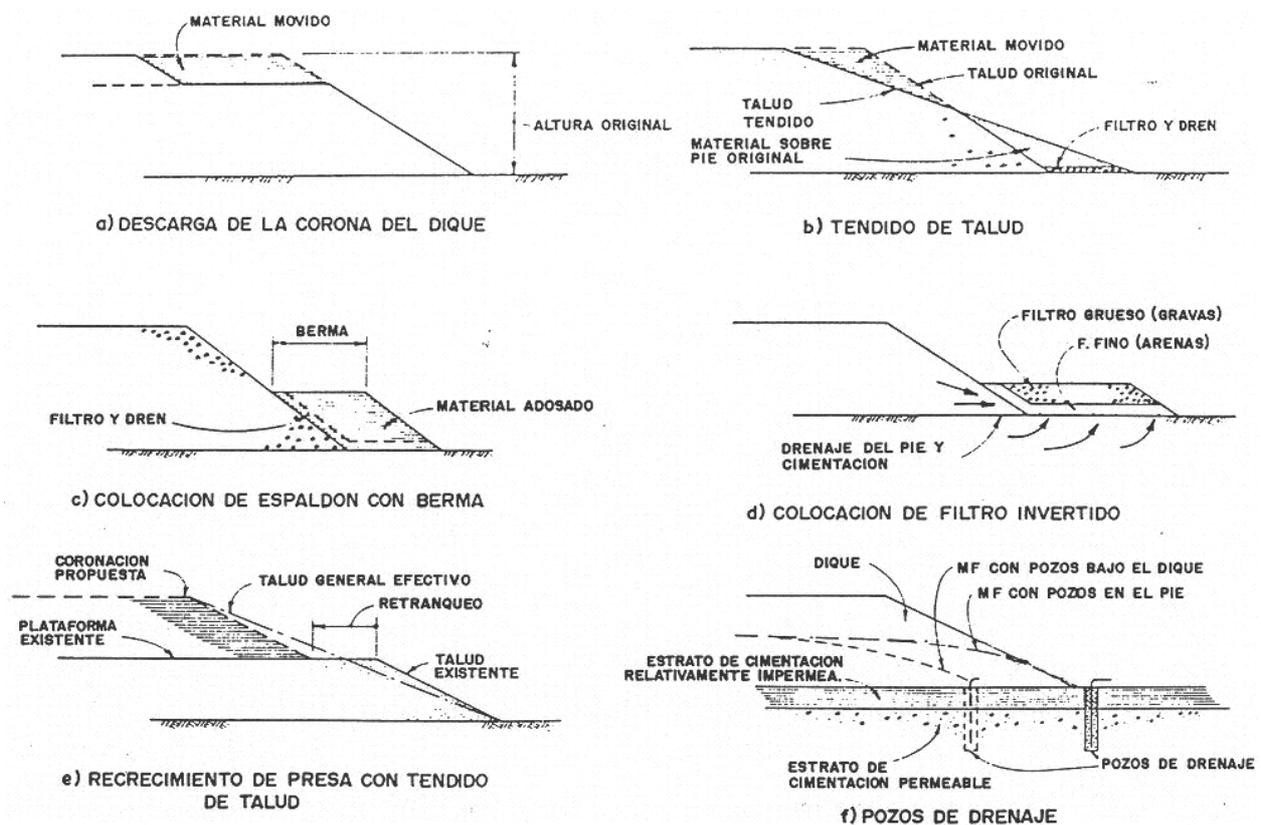


Figura 13.7. Medidas correctoras para mejorar la estabilidad de los diques en las presas de residuos. (CANMET, 1977).

13.3. Presas de residuos

R.D.975/2009: Balsa: “una instalación de residuos mineros natural o construida para la eliminación de residuos mineros de grano fino junto con cantidades diversas de agua libre, resultantes del tratamiento y beneficio de recursos minerales y del aclarado y reciclado del agua usada para dicho tratamiento de beneficio”.

Presa: “una estructura construida y diseñada para contener agua o residuos mineros en una balsa”.

Se utilizan para almacenar los estériles sólidos y retener temporalmente los efluentes líquidos procedentes de las plantas de tratamiento.

Pueden ser necesarios periodos largos de almacenamiento del líquido, hasta que se degraden los componentes tóxicos o se evapore el agua.

Características principales

- Almacenan sólidos y líquidos.
- Los residuos, si es posible, se utilizan como material de construcción de la presa.
- Se construyen por etapas, según el desarrollo de las operaciones. Hay que adaptar las inversiones al ritmo de explotación.
- Se modifican y adaptan según las modificaciones del proceso
- Llegan a representar un 20% del coste de operación del proceso minero. Su ubicación es un coste determinante en el estudio de viabilidad.
- Los lodos se transportan de forma hidráulica, con concentraciones entre el 15% y el 60% en peso.
- Exigencias de seguridad. Evitación de accidentes.
- Exigencia de protección ambiental. Contaminación de acuíferos.

Factores para su ubicación

- *Técnicos:* topográficos, dimensiones, geología, permeabilidad, tipo de lodos, distancia, etc.
- *Económicos:* viabilidad, costes de operación.
- *Legales:* implantación, restauración, medio ambiente, contaminación de acuíferos, permisos y autorizaciones, etc.

Métodos de construcción

- *Escollera:* de uso general; costoso.
El material de escollera está formado por materiales de tamaño comprendido entre 10 cm y 100 cm aproximadamente.
- *Aguas arriba:* 40% al 60% de sólidos.
Es la más económica de construcción. Menor volumen de materiales para la realización de la presa.
- *Aguas abajo:* método técnico más seguro
- *Centrada:* arenas o limos de baja plasticidad.
- *Método de descarga espesada:* descarga de lodos con 55%-65% de concentración de sólidos y descargarlos en un punto o en línea. Con taludes entre el 2% y el 8%.
Se eliminan los costes de construcción del muro, pero se incurre en costes de bombeo y espesado. No se elimina totalmente la necesidad de presas de decantación y/o evaporación.
- *Deposición en huecos mineros:* disponer de los huecos y que estos sean utilizables, (estables, efluentes, contaminación, etc.).

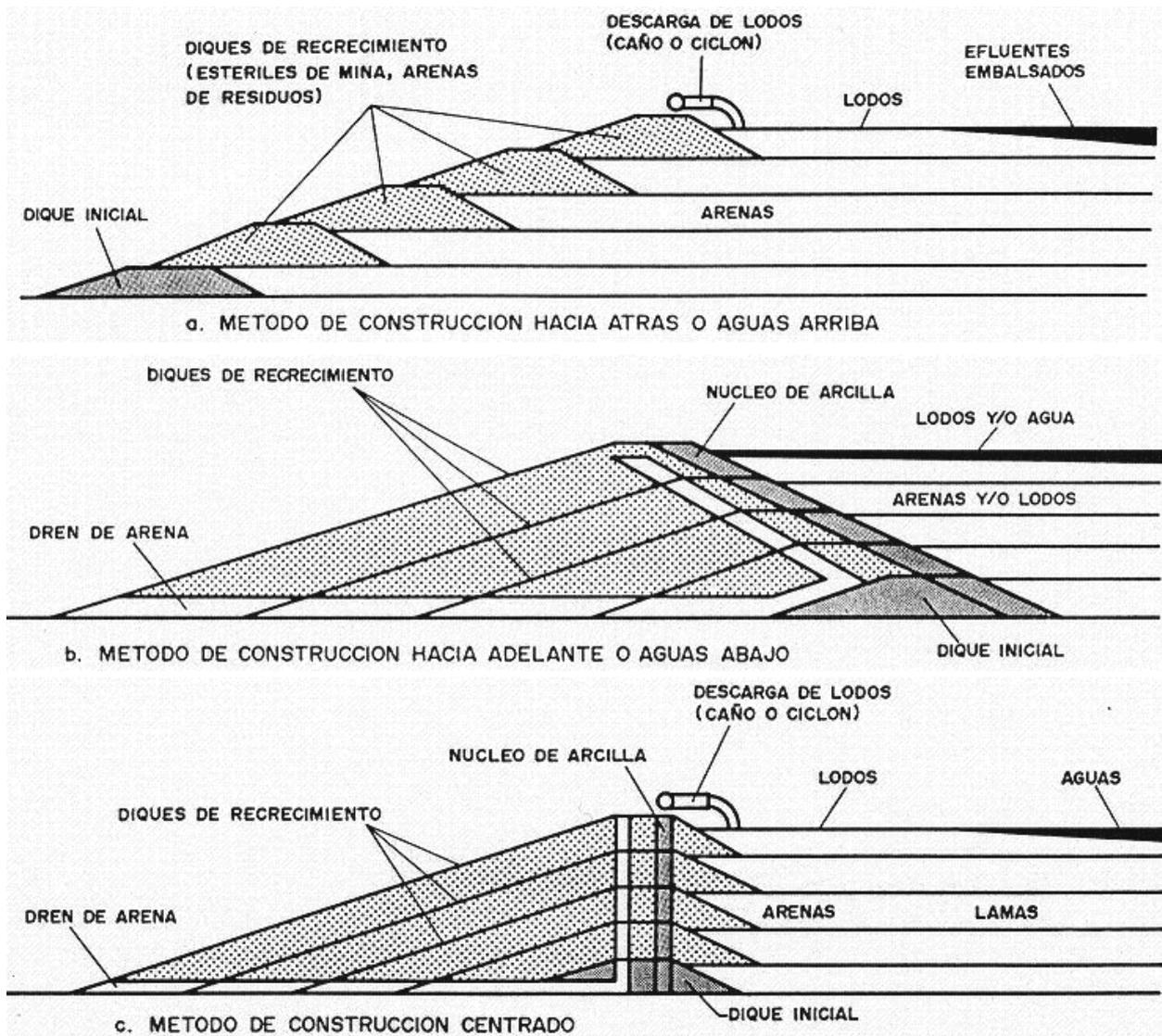
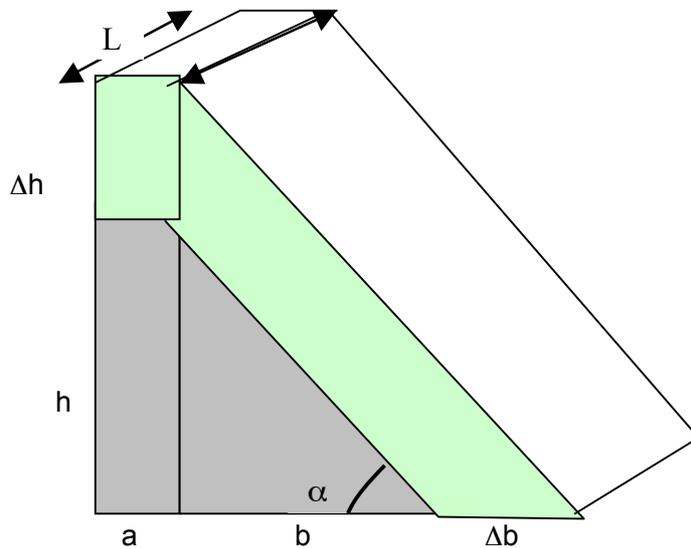


Figura 13.8. Métodos constructivos de presas de residuos.

13.3.1. Presa de residuos, coste por recrecimiento en altura

Evaluación del coste de construcción en función del recrecimiento en altura comparado con una unidad inicial de altura h . Se considera proporcional al volumen de material depositado, o manipulado cuando los materiales provienen de los estériles del tratamiento, y a los aportes de materiales auxiliares y obra necesaria a realizar para acondiciona la escombrera. Sólo se considera el efecto de altura sin considerar otros efectos de empuje o de estabilidad.



$$V_p = S_{\text{lateral}} \cdot L.$$

L : Longitud del perímetro.

$$S = h \left(a + \frac{1}{2} b \right).$$

a = ancho de berma (≈ 6 m).

α < Ángulo de estabilidad de los materiales.

$$S = h \left(a + \frac{1}{2} \frac{h}{\text{tg}\alpha} \right).$$

$$V = S \cdot L = h \cdot \left(a + \frac{h}{2 \cdot \text{tg}\alpha} \right) \cdot L$$

Variación del incremento unitario del coste de construcción de la presa, considerado proporcional a la cantidad de materiales necesarios, con relación a la primera unidad de presa construida en altura. Para $h = 1$ m es la relación por metro construido en altura y para $h =$ altura del banco, es la relación entre bancos sucesivos.

h	S	S(i)-S(i-1)	incremento
0	0,0	0,0	***
1	6,5	6,5	1,00
2	14,0	7,5	1,15
3	22,5	8,5	1,31
4	32,0	9,5	1,46
5	42,5	10,5	1,62
6	54,0	11,5	1,77
7	66,5	12,5	1,92
8	80,0	13,5	2,08
9	94,5	14,5	2,23
10	110,0	15,5	2,38

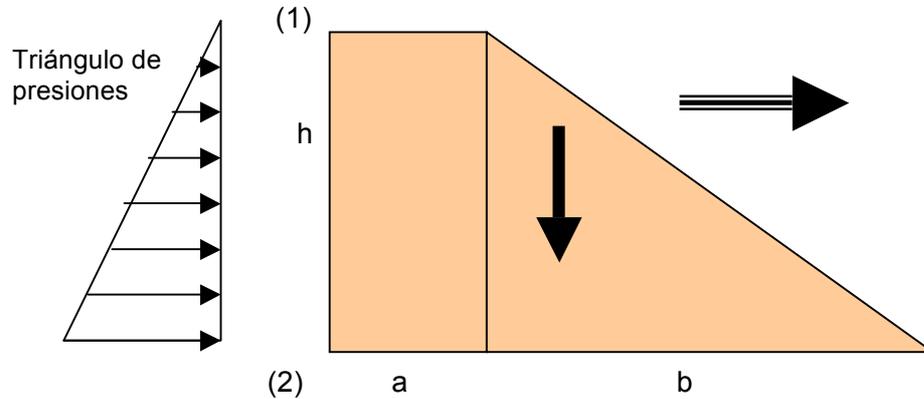
El ejemplo se calcula para un ángulo alfa de 45° y un plano horizontal de 6 m, berma normal que permite el paso de camiones. Se observa que el aumento de volumen en altura incrementa el coste de cada unidad y así, por ejemplo, para la unidad 6 por comparación con la unidad primera esta es un 77% más costosa.

El volumen de materiales para construir la presa, por el concepto de altura, aumenta con el cuadrado de la altura $C = f(h^2)$ además del deslizamiento del coste por el concepto de altura por cada unidad elevada.

Nota técnica: Límites de estabilidad y nivel freático

Los métodos de cálculo permiten diseñar las escolleras y presas, ver documentos del IGME, cálculo de escolleras y presas de residuos⁵ que aporta teorías de estabilidad y métodos de cálculo.

Una estimación de la estabilidad viene dada por la aplicación sencilla de los cálculos de la estabilidad de presas, que aplicados a las de residuos nos orientan sobre los principios que rigen estas estructuras y aportan un margen de seguridad.



El teorema de Bernoulli: $\frac{P}{\rho} + g \cdot h + \frac{v^2}{2} = cte$

Aplicado a las condiciones de contorno en los puntos 1 y 2 para un fluido en reposo y origen de coordenadas en el punto (1) da:

P(1) = 0; h(1) = 0; V(1) = 0;
P(2) = P; h(2) = -h; V(2) = 0; $\rightarrow P(2) = \rho \cdot g \cdot h$

La presión total sobre la presa es: $P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h^2$

La fuerza de empuje que tiende a desplazarla, por deslizamiento sobre el terreno, será:

$F_e = P_t \cdot S(m^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot (h \cdot L)$; L = longitud de la presa.

La fuerza que se opone al desplazamiento se corresponde con el efecto del peso y del coeficiente de resistencia, ligado con la cohesión, plasticidad, nivel freático, etc., y se puede aproximar por:

$F_r = \mu \cdot W$ $W = \text{peso} = \rho_m \cdot V = \rho_m \cdot S_{lat} \cdot L$
 $S_{lat} = h \cdot a + \frac{1}{2} \cdot h \cdot b = h (a + b \cdot \frac{1}{2})$

$F_r = \mu \cdot \rho_m \cdot h (a + b \cdot \frac{1}{2}) \cdot L$

La estabilidad supone: $F_e \leq F_r$ y en el límite, $F_e = F_r$

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h^2 \cdot h \cdot L = \mu \cdot \rho_m \cdot h (a + b \cdot \frac{1}{2}) \cdot L$

$a + b/2 > \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot h^2}{\mu \cdot \rho_m}$

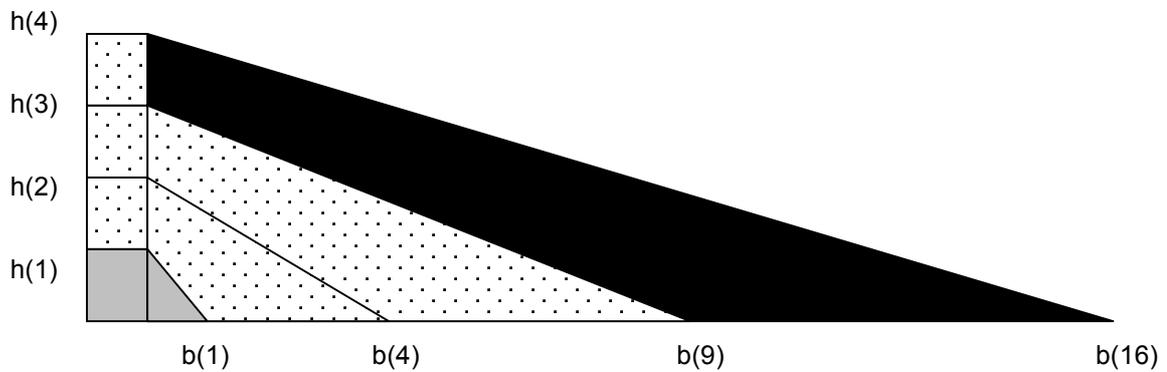
para a = 6 m (berma suficiente para el paso de camiones), se necesita:

$b > = \frac{\rho \cdot g \cdot h^2}{\mu \cdot \rho_m} - 3$ (3.1) que es la ecuación de una parábola.

⁵ El Código Técnico de la Edificación (marzo 2006) aporta un método para calcular la estabilidad de un terreno.

Algunas conclusiones:

- La superficie mojada de la presa hay que limitarla y asegurar su drenaje.
- La altura de las presas está limitada, no puede crecer indefinidamente por razones de estabilidad. Aumenta el coste unitario de construcción por unidad de altura al crecer ésta.
- Los materiales necesarios, volumen de escollera y/o presa al aumentar la altura, aumentan con un coeficiente de proporcionalidad que es función de la geometría del diseño, si no se tiene en cuenta otros factores.
- El aumento de los materiales necesarios, por el efecto de presión hidrostática, aumenta en proporción al cuadrado de la altura. Es estrictamente necesario tomar medidas para que el nivel freático no rebase determinados valores controlables.
- El control de la estabilidad de las presas es necesario, vigilancia de desplazamientos.
- La aplicación de la expresión (3.1) se representa gráficamente en el esquema siguiente. Se aprecia el efecto del valor tipo parabólico en la cubicación de los terrenos necesarios para la construcción de una presa resistente al empuje frente al nivel freático en altura.



- Punto de descarga. Una de los aspectos que diferencian una presa de tierra convencional de una presa de residuos es que estos últimos materiales pueden usarse para construir el propio dique o parte de él siempre que los lodos tengan unas características adecuadas. La característica más importante de los lodos es el tamaño de las partículas sólidas que determina sus posibilidades de aprovechamiento como estructura estable en el tiempo y esta granulometría viene determinada por el proceso mineralúrgico empleado para concentrar o extraer los minerales.

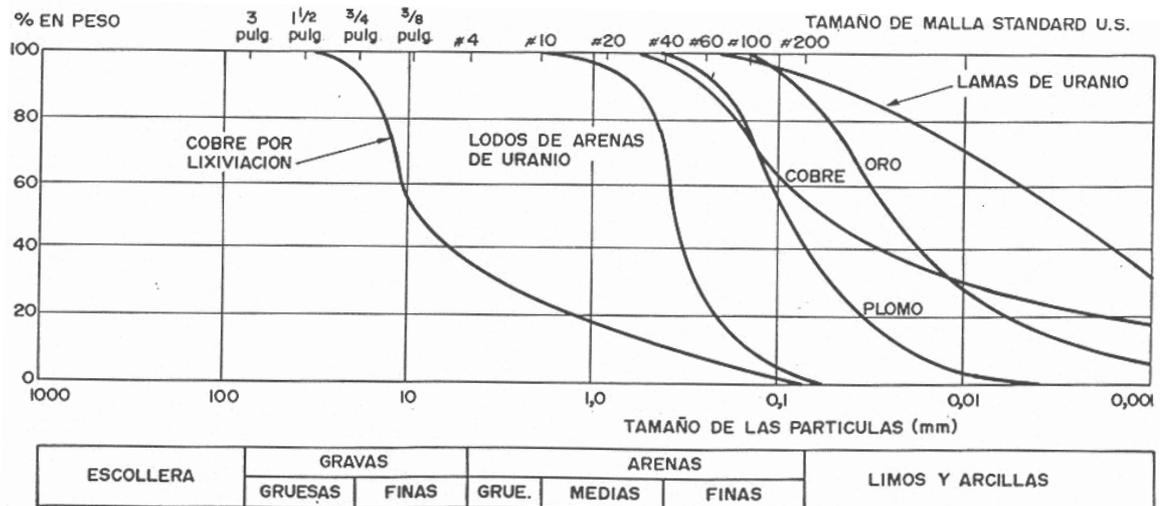


Figura 13.9. Curvas granulométricas tipo para diferentes minerales tratados.

Normalmente los lodos se transportan en forma hidráulica con concentraciones de sólidos entre 15% y 60%. El método de descarga hace que las partículas más gruesas se depositan rápidamente formando una playa junto al punto de descarga, que debe estar próximo al dique, y las partículas más finas fluyen como lamas hacia el interior de la presa.

- El volumen de materiales y el coste asociado para construir la presa, por el concepto de presión hidrostática, aumenta con el cubo de la altura $C = f(h^3)$. Es importante limitar la carga sobre la estructura resistente por el concepto de nivel freático de los materiales vertidos o por retenciones de escorrentías.

ANEXO: Apuntes y notas sobre legislación

La legislación a considerar en los proyectos, explotación y cierre de las escombreras y presas es muy diversa y de contenido muy específico en determinados supuestos por lo que se da una visión general de algunos de los aspectos que afectan a estas instalaciones, resaltando que los de mayor importancia, por motivos de especialización minera, son los directamente relacionados con la minería.

Legislación comunitaria

1985: Directiva 85/337/CEE – Evaluación de Impacto Ambiental. Exige, para su obligatoriedad, la transposición a las legislaciones de los diferentes países que integran la CEE.

Motivación dual:  Propiciar condiciones de igualdad de competencia.
Protección del medio ambiente y de la calidad de vida.

Contiene dos anexos:

- **Anexo I:** Las actividades aquí relacionadas deberán someterse a E.I.A.
- **Anexo II:** A criterio de los estados miembros, entre estos se encuentran los trabajos de “ordenación de zonas industriales” y los “trabajos de ordenación urbana”.

Legislación estatal

1986: *Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio de Evaluación de Impacto Ambiental.*

2000: *R.D.L. 9/2000 de 6 de octubre*, modifica y amplía el anterior. Algunos aspectos a comentar.

2008: *Real decreto Legislativo 1/2008* de 11 de enero, se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos. (Deroga el RD 1302/1986 y el RDL 9/2000, pero mantiene la estructura del anexo I donde se incluye los proyectos de minería y los afectados por la Ley de Minas 22/1973).

Artículo 2. Antiguo

1. Los proyectos que, según el artículo 1 del presente Real Decreto legislativo, hayan de someterse a evaluación de impacto ambiental deberán incluir un **estudio de impacto ambiental que contendrá, al menos**, los siguientes datos:

Descripción general del proyecto y exigencias previsibles en el tiempo, en relación con la utilización del suelo y de otros recursos naturales. Estimación de los tipos y cantidades de residuos vertidos y emisiones de materia o energía resultantes.

Una exposición de las **principales alternativas estudiadas** y una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos ambientales.

Evaluación de los efectos previsibles directos o indirectos del proyecto sobre la población, la fauna, la flora, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico artístico y el arqueológico.

Este texto queda cambiado por “Un diagnóstico territorial y del medio ambiente afectado por el proyecto”.

Medidas previstas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos.

Programa de vigilancia ambiental.

Resumen del estudio y conclusiones en términos fácilmente comprensibles. Informe, en su caso, de las dificultades informativas o técnicas encontradas en la elaboración del mismo.

2. **La Administración pondrá a disposición del titular** del proyecto los informes y cualquier otra documentación que obre en su poder cuando resulte de utilidad para la realización del estudio de impacto ambiental.

Asimismo, **el órgano ambiental dará** al titular del proyecto, a solicitud de éste, **su opinión en cuanto al alcance específico**, atendiendo a cada tipo de proyecto, del estudio señalado en el apartado 1.

3. Los titulares de proyectos comprendidos en el anexo II deberán presentar ante el órgano ambiental la documentación acreditativa de las características, ubicación y potencial impacto del proyecto, a fin de que dicho órgano pueda adoptar la decisión a que se refiere el artículo

Artículo 3. Antiguo

1. El estudio de impacto ambiental será sometido, dentro del procedimiento aplicable para la autorización o realización del proyecto al que corresponda, y conjuntamente con éste, al **trámite de información pública** y demás informes que en el mismo se establezcan.

ANEXO I: igual a la 85/337/CEE ampliada con 4 supuestos del anexo II. Hay 10 grupos, indicando a continuación aspectos del grupo 2 y el grupo 10.

Grupo 2. Industria extractiva

- A. Explotaciones y frentes de una misma autorización o **concesión a cielo abierto de yacimientos minerales** y demás recursos geológicos de las secciones A, B, C y D, cuyo aprovechamiento está **regulado por la Ley de Minas** y normativa complementaria, cuando se de alguna de las circunstancias siguientes:

- Explotaciones en las que la superficie de terreno afectado supere las 25 hectáreas (0,5 x 0,5 km²).
- Explotaciones que tengan un movimiento total de tierras superior a 200.000 metros cúbicos/año. (≅ 1 ÷ 2 camión/h, 230 días/año y doble turno).
- Explotaciones que se realicen por debajo del nivel freático, tomando como nivel de referencia el más elevado entre las oscilaciones anuales, o que puedan suponer una disminución de la recarga de acuíferos superficiales o profundos.
- Explotaciones de depósitos ligados a la dinámica actual: fluvial, fluvio-glacial, litoral o eólica. Aquellos otros depósitos y turberas, que por su contenido en flora fósil puedan tener interés científico para la reconstrucción palinológica y paleoclimática. Explotación de depósitos marinos.

Explotaciones visibles desde autopistas, autovías, carreteras nacionales y comarcales o núcleos urbanos superiores a 1.000 habitantes o situadas a distancias inferiores a 2 kilómetros de tales núcleos.

- Explotaciones situadas en espacios naturales protegidos o en un área que pueda visualizarse desde cualquiera de sus límites establecidos o que supongan un menoscabo a sus valores naturales.
- Explotaciones de sustancias que puedan sufrir alteraciones por oxidación, hidratación, etc., y que induzcan, en límites superiores a los incluidos en las legislaciones vigentes, a acidez, toxicidad u otros parámetros en concentraciones tales que supongan riesgo para la salud humana o el medio ambiente, como as menas con sulfuros, explotaciones de combustibles sólidos, explotaciones que requieran tratamiento por lixiviación in situ y minerales radiactivos.
- Explotaciones que se hallen ubicadas en terreno de dominio público hidráulico, o en la zona de policía de un cauce, y además la superficie sea mayor de 5 hectáreas.
- Extracciones que, aun no cumpliendo ninguna de las condiciones anteriores, se sitúen a menos de 5 kilómetros de los límites del área que se prevea afectar por el laboreo y las instalaciones anexas de cualquier explotación o concesión minera a cielo abierto existente.

B. Minería subterránea, en las explotaciones en las que se dé alguna de las circunstancias siguientes:

- Que su paragénesis pueda, por oxidación, hidratación o disolución, producir aguas ácidas o alcalinas que den lugar a cambios en el pH o liberen iones metálicos o no metálicos que supongan una alteración del medio natural.
- Que exploten minerales radiactivos.
- Aquellas cuyos minados se encuentren a menos de 1 kilómetro (medido en plano) de distancia de núcleos urbanos, que puedan inducir riesgos por subsidencia (hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras).

En todos los casos, se incluyen todas las instalaciones y estructuras necesarias para el tratamiento del mineral, acopios temporales o residuales de estériles de mina o del aprovechamiento mineralúrgico (escombreras, presas y balsas de agua o de estériles, plantas de machaqueo o mineralúrgicas, etc.).

C. Dragados:

- Extracción de minerales mediante dragados, cuando se realicen en zonas húmedas protegidas: lagos, lagunas, humedales y embalses clasificados; y en el resto de embalses, cuando el volumen de lodos extraídos sea mayor de 100.000 metros cúbicos.
- Dragados marinos para la obtención de arena, cuando el volumen a extraer sea superior a 3.000.000 de metros cúbicos/año.

D. Extracción de petróleo y gas natural con fines comerciales, cuando la cantidad extraída sea superior a 500 toneladas por día, en el caso del petróleo, y de 500.000 metros cúbicos por día, en el caso del gas, por concesión.

Grupo 10. Otros proyectos

A. Transformaciones de uso del suelo que impliquen eliminación de la cubierta vegetal arbustiva, cuando dichas transformaciones afecten a superficies superiores a 100 hectáreas.

B. Los siguientes proyectos correspondientes **a actividades listadas en el anexo I, que, no alcanzando los valores de los umbrales** establecidos en el mismo, se desarrollen en zonas especialmente sensibles, designadas en aplicación de las Directivas 79/409/CEE y 92/43/CEE, o en humedales **incluidos en la lista del convenio de Ramsar:**

- Primeras repoblaciones forestales cuando entrañen riesgos de graves transformaciones ecológicas negativas.
- Proyectos para destinar terrenos incultos o áreas seminaturales a la explotación agrícola intensiva, que impliquen la ocupación de una superficie mayor de 10 hectáreas.
- Proyectos de gestión de recursos hídricos para la agricultura, con inclusión de proyectos de riego o de avenamiento de terrenos, cuando afecten a una superficie mayor de 10 hectáreas.
- Transformaciones de uso del suelo que impliquen eliminación de la cubierta vegetal, cuando dichas transformaciones afecten a superficies superiores a 10 hectáreas.
- Concentraciones parcelarias.
- **Explotaciones y frentes de una misma autorización o concesión a cielo abierto de yacimientos minerales y demás recursos geológicos de las secciones A, B, C y D, cuyo aprovechamiento está regulado por la Ley de Minas y normativa complementaria, cuando la superficie de terreno afectado por la explotación supere las 2,5 hectáreas o la explotación se halle ubicada en terreno de dominio público hidráulico, o en la zona de policía de un cauce.**
- Tuberías para el transporte de productos químicos y para el transporte de gas y petróleo con un diámetro de más de 800 milímetros y una longitud superior a 10 kilómetros.

ANEXO II: A criterio según las diferentes legislaciones de las comunidades, resaltando la inclusión de:

Grupo 2. Industria extractiva

- A. Perforaciones profundas, con excepción de las perforaciones para investigar la estabilidad de los suelos, en particular:
 - Perforaciones geotérmicas.
 - Perforaciones para el almacenamiento de residuos nucleares.
 - **Perforaciones para el abastecimiento de agua.**
- B. Instalaciones industriales en el exterior para la extracción de carbón, petróleo, gas natural, minerales y pizarras bituminosas.
- C. Instalaciones industriales en el exterior y en el interior para la gasificación del carbón y pizarras bituminosas.
- D. Dragados marinos para la obtención de arena proyectos no incluidos en el anexo I).

Grupo 8. Otros proyectos

- B. **Instalaciones de eliminación de residuos** no incluidas en el anexo I.
- C. **Depósitos de lodos.**
- F. Instalaciones para la recuperación o destrucción de sustancias explosivas.
- J. Recuperación de tierras al mar.
- K. Cualquier cambio o ampliación de los proyectos que figuran en los anexos I y II, ya autorizados, ejecutados, o en proceso de ejecución, que puedan tener efectos adversos significativos sobre el medio ambiente, es decir, cuando se produzca alguna de las incidencias siguientes:

Incremento *significativo* de:

 - Emisiones a la atmósfera.
 - Vertidos a cauces públicos o al litoral.
 - Generación de residuos.
 - Utilización de recursos naturales.

Afección a áreas de especial protección designadas en aplicación de las Directivas 79/409/CEE y 2/43/CEE, o a humedales incluidos en la lista del convenio Ramsar.
- L. **Los proyectos del anexo I que sirven exclusiva o principalmente para desarrollar o ensayar nuevos métodos o productos y que no se utilicen por más de dos años.**

Nota: el fraccionamiento de proyectos de igual naturaleza y realizados en el mismo espacio físico no impedirá la aplicación de los umbrales establecidos en este anexo, a cuyos efectos se acumularán las magnitudes o dimensiones de cada uno de los proyectos considerados.

ANEXO III: Incluye criterios a considerar en los estudios.

Este resumen queda modificado en cuanto a su contenido y tramitación por el **Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras**. Se mantiene el contenido didáctico del principio que transmite la legislación y que se ha resumido en sus apartados significativos en las páginas anteriores.

Para las escombreras y presas, en tanto que se disponga de estructuras definidas como “presas o embalses” les puede ser de aplicación el “Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses”, aprobado por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1996. Se dispone en dicho documento la necesidad de tener una “memoria de construcción” y una “memoria de puesta en carga de la presa” (para la presas y embalses, no para escombreras) y se debe tener un plan de emergencia y una normativa de seguridad y de explotación.

NORMATIVA DE LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS REFERENTE A LA E.I.A.

Andalucía

- Ley 7/1994, de 18 de mayo de Protección Ambiental.
- Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto 292/1995, de 12 de diciembre).

Canarias

- Reglamento de contenido ambiental de los instrumentos de planeamiento (Decreto 35/1995, de 24 de febrero).

Islas Baleares

- Reglamento de implantación y regulación de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto 4/1986, de 23 de enero).

Castilla y León

- Ley 8/1994, de 24 de junio, de Evaluaciones de Impacto Ambiental y Auditorías Ambientales. Modificada por Ley 6/1996 y por Ley 5/1998, de 9 de julio.
- Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto 209/1995, de 5 de octubre).

Extremadura

- Reglamento sobre medidas de protección del ecosistema (Decreto 45/1991, de 16 de abril). Modificado por Decreto 25 de febrero de 1993.

Cataluña

- Decreto 114/1998, de 7 de abril, de Evaluación de Impacto Ambiental.

Galicia

- Ley 1/1995, de 2 de enero, de Protección del Medio Ambiente.
Establece tres niveles:
 - Evaluación de Impacto Ambiental.
 - Evaluación de Efectos Ambientales.
 - Incidencias Ambientales.

Madrid

- Ley 10/1991, de 4 de abril, para la Protección del Medio Ambiente. Modificada por el Decreto 123/1996, de 1 de agosto (**derogado**).

Murcia

- Ley 1/1995, de 8 de marzo, de Protección del Medio Ambiente.

Valencia

- Ley 2/1989, de 3 de marzo, de Impacto Ambiental.
- Reglamento para la ejecución de la Ley de Impacto Ambiental (Decreto 162/1990, de 15 de octubre).

Aragón

- Decreto 45/1994, de 4 de marzo, de Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental.

Cantabria

- Decreto 50/1991, de 29 de abril de Evaluación de Impacto Ambiental. Modificado por Decreto 77/1996, de 8 de agosto.

Relación utilizada como referencia y orientación y que está actualizada, en lo referente al documento principal sin considerar las reformas o modificaciones, a fecha octubre del 2008. Para la actualización se pueden utilizar las siguientes direcciones:

- <http://www.noticias.juridicas.com>

Esta dirección facilita la legislación e identifica la vigencia de los textos (**vigente** o **derogado**).

- <http://www.porticolegal.com>

Esta dirección facilita la legislación.

Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras. (Documento que consta de 46 páginas). Algunos párrafos y artículos, por su interés formativo, se indican a continuación.

Modifica, por su especificidad, la aplicación de la legislación anteriormente indicada pero que seguirá siendo referencia técnica en aquellos aspectos no claramente indicados en la presente legislación.

Preámbulo⁶

El concepto de aprovechamiento (minero) engloba el conjunto de actividades destinadas a la explotación, preparación, concentración o beneficio de un recurso mineral, incluyendo las labores de rehabilitación del espacio natural afectado por las actividades mineras, de acuerdo con los principios de desarrollo sostenible y de la minimización de las afectaciones causadas por el laboreo de las minas.

Con vistas a asegurar la construcción y el mantenimiento apropiados de las instalaciones de residuos mineros, es responsabilidad de la entidad explotadora garantizar que el diseño, la decisión sobre la ubicación y la construcción de las instalaciones de residuos mineros sean elaborados por técnicos con la titulación exigida por Ley. Además, la gestión de las instalaciones estará a cargo del Director Facultativo, de acuerdo con el artículo 117.3 de la Ley de Minas. En caso de subcontratarse a empresas externas los trabajos de gestión de la instalación de residuos, la supervisión sobre ellos también recaerá en la figura del Director Facultativo.

Art.1

Se entenderá por aprovechamiento al conjunto de actividades destinadas a la explotación, almacenamiento, preparación, concentración o beneficio de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos regulados en la Ley de Minas, **incluyendo las labores de rehabilitación de los espacios afectados por la actividad minera.**

El presente real decreto será de aplicación a las actividades de investigación y explotación (anteriormente estos trabajos no estaban incluidos).

Art. 3

2. Queda prohibido el abandono, vertido o depósito incontrolado de residuos mineros.
5. Todo plan de restauración, en el que se incluye el plan de gestión de residuos, deberá estar dirigido y firmado por un técnico competente con la titulación exigida por la ley.
6. Asimismo, todos los estudios técnicos de apoyo, ensayos, análisis, etc., encargados para la elaboración del plan de restauración y que en él se adjunten deberán ser desarrollados y firmados por técnicos competentes, sin perjuicio de que el técnico firmante del plan los haga suyos al incluirlos en la documentación presentada.

Art. 17

1. La entidad explotadora realizará un plan de gestión de residuos mineros enfocado a su reducción, tratamiento, recuperación y eliminación teniendo en cuenta el principio de desarrollo sostenible.

En el plan de gestión de residuos mineros la entidad explotadora garantizará que estos residuos se gestionan de un modo que **no suponga peligro para la salud de las personas y sin utilizar procesos o métodos que puedan dañar el medio ambiente y, en particular, suponer riesgos para el agua, el aire, el suelo, la fauna o la flora, sin causar molestias debidas al ruido o los malos olores y sin afectar negativamente al paisaje ni a lugares que representen un interés especial.**

⁶ El preámbulo o introducción de una legislación fija los criterios, principios o las bases de su fundamento. En aquello que presente duda sobre su interpretación correcta se debe ir a las bases o los principio que lo fundamenta.

Ley de Minas, 1973; Artículo 117.

1. Incumbe al Ministerio de Industria, en la forma que reglamentariamente se establezca, la inspección y vigilancia de todos los trabajos de exploración, investigación, explotación y aprovechamiento de recursos regulados por esta Ley, así como de los establecimientos de beneficio y de los productos obtenidos, sin perjuicio de las competencias que a otros Organismos de la Administración confiera la legislación vigente. Las referidas funciones de inspección y vigilancia en lo relativo a prevención de accidentes de trabajo y de enfermedades profesionales, así como la exacta observancia de las normas de seguridad e higiene en el trabajo, se circunscriben a las explotaciones mineras de cualquier orden y a cuantos trabajos regulados por esta Ley exijan la aplicación de técnica minera.
2. Los trabajos de exploración e investigación habrán de ser proyectados y dirigidos por Ingenieros de Minas, Licenciados en Ciencias Geológicas, Ingenieros Técnicos de Minas, Peritos de Minas o Facultativos de Minas. Cuando dichos trabajos requieran básicamente el empleo de técnicas geofísicas o geoquímicas, las competencias anteriores se extenderán a los Licenciados en Ciencias Físicas y en Ciencias Químicas, así como a otros titulados universitarios a los que se reconozca la especialización correspondiente. En todo caso, las operaciones que puedan afectar a la seguridad de los bienes o de las personas o requieran el uso de explosivos habrán de ser dirigidas por titulados de Minas.
3. Los trabajos de explotación habrán de ser proyectados y dirigidos por titulados de Minas, de acuerdo con sus respectivas competencias.
Documentos básicos a elaborar por técnico de Minas en los proyectos mineros:
 - a) Proyecto de investigación.
 - b) Proyecto de explotación.
 - c) Plan de labores (anual).
 - d) Plan de emergencias (actualizado periódicamente). Debe de existir un responsable de seguridad y salud que, normalmente, recae en el facultativo de minas.
 - e) Plan de restauración.
 - f) EAI, Proyecto de evaluación de impacto ambiental.
 - g) Plan de cierre (la mina no se termina hasta que se dan el cierre definitivo en que se liberan las responsabilidades inherentes a la explotación y se devuelven las garantías en su caso).

13.4. Estabilidad de taludes – Muros de contención

El talud es la superficie inclinada de un terreno o del paramento de un muro respecto a la horizontal y su estabilidad, en lo referente a procesos técnicos de cálculo, se verifica por la relación entre dos grupos de fuerzas, aquellas que forman parte de las resistencias del terreno y las estructuras soporte o de contención y aquellas que tienden a desestabilizarlo.

A las escombreras y presas le son de aplicación los principios de la caracterización mecánica de los suelos y las técnicas de cálculo de estabilidad así como las técnicas de mejora de esta estabilidad (disminución de pendientes, pilotes en cabeza, muros, sistemas de drenaje, reforestación, etc.), con la consideración de que en ambos casos los materiales no están tan consolidados como en los suelos naturales y se deben tener las consideraciones adecuadas al estimar o evaluar los parámetros correspondientes de cálculo.

13.4.1. Características mecánicas de los suelos

Los suelos y en general aplicable a las escombreras y presas de material procedente de residuos mineros, se definen o caracterizan por el tipo y tamaño de los materiales que lo componen y por la forma en que estos materiales se encuentran, y así se identifican suelos arcillosos, de arenas, de grava o rocosos, según sea el tamaño de partícula o suelo cohesivo o granular según las proporciones de arenas gravas o finos, diaclasados, etc., y en general según aspectos y características de los materiales que afectan a la resistencia y la estabilidad.

a) Tipos de suelos:

1. Tipo de elemento. Según el tipo de elemento principal que caracteriza el suelo pueden ser:

- Arcillas: Fracción de suelo con las partículas de tamaño comprendido entre:
 $< 0,002 \text{ mm} (< 2 \mu\text{m})$.
- Limo: Fracción de suelo con las partículas de tamaño comprendido entre:
 $0,002 - 0,06 \text{ mm}$
- Arenas: Fracción de suelo con las partículas de tamaño comprendido entre:
 Fina: $0,06 - 0,2 \text{ mm}$.
 Media: $0,2 - 0,6 \text{ mm}$.
 Gruesa: $0,6 - 2 \text{ mm}$.
- Grava: Fracción de suelo con las partículas de tamaño comprendido entre:
 Fina: $2 - 6 \text{ mm}$.
 Media: $6 - 20 \text{ mm}$.
 Gruesa: $> 20 \text{ mm}$.
- Roca: Agregado natural de uno o más minerales.

2. Tipo de suelo. Se considera el suelo como la parte de la corteza que puede ser disgregado en partículas individuales mediante la acción del agua y en este supuesto se puede considerar los tipos:

- Suelo cohesivo: Proporción de finos que tenga plasticidad $> 35\%$.
- Suelo granular: Proporción en peso de arenas y gravas $> 65\%$.

Se considera una *unidad geotécnica* a cada una de las capas del terreno que presenta características físicas y mecánicas comunes y que se pueden referenciar en una primera unidad de cálculo con las capas geológicas de los estratos.

Para la identificación previa del tipo de suelo por tamaños se pueden tener las referencias:

Denominación	Tamaño de partícula	Identificación en campo
Gravas	> 2 mm	Tamaños medibles
Arenas	entre 0,06 y 2 mm	Tamaños visibles
Limos	entre 0,002 y 0,06 mm	Ásperos al tacto
Arcillas	< 0,002 mm	Tacto suave, se seca pegándose a los dedos

b) Resistencia a la compresión simple

Una característica importante de los materiales y suelos en general es la resistencia a la compresión simple o capacidad de soportar pesos sin deformaciones importantes que puedan afectar a la estabilidad de las diferentes capas de materiales. Es función del tipo de suelo y de su composición además de otras variables como compacidad, consistencia de las arcillas, discontinuidades, tipos de relleno de las discontinuidades, índice de fracturación, composición química, permeabilidad al agua, etc., que afecta a los valores tipo de referencia. Según la composición base del suelo, se pueden dar referencias de presiones admisibles a efectos orientativos para diferentes terrenos⁷.

Terreno	Tipos y condiciones	Presión admisible [Mpa]	Observaciones
Rocas	Rocas ígneas y metamórficas sanas ⁽¹⁾ (Granito, diorita, basalto, gneis)	10	Para los valores apuntados se supone que la cimentación se sitúa sobre roca no meteorizada
	Rocas metamórficas foliadas sanas ^{(1), (2)} (Esquistos, pizarras)	3	
	Rocas sedimentarias sanas ⁽¹⁾ , ⁽²⁾ Pizarras cementadas, limolitas, areniscas, calizas sin karstificar, conglomerados cementados	1 a 4	
	Rocas arcillosas sanas ^{(2), (4)}	0,5 a 1	
	Rocas diaclasadas de cualquier tipo con espaciamiento de discontinuidades superior a 0,30m, excepto rocas arcillosas	1	
	Calizas, areniscas y rocas pizarrosas con pequeño espaciamiento de los planos de estratificación ⁽²⁾	-	
	Rocas muy diaclasadas o meteorizadas ⁽³⁾	-	
Suelos granulares (% finos inferior al 35% en peso)	Gravas y mezclas de arena y grava, muy densas	>0,6	Para anchos de cimentación (B) mayor o igual a 1 m y nivel freático situado a una profundidad mayor al ancho de la cimentación (B) por debajo de ésta
	Gravas y mezclas de grava y arena, medianamente densas a densas	0,2 a 0,6	
	Gravas y mezclas de arena y grava, sueltas	<0,2	
	Arena muy densa	>0,3	
	Arena medianamente densa	0,1 a 0,3	
Suelos finos (% de finos superior al 35% en peso)	Arcillas duras	0,3 a 0,6	Los suelos finos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados en los que sean de esperar asientos de consolidación serán objeto de un estudio especial. Los suelos arcillosos potencialmente expansivos serán objeto de un estudio especial
	Arcillas muy firmes	0,15 a 0,3	
	Arcillas firmes	0,075 a 0,15	
	Arcillas y limos blandos	<0,075	
	Arcillas y limos muy blandos		
Suelos orgánicos		Estudio especial	
Rellenos		Estudio especial	

⁽¹⁾ Los valores indicados serán aplicables para estratificación o foliación subhorizontal. Los macizos rocosos con discontinuidades inclinadas, especialmente en las cercanías de taludes, deben ser objeto de análisis especial.

⁽²⁾ Se admiten pequeñas discontinuidades con espaciamiento superior a 1 m.

Tabla 13.1. Presiones admisibles a efectos orientativos.

La capacidad portante de un suelo con una presión admisible de 1 Mpa, equivale a un peso de 10⁵ kg/m² (100 t/m²).

⁷ Referencia Código Técnico de la Edificación, 2006.

c) Estabilidad de los materiales, ángulo de rozamiento interno

Los materiales, dependiendo de su constitución, pueden tener una componente de *resistencia friccional* ($tg\varphi$), identificada por el ángulo de equilibrio sin rotura o sin desplazamiento de materiales y una componente *cohesiva* (c) como consecuencia de las fuerzas de atracción electroquímicas que existan en el punto de contacto entre las partículas.

La componente cohesiva es independiente del estado tensional y la componente debida al ángulo de rozamiento interno si depende del estado tensional, la resistencia aumenta con la presión de confinamiento. Esto se expresa mediante la relación de Coulomb

$$T = c + \sigma \cdot tg(\varphi) \quad (4.1)$$

T: Esfuerzo cortante.

σ : Esfuerzo normal.

φ : Ángulo de rozamiento interno.

c: Cohesión, que para el caso de materiales de escombreras o presas mineras se considera de valor nulo ($c = 0$) hasta que se asegure un cierto asentamiento.

Se diferencian con la denominación $\sigma' = \sigma - u$ siendo u la parte de tensión absorbida por el agua y denominada *ley de la presión efectiva*. Como el agua no puede soportar esfuerzos cortantes, las denominaciones con el signo (') para las variables se denominan "efectivas" y tanto para la tensión normal efectiva (σ'), como para la cohesión efectiva (c') y para el ángulo de rozamiento interno efectivo (φ') son las variables realmente utilizadas en las expresiones de calculo de factores de seguridad.

Esta expresión es una línea recta (para $c = 0$ pasa por el origen) y cuando el estado tensional que actúa sobre el suelo supera o es tangente a la recta, se puede decir de una manera simplificada, que el material rompe o que ha plastificado.

El ángulo de rozamiento interno también identifica aquel ángulo que forman los materiales a granel sometidos al equilibrio de los rozamientos entre sus partículas.

Clase de suelo		Peso específico aparente (kN/m ³)	Ángulo de rozamiento interno
Terreno natural	Grava	19 – 22	34° - 45°
	Arena	17 – 20	30° - 36°
	Limo	17 – 20	25 – 32°
	Arcilla	15 – 22	16° – 28°
Rellenos	Tierra vegetal	17	25°
	Terraplén	17	30°
	Pedraplén	18	40°

Tabla 13.2. Propiedades básicas de los suelos.



Material	Peso kN/m ³	Ángulo	Material	Peso kN/m ³	Ángulo
Arena	14 a 19	30°	Carbón en leña de trozos	4	45°
Arena de piedra pómez	7	35°	Hulla		
Arena y grava	15 a 20	35°	briquetas amontonadas	8	35°
Cal suelta	13	25°	briquetas apiladas	13	-
Cemento clinker suelto	16	28°	en bruto, de mina	10	35°
Cemento en sacos	15		pulverizada	7	25°
Escoria de altos hornos			Leña	5,4	45°
troceada	17	40°	Lignito		
granulada	12	30°	briquetas amontonadas	7,8	30°
triturada, de espuma	9	35°	briquetas apiladas	12,8	-
Poliéster en resina	12	-	en bruto	7,8 a 9,8	30° a 40°
Poliétileno, poliestirol granulado	6,4	30°	pulverizado	4,9	25° a 40°
Resinas y colas	13	-	Turba negra y seca		
Yeso suelto	15	25°	muy empaquetada	6 a 9	-
Agua dulce	10	-	amontonada y suelta	3 a 6	45°

⁽¹⁾ En la ENV 1990 pueden encontrarse valores adicionales de materiales agrícolas, industriales y otros.

Tabla 13.3. Peso específico y ángulo de rozamiento de materiales almacenables y a granel⁽¹⁾.

d) *Líneas de deslizamiento*

Son las líneas posibles de rotura del macizo y corresponden a líneas teóricas de deslizamiento donde no se cumplen los criterios de estabilidad para las ecuaciones de la estática. Para su estudio o determinación, normalmente, el macizo o el área de estudio se divide en dovelas que son áreas verticales que se consideran sometidas a las fuerzas de la estática y a las reacciones de las dovelas contiguas. Se plantean las ecuaciones para cada unidad de dovela o conjunto de ellas que constituyen un área posible de deslizamiento.

La imagen representa diferentes posibilidades de rotura o desplazamiento de masas de tipo rotacional. Existen estudios para diferentes tipos de rotura, planar, por cuñas, etc., y dentro de cada modelo se pueden utilizar diferentes métodos o precisiones.

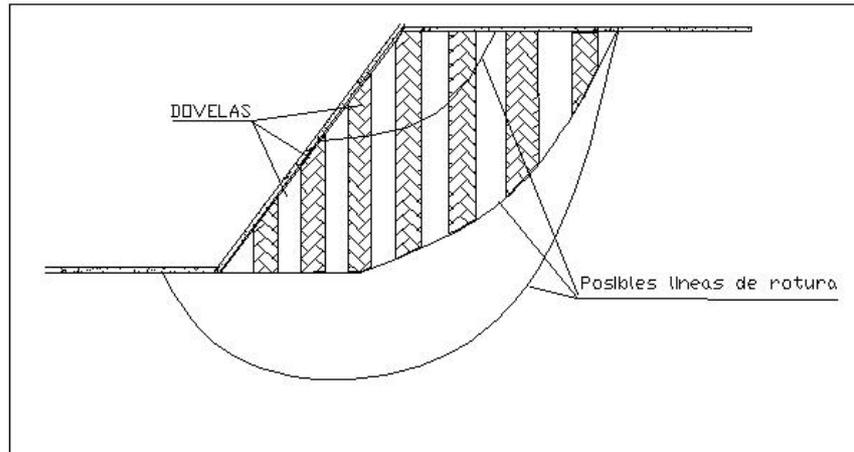


Figura 13.10. División de la masa deslizante en dovelas.

e) *Seguridad de los taludes (seguridad de los terrenos)*

La seguridad de un determinado talud se cuantifica por medio del *factor de seguridad FS* (ó *coeficiente de seguridad*), que es la relación entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio estricto de la masa deslizante.

En la obtención del factor de seguridad, que se le supone constante en toda la superficie de deslizamiento, se asume que la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento sigue la ley de Mohr-Coulomb (lineal y para el supuesto de las escombreras con cohesión nula, $c = 0$) y los métodos de equilibrio límite aplican las ecuaciones de la estática a la masa deslizante suponiendo que los parámetros del terreno (*tangente del ángulo de rozamiento interno $tg(\varphi)$* y *cohesión c*) se encuentran divididos por el factor de seguridad.

Del principio anterior se puede obtener el valor de FS o bien definir un valor de FS a priori y resolver el sistema para las condiciones a mantener en el terreno.

El factor de seguridad, en el método de talud infinito, tiene la forma de:

$$FS = \frac{c' \cdot l + N \cdot tg\varphi'}{N \cdot tg\psi} = \frac{c' \cdot \frac{a}{\cos\psi} + N \cdot tg\varphi'}{N \cdot tg\psi} = \frac{\frac{c'}{\gamma \cdot h \cdot \cos^2\psi} + tg\varphi'}{tg\psi} \quad (4.2)$$

Siendo:

Dovela: Franjas verticales en que se divide el terreno para su estudio, a cada franja o dovela se la identifica con unos parámetros, valores, coeficientes de seguridad, etc., constantes en toda la dovela lo que es una característica del diseño y a la vez una crítica al método.

c' : Coeficiente de cohesión efectiva del terreno.

l : Longitud de la dovela (unidad vertical en que se divide el terreno) en la dirección paralela al terreno.

N : Fuerza normal a la dirección real del terreno.

φ' : Ángulo de rozamiento interno efectivo del terreno.

ψ : Ángulo real, geométrico, que forma el terreno con la horizontal.

a : Distancia en proyección horizontal de la dovela.

γ : Densidad del terreno.

h : Altura considerada de la franja de longitud infinita.

De la expresión anterior (4.2) se aprecia lo que es una norma en taludes infinitos, que para terrenos cohesivos el valor de FS depende de la profundidad h de la superficie de deslizamiento, disminuyendo al aumentar esta (h). En el supuesto de laderas, cuando se produce una meteorización que va progresando con el tiempo en profundidad (h), llega un momento en que se alcanza una (h) crítica en que $FS=1$, y entonces se produce un deslizamiento global.

En terrenos no cohesivos ($c' = 0$) y para talud seco, FS no depende de (h) siendo:

$$FS = \frac{tg\varphi'}{tg\psi}$$

y el talud es estable si el (ángulo de rozamiento interna efectivo) $\varphi' > \psi$ (ángulo del terreno), e inestable en caso contrario.

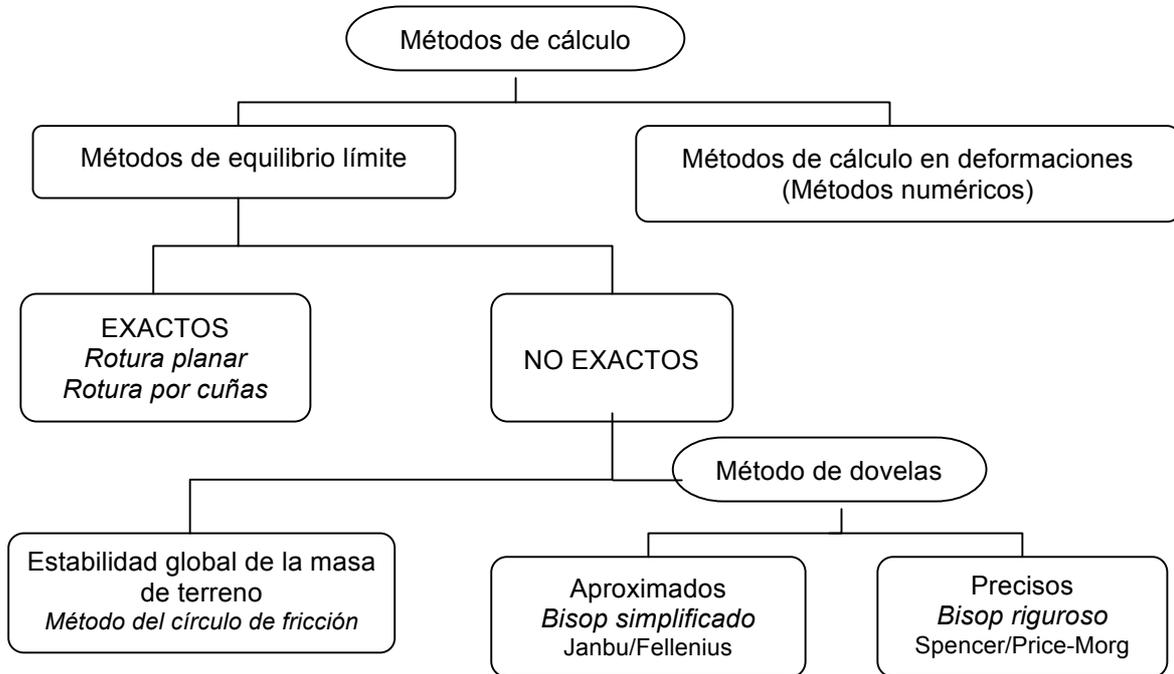
De lo anterior se puede concluir algunos aspectos relevantes para la estabilidad de los terrenos

- a) Cuando los terrenos tienen una componente cohesiva, terrenos naturales o compactados adecuadamente, y son sometidos en su parte superficial a degradación o fractura por los elementos atmosféricos, al cabo de un tiempo suficiente se degradarán por fisuras, penetración del agua, discontinuidades superficiales, diaclasas y su avance en profundidad, y otros fenómenos que afectan al macizo. Cuando estos defectos avancen en profundidad y alcancen el valor de " h " tal que el factor de seguridad sea inferior a la unidad, los terrenos se desplazarán de forma más o menos violenta hasta alcanzar un nuevo equilibrio estático (se genera un derrumbe)
- b) Para los terrenos de cohesión despreciable, caso característico de escombreras y presas, cuando la pendiente supere el ángulo límite de equilibrio se producirá un desplazamiento o rotura de los estériles, desplazando masas importantes de residuos mineros. Luego la estabilidad de los depósitos de residuos mineros debe ser vigilada de forma periódica y adoptar técnicas de estabilización (disminuir el ángulo de los depósitos mineros) y técnicas de garantía en el tiempo de esta estabilidad (revegetación de las escombreras).
- c) Cuando se observan movimientos en los macizos o depósitos mineros, ya se manifiesta la rotura, la única componente resistente a considerar es la estabilidad por ángulo de rozamiento interno ya que la resistencia de los materiales por la ecuación de Coulomb está en su resistencia última o resistencia residual y esta corresponde a la ecuación de una recta que pasa por el origen ($c' = 0$).
- d) Cuando los terrenos o escombreras pueden verse anegado por agua, el nivel freático está por encima de la base de la escombrera, el sistema de equilibrio se modifica notablemente disminuyendo el ángulo de equilibrio según la expresión dada por ($\gamma_{sat} - 1 = \gamma'$; valor efectivo):

$$FS_{flujos} = \frac{(\gamma_{sat} - 1) \cdot tg\varphi'}{\gamma_{sat} \cdot tg\psi}$$

Sistemas de equilibrio, métodos de cálculo

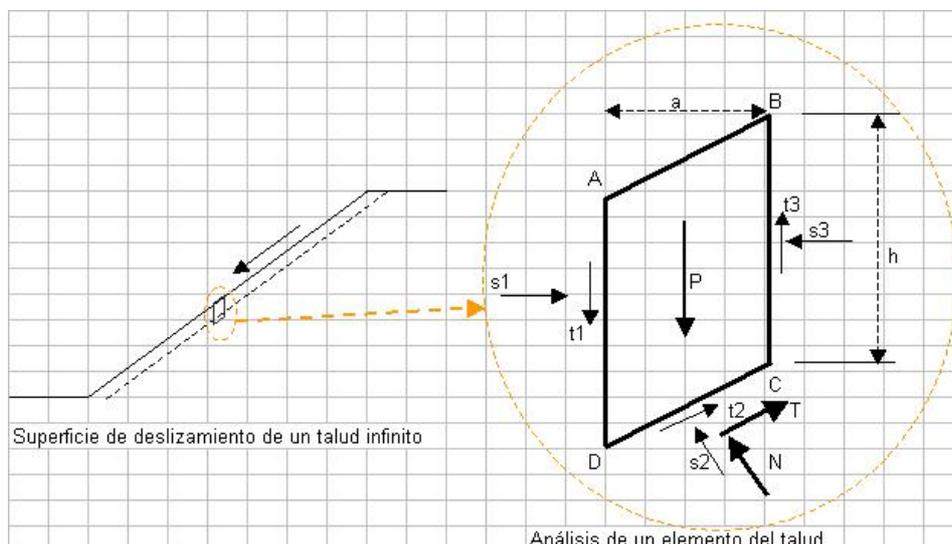
Los métodos de equilibrio límite permiten obtener resultados muy ajustados y contrastados con grados de confianza aceptables.



13.4.2. Métodos de cálculo, talud infinito

Cuando el material inestable es una capa de espesor constante y muy pequeño respecto a la altura del talud, este se denomina talud infinito o indefinido. Se considera la superficie de deslizamiento paralela al talud. Este tipo de inestabilidad del talud se da generalmente en materiales muy poco o nada cohesivos o en materiales cohesivos en los que el suelo descansa sobre una base de material más resistente a escasa profundidad y paralela al talud. Dicha base constituye la posible superficie de deslizamiento.

Se considera que el material del terreno es homogéneo, (su densidad, cohesión y ángulo de rozamiento son constantes) a lo largo del talud y se analiza un elemento de suelo.



Para un talud infinito y homogéneo se dan las igualdades siguientes:

$$s_1 = s_3; \quad t_1 = t_3$$

Para un elemento de dimensiones a , h y densidad γ el peso por unidad de longitud es:

$$P = a \cdot h \cdot \gamma$$

De las ecuaciones para el equilibrio de fuerzas se obtiene:

$$P - T \cdot \text{sen}(\psi) - N \cdot \text{cos}(\psi) = 0;$$

$$T \cdot \text{cos}(\psi) - N \cdot \text{sen}(\psi) = 0;$$

siendo:

N: Esfuerzo normal efectivo sobre una profundidad h .

T: Esfuerzo tangencial sobre dicha superficie.

ψ : ángulo del talud que forma el terreno.

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$N = P \cdot \text{cos}(\psi)$$

$$T = P \cdot \text{sen}(\psi) = N \cdot \text{tg}(\psi)$$

El factor de seguridad FS, definido como la relación entre la resistencia al corte del terreno y la necesaria para mantener el equilibrio estricto, y que corresponde a la expresión, con los parámetros definidos anteriormente:

$$FS = \frac{c' \cdot l + N \cdot \text{tg}\varphi'}{(T = N \cdot \text{tg}\psi)} = \frac{c' \cdot \frac{a}{\text{cos}\psi} + N \cdot \text{tg}\varphi'}{N \cdot \text{tg}\psi} = \frac{\frac{c'}{\gamma' \cdot h \cdot \text{cos}^2 \psi} + \text{tg}\varphi'}{\text{tg}\psi}$$

La expresión anterior se puede poner en forma de dos sumandos, donde el factor de seguridad queda en la forma:

$$FS = \frac{\frac{c'}{\gamma' \cdot h \cdot \text{cos}^2 \psi} + \text{tg}\varphi'}{\text{tg}\psi} = \frac{c'}{\gamma' \cdot h \cdot \text{cos}\psi \cdot \text{sen}\psi} + \frac{\text{tg}\varphi'}{\text{tg}\psi} = \frac{2 \cdot c'}{\gamma' \cdot h \cdot \text{sen}(2\psi)} + \frac{\text{tg}\varphi'}{\text{tg}\psi}$$

Para el supuesto de talud sumergido bajo una superficie de agua estática, se debe considerar un empuje de Arquímedes vertical cuyo efecto es disminuir el peso del elemento considerado. Se tiene $P = a \cdot h \cdot (\gamma - \gamma_{\text{agua}}) = a \cdot h \cdot \gamma_{\text{sat}}$; Siendo γ_{sat} un valor corregido y menor que el del propio terreno. La estabilidad disminuye para el factor de cohesión pero no afecta al valor límite si se considera cohesión nula, que sigue siendo:

$$FS = \frac{\text{tg}\varphi'}{\text{tg}\psi}$$

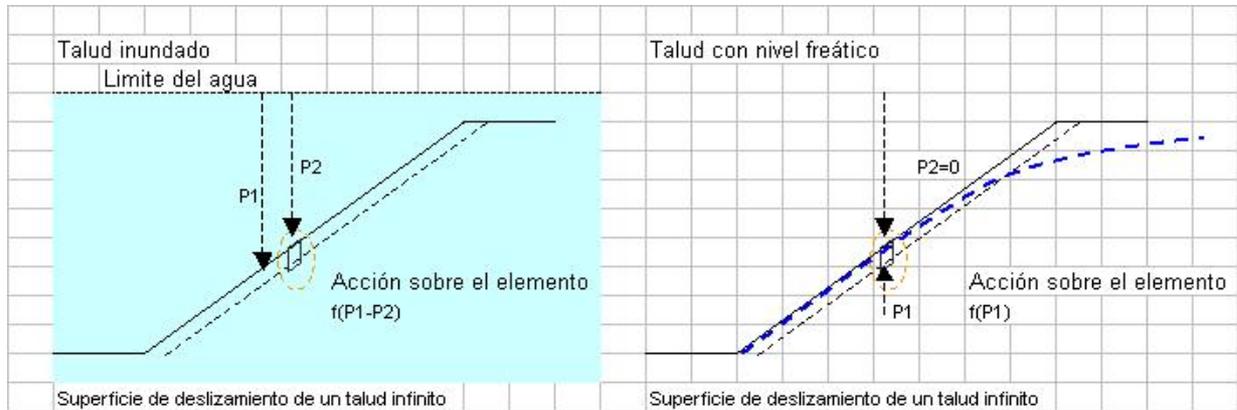
Para terreno no cohesivo y con suelo saturado, existencia de un nivel freático elevado pero el terreno no está inundado, se obtiene la expresión (ver justificación posterior):

$$FS = \frac{\gamma_{\text{sat}} \cdot \text{tg}\varphi'}{\gamma \cdot \text{tg}\psi} \quad (\gamma_{\text{sat}} = \gamma - 1); \quad 1 = \text{densidad del agua.}$$

El factor de seguridad en un terreno saturado de agua es menor que en un terreno seco, en la proporción de $(\gamma - 1) / \gamma$.

13.4.2.1. Talud con nivel freático⁸

El efecto del flujo de agua paralelo por el efecto de una filtración, en régimen estacionario, y con la línea de saturación paralela a la superficie del talud. Se esquematiza en la figura siguiente dando la diferencia entre talud inundado, visto en el apartado anterior, y talud saturado.



Para espesores pequeños con relación a la altura del talud es lícito suponer que las líneas de filtración, la circulación del agua por los intersticios del material, son líneas rectas paralelas al talud y por consiguiente las equipotenciales son perpendiculares al mismo (Lambe y Whitman 1972). Este caso se suele presentar frecuentemente en la parte inferior de taludes naturales y se esquematiza en la figura siguiente:

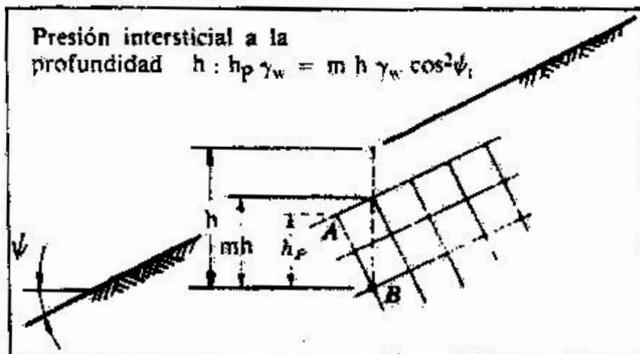


Figura 13.11. Talud infinito con flujo paralelo. Red de flujo.

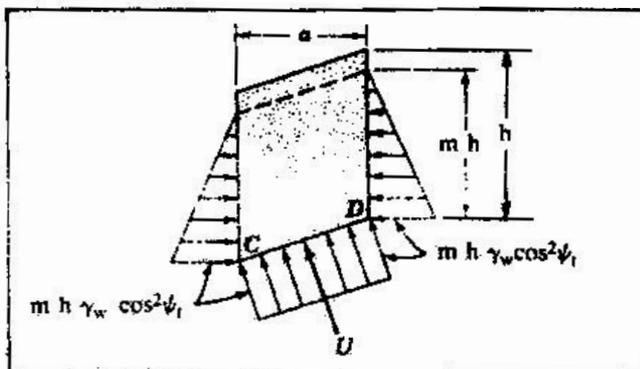


Figura 13.12. Talud infinito con flujo paralelo. Presiones intersticiales periféricas.

Se supone la superficie de deslizamiento situada a una profundidad “h” y la altura del nivel freático respecto de aquella a un valor “mh”, (0 < m < 1). Se considera γ_a (agua) = γ_w (water) que figura en los esquemas.

La presión intersticial a la altura h es $h_p \cdot \gamma_a$ y se deduce de la figura 13.8. El flujo es paralelo a la superficie del talud, no existen circulaciones perpendiculares luego la línea AB es un equipotencial y la altura piezométrica según esta línea AB es constante ($z + P/\gamma_a = Cte$).

Igualando las alturas piezométricas de A y B y teniendo en cuenta que $P_A = 0$ (nivel del agua y que para $m = 1$ coincide con el nivel del talud). Se obtiene que la presión intersticial a la profundidad h es:

$$u_h = P_B = h_p \cdot \gamma$$

Por consideraciones de tipo geométrico se tiene que el segmento $AB = mh \cdot \cos \psi$, y que, siendo h_p al diferencia de cota entre el punto A y el punto B se tiene

$$h_p = AB \cdot \cos \psi = mh \cdot \cos^2 \psi$$

Luego la presión intersticial en el punto B es entonces: $h_p \cdot \gamma_a = mh \cdot \gamma_a \cdot \cos^2 \psi$; y esta presión intersticial es constante en la base del elemento de talud considerado a la profundidad h (ver figura 13.12).

⁸ Manual de taludes, IGME; capítulo 7, pág 180 y siguientes.

Las presiones intersticiales en las caras laterales se anulan mutuamente por el concepto de talud infinito y la resultante sobre la cara inferior toma el valor dado por la expresión:

$$U = mh \cdot \gamma_a \cdot \cos^2 \psi \cdot (a/\cos \psi) = a \cdot mh \cdot \gamma_a \cdot \cos \psi$$

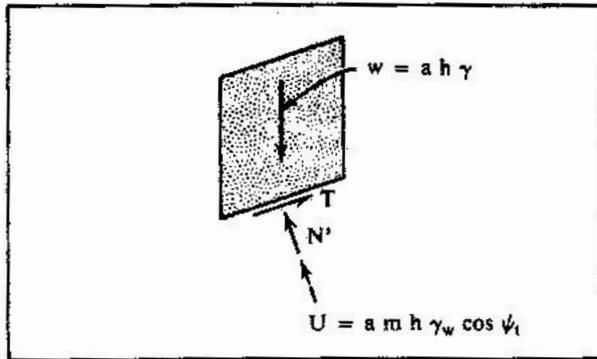


Figura 13.13. Talud infinito con flujo paralelo. Planteamiento del equilibrio.

Del equilibrio de fuerzas en el elemento de talud considerado se obtiene las ecuaciones:

$$T = a \cdot h \cdot \gamma \cdot \sen \psi$$

$$N = a \cdot h \cdot \gamma \cdot \cos \psi - U = (\gamma - m \cdot \gamma_a) \cdot a \cdot h \cdot \cos \psi$$

Para terreno parcialmente saturado el valor de γ a considerar es un valor intermedio entre el del terreno y el saturado.

El factor de seguridad "FS" se obtiene por relación entre la resistencia al corte y la necesaria para mantener el equilibrio estricto y se calcula por sustitución de los valores anteriores en la definición:

$$FS_{flujo} = \frac{c' + N \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{T}$$

$$FS_{flujo} = \frac{c' + N \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{T} = \frac{c' + \frac{a}{\cos \psi} + (\gamma - m \gamma_a) a \cdot h \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{a \cdot h \cdot \gamma \cdot \sen \psi} = \frac{c' + (\gamma - m \gamma_a) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{h \cdot \cos^2 \psi + \gamma \cdot \operatorname{tg} \psi}$$

La expresión anterior se puede poner en forma de dos sumandos, donde el factor de seguridad queda:

$$FS_{flujo} = \frac{c'}{h \cdot \gamma \cos \psi \cdot \sen \psi} + \frac{(\gamma - m \gamma_a) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma \cdot \operatorname{tg} \psi}$$

Para un terreno saturado, nivel freático coincidente con el nivel del terreno, $m = 1$, y sin cohesión, $c = 0$, supuesto característico de las escombreras inundadas, se obtiene la expresión siguiente:

$$FS_{flujo} = \frac{(\gamma - \gamma_a) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma \cdot \operatorname{tg} \psi} = \frac{(\gamma_{sat} - 1) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_{sat} \cdot \operatorname{tg} \psi}$$

Se observa en las expresiones anteriores que el efecto del agua equivale a modificar el ángulo de resistencia interna con el factor $(\gamma - m \gamma_a) / \gamma$

Ejemplo: Calcula el factor de seguridad para una escombrera, terreno no cohesivo, en los supuestos de terreno seco y terreno inundado (saturado). Se consideran los valores de $\gamma_{sat} = 2 \text{ t/m}^3$, ángulo de resistencia interno $\varphi = 30^\circ$ y ángulo del talud $\psi = 20^\circ$.

Talud seco: $FS = \operatorname{tg}(30)/\operatorname{tg}(20) = 1,59$; El sistema es estable, $FS > 1$.

Talud inundado: $FS_{flujo} = (2 - 1) \cdot \operatorname{tg}(30) / 2 \operatorname{tg}(20) = 0,79$; El sistema es inestable, $FS < 1$.

La extensión del ejemplo anterior para variaciones en la densidad y el ángulo de resistencia interno se da en el cuadro siguiente donde se calcula el ángulo límite para talud inundado con flujo paralelo.

Nota técnica

El *nivel freático* de un acuífero se define como el lugar geométrico de los puntos cuya presión coincide con la atmosférica y que constituye la *superficie libre* del acuífero. Debajo del nivel freático el terreno se encuentra saturado.

El *nivel piezométrico* o *altura piezométrica* de un punto de un acuífero tiene la siguiente expresión:

$$h = z + P/\gamma_a$$

donde:

- h: Nivel piezométrico del punto considerado.
- z: Altura geométrica del punto considerado.
- P: Diferencia entre la presión en el punto considerado y la presión atmosférica.
- γ_a : Peso específico del agua.

El *potencial hidráulico* o *carga hidráulica* es igual al nivel piezométrico incrementado en $(V^2/2g)$ de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. Este valor de $(V^2/2g)$ en los fenómenos de filtración es despreciable frente al nivel piezométrico dado por la ecuación $(h = z + P/\gamma_a)$. Al término z se le denomina *altura o potencial geométrico* y al término (P/γ_a) se le denomina *altura o potencial de presión*.

El agua que cae sobre un talud puede *infiltrarse* o bien *escurrir* sobre su superficie, en el primer caso y si la cantidad es poca queda retenida en los primeros centímetros y si es abundante produce *infiltraciones* o movimientos del agua hacia el interior del terreno desde la superficie. Este flujo hacia el interior depende de la naturaleza del terreno y así se definen parámetros como *porosidad* que es la relación entre el nivel o volumen de huecos y el volumen total considerado; el *índice de poros* que es la relación entre el volumen ocupado por los poros y el ocupado por las partículas, y otros factores de uso normal como *porosidad eficaz*, que toma en cuenta el volumen de poros interconectados.

La *permeabilidad* o conductividad hidráulica es la propiedad que permite la filtración de fluidos a través de poros interconectados y se definen otros parámetros, sin considerar en la relación la totalidad de los utilizados en la técnica de estudio de los suelos, del tipo, grado de saturación, capacidad de almacenamiento, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, presiones intersticiales, etc., con definiciones precisas de tipo matemático que tienen utilidad según el problema técnico en estudio y los ensayos característicos para su determinación.

Importante para el estudio de la estabilidad de taludes y escombreras es el efecto del agua en la resistencia al corte de los materiales.

En suelos de tipo gravas y en la mayoría de rocas duras, las propiedades friccionales y cohesivas no se ven afectadas, en gran manera, por la presencia de agua, siendo la presión intersticial y no el contenido de agua la causa de la reducción en la resistencia de los materiales. Por el contrario en suelos cohesivos, el contenido de agua puede variar considerablemente la fricción y la cohesión.

Ley de Darcy

En la determinación de los flujos de agua en el terreno se utiliza la ley de Darcy para flujos laminares

$$q = A \cdot v = A \cdot k \cdot i$$

A: Sección del terreno perpendicular al flujo.

$$v = k \cdot i$$

i: Gradiente hidráulico.

$$i = \Delta h / l$$

$\Delta h = (z_a + P_a/\rho) - (z_b + P_b/\rho)$: *Pérdida de carga* o diferencia de nivel piezométrico.

l: Distancia entre los puntos en proyección horizontal; k: constante que se denomina coeficiente de permeabilidad y se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente unidad a temperatura fija.

$$k = K \cdot \rho \cdot g / \mu$$

- k: Es un coeficiente que tiene unidades de velocidad ya que el factor i es adimensional.
- K: Permeabilidad intrínseca (cm^2).
- ρ : La densidad del fluido.
- g: la aceleración de la gravedad.
- μ : La viscosidad del fluido.

La velocidad de circulación es función de los diferentes regímenes de circulación y se puede determinar por las expresiones:

- Régimen laminar: Ley de Darcy $v = k \cdot i$; $q(m^3/h) = A(m^2) \cdot v(m/h)$
- Régimen turbulento: $v = c \cdot \text{raiz}(i)$
- Régimen mixto: $v = k \cdot i + c \cdot \text{raiz}(i)$

c: Es la permeabilidad hidráulica o permeabilidad en régimen turbulento que se determina a partir del número de Reynolds.

Redes de flujo. El agua al atravesar un medio permeable fluyen a través de los poros en infinitas líneas de flujo que interconectan entre ellas. Esta mallas o redes de flujo, para determinadas condiciones de contorno como:

- Terreno homogéneo (medios homogéneos e isótropos).
- Terreno y agua incompresibles.
- No existe consolidación o expansión.
- El flujo es laminar.
- Se cumple la ley de Darcy.

Con estas simplificaciones, y suponiendo un flujo bidireccional, el problema de la transferencia de masas de tipo general que responde en su planteamiento genérico a una ecuación de Poisson, $\nabla^2 h = f(xyz)$, se simplifica y se transforma en la solución de la ecuación de Laplace para dos dimensiones:

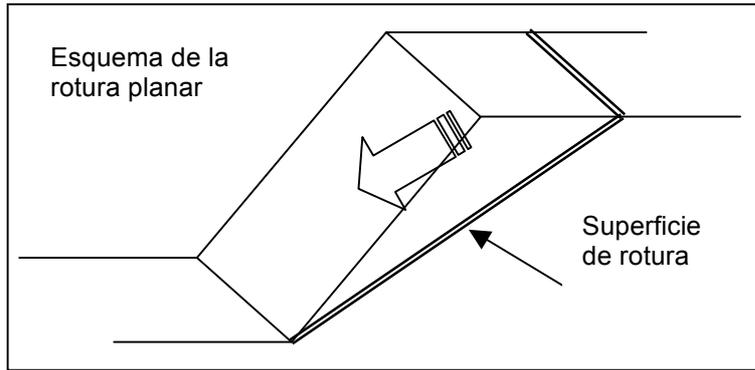
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

La solución da lugar a dos familias de curvas ortogonales entre si, las líneas de corriente $\psi = \text{cte.}$ y las líneas equipotenciales $\Phi = \text{cte.}$

Las primeras son las líneas seguidas por el agua al fluir a través del suelo y rocas saturadas, para un régimen estacionario siempre son las mismas siendo constante la cantidad de fluido que pasa entre dos líneas de corriente. Las líneas equipotenciales, ortogonales con las anteriores, son aquellas que presentan una misma altura piezométrica o carga hidráulica “h” en todos sus puntos⁹.

Esta solución general de la ecuación de Laplace, y su aplicación, es lo indicado en el apartado anterior en su aplicación a la solución para talud infinito y así obtener las conclusiones allí indicadas, sobre la base de las redes de flujo.

⁹ Para ampliación de los conceptos y su aplicación incluidos en la nota técnica se puede consultar el manual de Ingeniería de Taludes, IGME, 2006, capítulo 6.



El cálculo del factor de seguridad se obtiene de forma directa como el cociente entre las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento y las fuerzas resistentes del terreno que se oponen al mismo, proyectadas según la dirección del plano de rotura.

Se supone que la rotura se produce únicamente por deslizamiento.

En el caso más general se considera que el plano de deslizamiento está limitado en su parte superior por una grieta de tracción, según la figura siguiente, que se puede suponer plana y se obtiene el factor de seguridad que viene dado por la expresión:

$$FS = \frac{c' A + \left\{ W \cdot \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \psi_p - \frac{a_H}{g} \sin \psi_p \right] - U - V \sin(\psi_p + \delta) \right\} \operatorname{tg} \varphi'}{W \left[\left(1 + \frac{a_v}{g} \right) \sin \psi_p + \frac{a_H}{g} \cos \psi_p \right] + V \cos(\psi_p + \delta)}$$

Siendo:

c' : Cohesión efectiva en la superficie de deslizamiento.

φ' : Ángulo de rozamiento interno efectivo en la superficie de deslizamiento; $A = (H - z)/\sin(\psi_p)$.

A : Área de la superficie de deslizamiento, supuesta de ancho unidad; $A = (H - z)/\sin(\psi_p)$.

W : Peso de la masa deslizante, supuesta de ancho unidad.

ψ_p : Ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.

δ : Ángulo que forma la grieta de tracción con la vertical.

g : Aceleración de la gravedad.

a_v : Aceleración vertical. Se supone que actúa un terremoto o vibraciones por el efecto de una voladura que se asimila a la aparición de una aceleración vertical.

a_H : Aceleración horizontal. Se supone que actúa un terremoto o vibraciones por el efecto de una voladura y que se asimila a la aparición de una aceleración vertical.

V : Resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre la grieta de tracción. Se considera una distribución triangular, $V = (1/2) \cdot \gamma_a \cdot z_a$

γ_a : Densidad del agua.

z_a : Altura geométrica vertical del nivel del agua en la grieta.

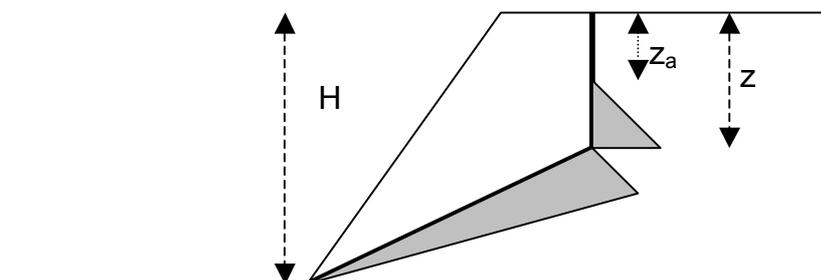
U : Resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre el plano de deslizamiento. Se considera una distribución triangular, $U = (1/2) \cdot \gamma_a \cdot z_a \cdot (H - z)/\sin \psi_p$

γ_a : Densidad del agua.

z_a : Altura geométrica vertical del nivel del agua en la grieta.

z : Altura total de la grieta vertical.

H : Altura vertical total del talud). Ver figura.



Las aceleraciones, si se consideran en el cálculo, se debe hacer en la dirección más desfavorable por lo que hay que calcular con los dos sentidos posibles para a_v .

La fórmula es aplicable, y se simplifica, cuando no se consideran las acciones de las vibraciones (caso de $a_H = a_v = 0$) y al caso en que se considere el terreno totalmente seco haciendo ($U = V = 0$).

Si no se considera la existencia de la grieta de tracción, el plano de deslizamiento se prolonga hasta la superficie del terreno y se aplica la fórmula anterior con la condición $V = 0$.

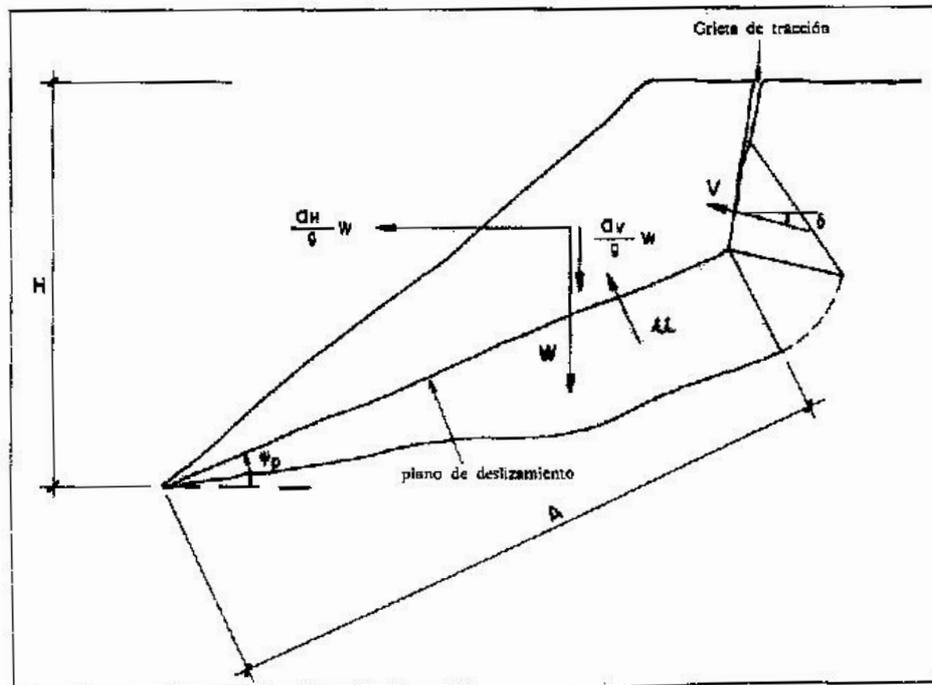


Figura 13.14. Análisis de estabilidad en rotura planar. Fuerzas actuantes.

La expresión, con las condiciones anteriores de $a_H = a_v = 0$ y de $U = V = 0$, se simplifica y queda la expresión correspondiente a una masa W que se desliza por un plano de ángulo ψ_p que tiene un coeficiente de cohesión c y un ángulo de rozamiento interno de $\text{tg}\varphi$, similar en su formulación a la obtenida para talud infinito.

$$FS = \frac{c' \cdot A + \left\{ W \cdot \left[\cos\psi_p \right] \right\} \text{tg}\varphi'}{W \left[\text{sen}\psi_p \right]}$$

Los anclajes (T) se calculan como en el caso general, por unidad de longitud de talud, sumando al numerador la parte $T \cdot \cos\theta$ y restando al denominador la parte $T \cdot \text{sen}\theta$, (θ : ángulo del anclaje con la normal al plano de deslizamiento).

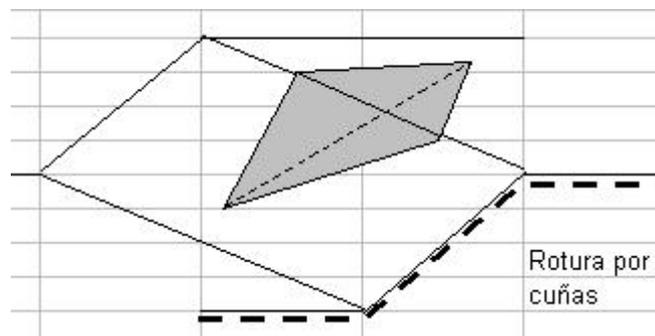
13.4.2.4. Rotura por cuñas

Es aquella producida a través de dos discontinuidades dispuestas oblicuamente a la superficie del talud, con la línea de intersección aflorando en la superficie del mismo y buzando en sentido desfavorable.

La dirección de deslizamiento es la de la intersección de las dos familias de discontinuidades y ha de tener menor inclinación que el talud. La figura es una cuña que se desliza.

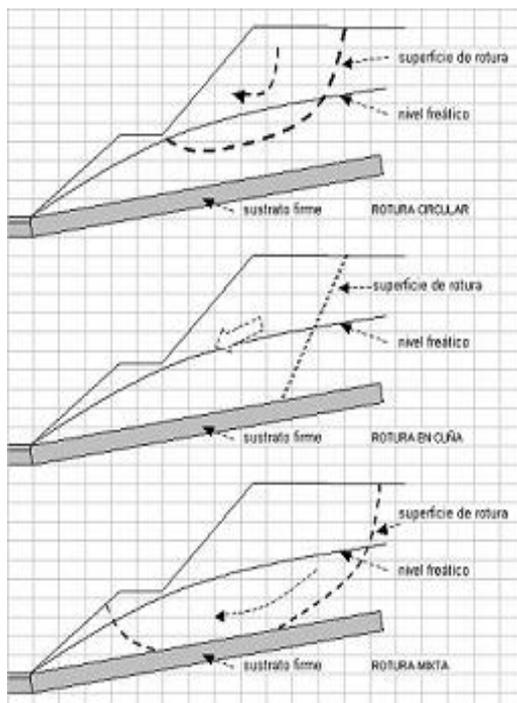
El análisis de la estabilidad responde al principio de equilibrio de las masas y se deduce de su estudio los principios siguientes:

- El FS es independiente de la altura del talud.
- El FS es independiente de la dirección del plano del talud.
- De forma general no es de aplicación al supuesto de las escombreras donde se establece una cierta homogeneidad en el terreno depositado. No existen discontinuidades preferentes tal como supone este método de cálculo.



13.4.2.5. Rotura circular

Corresponde al deslizamiento de una masa a través de una línea circular y, normalmente, se produce en depósitos en los que los materiales presentan unas propiedades geotécnicas homogéneas.

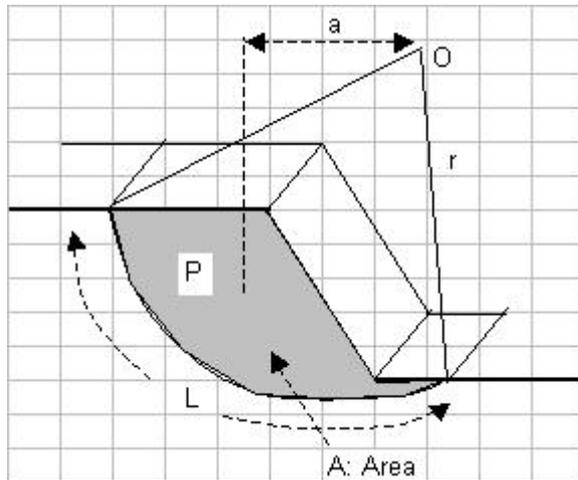


Los materiales vertidos en una escombrera se encuentran como fragmentos con tamaños pequeños en comparación con las dimensiones del depósito. Inmediatamente después del vertido no existe componente de cohesión resistiva de los materiales ($c = 0$), pero el paso del tiempo facilita los fenómenos de consolidación y esto se traduce en un aumento de la cohesión y consecuentemente en un aumento de la resistencia al corte de los materiales depositados en una escombrera.

También el paso del tiempo permite la aparición de fenómenos (fuertes lluvias con aumento del nivel freático, pudiendo llegar incluso a la inundación si los sistemas de drenaje no funcionan correctamente), que pueden modificar la estabilidad de los materiales depositados.

Los principales tipos de rotura que aparecen en escombreras son de tipo circular, en cuña y mixtos, considerando este último como una combinación de la rotura circular que es por vuelco del material, y la de cuña que es por el concepto de desplazamiento.

Los métodos de análisis de estabilidad son muy diversos y se basan en comparar las fuerzas que actúan para favorecer el movimiento de la masa de materiales a través de una hipotética superficie de rotura con las fuerzas resistentes estabilizadoras. Los cálculos se simplifican llevándose a cabo en secciones verticales (dovelas) y los métodos simplificados, normalmente, no tienen en cuenta las fuerzas resistentes que actúan en los extremos de la masa en movimiento para simplificar los cálculos.



El factor de seguridad para el modelo general, de tipo circular en la figura, corresponde a la expresión:

$$FS = \frac{F_T \cdot L \cdot r \cdot b + F_{RL}}{P \cdot a \cdot b}$$

Siendo:

FS: Factor de seguridad.

F_T : Fuerza tangencial resistente sobre la superficie de rotura.

F_{RL} : Fuerzas resistentes laterales. contribución de los extremos de la masa deslizante al efecto de resistencia al desplazamiento.

L: Longitud del arco de la superficie de rotura; este valor no conocido a priori y se deben estimar varias soluciones hasta dar con la más desfavorable, aquella que hace que el coeficiente de seguridad sea más bajo. Se deben evitar todas aquellas cuyo resultado sea $FS < 1$, ya que en este caso se producirá el movimiento de las masas.

r: Radio de la superficie de rotura.

b: Longitud de la masa deslizante; Este valor desaparece cuando se considera despreciable el efecto lateral y se calcula por unidad de longitud de talud.

a: Distancia horizontal del centro "O" de rotura, eje de giro de la masa deslizante, al centro de gravedad de la masa a deslizar. Dado que no se conoce la línea de rotura a priori, ni la curvatura, este valor es, en principio, desconocido igualmente.

P: Peso de la masa deslizante por unidad de longitud.

La simplificación indicada de $F_{RL} = 0$, efectos laterales no considerados (estamos del lado de la seguridad) simplifica el método del estudio límite a la formulación:

$$FS = \frac{F_T \cdot L \cdot r}{P \cdot a}$$

Los métodos de cálculo determinan las fuerzas resultantes normales a la superficie de deslizamiento, las tangenciales y las presiones intersticiales y suelen despreciar factores complejos que en todo caso facilitan la estabilización.

Los estudios se plantean como un problema de equilibrio límite, y en ellos resulta necesario seleccionar diversas superficies de rotura hasta llegar a la más crítica para el talud considerado que será la que de un menor coeficiente de seguridad.

Según el horizonte temporal que se plantea para la estabilidad de la escombrera, se tendrá en cuenta la tensión total que actúa sobre la masa deslizante, caso de calcular las condiciones de estabilidad a muy corto plazo, o la tensión efectiva, esto es la tensión total menos las presiones intersticiales, para la estabilidad a largo plazo.

13.5. Taludes¹⁰

13.5.1. Generalidades

Se llama talud a la inclinación del paramento de un muro o de un terreno. Cuando en una ladera parte de la superficie del terreno destaca del conjunto y se desplaza hasta una cota inferior el proceso está regido por dos grupos de fuerzas: las resistentes del terreno y las desestabilizadoras.

El agua es un factor que influye reduciendo las fuerzas de fricción y cargando las fisuras existentes, lo que da lugar aun efecto de empuje al exterior. Otros factores son los: topográficos, litoestructurales y tectónicos, climáticos, etc.

En general, la inestabilidad la intensifica la acción del hombre. A veces, los fenómenos de inestabilidad se pueden conocer en la fase de diseño, otras no y aparecen posteriormente exigiendo las medidas correctoras oportunas.

Por otro lado, procesos erosivos o de meteorización pueden degradar los taludes exigiendo no sólo gastos de conservación, sino que pueden incluso afectar a su geometría y desencadenar mecanismos de rotura.

Por último, es necesario recuperar la productividad de los taludes creados, revegetándolos, lo que no sólo mejorará su estabilidad geotécnica, sino que permitirá una integración de los mismos de nuevo en el paisaje.

13.5.2. Mecanismos de movimiento de masas

1. *Desprendimientos*. Despegue de suelo o roca de una pared empinada, caída libre de la misma y rebote en el suelo o rodadura final. El movimiento es rápido.
2. *Colapsos*. Son desplomes, más o menos verticales, por socavación. Ésta se puede deber a un río, oleaje en un acantilado o meteorización del pie de la roca.
3. *Vuelcos*. Generalmente por giro de una masa hacia delante, rompiendo de modo similar a un colapso al perder el apoyo.
4. *Deslizamientos rotacionales*. La masa desliza según una superficie curvilínea, con un eje de giro por encima de su centro de gravedad.
5. *Deslizamientos planos*. Los bloques se deslizan sobre una superficie plana inclinada. También se conoce como resbalamiento.
6. *Deslizamiento en cuña*. La superficie sobre la que se mueve está constituida por dos planos.
7. *Deslizamientos concordantes*. Las masas se deslizan sobre materiales plásticos en los que se hunden por extrusión y se desplazan lentamente.
8. *Deslizamientos discordantes*. Los estratos sobre los que se deslizan las masas y la superficie de ésta son discordantes y no hay hundimiento apreciable.
9. *Deslizamiento de derrubios*. Se produce sobre suelos no cohesivos y las masa son partículas gruesas o trozos de roca.
10. *Corrimientos*. Cuando la masa que se desliza se trocea en su movimiento resultando una acumulación caótica de bloques.
11. *Movimiento con extrusión plástica lateral (expansismo lateral)*. Fracturación del material compacto por licuefacción del subyacente. Por ejemplo, por una sacudida sísmica. También se da cuando materiales duros y pesados descansan sobre otros blandos y deformables.

¹⁰ Capítulo facilitado por el profesor, Ingeniero de Minas, D. Gonzalo Pardo de Santayana.

12. *Movimientos de masas desorganizadas.*

- Flujos. Masas en movimiento continuo, con posible desplome
- Reptación. Movimientos imperceptibles, que se aprecian a largo plazo.
- Coladas de tierra. Reformación plástica lenta de tierra o rocas blandas en laderas moderadas. Dan lugar a un depósito elongado y lobulado en el pie.
- Soliflucción. Deformaciones en suelos cohesivos de poco espesor que dan lugar a formas lobuladas.
- Corriente de derrubios. Movimientos rápidos de materiales detríticos (arenas, gravas y bloques) que se desparraman en la parte inferior de las laderas sin generar un depósito de forma definida o como conos de deyección.
- Golpes de arena y limos. Movilización brusca de esos materiales, a veces secos, por colapso o sacudida (sísmica) al iniciarse la rotura del suelo por deslizamiento.
- Avalancha. Movilización de grandes masas de tierra, roca o derrubios que se desplazan a gran velocidad y se precipitan a vaguadas o más allá del pié de la ladera.

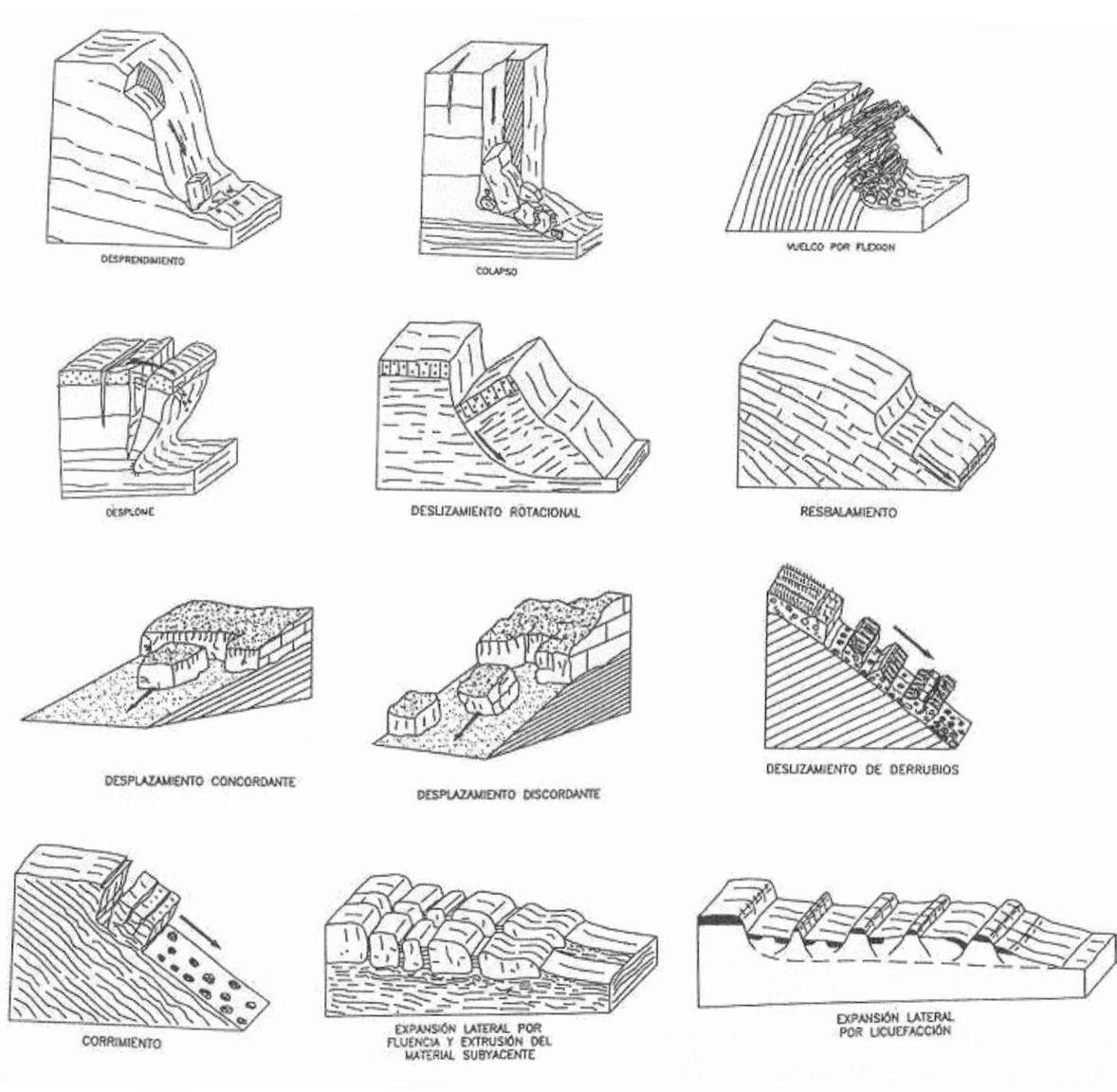


Figura 13.15. Mecanismos de movimientos de masas.

13.5.3. Otros movimientos

En este grupo se incluye las deformaciones sin rotura o previas a las roturas de los movimientos complejos.

1. Deformaciones sin rotura o previas a la rotura.

- a) Reptación por fluencia. Desplazamientos lentos inicialmente que se aceleran hasta que se produce la rotura.
- b) Cabeceo. En formaciones fracturadas con buzamiento hacia el interior del macizo. La parte superficial tiende a girar hacia abajo.
- c) Combadura. Los niveles superiores reposan sobre estratos blandos que adelgazan hacia el pie y su peso abre fisuras en los mismos.

2. Deformaciones gravitacionales profundas.

- a) Roturas confinadas. La ladera se agrieta en la cabecera y abomba en el pie.

3. Deformaciones complejas.

- a) Colapsos de volcanes. Se producen por:
 - Inyección de magma.
 - Por vapor de agua.
 - Por superación de la capacidad resistente del cono.
- b) Flujos deslizantes. Son colapsos bruscos y masivos por efecto perturbador intenso. Por ejemplo, aumento de la presión de poros debido al agua.

Todos estos movimientos pueden estar influenciados por factores geoestructurales¹¹ tales como la estratificación, las fallas, la esquistosidad, las diaclasas, las estructuras intrusivas.

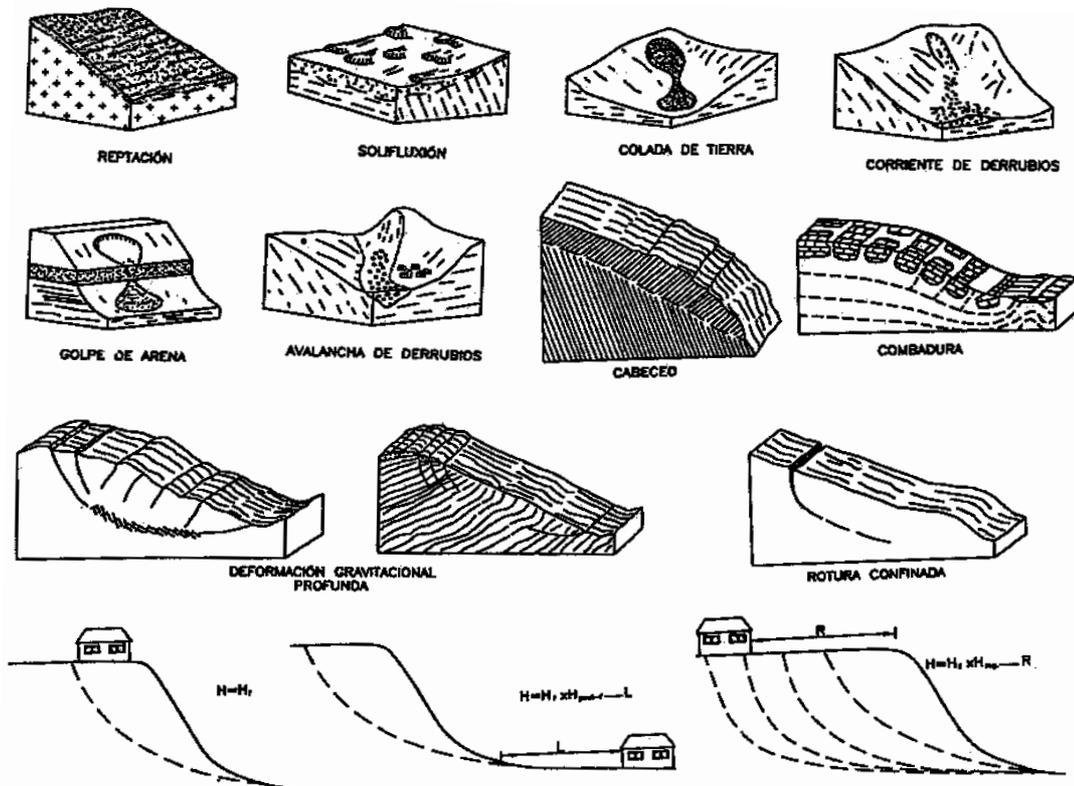


Figura 13.16. Peligros asociados a: (a) Una rotura simple. (b) Rotura con distancia de corrimiento. (c) Rotura remontante o regresiva.

¹¹ Referencia: Manual de “Estabilización y Revegetación” de López Jimeno, páginas 40 a 42.

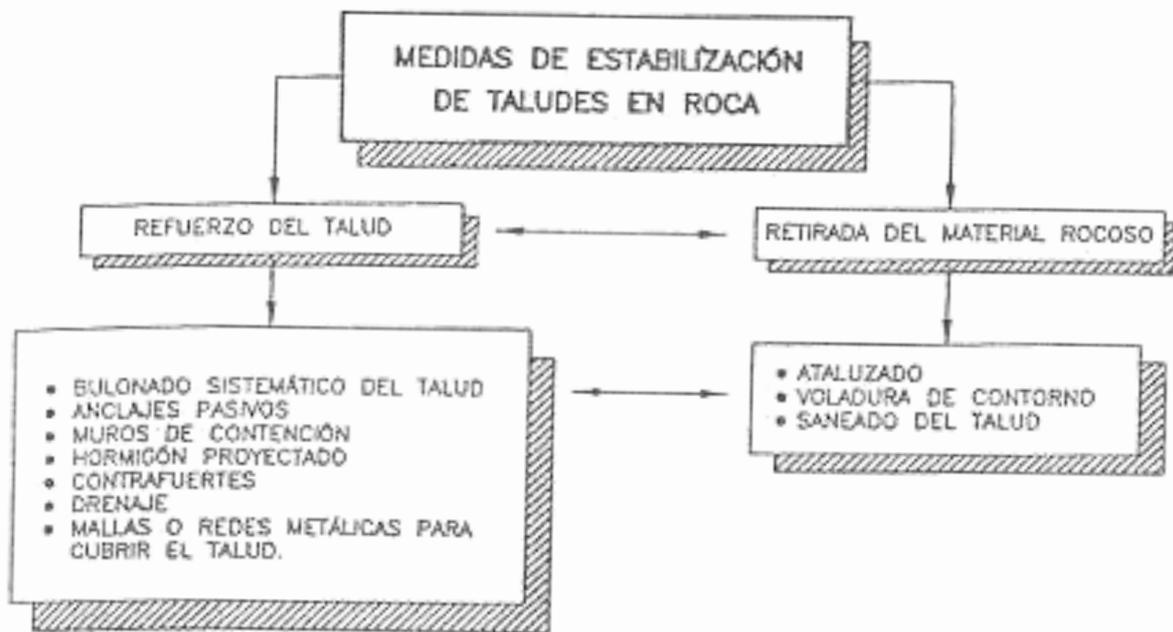
13.5.4. Factores que afectan a la estabilidad de los taludes

- Propiedades resistentes y deformaciones de los suelos y las rocas.
- Características físicas y geométricas de las discontinuidades.
- Estado tensional.
- Geometría del talud: altura, ángulo, etc.
- Técnicas de excavación o construcción.
- Condiciones del agua subterránea.
- Sistema de drenaje.
- Técnicas de refuerzo o sostenimiento.

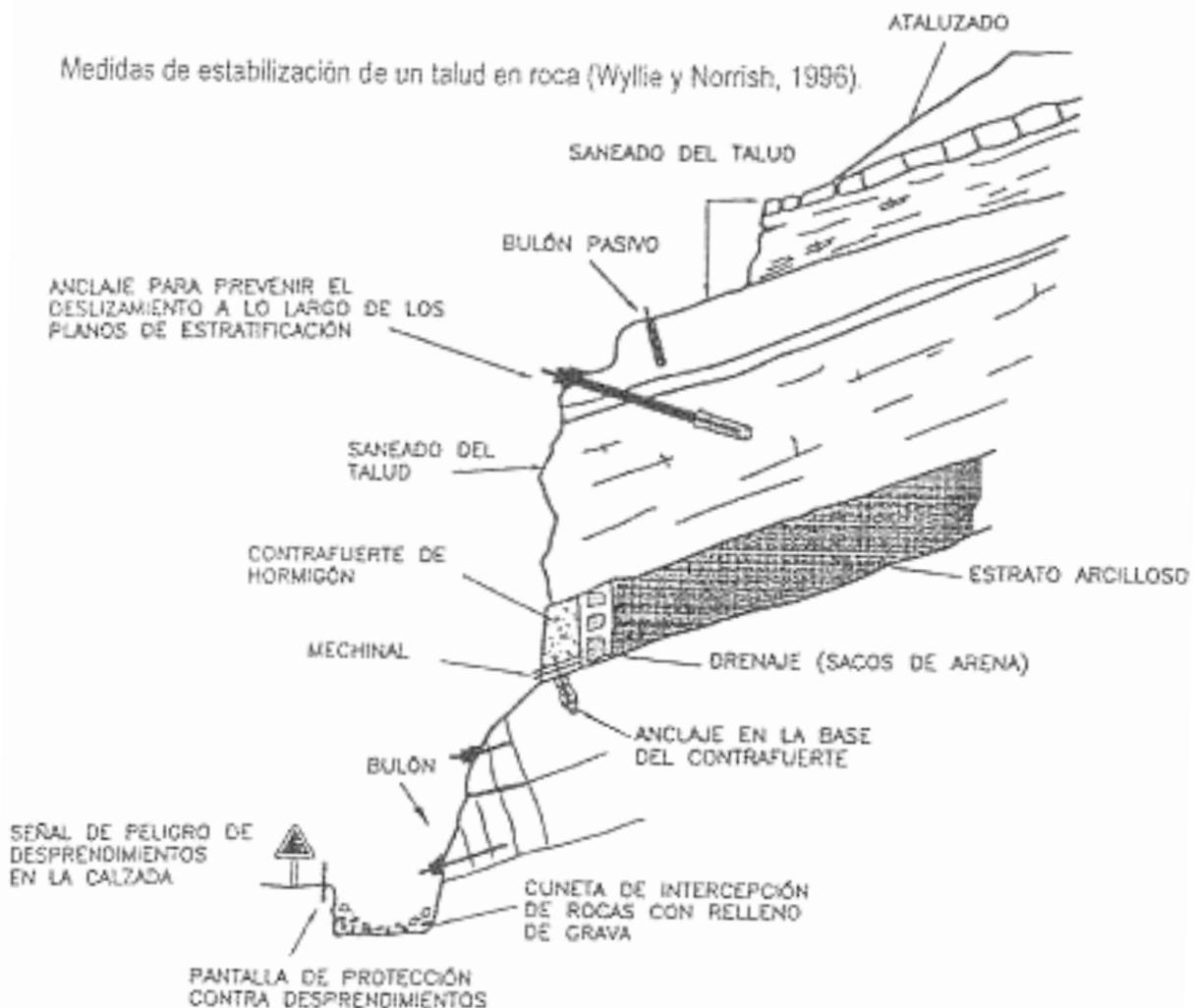
13.5.5. Estabilización de taludes

En los taludes muy cercanos a vías de comunicación (carreteras, autopistas, vía de ferrocarril, etc.), sin espacio para hacer una cuneta de recogida de fragmentos o una pantalla, se aplican las medidas siguientes.

- Refuerzo del talud.
- Retirada del material rocoso.



Medidas de estabilización de un talud en roca (Wyllie y Norrish, 1996).



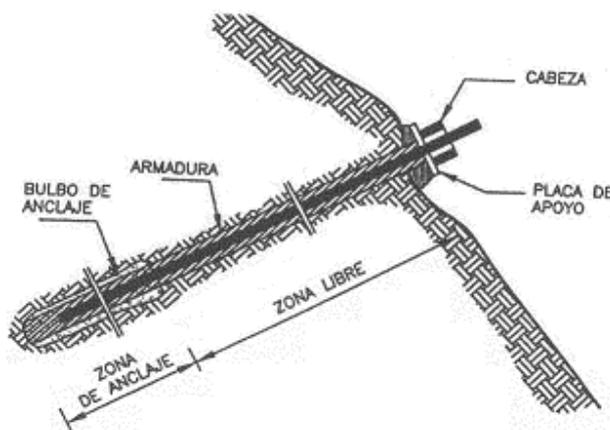
15.5.5.1. Retirada del material rocoso suelto del talud

- a) Ataluzamiento. Reducción del ángulo en la parte alta del talud, con excavadora o tractor si el material es blando.
- b) Con voladura del contorno. Si el material inestable que se pretende retirar para mejorar la estabilidad es duro, es necesario el uso de explosivos y voladura de “precorte”, tratando de no afectar a la roca con la onda de choque o la expansión de gases, para lo que se debe disparar reduciendo la velocidad crítica a valores menores de 0,6 m/seg. Hallada ésta en función de la velocidad de propagación de la onda longitudinal, la resistencia a la tracción de la roca y de su densidad por la fórmula:

$$V_{\text{critica}} = R_{\text{tracción}} / (\rho \cdot V_{\text{pro_onda_long}}) < 0,6 \text{ m/s}$$

Se puede calcular el precorte conforme a una tabla de carga distancia. Cuanto más homogéneo y menos fisurada, más eficaz será este método.

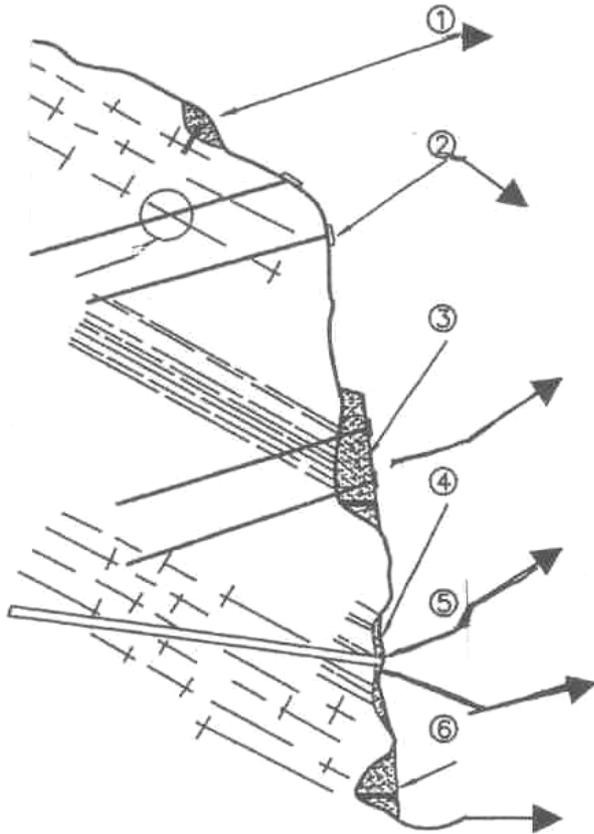
- c) Saneo del talud. La limpieza es tanto más laboriosa cuanto más altura tenga el talud.
- d) Bulonado con anclaje. Los anclajes son barras de material resistente que aportan una resistencia a tracción. Los anclajes colaboran de dos formas en la estabilidad:



- Proporcionando una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante.
- Incrementando las tensiones normales en la superficie de rotura potencial, aumentando así la resistencia al deslizamiento en dicha superficie.
- Un anclaje se compone de los elementos siguientes: Bulbo de anclaje, armadura, cabeza y placa de apoyo y se diferencian dos zonas de trabajo, la zona de anclaje en la parte más interna (bulbo) y la zona libre, que es más o menos larga, y sirve para darle profundidad al anclaje.

- Los tipos de anclaje, según la forma de trabajo o la tensión que se le da en el momento de su realización, son:
 - Pasivos: Entran en tracción al moverse el terreno.
 - Activos: Se pretensan para que actúen.
 - Mixtos: Son un tipo intermedio, se da una cierta carga inicial y entran en carga plena cuando se mueve el terreno.
 - Temporales: Tienen una vida útil de < 2 años.
 - Permanentes: Tienen una vida útil de > 2 años.
- Según el tipo constructivo pueden ser de barra o de cables.
- Según su colocación pueden ser ascendentes o descendentes.
- Según su constitución son, normalmente de acero, pero pueden ser de resina o de cemento.
- La instalación se realiza primero el taladro y luego se introduce el elemento y posteriormente se tensa según el criterio deseado.

- e) Muros de contención o contrafuertes de hormigón. Se construyen tanto al nivel del suelo como en cualquier punto de la ladera. Se construyen en capas, con mallas alternas previa instalación de anclajes profundos tensados que hacen de fuerza estabilizadora del muro. A veces, con escalonados y siempre su objeto es distribuir las cargas de los anclajes y proteger la roca del deterioro posterior.



- (1) Anclaje reforzado con hormigón para prevenir el desprendimiento de lajas de la cima del talud.
- (2) Anclajes tensados para asegurar que no se produzca colapso por desprendimiento.
- (3) Muro de contención para prevenir el colapso por deslizamiento en zonas falladas.
- (4) Hormigón proyectado para prevenir la descomposición de una roca fracturada.
- (5) Tubo drenante para reducir la presión del agua en el talud (Normalmente tubos perforados a lo largo de su longitud).
- (6) Contrafuerte de hormigón para realizar el sostenimiento de la roca en voladizo sobre una oquedad.

f) **Hormigón proyectado.** Su objetivo es proteger rocas degradadas (para frenar su degradación) o potencialmente degradadas (margas). El producto que se proyecta recibe el nombre de “gunita” y es un mortero resultante de mezclar: cemento, áridos finos, áridos gruesos, agua y aditivos.

1. Se coloca proyectándolo con un equipo neumático de modo que la fuerza de lanzamiento logre su compactación y reduzca al mínimo el “rebote” de producto.
2. Dado que el poder de sostenimiento a deslizamiento es muy bajo se suele combinar conjuntamente el bulonado y el gunitado.

g) **Drenaje.** Es necesario para reducir el deslizamiento y aliviar peso sobre el talud. Para drenar se perforan sondeos (barrenos) en el pie del talud, reduciendo así las presiones de agua intersticiales.

1. Si desde el comienzo de la construcción del talud se tiene en cuenta el drenaje y se evita además el agua de infiltración (recogida en la cresta) se puede mejorar el ángulo de diseño del mismo
2. Drenaje superficial. Para eliminar el agua de infiltración se puede hacer:
 - Con canales en creta.
 - Sellando grietas en la cresta y frente.
 - Retirando derrubios en la cresta que pueda represar aguas.
 - Con zanjas.
 - Impermeabilizando grietas.
3. Drenaje profundo. Se puede realizar con:
 - Drenes horizontales (taladros con ligera pendiente ascendente desde el eje).
 - Californiano.
 - Pozos.
 - Galerías.
 - Zanjas con relleno.

4. Mallas o redes metálicas. Las redes de cables y telas metálicas se combinan, con muy buenos resultados, con anclajes (activos o pasivos) en zonas de difícil acceso, zonas fracturadas, acantilados, etc.¹²

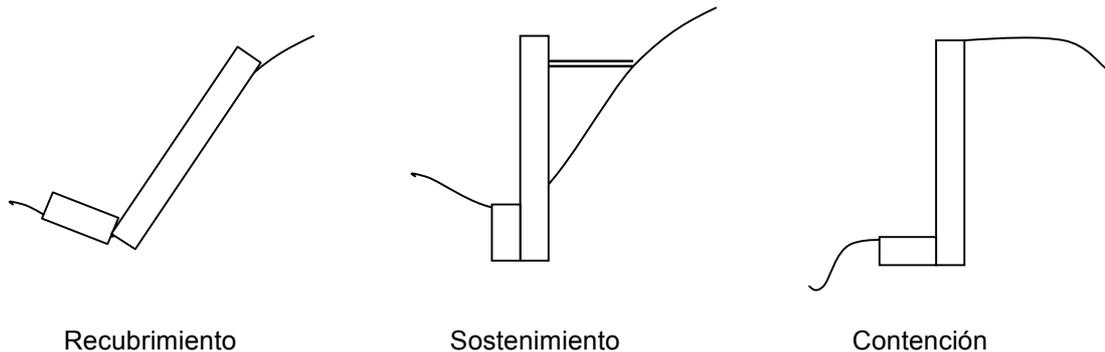
15.5.5.1. Métodos de estabilización de taludes en suelos

a) Descarga de los taludes. Las formas más comunes son:

- Quitar peso a la parte más alta del talud.
- Retirar materiales inestables.
- Tender los taludes (ataluzar).
- Banquear.
- Rellenos de baja densidad (alpacas, serrín, poliestireno...).

b) Muros. Son para incrementar las fuerzas resistentes opuestas a las desestabilizadoras. Hay tres tipos de muros que son para:

1. Recubrimientos. Crear protección ante agentes erosivos. Evitar el arrastre por lluvias o vientos.
2. Sostenimiento. Para mantener estable el talud. Se construyen alejados del terreno y luego se rellena el hueco.
3. Contención. Para contener el material suprayacente.

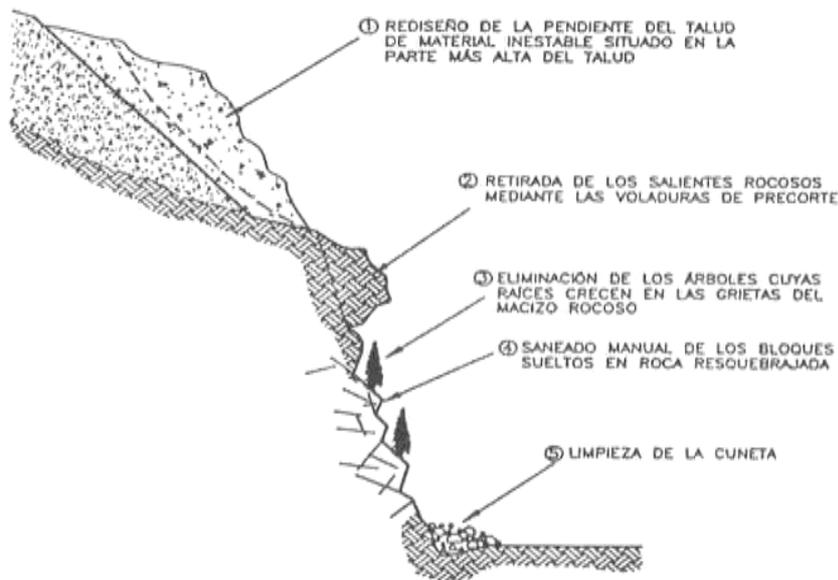


- Muros de hormigón: Por el sistema de construcción pueden ser en masa o armados.
- Muros de fábrica: Se hacen manualmente con piedras naturales o con ladrillos. Los más comunes son: De sillería o de mampostería (con relleno de mortero o con relleno de grava).
- Muros de escollera: Se construyen en dos fases, una primera de preparación del suelo y posteriormente se colocan los bloques.
- Muros de neumáticos. Sin refuerzos o con vigas o carriles.
- Muros de tierra armada. Tongadas de relleno alternando con bandas, plásticos, prefabricados de hormigón u otros materiales para dar estabilidad al conjunto.
- Muro celular verde. Se realiza con prefabricados de hormigón de formas geométricas variadas y huecos que permiten ser rellenos de tierra y facilitan la revegetación. Los huecos además facilitan el drenaje que a veces se activa con un tubo instalado tras los prefabricados a lo largo del pie.
- Muro de paneles. son estructuras para hacer paramento unidas lateralmente por armaduras metálicas. Los paneles se fijan al relleno por anclajes cuando se desea reforzar la estabilidad del conjunto.

¹² Ver conferencia del profesor Ballester, métodos desarrollados por la E.T.de I.de Caminos Canales y Puertos.

- Geotextiles y geomallas en muros. Pueden instalarse solos o complementando otras formas de estabilización. Los elementos básicos usados son:
 - Armaduras geotextiles colocadas, normalmente, entre tongadas.
 - Geotextil de vegetación, colocados en paramento exterior.
 - Mallazo de sujeción, refuerza y mantiene uniforme el talud.
- Muro de gaviones. Un gavión es una estructura paralelepípedica con mallas metálicas de alambre galvanizado de triple torsión y rellena de piedras. Se colocan los gaviones uno sobre otro al igual que una escollera, resultando el muro vertical, o en escalera. Requieren mantenimiento y son económicos.

ESTABILIZACIÓN DE TALUDES



Métodos de retirada de rocas para la estabilización de taludes

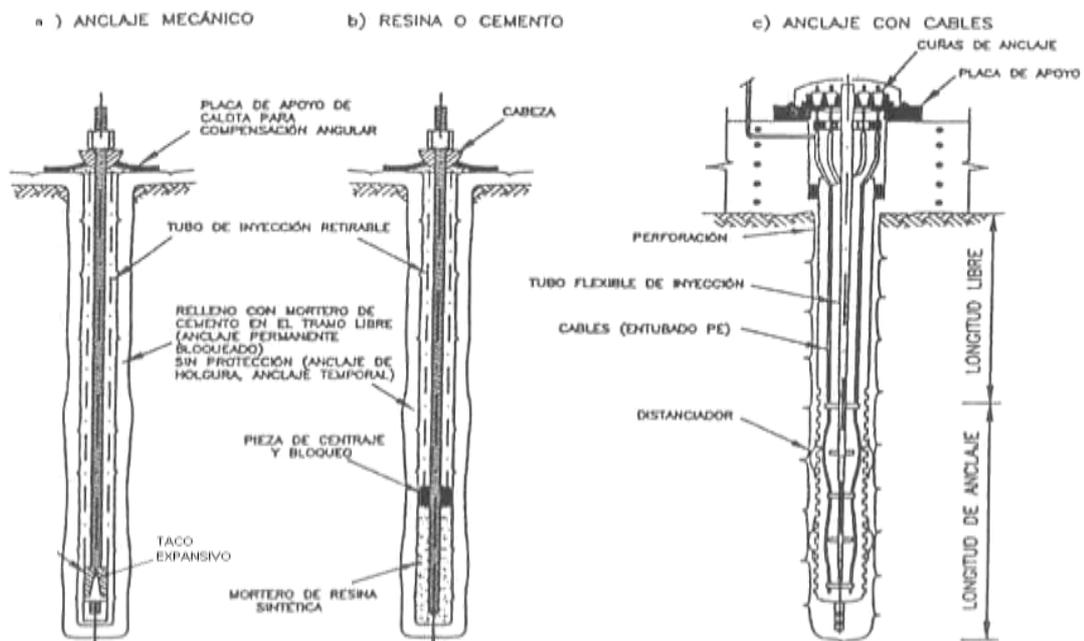


Figura 13.17. Tipos de anclaje de barra y de cables.

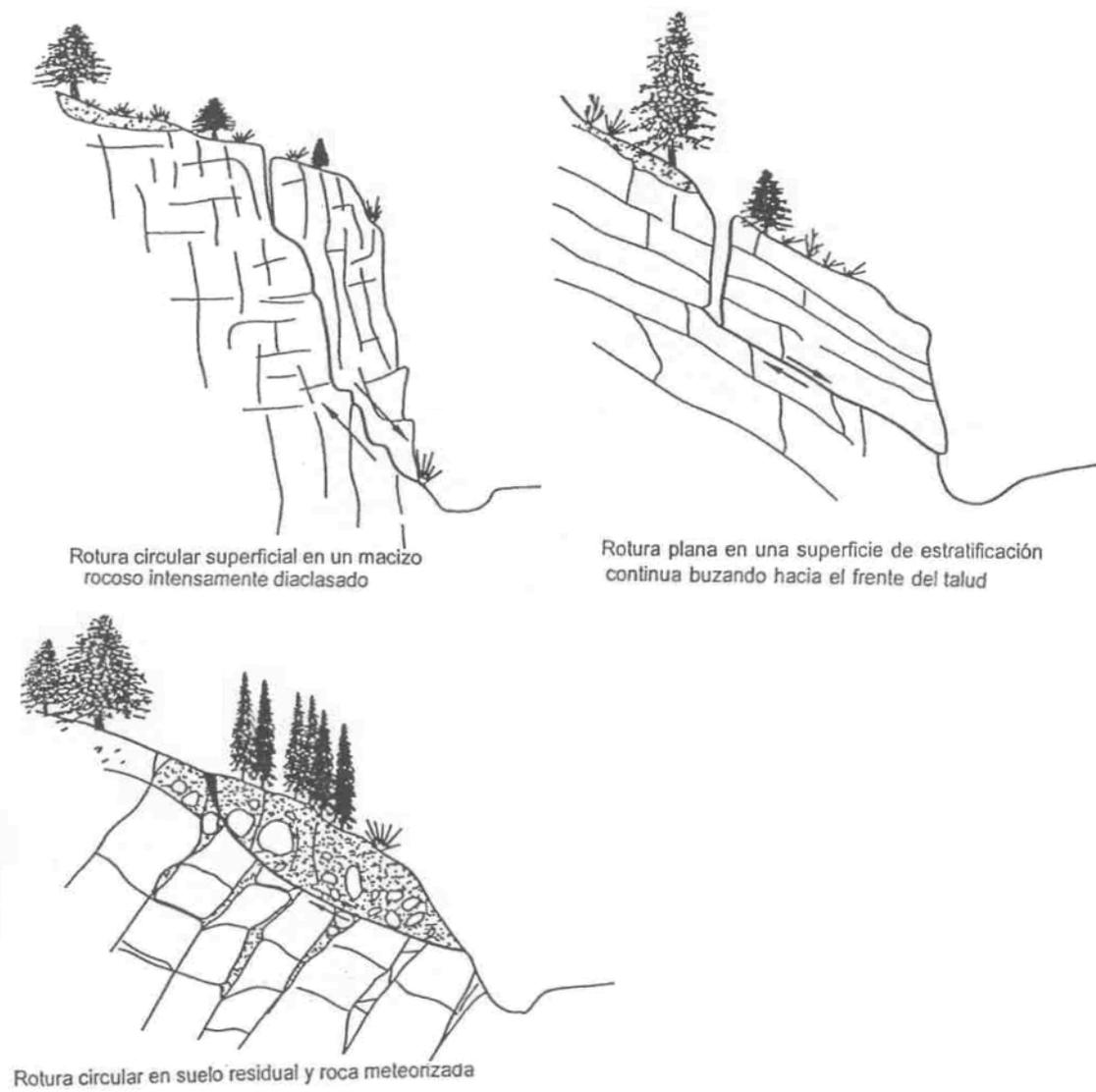


Figura 13.18. Algunos tipos de rotura de taludes en roca.

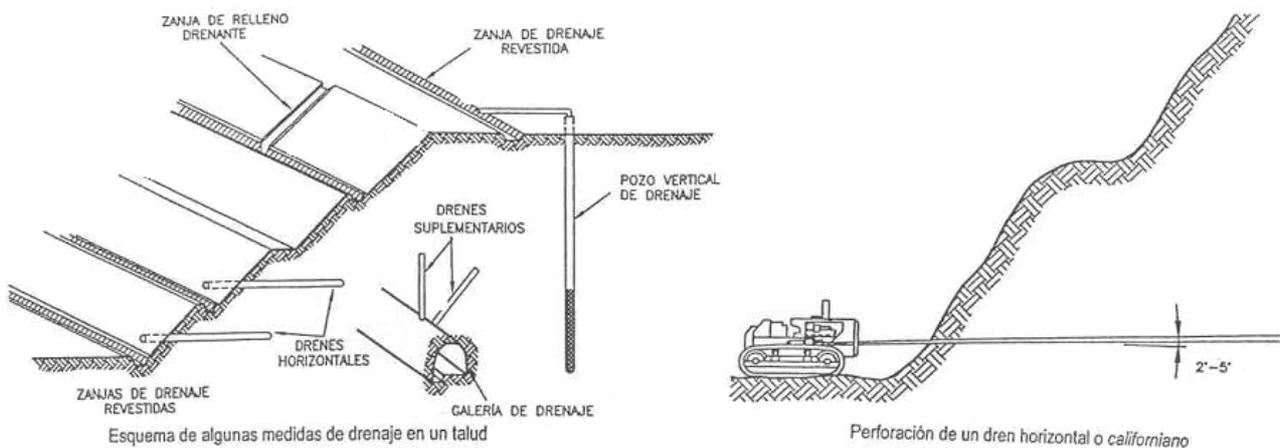


Figura 13.19. Drenaje de taludes.

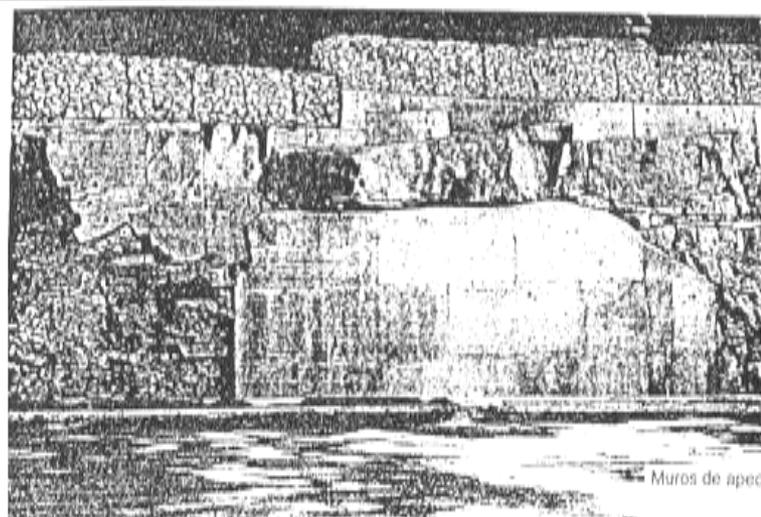
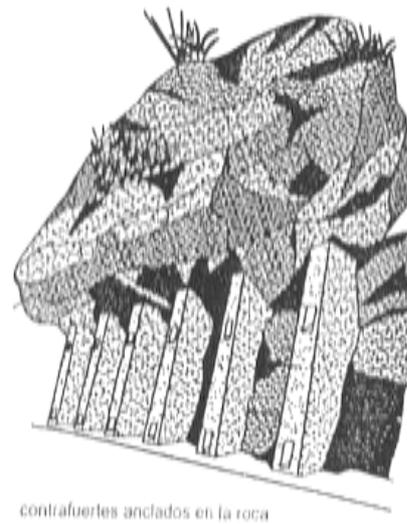
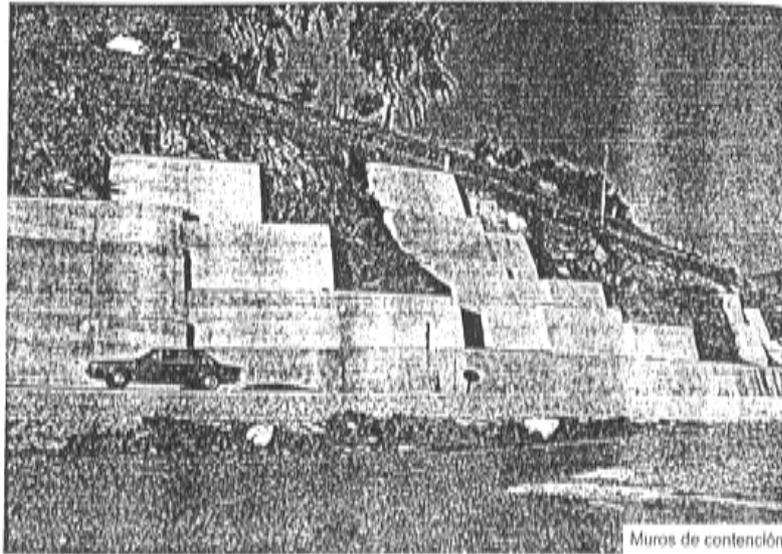


Figura 13.20. Estabilización de taludes en suelos.

Figura 13.21a y 13.21b.
Mina de Reocín (Mina de Zn y Pb), Torrelavega (Cantabria).
Rotura del dique de la mina (escombrera); situación antes y después del desprendimiento ocurrido en agosto de 1960.¹³

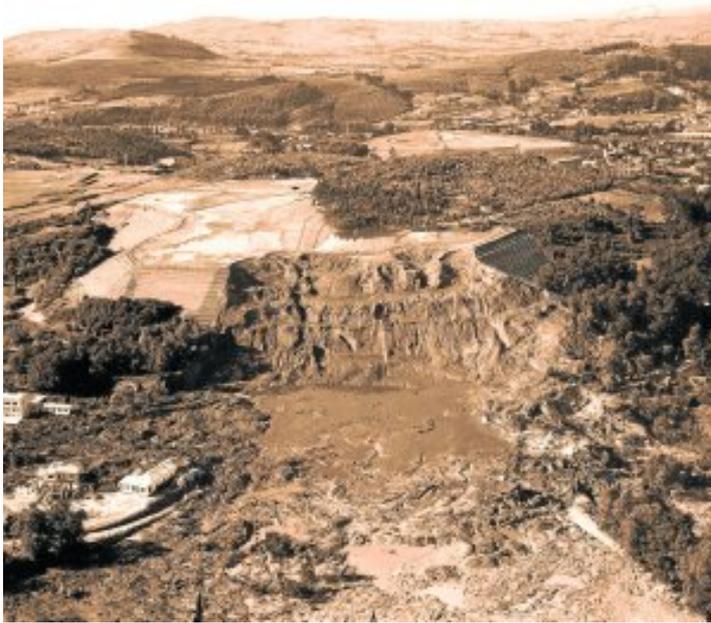


Figura 13.22a y 13.22b. Rotura, en abril de 1998, del dique de la mina de Boliden en Aznalcóllar (Mina de Zn, Pb, Cu y Ag). La mina contenía otros metales como As, Cd y Ta. Causó un vertido de residuos tóxicos de bajo pH (ácidos) en el Parque Natural de Doñana, Andalucía.



¹³ El accidente causó 18 muertos.

Anexo: Cálculo de Drenajes

Del Código Técnico de la Edificación (CTE), de marzo de 2006, apartado HS1-43, se obtiene una referencia y fórmulas de cálculo que dan el caudal para el agua de aportación que debe ser drenada por el concepto de pluviometría y acuíferos. Además se debe considerar la aportada por el propio proceso minero que se calculará según el método minero utilizado (tratamiento en forma de pulpas, aportada por técnicas de lavado, etc.).

En el tratamiento del agua de eliminación de las escombreras se deberá considerar la necesidad, si procede, de la recogida en forma de balsa para posterior tratamiento antes de verter estas aguas a la naturaleza o sistemas naturales de transporte (ríos, acuíferos, etc.).

Apéndice C. Cálculo del caudal de drenaje

1 El caudal de drenaje por metro lineal de muro en $m^3/(s.m)$ debido al encuentro con una capa freática, q , se obtiene por el procedimiento que se expone a continuación (Véase la figura C.1).

a) Cuando el arranque del muro coincide o está por debajo de la cara superior de una capa impermeable el caudal se obtiene mediante la fórmula C.1 o la fórmula C.2

$$q = \frac{K_s(P - NF)}{10} \quad (C.1)$$

$$q = \frac{K_s(H^2 - h_0^2)}{2R} \quad (C.2)$$

siendo

P la profundidad del arranque del muro con respecto a la superficie del terreno, [m];

NF el nivel freático, [m];

q el caudal de drenaje por metro lineal de muro, [$m^3/(s.m)$];

K_s el coeficiente de permeabilidad del terreno, [m/s];

H la diferencia entre la profundidad de la cara superior de la capa impermeable y el nivel freático antes de la intervención, [m];

h_0 la diferencia entre la profundidad de la cara superior de la capa impermeable y el nivel freático en el punto del terreno donde está situado el tubo drenante, [m];

R el radio de acción del drenaje, equivalente a la distancia de la zona de recarga del acuífero, [m].

b) Cuando el arranque del muro no alcanza ninguna capa impermeable, el caudal se obtiene mediante la fórmula

$$q = \frac{K_s \left[0,73 + 0,27 \frac{H - h_0}{H} \right] (H^2 - h_0^2)}{2R} \quad (C.3)$$

siendo

K_s , H, h_0 y R lo indicado para el caso a).

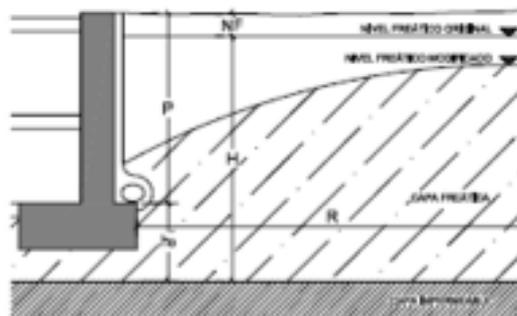


Figura C.1

Apéndice B. Obtención de la intensidad pluviométrica

	Intensidad Pluviométrica i (mm/h)											
Isoyeta	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Zona A	30	65	90	125	155	180	210	240	275	300	330	365
Zona B	30	50	70	90	110	135	150	170	195	220	240	265

- 1 La intensidad pluviométrica i se obtendrá en la tabla B.1 en función de la isoyeta y de la zona pluviométrica correspondientes a la localidad determinadas mediante el mapa de la figura B.1

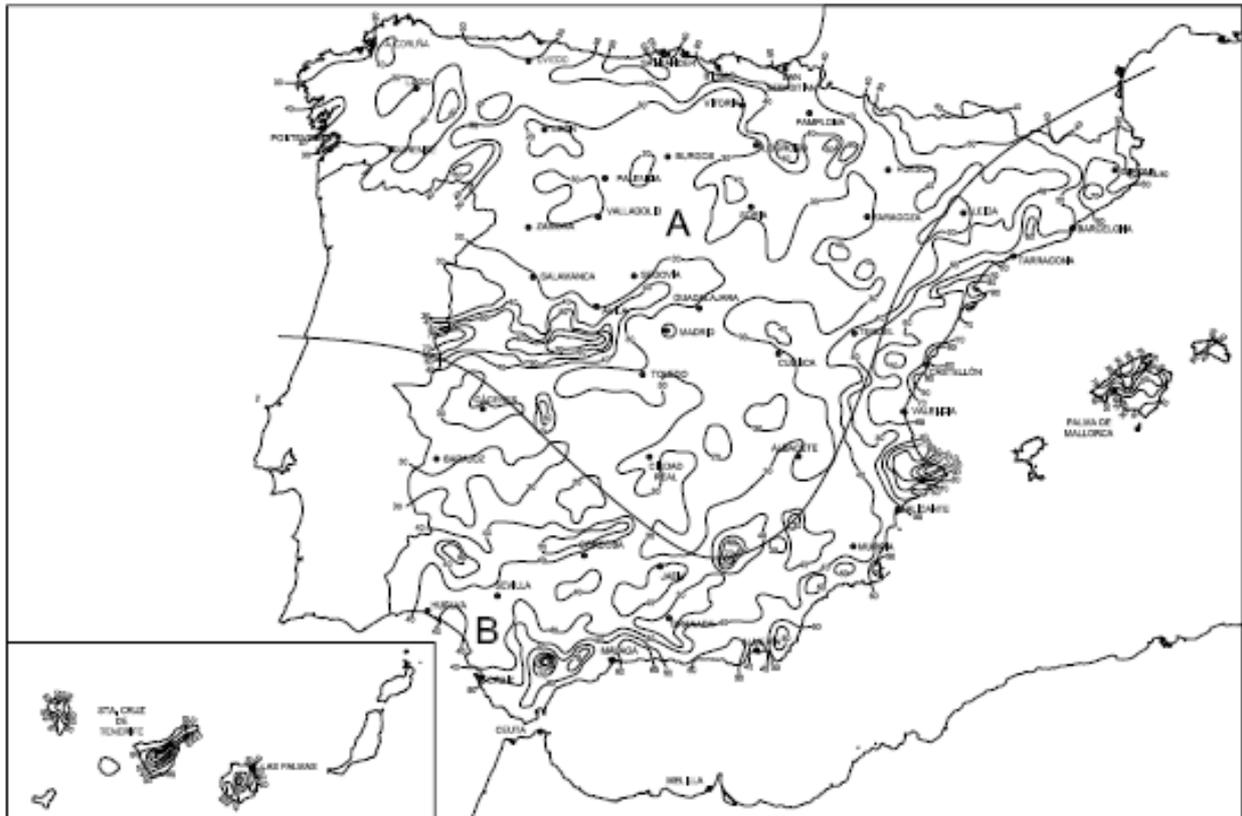


Figura 23. Mapa de isoyetas y zonas pluviométricas.