

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

A la Libertad por la Universidad !!



INGENIERÍA GEOLÓGICA II

Presas Hidroeléctricas

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

Managua, 2010

PRESAS

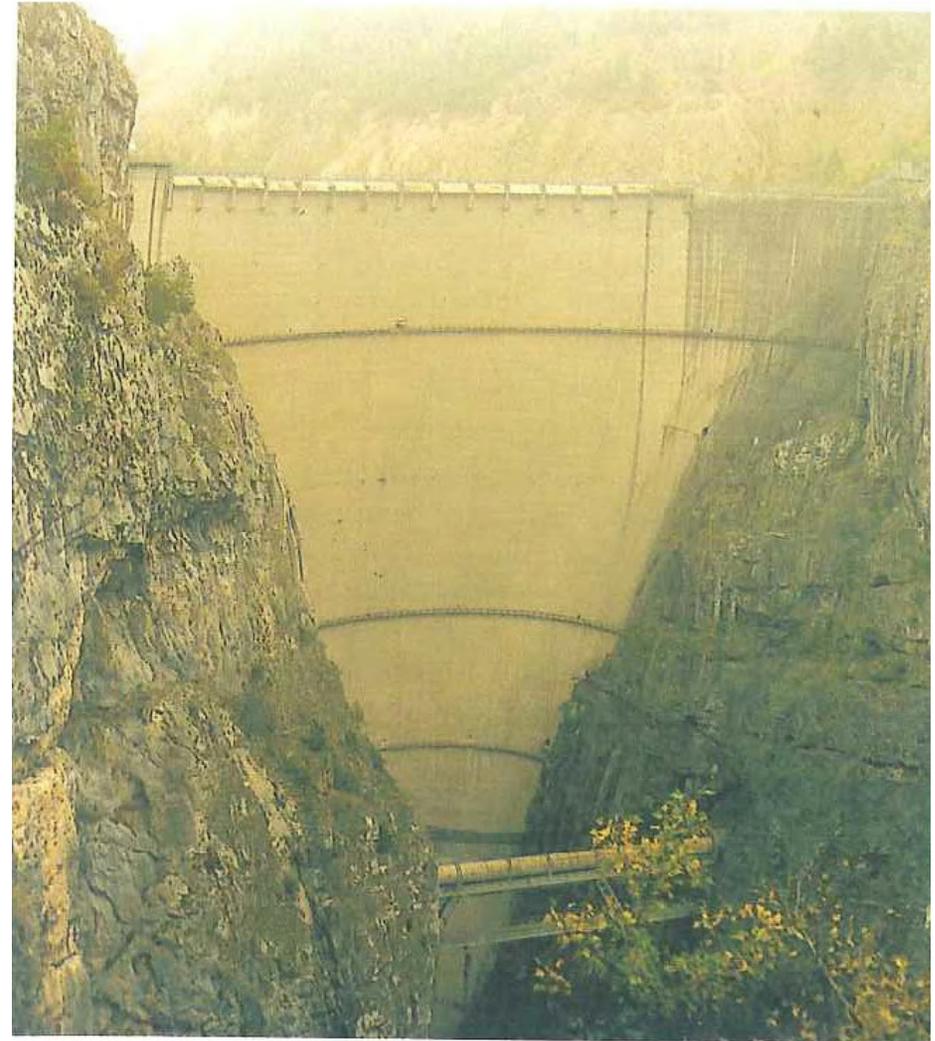
CONTENIDO

1. Introducción
2. Tipos de presa y estructuras auxiliares
3. Metodología de los estudios geológicos y geotécnicos
4. Reconocimientos geológicos e investigaciones *in situ*
5. Criterios geológico-geotécnicos de selección de presas
6. Materiales geológicos para la construcción de presas
7. Estanqueidad de embalses
8. Permeabilidad de cerradas
9. Estabilidad de laderas en embalses
10. Condiciones geológico-geotécnicas de cimentación de presas
11. Neotectónica y sismicidad natural e inducida

Introducción

Las presas constituyen una de las obras de ingeniería de mayor importancia para el desarrollo de un país, en sus distintas finalidades: para regadío, abastecimiento, control de avenidas y producción de energía eléctrica (19 % del suministro mundial), entre otros múltiples usos, como el almacenamiento de residuos mineros. El crecimiento económico está directamente relacionado con la construcción de presas, existiendo más de 45.000 grandes presas en todo el mundo (aquellas cuya altura es superior a 15 m o cuya capacidad de embalse supera los 3 millones de metros cúbicos). La escasez de recursos hídricos es una de las mayores necesidades a nivel mundial; más de mil millones de personas no disponen del agua mínima necesaria (50 l/persona/día), mientras que en los países industrializados se consume entre 4 y 14 veces la cantidad citada.

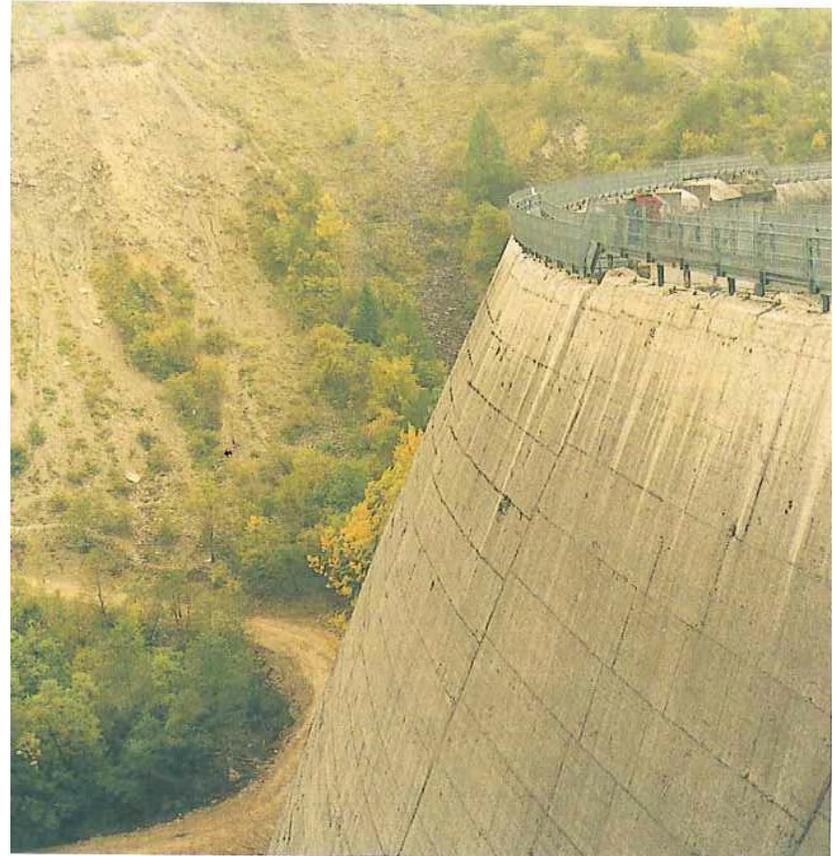
Los **problemas medioambientales** son uno de los temas más debatidos para descartar la construcción de nuevas presas. Algunos de los problemas a considerar en este ámbito son la colmatación de sedimentos y la salinización de suelos. La sedimentación afecta a gran parte de los embalses, estimándose que anualmente se pierde entre el 0,5 y el 1 % de la capacidad total de embalse por sedimentación en todo el mundo. La salinización de suelos, producida como consecuencia de la elevación del nivel freático, afecta al 20 % de las zonas reguladas por embalses, lo que implica la improductividad agrícola del suelo.



La presa de Vajont (Italia)

Otros factores medioambientales, como la erosión y pérdida de suelo, deslizamientos, sismicidad inducida, eutrofización, efectos climáticos, modificación de la dinámica fluvial, junto a los impactos sociales (40 millones de personas desplazadas en todo el mundo por causa de los embalses) y económicos (muchos países endeudados por la construcción de presas), son objeto de la actual controversia entre las necesidades de recursos hídricos, el desarrollo sostenible y las consecuencias medioambientales.

La **seguridad de las presas** es otro factor importante frecuentemente debatido entre los detractores de estas obras. Sin embargo, la seguridad de las presas es muy alta, habiendo aumentando notablemente en las últimas décadas, con un 0,5 % de roturas registradas a partir de 1950, frente al 2,2 % con anterioridad a 1950. No obstante, es significativo que la mayoría de los fallos han tenido su causa en problemas geológicos. En las presas de hormigón el 21 % de las roturas han tenido su origen en la cimentación, y en las presas de materiales sueltos el 31 % de los fallos se han debido igualmente a causas del terreno (erosión interna y cimentación).



La presa de Vajont (Italia)

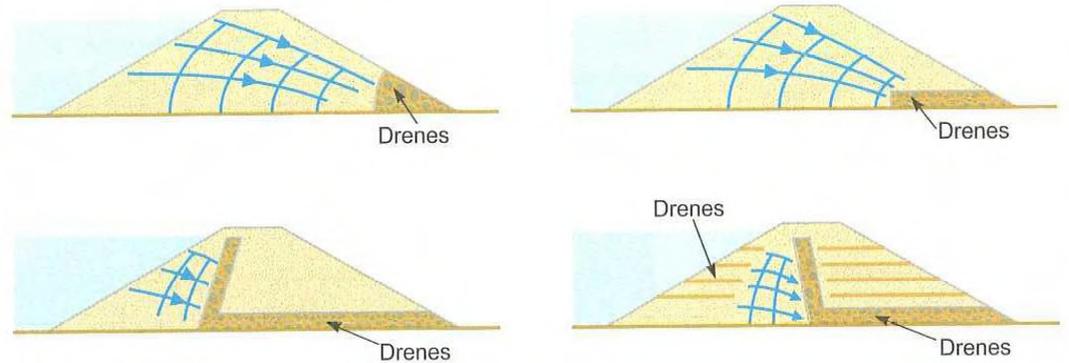
Tipos de presa y estructuras auxiliares

Las presas pueden clasificarse en función de su material de construcción en dos grupos: presas de materiales sueltos y presas de fábrica.

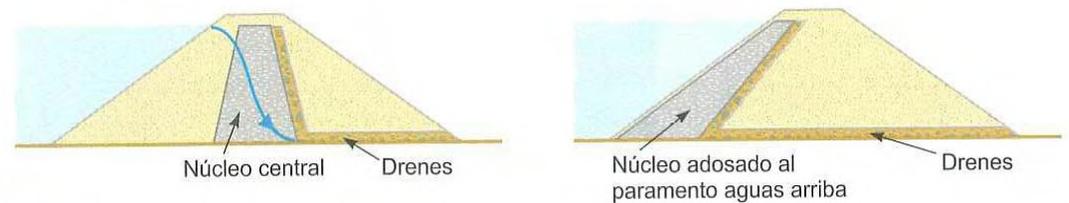
Presas de materiales sueltos

La principal característica de estas presas es el tipo de material utilizado para su construcción. En principio, la gran mayoría de materiales geológicos son aceptables, excepto los que se pueden alterar, disolver o

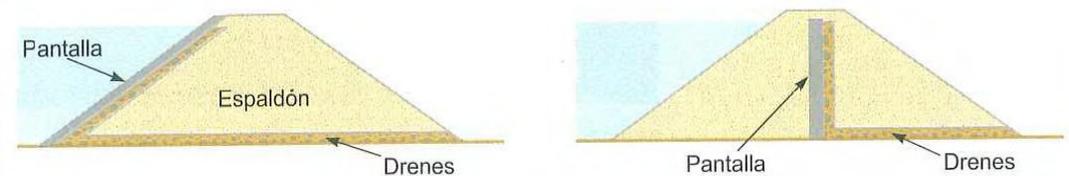
a) Homogéneas:



b) Zonadas:



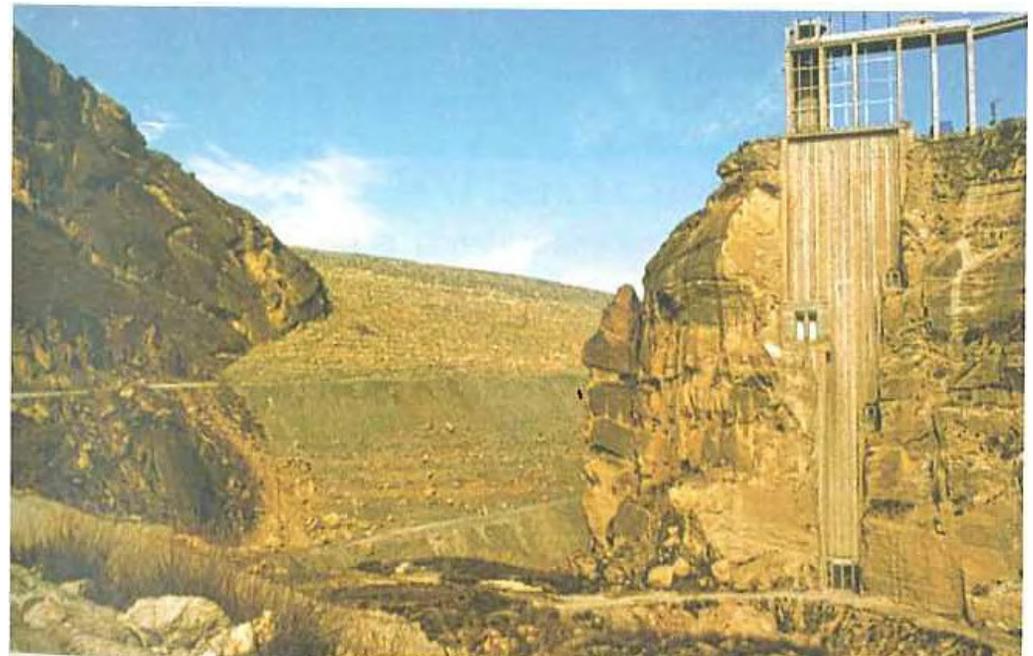
c) Con pantalla:

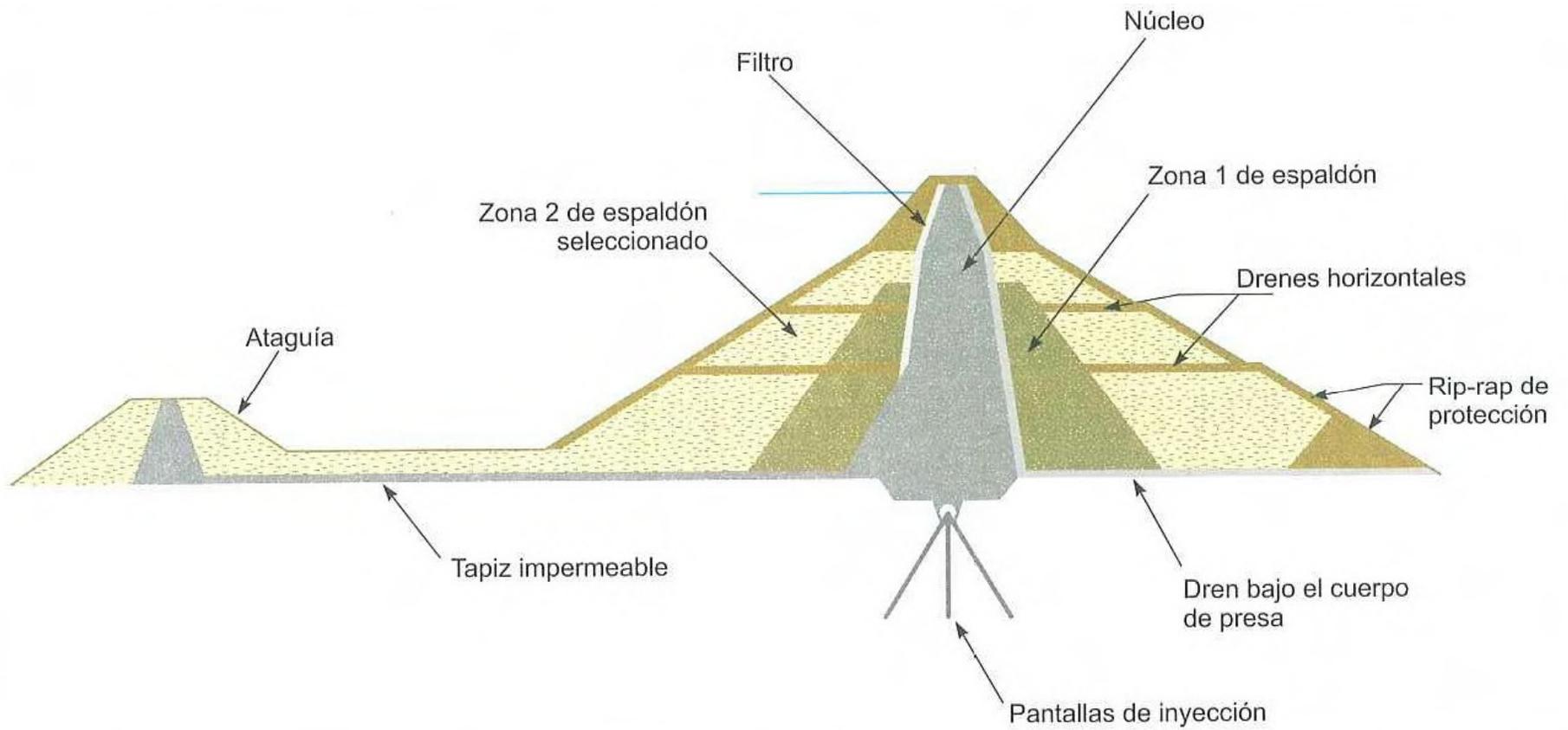




Presa de Guadarranque (Cádiz) sobre areniscas y margas del Eoceno; presa de tierras con núcleo de arcilla de 71 m de altura; en primer plano el aliviadero y al fondo la torre de toma

Presa de Canales (Granada) vista desde aguas arriba, sobre areniscas y margas limosas; presa de materiales sueltos de 156 m de altura, con espaldones de escollera y núcleo central de arcillas; obsérvese la torre de toma





Sección transversal de la presa de materiales sueltos

Presas de fábrica

Las presas de fábrica son todas, actualmente, de hormigón y pueden adoptar distinta geometría dependiendo del terreno de cimentación y la morfología de la cerrada.



Presas de Sancho (Huelva), de gravedad, de 50 m de altura (cortesía del CNEGP).



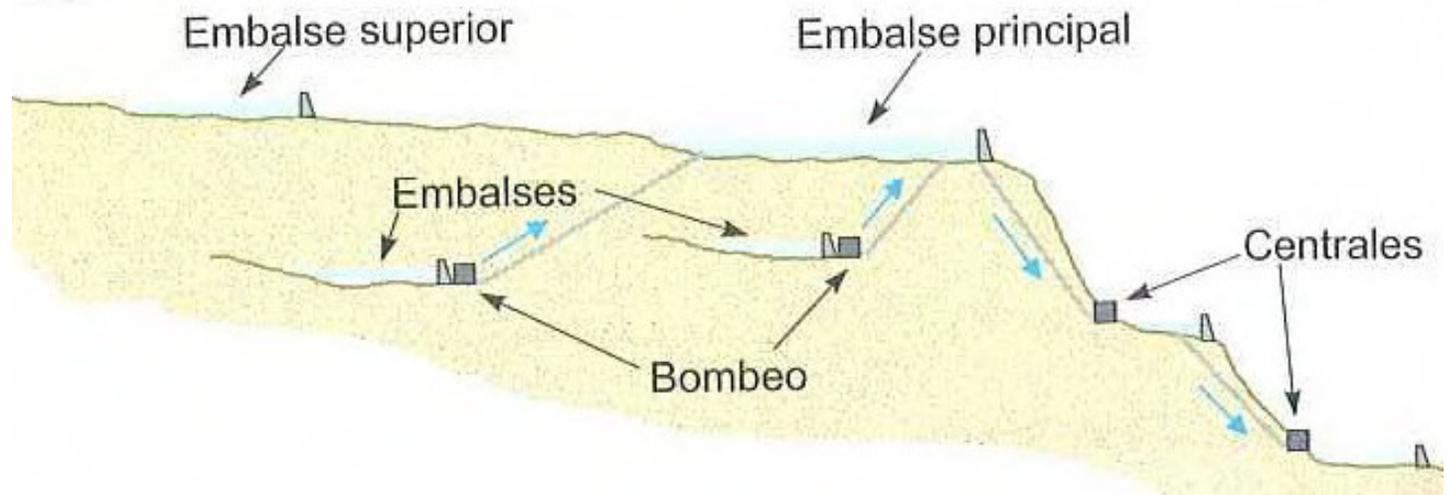
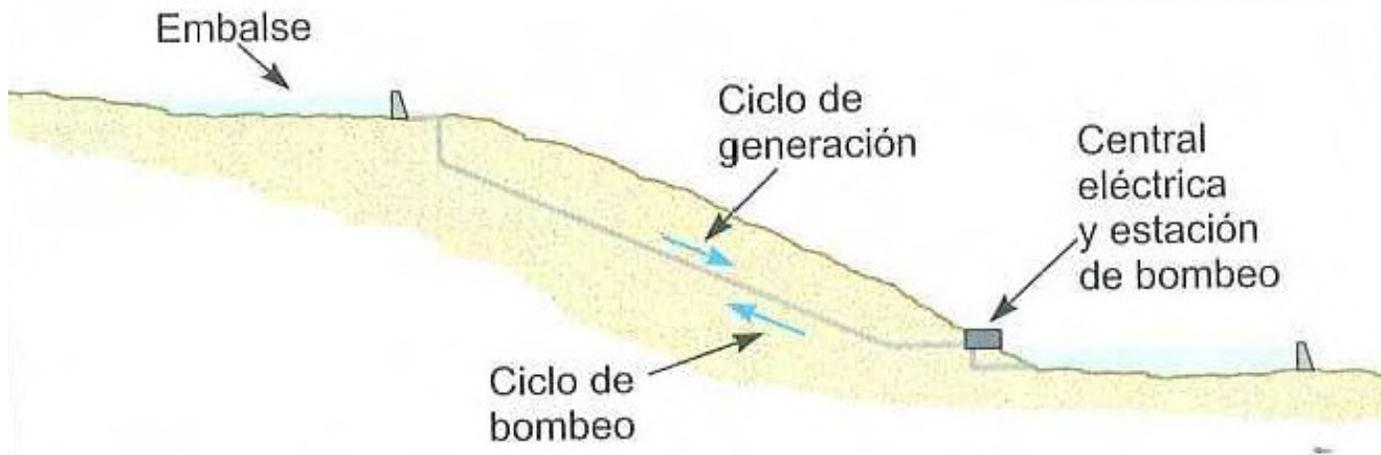
Presas de Aracena (Huelva), sobre pizarras del Silúrico; presa de contrafuertes de 60 m de altura (cortesía del CNEGP).



Presa de Canelles (Pirineo de Lérida) sobre calizas del Cretácico; presa bóveda de 151 m de altura (cortesía del CNEGP).

Estructuras auxiliares

Esquemas de aprovechamientos hidroeléctricos:
a) sistema simple de ciclo reversible, b) sistema de almacenamiento y bombeo con embalses subsidiarios situados a cotas intermedias.



Metodología de los estudios geológicos y geotécnicos

Fases	Estudios geológico-geotécnicos
Estudios de viabilidad, de soluciones y de anteproyecto	Estudios geológicos regionales <ul style="list-style-type: none"> — Investigación geológica — Impermeabilidad del vaso — Estabilidad de laderas — Aterramientos y subsidencias — Préstamos
	Estudios previos de cerradas <ul style="list-style-type: none"> — Estructura geológica — Reconocimiento geofísico — Permeabilidad
Proyecto de construcción	Caracterización de la cerrada <ul style="list-style-type: none"> — Macizos rocosos — Suelos
	Problemas específicos <ul style="list-style-type: none"> — Resistencia y deformabilidad — Permeabilidad — Obras auxiliares — Otros problemas
Desvío del río, excavaciones, construcción	Estudios durante la construcción <ul style="list-style-type: none"> — Cartografía detallada — Controles geofísicos — Ensayos de resistencia y deformabilidad — Ensayos de inyectabilidad — Otros reconocimientos — Archivo técnico de la presa
Explotación	Estudios de evaluación <ul style="list-style-type: none"> — Primer llenado — Situaciones de emergencia — Resolución y análisis de la seguridad — Presas con archivo técnico deficiente — Abandono de presas

Reconocimientos geológicos e investigaciones *in situ*

Fase de estudio	Tipo de investigaciones <i>in situ</i>	Presas de hormigón	Presas de materiales sueltos
Estudios previos y de factibilidad	— Mapas geológicos regionales	S	S
	— Fotointerpretación e imágenes de satélite	S	S
	— Reconocimientos geológicos de superficie y cartografía geológico-geotécnica preliminar	S	S
Anteproyecto	— Cartografía geológico-geotécnica de detalle (1:2.000-1:1.000)	S	S
	— Datos hidrogeológicos y ensayos de permeabilidad	S	S
	— Sísmica de refracción y sondeos eléctricos verticales	S	S
	— Sondeos geotécnicos — Instalación de piezómetros	S	S
	— Ensayos en el interior de sondeos (<i>downhole</i> y dilatómetros)	S	O
	— Ensayos de materiales	S	S
	— Galerías de reconocimiento	S	N
Proyecto	— Cartografía geotécnica complementaria	R	O
	— Sondeos geotécnicos complementarios	R	O
	— Ensayos <i>in situ</i> a gran escala de deformabilidad y resistencia	R	N
	— Ensayos de inyecciones — Ensayos de permeabilidad complementarios	R	N
	— Cartografía geotécnica de las excavaciones y cimentaciones	S	S
Construcción	— Ensayos <i>in situ</i> de verificación de tratamientos	S	S
	— Ensayos de control de materiales	S	S

(S: necesario; R: recomendable; O: opcional; N: no necesario.)

Criterios para la investigación geotécnica de presas

- Los estudios y los trabajos de reconocimiento geotécnico deben ser **realizados en fases**, utilizando los métodos más sofisticados y de mayor coste progresivamente, de acuerdo con el desarrollo del proyecto.
- Como resultado de estos trabajos de prospección se obtiene una gran cantidad de datos correspondientes a cada una de las propiedades investigadas. Estos datos deben ser representativos del macizo y permitir su **análisis estadístico**, con la definición de los valores medios de los parámetros más relevantes.
- Las investigaciones *in situ* deben ser programadas con **finés múltiples**, con lo que se disminuyen los costes y plazos para su ejecución.
- La interpretación conjunta de los parámetros geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos debe conducir a la **zonificación geotécnica** del macizo de cimentación (Figura adjunta), que servirá para la definición de las condiciones de cimentación de la presa y de las estructuras auxiliares.
- Las **zonas singulares del macizo** (fallas, zonas de cizalla, diques, zonas alteradas, etc.) se consideran como casos particulares y se estudian como zonas geotécnicas individualizadas, independientes de la zonificación general.
- La ejecución de **ensayos *in situ* a gran escala** se circunscribe a la fase de proyecto y solo en presas de hormigón. Su número es reducido y la ubicación responde a los puntos más críticos del macizo, con la finalidad de definir con detalle los parámetros de cálculo de estabilidad del conjunto presa-cimentación.

Criterios geológico-geotécnicos de selección de presas

- Capacidad del vaso (volumen de embalse).
- Impermeabilidad del vaso.
- Cerrada adecuada: condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas favorables.
- Valor de los terrenos inundados (poblaciones, infraestructuras, etc.).
- Disponibilidad de materiales de construcción próximos a la presa.
- Condiciones favorables para ubicar el aliviadero, ataguías y demás obras auxiliares.
- Altura prevista de la presa.
- Geomorfología de la cerrada.
- Disponibilidad de materiales de construcción.
- Condiciones geológico-geotécnicas de la cimentación.
- Ausencia de riesgos geológicos activos.

Impactos geoambientales en la construcción y explotación de presas

Fase constructiva	Fase de explotación	En caso de rotura
<ul style="list-style-type: none"> — Extracción de materiales (canteras y préstamos) — Vertederos de estériles y escombreras — Inestabilidad de taludes — Ruido, vibraciones y polvo 	<p>Aguas arriba:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Deslizamientos de laderas — Erosión y sedimentación — Aterramientos — Cambios hidrológicos — Inundación y pérdida de recursos — Sismicidad inducida — Cambios en la calidad de las aguas — Salinización <p>Aguas abajo:</p> <ul style="list-style-type: none"> — Erosión y sedimentación — Estabilidad de laderas — Cambios hidrológicos — Inundación del valle 	<ul style="list-style-type: none"> — Vaciado brusco del embalse — Inundación aguas abajo

Materiales geológicos para la construcción de presas

- Volumen apropiado a la magnitud de la presa.
- Calidad adecuada a los distintos fines.
- Distancia operativa.
- Facilidad de extracción.
- Condiciones medioambientales aceptables para su explotación.

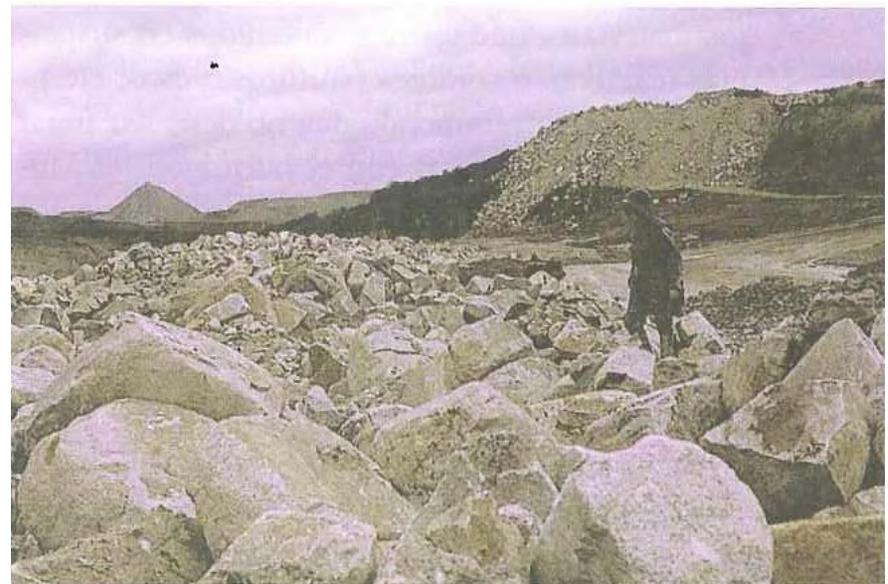
Tipología de los materiales

En función de su utilización, los materiales se agrupan en los siguientes tipos:

- Núcleos impermeables.
- Espaldones y escolleras.
- Filtros y drenes.
- Áridos para hormigones.



Aspecto de las arcillas compactadas para el núcleo de presas (foto L. González de Vallejo).



Escolleras para espaldones de presas (foto L. González de Vallejo).



Materiales del núcleo, a la izquierda, y de drenes, en primer plano (foto L. González de Vallejo).

Estanqueidad de embalses

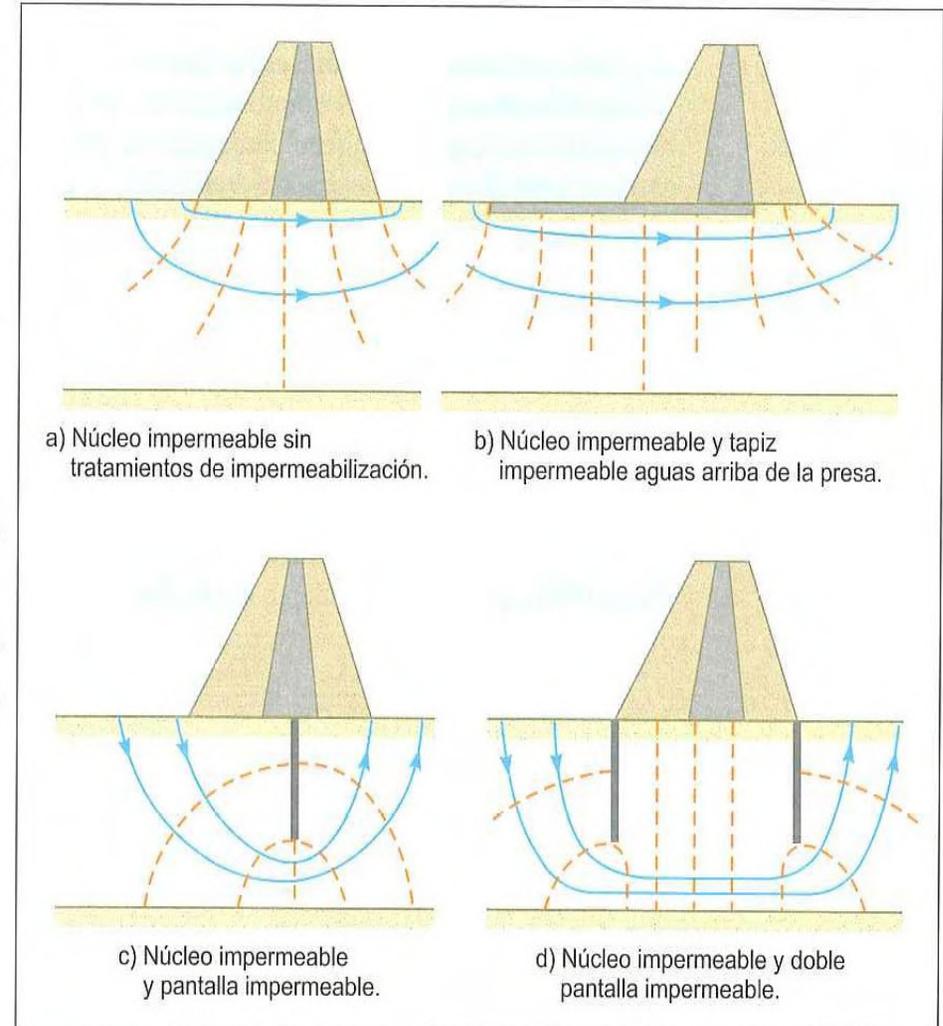
Los criterios generales para el análisis de la estanqueidad de un embalse se basan en factores hidrogeológicos, litológicos y estructurales; entre ellos se incluyen:

- Las **rocas duras y poco fracturadas** (rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias masivas, etc.) son en general favorables para la estanqueidad.
- Las **rocas sedimentarias de alto contenido en arcilla** (margas, lutitas, etc.) son muy favorables.
- Las **rocas sedimentarias fracturadas**, exceptuando las muy porosas, son igualmente favorables, ya que se supone que la transmisividad se efectúa a través de fracturas y éstas se cierran con la profundidad.
- Las estructuras geológicas, como los **pliegues**, pueden condicionar el flujo hacia el interior o exterior del embalse, por lo que deben analizarse detalladamente, así como su relación con las fallas y discontinuidades asociadas a dichos pliegues.
- Las **fracturas importantes**, diques, zonas de alteración, etc., pueden constituir vías de flujo preferente, siendo especialmente importantes en las rocas duras cristalinas y sedimentarias, donde es frecuente que las fallas pongan en contacto a rocas de muy distinta permeabilidad; el control hidrogeológico de estas fracturas y su relación estructural es determinante.
- Las formaciones menos favorables y donde son de esperar los mayores problemas de filtraciones son las **rocas calcáreas**, calizas y dolomías, afectadas por procesos de **karstificación**.
- Igualmente, otras **rocas porosas**, como algunos tipos de areniscas, determinadas rocas volcánicas, depósitos cuaternarios y algunas estructuras sedimentarias como paleocauces, son en principio desfavorables a la estanqueidad.
- También pueden darse problemas de filtración en zonas de **explotaciones mineras** actuales o abandonadas, siendo las cuencas carboníferas particularmente conflictivas, al poder combinarse los problemas de filtración con los de **subsistencia**.

Permeabilidad de cerradas

En general, las cerradas deben reunir condiciones de baja permeabilidad. Los efectos de las filtraciones, prácticamente presentes en la mayoría de los macizos, bien a través de fracturas o discontinuidades o a través de zonas alteradas, son especialmente críticos para las cimentaciones al ocasionar los siguientes problemas:

- Subpresiones en la base de la presa.
- Inestabilidades en la zona de aguas abajo de la presa.
- Creación de gradientes elevados con altas velocidades de filtración y riesgo de erosiones internas.
- Inestabilidad de taludes en los estribos.
- Pérdidas significativas de caudales.



Influencia de los sistemas de impermeabilización en la red de flujo de la cimentación de una presa de materiales sueltos con núcleo central (Attewell y Farmer, 1976).

Erosión interna

- En las **zonas de contacto entre la cimentación y la presa** a favor de fisuras en el núcleo de la presa y su contacto con el cimiento; en excavaciones de la cimentación mal ejecutadas o deficientemente inyectadas; en superficies de discontinuidad del macizo de cimentación no tratadas sobre las que se apoya el núcleo; en zonas de contacto entre el núcleo y las obras de fábrica; por irregularidades en los taludes; etcétera.
- A **través de la cimentación** por socavación de zonas de aguas abajo de la presa afectadas por filtraciones.
- En los **materiales** que forman el cuerpo de presa: zonas mal compactadas o con insuficiencia de drenaje.

Estabilidad de laderas en embalses

1. Investigar antes de la construcción de la presa la existencia de deslizamientos o zonas inestables.
2. Evaluar la tipología y actividad de los deslizamientos (ver Capítulo 14), su geometría, volumen y distancia a la presa.
3. Analizar su estabilidad considerando la hipótesis de vaciado brusco.
4. En el caso de ser posible el deslizamiento, debe valorarse su peligrosidad, pudiendo optar por tomar medidas estabilizadoras, instrumentar la ladera durante la construcción y explotación, o bien reconsiderar el emplazamiento de la presa.

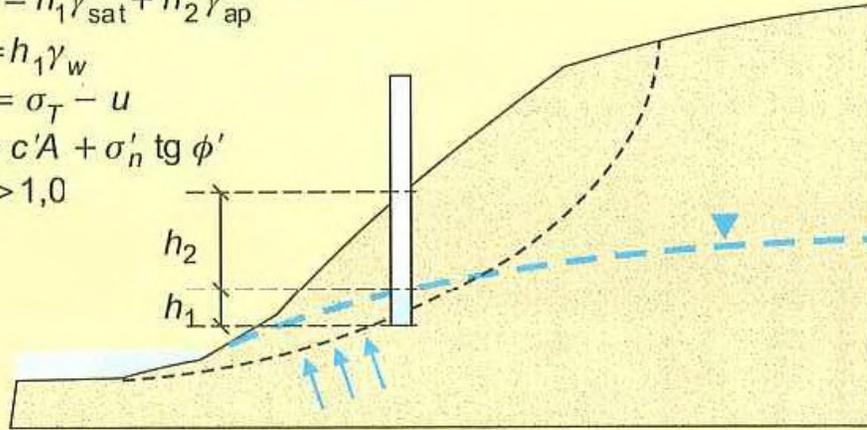
$$\sigma_T = h_1 \gamma_{\text{sat}} + h_2 \gamma_{\text{ap}}$$

$$u = h_1 \gamma_w$$

$$\sigma'_n = \sigma_T - u$$

$$\tau = c' + \sigma'_n \text{tg } \phi'$$

$$F > 1,0$$

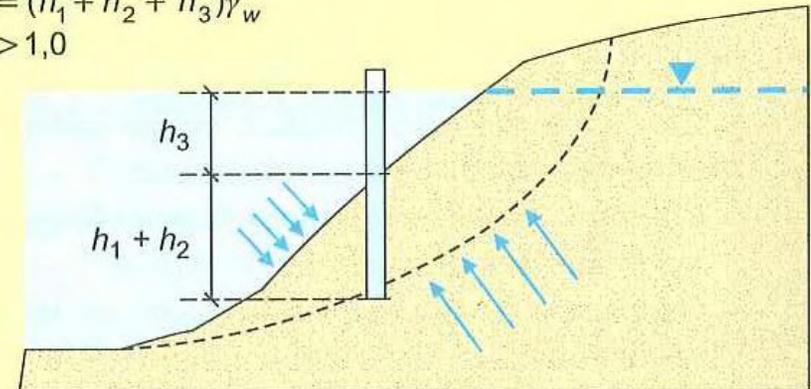


- a) Situación de equilibrio de la ladera previa al llenado del embalse para una superficie de rotura potencia

$$\sigma_T = (h_1 + h_2) \gamma_{\text{sat}} + h_3 \gamma_w$$

$$u = (h_1 + h_2 + h_3) \gamma_w$$

$$F > 1,0$$



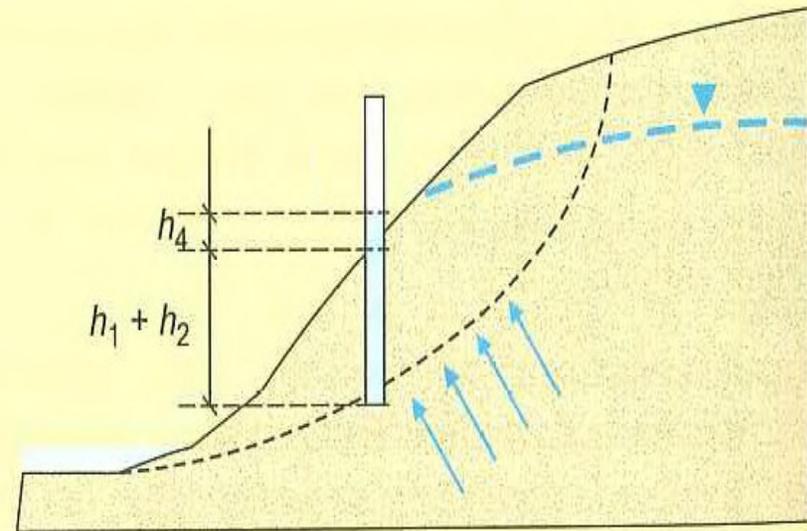
- b) Nueva situación de equilibrio tiempo después del llenado del embalse, una vez establecido el nivel freático en la ladera. El aumento de presión intersticial en el terreno se contrarresta con las fuerzas estabilizadoras generadas por el agua sobre la superficie de la ladera.

$$\sigma_T = (h_1 + h_2)\gamma_{\text{sat}} + h_4\gamma_w$$

$$u = (h_1 + h_2 + h_4)\gamma_w$$

$$F < 1,0$$

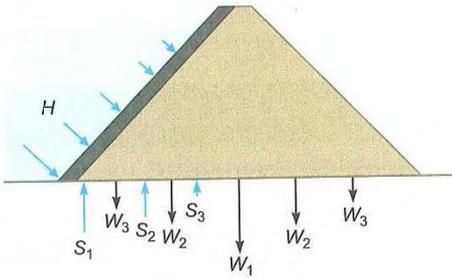
- c) Situación de inestabilidad al desaparecer la carga hidrostática sobre la ladera y no disiparse las presiones intersticiales en el terreno.



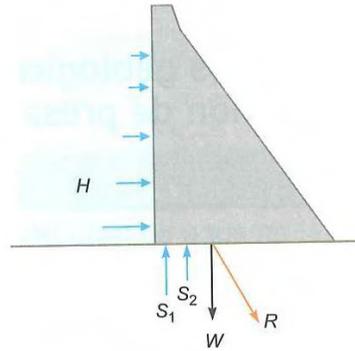
Condiciones geológico-geotécnicas de cimentación de presas

- Resistencia y estabilidad tanto del macizo de cimentación como de los estribos.
- Deformabilidad compatible con las cargas de la presa.
- Estanqueidad de la cimentación y control de las fuerzas de filtraciones con eliminación de las subpresiones o reducción a los niveles exigidos por la estabilidad de la presa.
- Estabilidad frente a erosiones internas y socavaciones.
- Estabilidad frente a sismos y sus efectos inducidos (licuefacción, densificación, colapsos, fallas activas, etc.).
- Estabilidad frente a movimientos del terreno (deslizamientos, hundimientos, subsidencias, etc.).

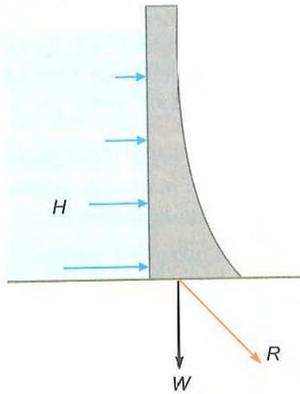
a) Presa de materiales sueltos.



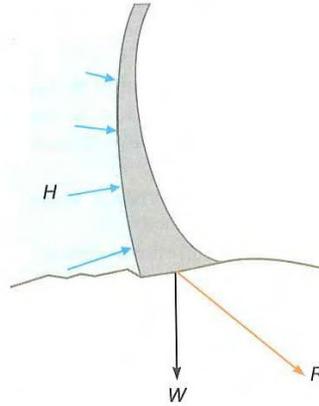
b) Presa de gravedad.



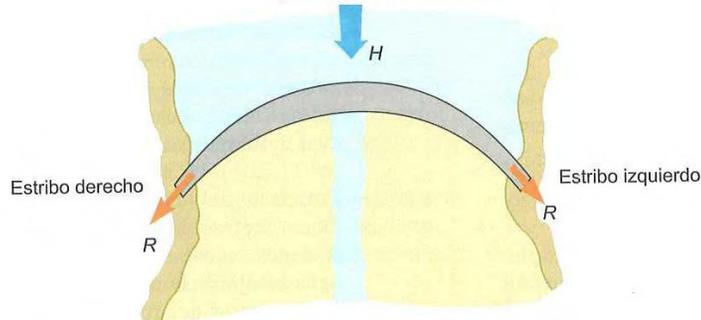
c) Presa de arco.



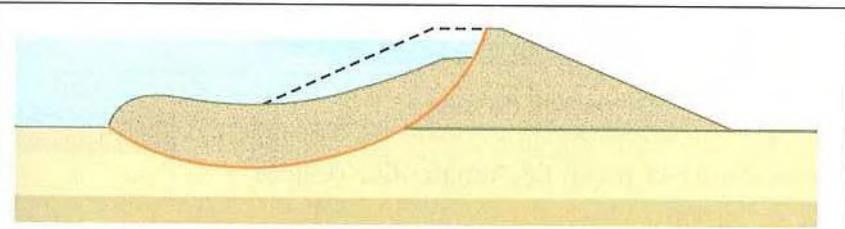
d) Presa de bóveda.



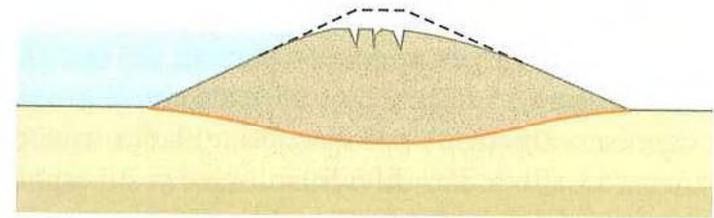
e) Presa de bóveda (planta).



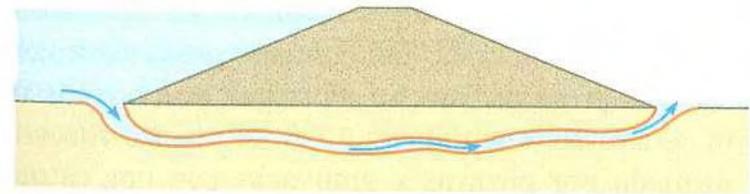
Fuerzas actuantes en las presas. H: presión hidrostática; S: subpresiones; W: peso de la presa; R: resultante de H y W (embalse lleno).



a) Rotura circular a favor de materiales de baja resistencia.

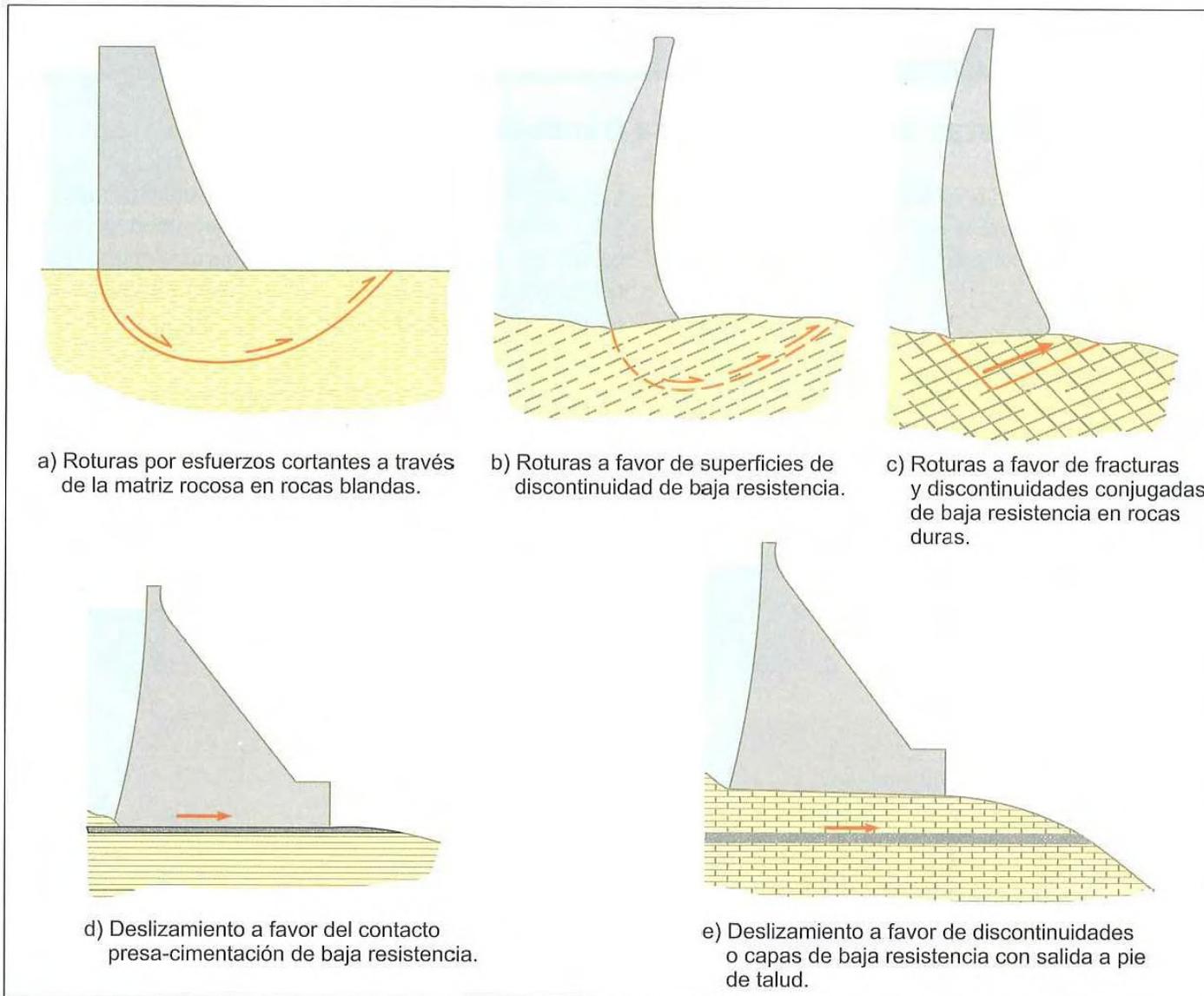


b) Asientos en la presa por suelos blandos compresibles.

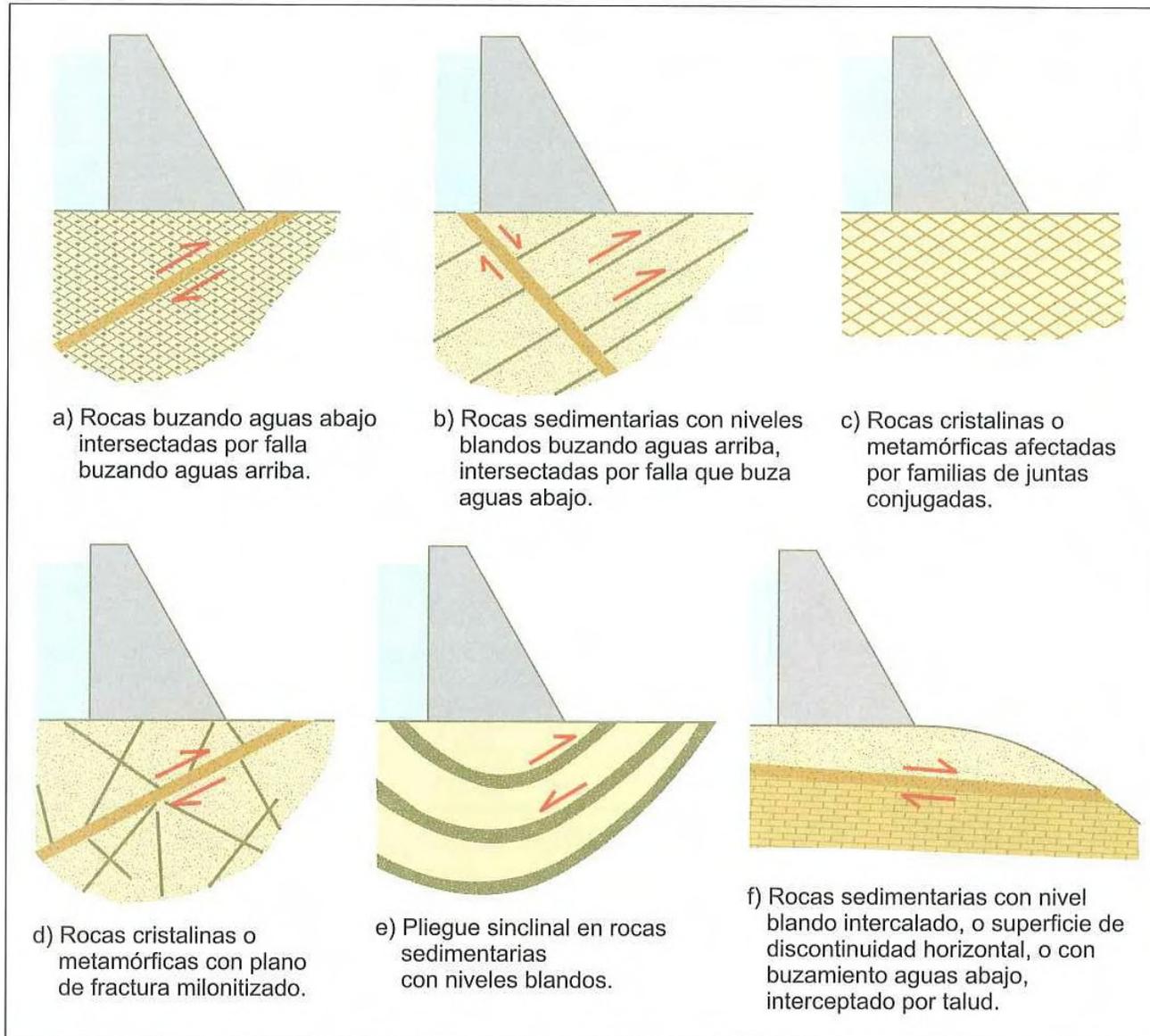


c) Erosión interna en los materiales de la cimentación.

Mecanismos de rotura en presas de tierras por fallo de la cimentación.

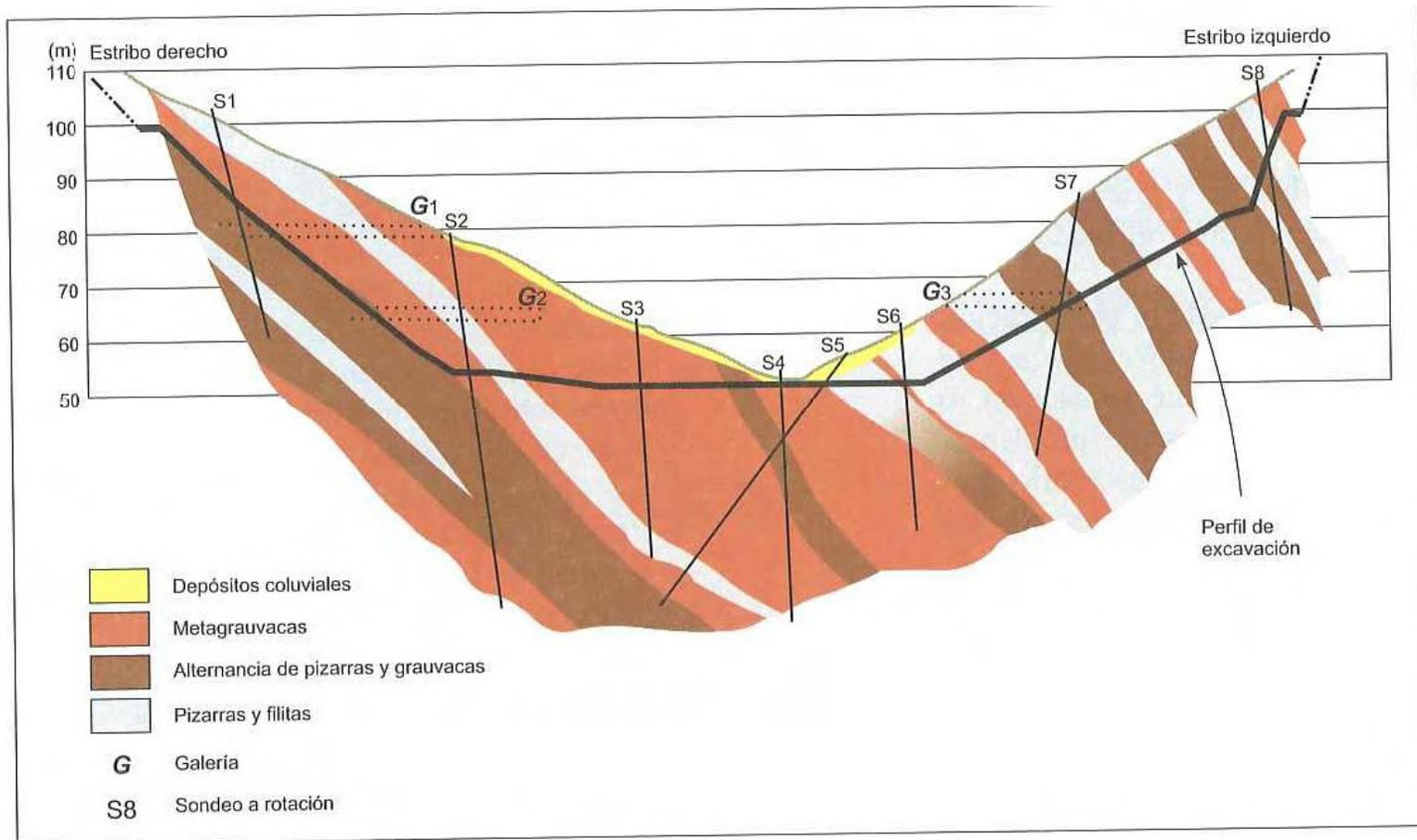


Mecanismos de rotura en cimentaciones de presas de hormigón.



Condiciones geológicas favorables a la formación de roturas en la cimentación de presas de hormigón.

Problemas geológicos y posibles soluciones



Corte geológico y perfil de excavación de la presa de Funcho (Portugal).

■ ROCAS BLANDAS

- Rocas de **baja resistencia**, con posible mecanismo de rotura a través de la matriz rocosa (Figura 11.27a); en estos casos se puede requerir una excavación más profunda a fin de alcanzar un nivel más resistente; si no es así, es necesario modificar la geometría de la presa, o bien cambiar el tipo de presa.
- Pérdida de resistencia por efecto de la **saturación**; gran parte de las rocas blandas pierden resistencia al saturarse (rocas cementadas, arcillosas, etc.), siendo necesario realizar ensayos sobre muestras saturadas.
- **Desecación** en rocas de alto contenido en arcillas (argilitas, margas, etc.), y agrietamiento en excavaciones, lo que hace necesario el hormigonado inmediato.
- **Baja durabilidad** en materiales arcillosos.
- **Expansividad** en rocas con contenidos en esmectita, requiriendo protección superficial.
- A veces algunas rocas blandas precisan algún tipo de **voladura**, dando superficies irregulares y fisuraciones, siendo necesario su control.

■ ROCAS DURAS

La presencia de discontinuidades o capas blandas de gran longitud, horizontales o de bajo ángulo buzando aguas abajo, representa «a priori» un problema geológico de importancia (Figura 11.28f), muy común en rocas duras. Si estas discontinuidades están a poca profundidad, la solución es la excavación completa, aunque ésta puede ser también parcial. Otras soluciones consisten en macizar tramos de la discontinuidad a través de galerías, pantallas, etc., pudiendo complementar estas medidas con drenajes, inyecciones y, a veces, con anclajes.

■ FALLAS Y ZONAS DE TRITURACIÓN TECTÓNICA

En el caso de fallas y zonas de trituración tectónica o de intensa fracturación, los tratamientos varían en función de cada problema. En general, estas discontinuidades suelen tener escaso espesor, y el tratamiento más común es la excavación de la zona más superficial, reemplazando el material saneado por hormigón, o bien realizar inyecciones desde superficies o galerías. Las zonas de fracturación intensa están asociadas a permeabilidades altas y compresibilidades elevadas, con baja resistencia al corte, requiriéndose tratamientos de consolidación y, en ocasiones, anclajes.

■ CAVIDADES

Las cuevas, cavidades o huecos, en general, se tratan con inyecciones. Sin embargo el principal problema es su detección, lo que supone una incertidumbre en los tratamientos, que si son muy extensivos (como ocurre en los terrenos kársticos) pueden resultar muy costosos.

Neotectónica y sismicidad natural e inducida

Ejemplos de embalses afectados por sismicidad inducida

Embalse	Magnitud	Altura de presa (m)
Koina (India)	6,5	103
Kremasta (Grecia)	6,3	165
Kariba (Zimbabwe y Zambia)	6,2	128
Hsinfengkiang (China)	6,1	105
Orovile (USA)	5,8	230
Kurobe (Japón)	4,9	186
Nurek (Tadjikistán)	4,6	317
Volta Grande (Brasil)	4,2	56

En presas o embalses de grandes dimensiones, sobre todo en zonas sísmicamente activas, debe considerarse el fenómeno de la **sismicidad inducida**. Este tipo de sismicidad tiene lugar cuando el nivel del embalse alcanza alturas del orden de 100 m, o bien la capacidad del embalse es superior a 100 millones de metros cúbicos.

Este tipo de sismicidad se debe a fenómenos de fracturación hidráulica a favor de fallas sometidas a elevadas presiones intersticiales. En la mayor parte de las presas analizadas, los terremotos han ocurrido en el primer llenado del embalse, disminuyendo la intensidad y la frecuencia de los terremotos en el transcurso de la explotación. Como consecuencia, es necesario efectuar un análisis de la sismicidad natural e inducida en zonas sísmicamente activas, cuando se trate de presas importantes. En estos casos es recomendable proceder al llenado del embalse de forma escalonada y controlada.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN