

Jornada de Erosión Interna de Presas

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino

16 de abril de 2010

LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS Y SUS PATOLOGÍAS

Fernando Pardo de Santayana
Laboratorio de Geotecnia - CEDEX



Índice

1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

Índice

1. **Introducción**
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

- **Funciones de las presas:**
 - a) abastecimiento de agua
 - b) generación de energía hidroeléctrica
 - c) protección contra inundaciones
 - d) recreo



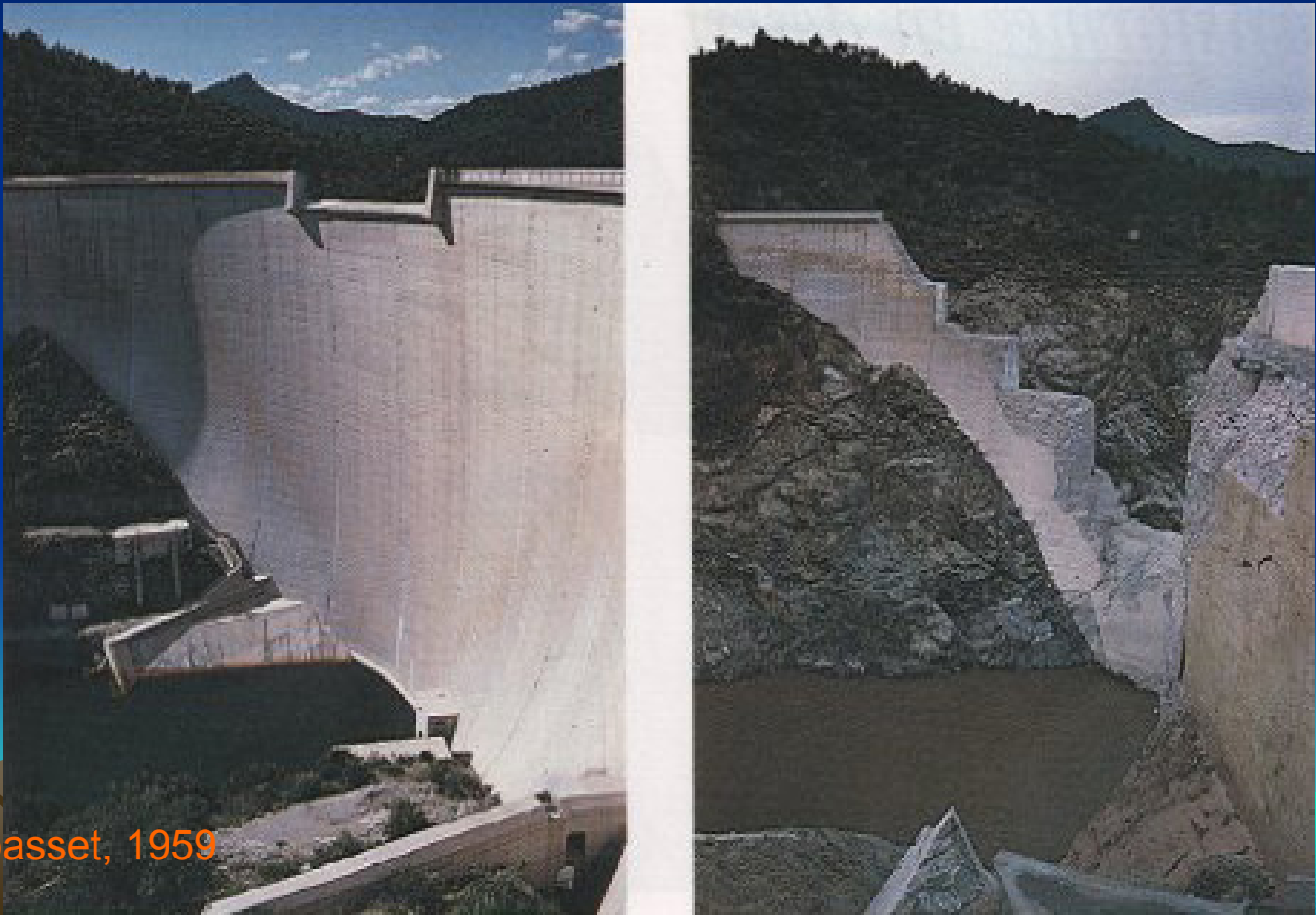
Introducción

- **Exigencias básicas:**
 1. que la presa sea estable
 2. que constituya una barrera razonablemente impermeable
 3. que el emprendimiento sea económico



Introducción

- Elevado número de presas en el mundo <> pequeño porcentaje de fallos
- Consecuencias graves, gran poder destructor



Presa de Malpasset, 1959

Introducción

- **Presa de Teton, 1976**

- Presa de tierras de 73 m de altura, construida sobre formaciones riolíticas y tobas volcánicas
- Terminada en 1976, colapsó el 5 de julio del mismo año durante el primer llenado.
- Causas del desastre: la riolita fisurada de la cimentación provocó la infiltración de agua bajo la presa; el agua infiltrada causó erosión interna en el material loésico del núcleo; la presa falló por tubificación.



Introducción

- Presa de Teton, 1976



Introducción

- Presa de Teton, 1976



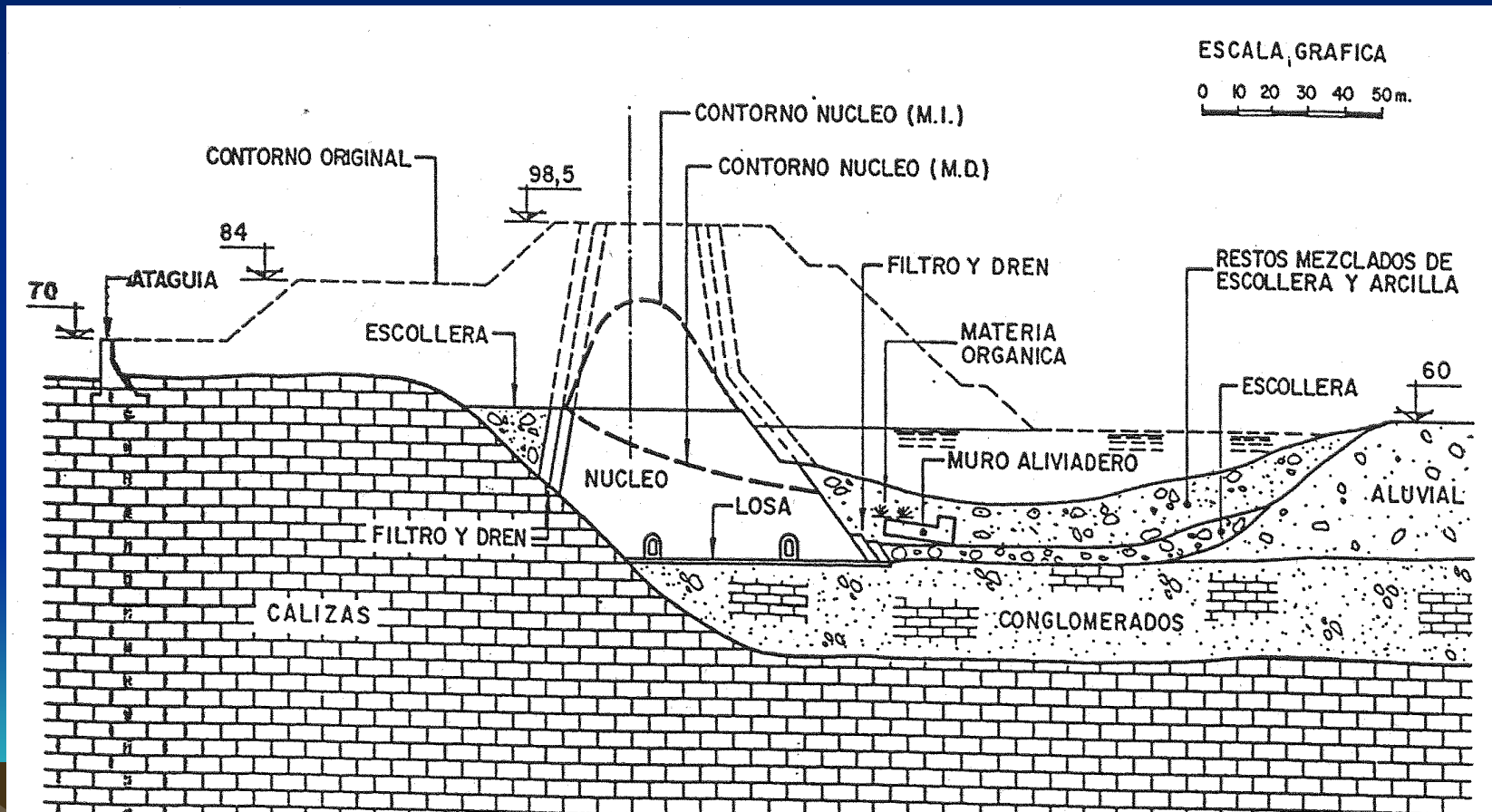
Introducción

- **Presa de Tous, 1982**
 - Presa de escollera con núcleo arcilloso de 71 m de altura.
 - Se arruinó por la riada del 20 de octubre de 1982, por rebosamiento.



Introducción

- Presa de Tous, 1982
 - La rotura puso de manifiesto la mayor resistencia del núcleo arcilloso a la erosión que los espaldones de escollera.



Elección del tipo de presa

Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas:

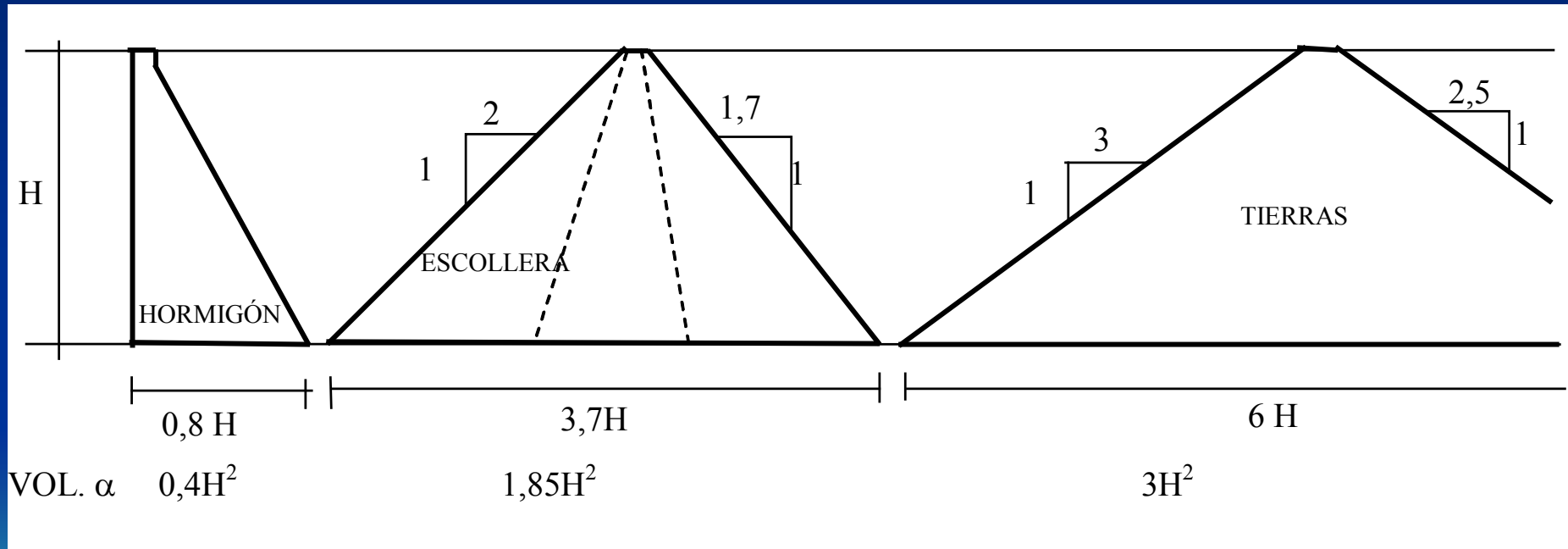
“La elección del tipo de presa debe estar precedida de un concienzudo **estudio comparativo de soluciones posibles**, en su triple aspecto estructural, hidráulico y económico”.

- Consideraciones geológicas y la clase de materiales naturales disponibles
- Exigencias del aliviadero.
- Aprovechamiento exhaustivo de los recursos naturales.

Elección del tipo de presa

TIPO DE PRESA

- Emprendimiento económico →
 - coste unitario del material empleado



Presas de materiales sueltos:

- Principio básico: los **suelos** tienden a erosionarse cuando el **agua** fluye sobre o a través de ellos



Índice

1. Introducción
2. **La compactación de materiales**
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

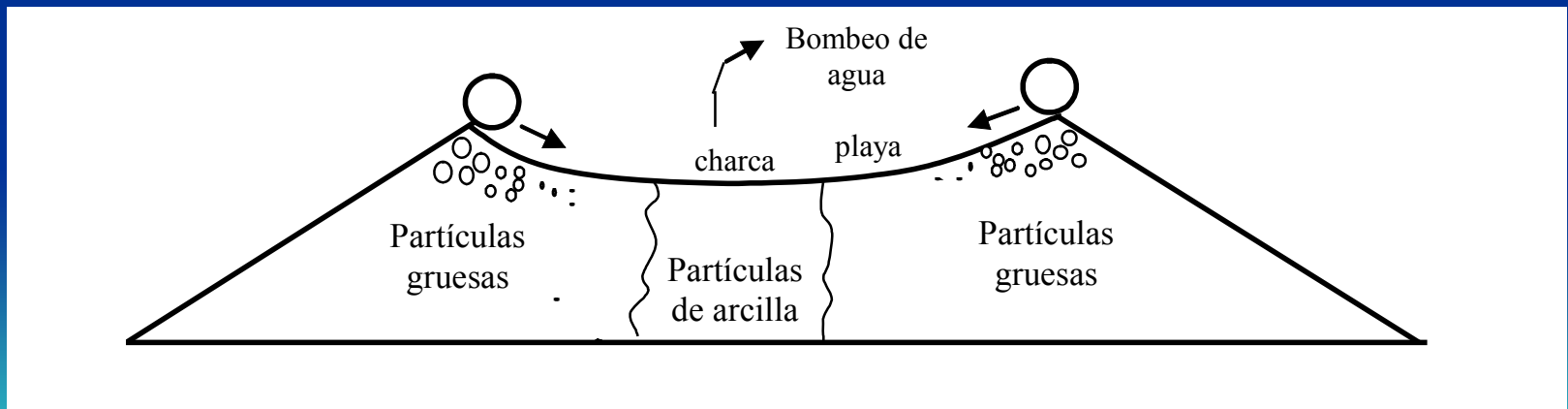
La compactación de los materiales

- Métodos constructivos de presas de tierra:
 - Relleno hidráulico (hasta ~ 1930)
 - Compactación por tongadas (método general en la actualidad)



La compactación de los materiales

- Presas construidas mediante **relleno hidráulico**:
 - El material:
 - **procedente de dragados**
 - **transportado suspenso en agua hasta el local de la presa**
 - **decanta por gravedad, con segregación natural por tamaños, formando la sección de la presa (núcleo y espaldones)**
 - De la zona central se bombea el agua acumulada
 - Se protegen sus taludes con escollera



La compactación de los materiales

- Presas construidas mediante **relleno hidráulico**:
 - Problemas:
 - Control del material dragado del río
 - Control del vertido en la presa
 - segregación de los materiales, formación de lentejones arenosos en la zona del núcleo, o arcillosos en los espaldones.
 - Baja densidad de los materiales: **densidades relativas 30 - 70 %**.
 - Malas experiencias → problemas de estabilidad

Comparación grado de compactación/densidad relativa de arenas finas

Grado de compactación PN, %	Grado de compactación PM, %	Densidad relativa, %
	100	100
100	95	75
95	90	50
90	85	25
85	80	0

← Mínimo recomendable

$$Dr \approx 5(\%PM - 80); Dr \approx 5(\%PN - 85)$$

La compactación de los materiales

- Presas construidas mediante **tongadas compactadas**:
 - compactación por medio de rodillos
 - condiciones de puesta en obra en función de las **curvas de compactación** (PN o PM)

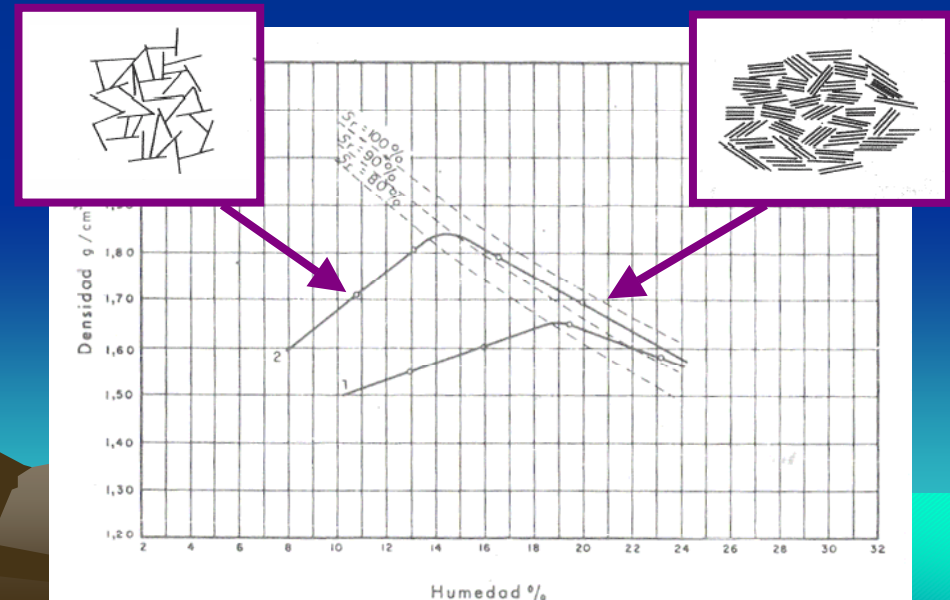
La compactación de los materiales

- Presas construidas mediante **tongadas compactadas**:
 - compactación por medio de rodillos
 - condiciones de puesta en obra en función de las **curvas de compactación** (PN o PM)
 - **Suelos sin cohesión (granulares)**:
 - curvas bastante planas.
 - propiedades fn. de la densidad, (no de la humedad de compactación).
 - buen valor de la densidad relativa: > **75%** (95% PM).
 - 100% de compactación PM fácilmente alcanzable en obra.



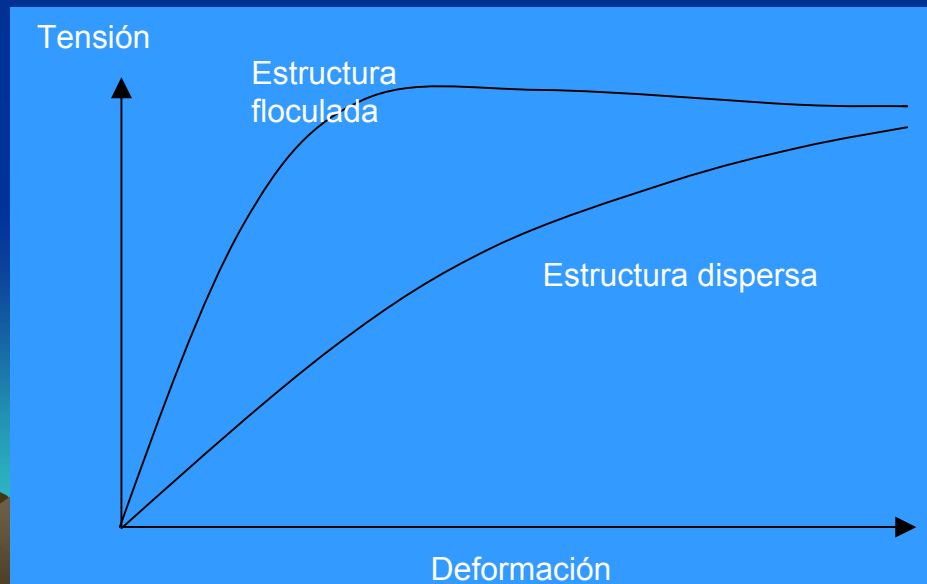
La compactación de los materiales

- Suelos arcillosos → materiales para el núcleo: elemento impermeabilizante
 - Propiedades fn. de la **densidad** y de la **humedad de compactación**:
 - **Densidad seca** → resistencia al corte.
 - **Humedad de compactación** → estructura:
 - Lado seco → estructura floculada
 - Lado húmedo → estructura dispersa



La compactación de los materiales

- La estructura de la arcilla compactada influye en las propiedades:
 - **Comportamiento tensodeformacional:**
 - **estructuras floculadas:** comportamiento frágil en ensayos de corte (resistencia → pico de rotura)
 - **estructuras dispersas:** comportamientos dúctil (resistencia → tensión para una determinada deformación, por ej., el 20%).

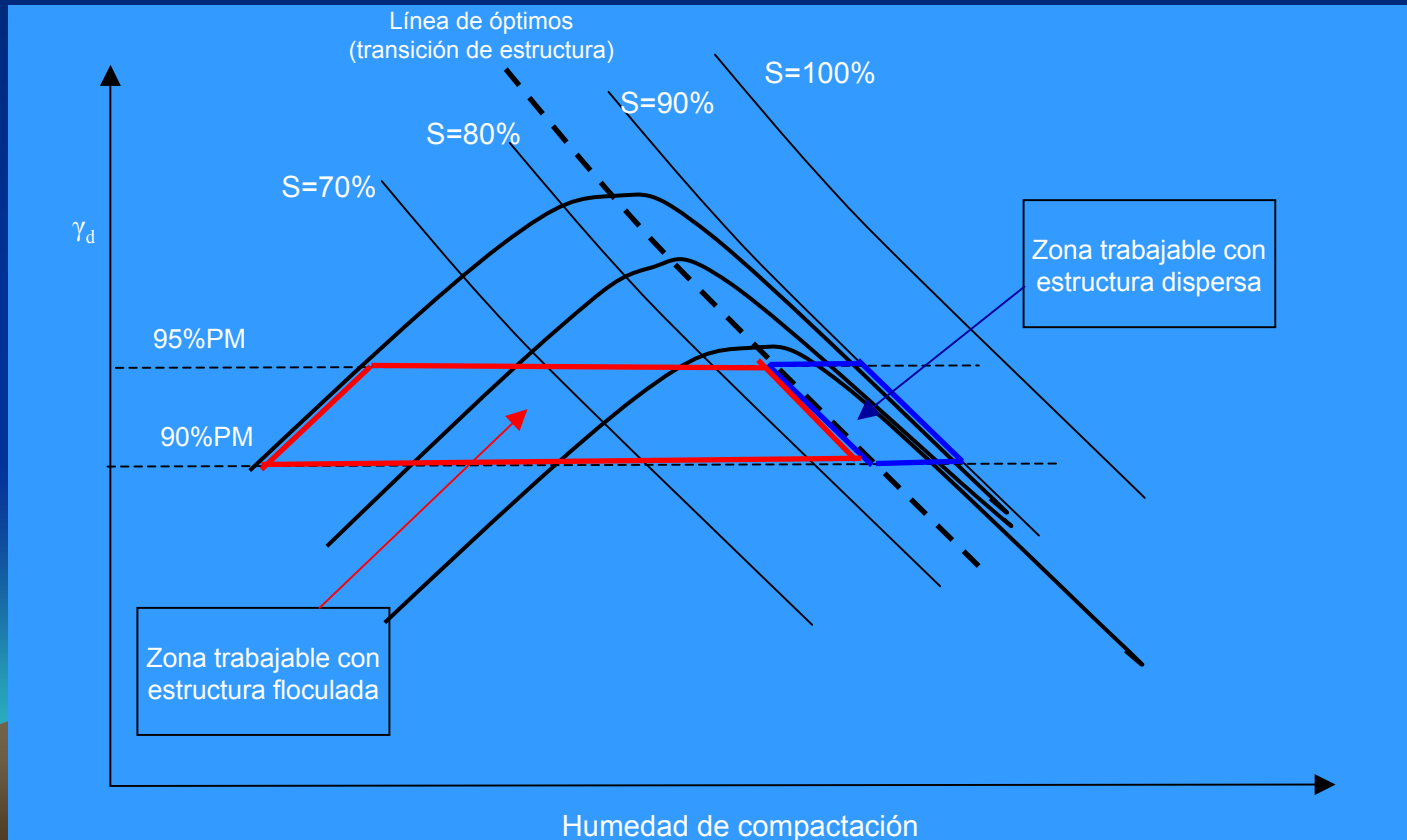


La compactación de los materiales

- Estructura de la arcilla compactada:
 - Por deformabilidad interesa estructura floculada: elevada resistencia a deformaciones pequeñas.
 - Por permeabilidad interesa estructura dispersa (1000 veces menos permeables).
 - Por susceptibilidad a la fisuración interesa estructura dispersa
- **NÚCLEO:**
 - **Estructura dispersa:** impermeable y poco susceptible a la fisuración
 - Una densidad mínima de compactación (90 a 95% PM)
- **ESPALDONES o ZONAS de TRANSICIÓN:**
 - **Estructura floculada:** mejor comportamiento tensodeformacional

La compactación de los materiales

- Arcilla compactada:
 - Son alcanzables en obra densidades secas entre el 90 y el 95 % PM
 - La línea de óptimos separa la zona de estructura floculada y dispersa
 - Condiciones de compactación diferentes para núcleo y espaldones



Índice

1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. **Fisuración en presas de materiales sueltos**
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

- Afecta a los suelos cohesivos (los suelos sin cohesión no forman fisuras).
- Prácticamente inevitable; se ha observado en gran cantidad de presas.
- Mejor estrategia: múltiples líneas de defensa:
 - evitar la formación de grietas
 - asumiendo que las hay, evitar que supongan un problema
- Principal problema asociado: la erosión interna → filtros adecuados.

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

- Se produce en las zonas de la presa sujetas a tracciones:
 - al deformarse la presa por asientos diferenciales.
 - diferentes formas de deformación y diferentes patrones de fisuración en función de la geometría y compresibilidad de:
 - la cimentación,
 - estribos
 - cuerpo de la presa

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

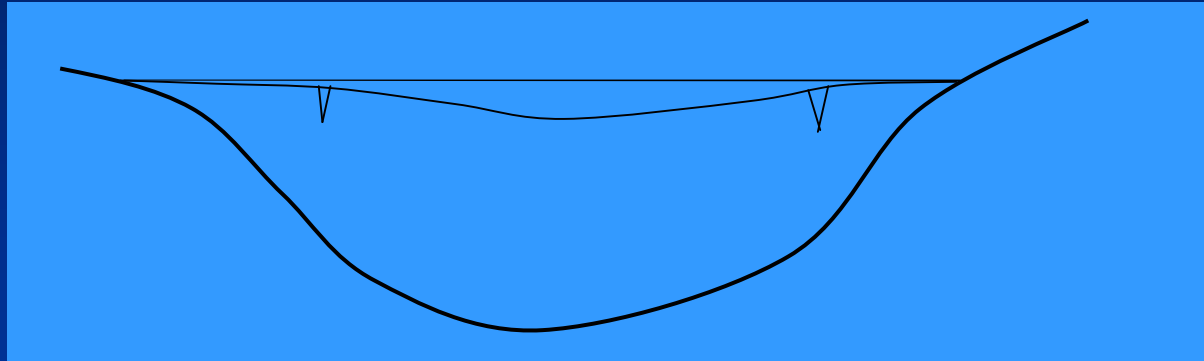
- Características de la fisuración:
 - Orientación:
 - paralela o transversal al eje de la presa;
 - en planos verticales, horizontales u otros intermedios.
 - Desarrollo: local, extenso.
 - Abertura: centimétrica, decimétrica.
- Más frecuentes en presas de altura moderada o en las zonas superiores de las presas más altas. (Las mayores presiones existentes en las zonas inferiores del relleno, contribuyen a evitar la aparición de tracciones).

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

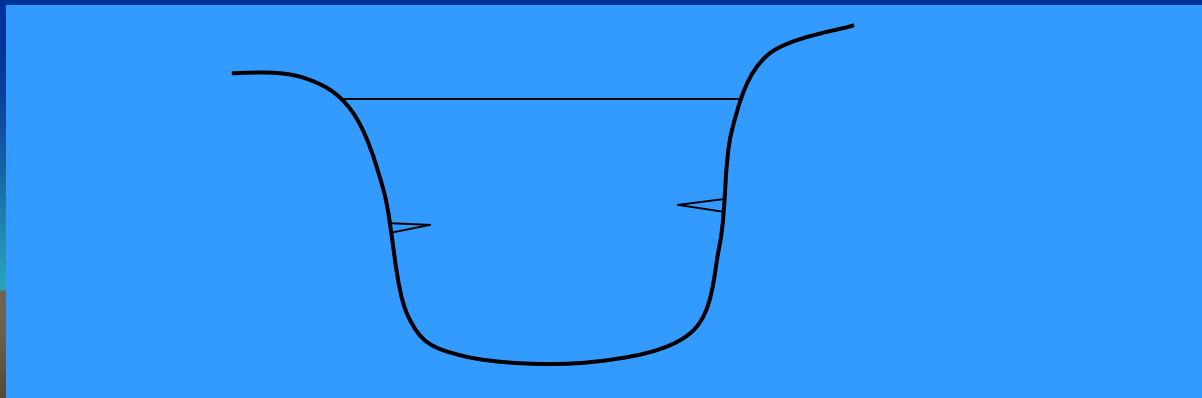
Grietas de mayor peligro: las transversales al núcleo

Mecanismos:

- Grietas transversales producidas a partir de la coronación por asientos diferenciales:



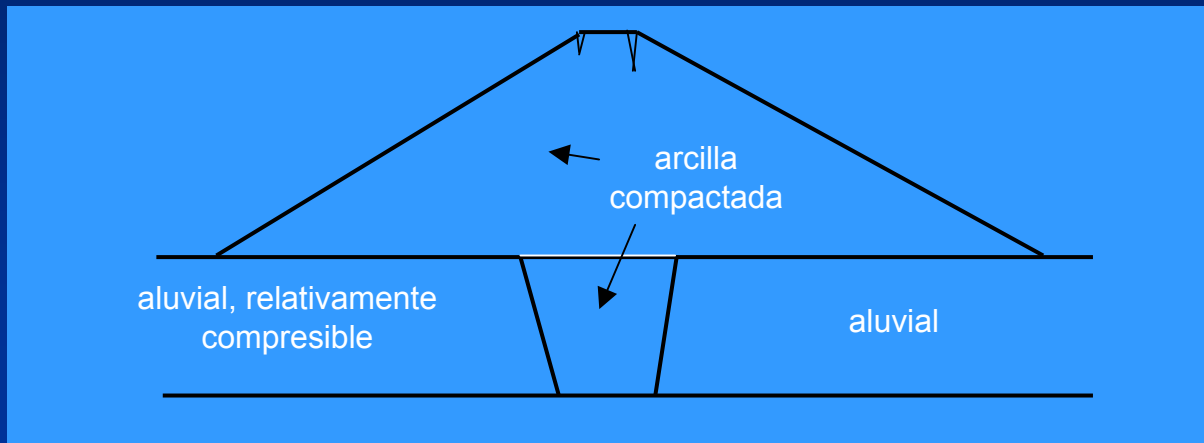
- Grietas en cerradas muy verticales



El agrietamiento en presas de materiales sueltos

Mecanismos:

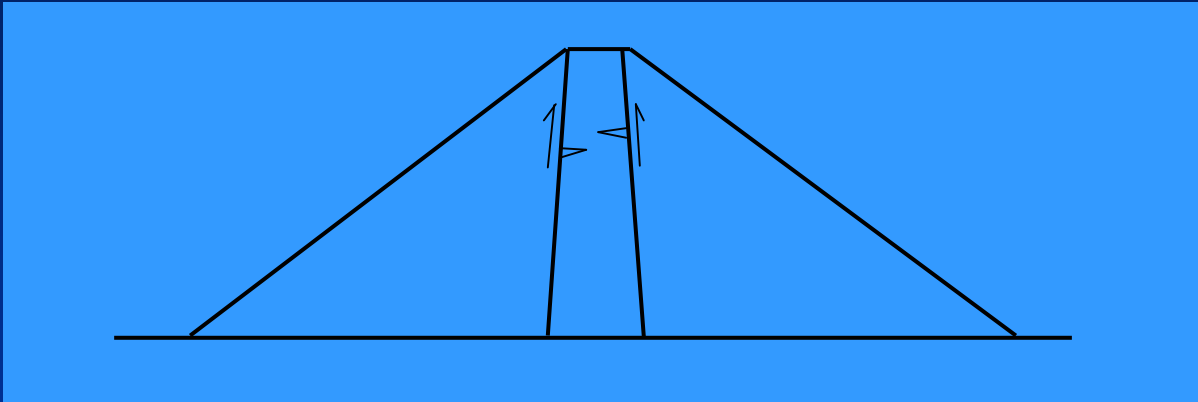
- Grietas en coronación por deformación diferencial del terreno de cimentación:



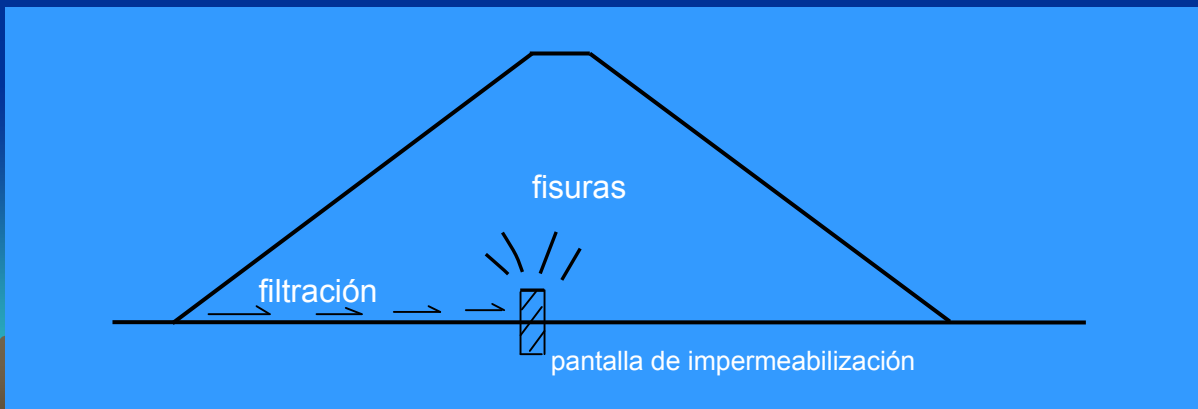
El agrietamiento en presas de materiales sueltos

Mecanismos:

- Agrietamiento del núcleo por diferente compresibilidad entre la arcilla del núcleo y los espaldones:



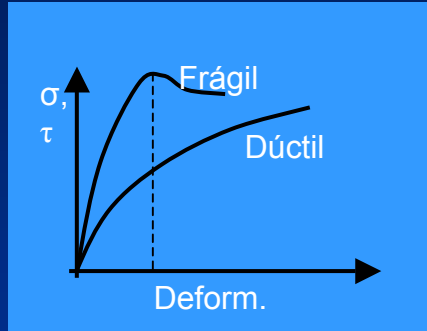
- Grietas en presencia de elemento rígido en la base del cuerpo de la presa:



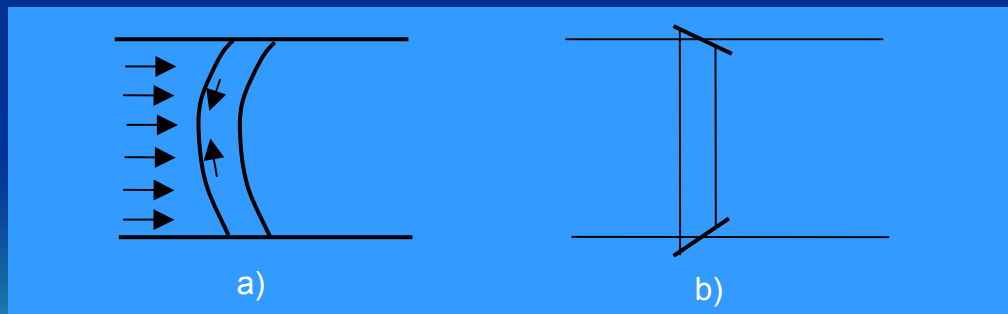
El agrietamiento en presas de materiales sueltos

Medidas para EVITAR el agrietamiento:

- utilización de arcillas plásticas, en el sentido del comportamiento tensodeformacional (dúctiles) :



- trazados en planta del eje de la presa curvos, o reperfilamiento de los encuentros (efecto arco):



- evitar núcleos de presa muy delgados, y, en todo caso, utilizar filtros anchos y buenas zonas de transición

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

Medidas para EVITAR el agrietamiento *(cont.)*:

- Limitar la inclinación de los taludes de los estribos.
- Tratar la superficie de los estribos (eliminar salientes, extraplomos, irregularidades).
- Humedad de compactación elevada en el núcleo (comportamiento dúctil).
- Densidades secas de compactación elevadas (reducir cambios de volumen).
- Eliminar juntas y fisuras en la roca o terreno de cimentación (inyecciones de consolidación, tratamiento de la superficie de contacto).
- Utilización de refuerzos: geosintéticos

El agrietamiento en presas de materiales sueltos

Medidas para MINIMIZAR LOS EFECTOS del agrietamiento:

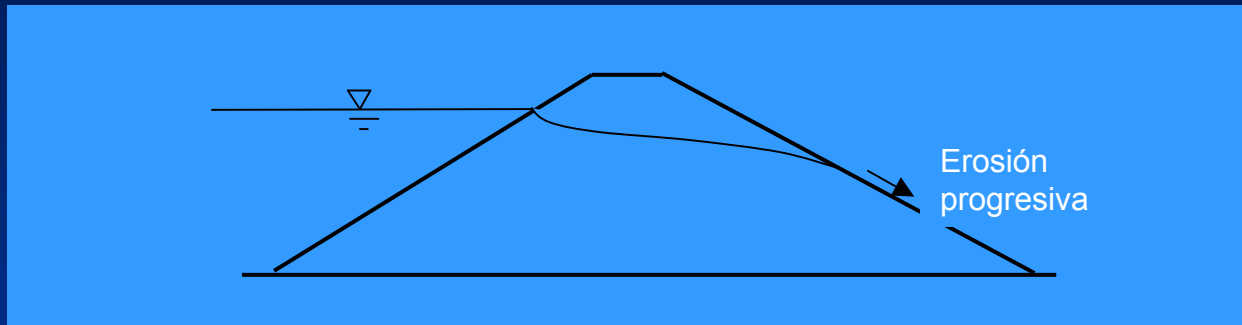
- Ensanchar el área de contacto entre núcleo y terreno.
- Ensanchar las zonas de transición.
- Usar resguardos suficientes, para mantener la fisuración por encima del nivel del embalse.
- Proveer filtros y drenes.

Índice

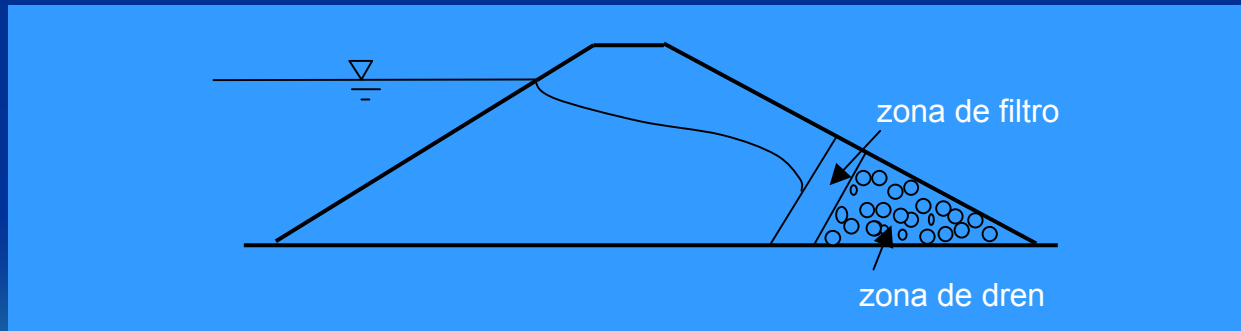
1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. **Tipos de presas y factores de proyecto**
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

PRESAS DE SECCIÓN HOMOGÉNEA:

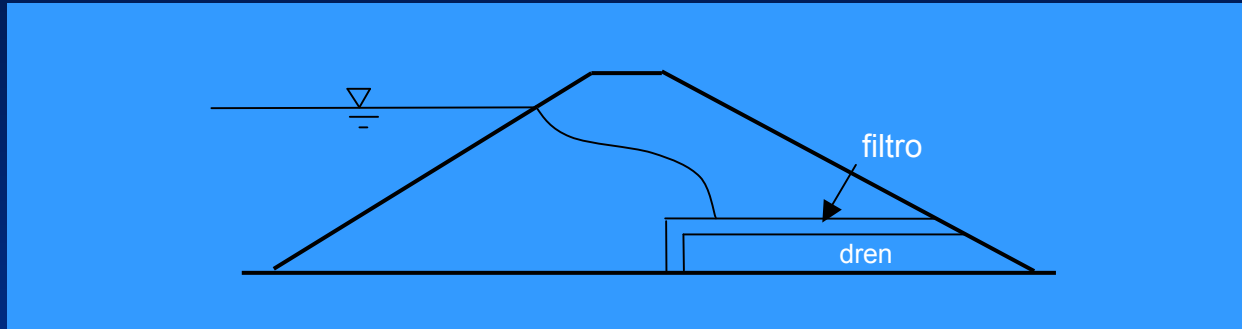


Presa homogénea sin dren

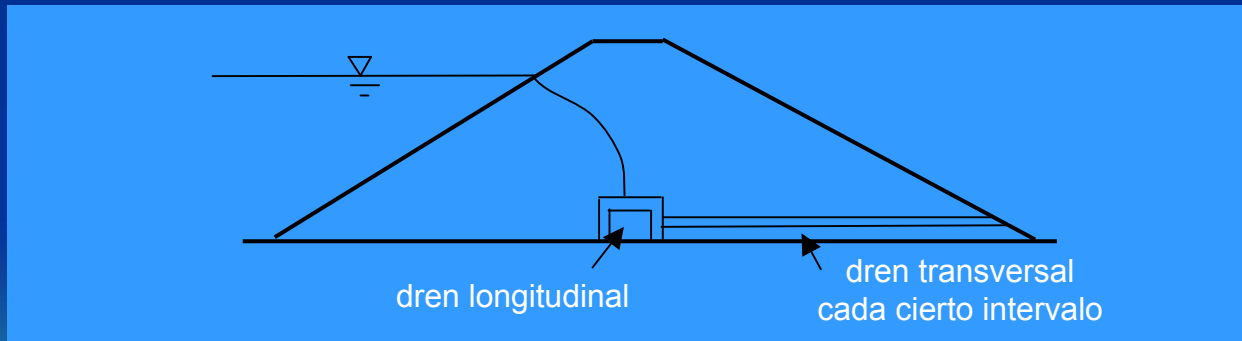


Presa homogénea con dren de pie.

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

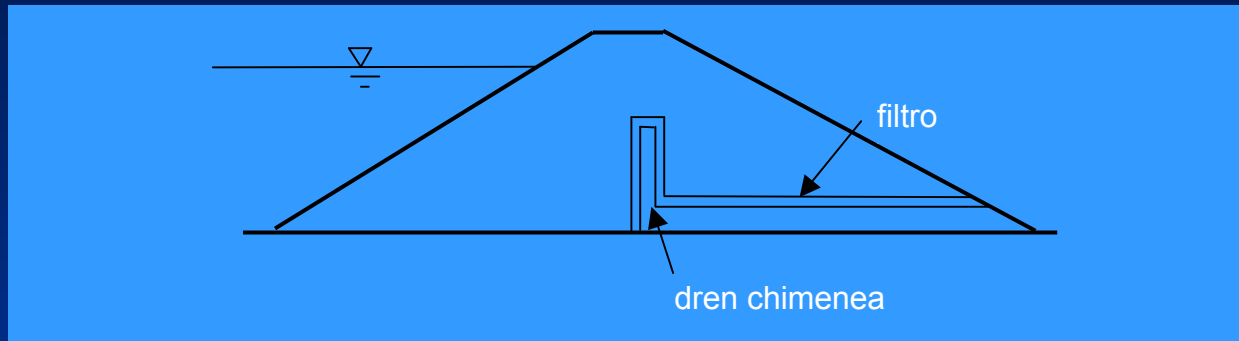


Presa homogénea con capa drenante horizontal.

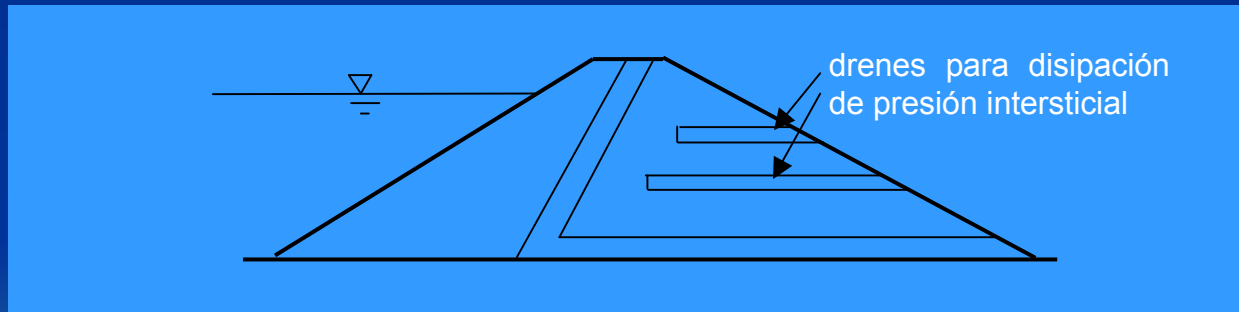


Presa homogénea con dren longitudinal y drenes transversales.

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto



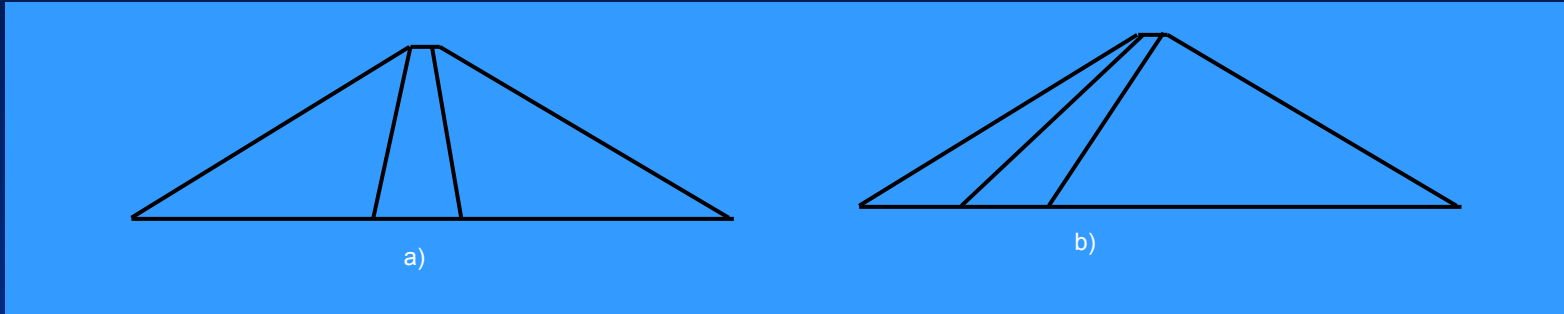
Presa homogénea con dren chimenea.



Presa con drenes de disipación de presiones intersticiales de construcción.

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

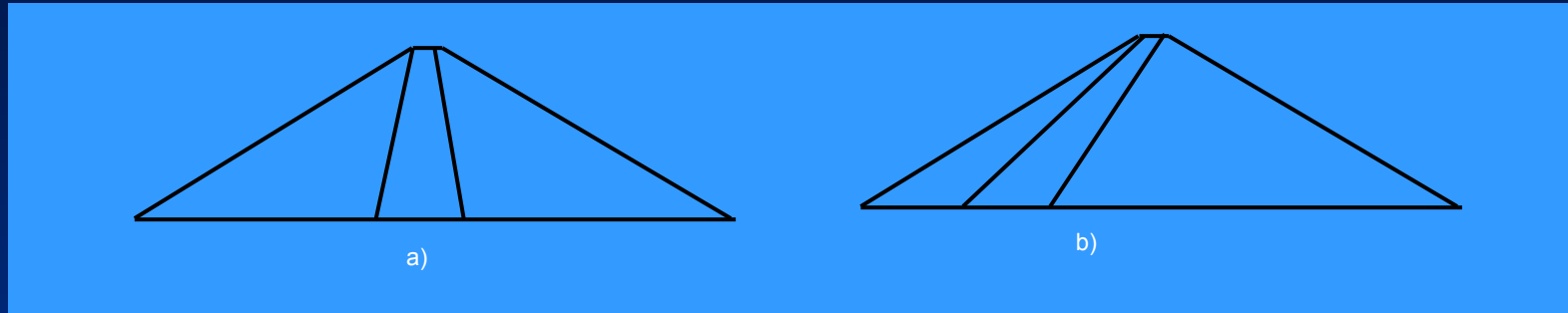
PRESAS CON NÚCLEO:



Presas con núcleo impermeable **vertical** (a) o **inclinado hacia aguas arriba** (b).

- espesor mínimo del núcleo:
 - *establecimiento de una adecuada red d filtración*
 - *resistencia a la erosión interna*
- por lo menos 25-30% de la carga hidráulica en cualquier punto.
- anchura mínima en la zona superior de la presa: 2 m.
- necesidad de buenos filtros.

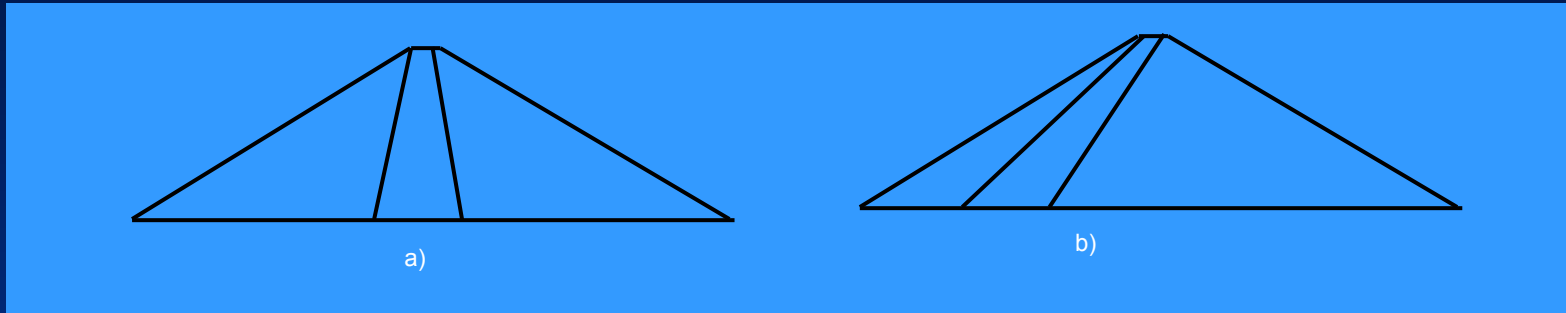
Tipos de presas de tierra y factores de proyecto



VENTAJAS DE LOS NÚCLEOS INCLINADOS HACIA AGUAS ARRIBA:

- Más fácil construcción en climas muy húmedos.
- El filtro se coloca y compacta directamente sobre el talud.
- Fuerzas de filtración orientadas favorablemente para la estabilidad de la presa.
- Talud de aguas abajo más estable.
- Núcleo menos vulnerable a la fisuración y fracturación hidráulica.
- Mayor estabilidad en caso de sismo de la zona de la presa no saturada, (no vulnerable al aumento de la presión de poros).

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto



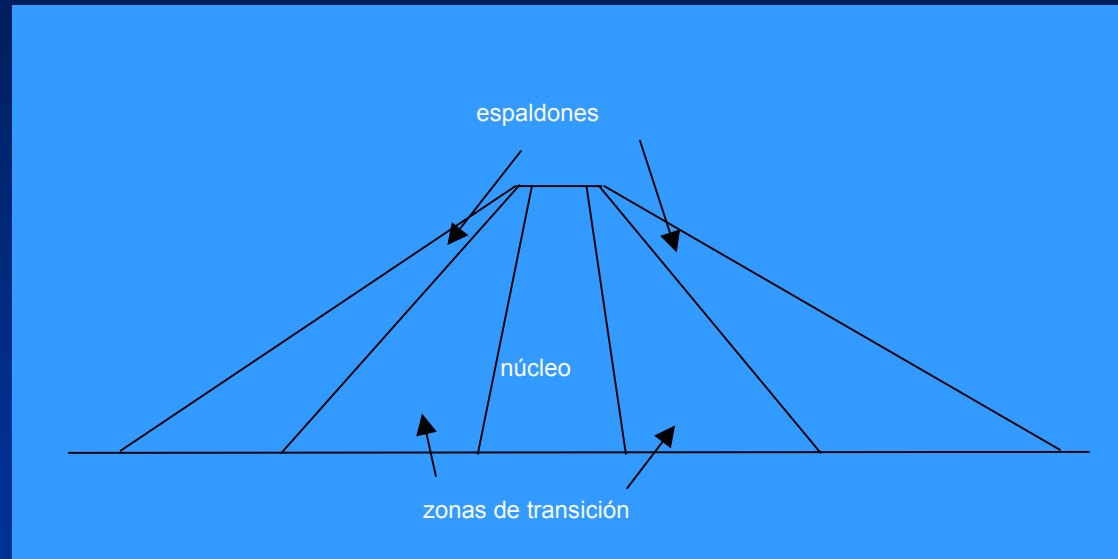
VENTAJAS DE LOS NÚCLEOS VERTICALES:

- Permiten taludes de aguas arriba más inclinados.
- Núcleo más grueso, para un volumen dado de material.
- Mayor presión vertical contra el contacto núcleo-cimentación (plano de debilidad favorable a la filtración de agua).

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

PRESAS ZONIFICADAS:

- Núcleo (+ filtros + drenes)
- Zonas de transición
- Espaldones



- Solución más común y recomendable para presas de cierta entidad.
- Permiten utilizar los materiales de préstamo en la zona de la presa más apropiada.

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

PRESAS ZONIFICADAS:



$$4D_{85} > d_{15} > 4D_{15}$$

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

PRESAS ZONIFICADAS:



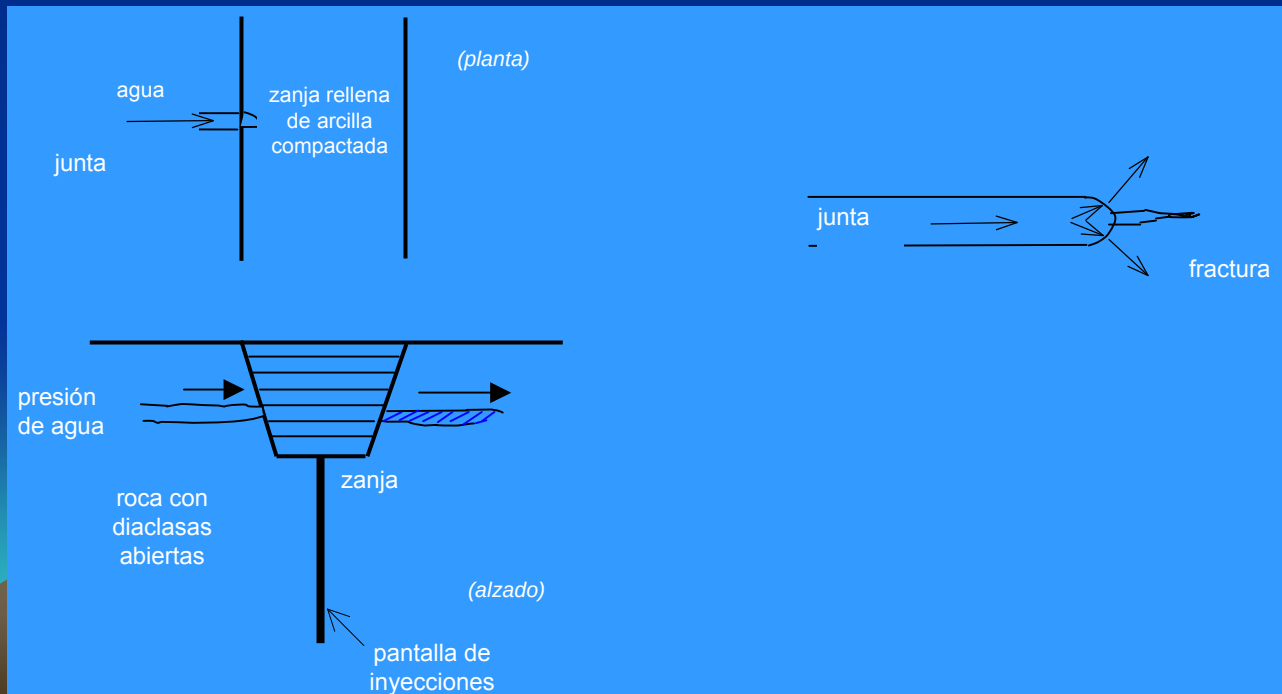
LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA:

1. Cuando el agua consigue entrar en una discontinuidad en material arcilloso o limoso;
2. El agua consigue ir abriendo una grieta como consecuencia de una elevada presión hidráulica, superior a la presión vertical de tierras;
3. La longitud de la grieta avanza, pudiendo atravesar el núcleo impermeable y desembocar en una rotura de la presa por erosión interna.

Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA:

- Problema típico en zanjas de arcilla compactada bajo el núcleo, y terreno natural fracturado (presa de Teton).
- Soluciones:
 - sellado de juntas aguas arriba
 - filtro adecuado aguas abajo



Tipos de presas de tierra y factores de proyecto

FILTROS:

- El filtro debe evitar problemas de erosión interna o tubificación en el núcleo, al dejar pasar el agua y retener las partículas sólidas.

- Criterios de filtro:

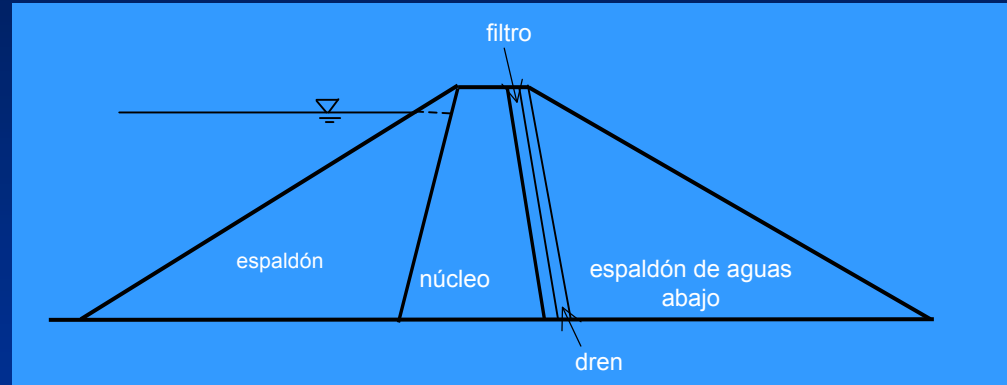
- Si el núcleo es una arcilla:

$$4D_{N85} > d_{F15} > 4D_{N15}$$

- Puede no ser válido si el núcleo es un material más grueso, ej.: materiales bien graduados limoarenosos con gravas.
- Filtros arenosos, de granulometría uniforme, con d_{15} entre 0,2 y 0,5 mm

- Espesor de la capa de filtro:

- filtro horizontal: mínimo de 30 a 50 cm;
- filtro vertical: por razones constructivas, anchura mínima de 2 m



Índice

1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. **Causas de fallos**
 - Rebosamiento
 - Fugas en conductos
 - Erosión interna
 - El terreno de cimentación
 - Galería perimetral
 - Estabilidad de taludes
 - Erosión de taludes
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. Conclusiones

Causas principales de rotura en presas de materiales sueltos

CAUSA	PORCENTAJE
Rebosamiento	30
Filtración a través de la presa o en el cimiento	25
Deslizamientos	15
Fugas en conductos	13
Erosión de taludes	5
Otras, o combinación de varias causas	7
Desconocida	5

Causas de fallos en presas de materiales sueltos

Distribución de fallos en función de la edad de la presa

Nº DE AÑOS DESDE EL FIN DE LA CONSTRUCCIÓN	REBOSAMIENTO %	FILTRACIÓN %	DESLIZAMIENTO %	FUGA EN CONDUCTO %
0-1	9	16	29	23
1-5	17	34	24	50
5-10	9	13	12	9
10- 20	30	13	12	9
20-30	13	12	12	5
30-40	10	6	11	4
40-50	9	6	0	0
50-100	3	0	0	0

Rebosamiento

Rebosamiento

Causas de fallo por **rebosamiento**:

1. inadecuada previsión de avenidas (causa más frecuente);
2. inadecuado sistema de control del nivel de agua en el embalse.

Mecanismos de fallo:

1. **EROSIÓN HIDRÁULICA PROGRESIVA:**

- Afecta a partículas desde arcillas y limos hasta escolleras.
- Mecanismos de resistencia a la erosión:
 - materiales cohesivos: fuerzas cohesivas mantienen las partículas unidas:
 - las presas con estos materiales pueden resistir rebosamiento moderado sin romper.
 - materiales granulares: sólo se cuenta con el peso de las partículas:
 - cuando es insuficiente → rotura de la presa de forma gradual, pero rápida.

2. **DESLIZAMIENTO MASIVO:**

- La rotura se produce de forma repentina, dando lugar a una ola de gran poder destructivo.

Rebosamiento

- **Sistemas de control del nivel de agua en el embalse:**
 - aliviaderos en superficie: deben impedir que el agua rebose la presa.
 - desagües de fondo: permiten mantener capacidad de almacenamiento en caso de avenida.
- **Es fundamental:**
 - una adecuada observación de la presa;
 - un correcto mantenimiento de los dispositivos de desagüe.
- **Existirán problemas para controlar el nivel de agua en el embalse si:**
 1. no existen vertederos o desagües;
 2. existen, pero no están preparados aun para funcionar;
 3. no funcionan porque su diseño es defectuoso;
 4. no están sujetos a un correcto mantenimiento;
 5. las instrucciones o protocolos de funcionamiento no están claros.

Rebosamiento

Casos de fallos en presas por defectuoso comportamiento de los sistemas de control del embalse

AÑO	PRESA	PAÍS	TIPO	CAUSA
1961	Panshet	India	Presa zonificada de 61 m de altura, en construcción.	Los monzones llegaron cuando las compuertas de los desagües no estaban completamente instaladas y funcionales.
1977	Euclides da Cunha	Brasil	Presa de tierras de 63 m de altura.	Por causa de un mal protocolo de funcionamiento, el operador no abrió completamente las compuertas del aliviadero.
1968	Fontenelle	EE.UU.	Presa de tierras, zonificada , de 42 m de altura	Los desagües no se habían terminado de construir cuando se llenaba la presa.
1972	Canyon Lake	Dakota del Sur, EE.UU.	Presa de tierras de 6m de altura.	El aliviadero se encontraba obstruido por detritos; la presa fue rebosada; 237 muertos.
1976	Teton	EE.UU.	Presa de tierras de 93 m de altura, zonificada, con núcleo de material limoso, zonas de de transición granulares y protección de taludes de escollera	Los desagües no estaban acabados cuando se llenaba la presa; el llenado se produjo 4 veces más rápido de lo previsto; la presa falló por tubificación durante el primer llenado.
1979	Machhu II	India	Presa de 22 m de altura mixta, de tierras y con una sección central de gravedad con el aliviadero.	Previsión incorrecta de avenida y diseño de aliviadero insuficiente; se intentó en vano abrir las compuertas una vez la presa estaba siendo rebosada; más de 1100 muertos
1982	Tous	España	Presa de escollera con núcleo arcilloso, de 71 m de altura.	Falló por rebosamiento; las compuertas no funcionaron por pérdida de suministro eléctrico.
1991	Belci	Rumanía	Presa con núcleo arcilloso y espaldones de grava, de 18 m de altura	Fallo en la apertura de las compuertas; 66 muertos.

Fugas en conductos

Fugas en conductos

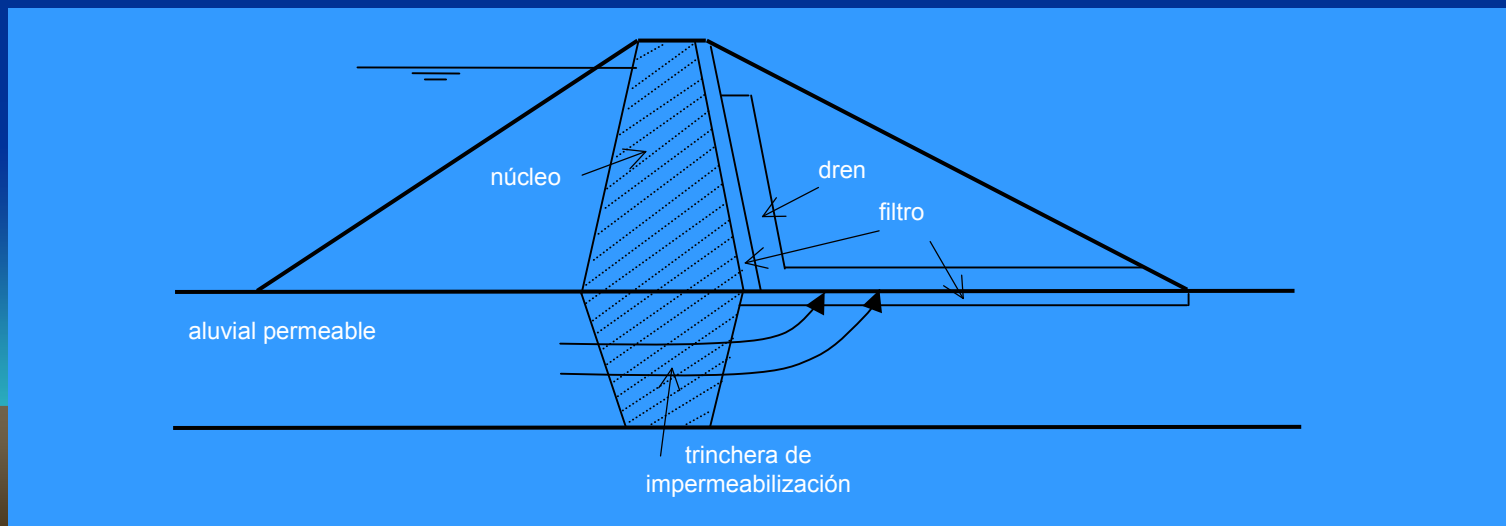
- Fugas de agua en conductos de tomas de agua o descargas de fondo.
- Deficiente compactación lateral.
 - camino preferencial para el flujo de agua.
 - peligro de tubificación



Erosión interna y control de filtraciones

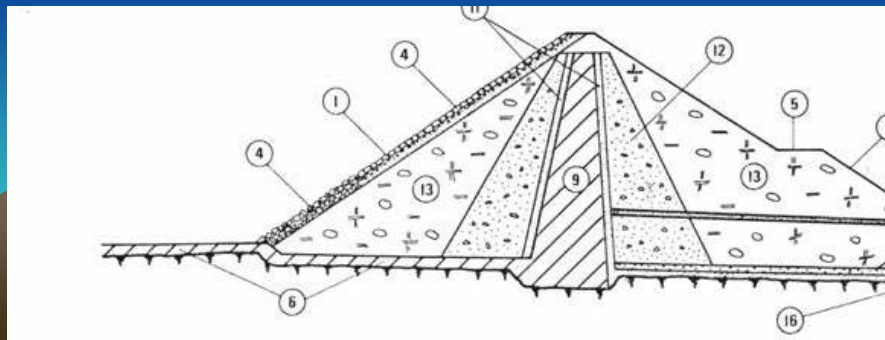
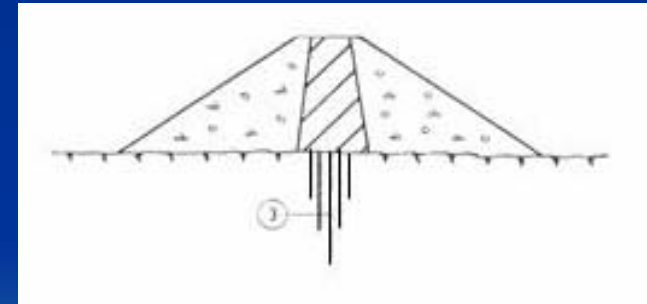
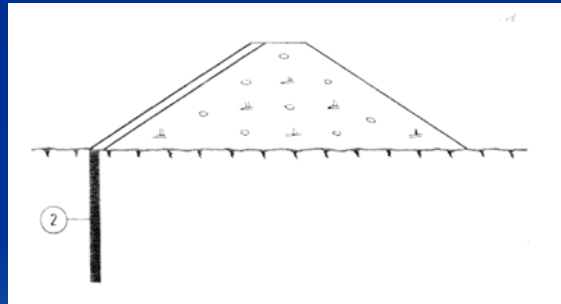
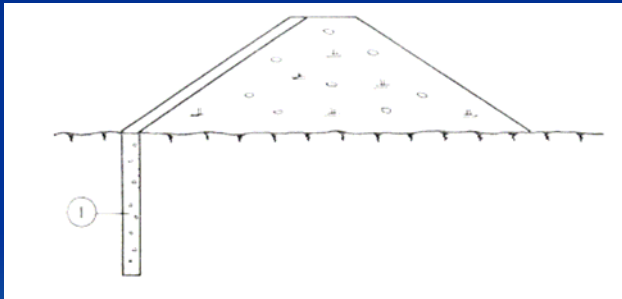
Control de filtraciones

- Antes de 1930 → énfasis en evitar la filtración.
- Posteriormente → énfasis en su control, para prevenir problemas de erosión interna y tubificación.
 - No es crítico que el material del cuerpo de la presa o en el núcleo sea erosionable, si se dispone de un adecuado sistema de filtros.
- Elementos de control de la filtración:
 - núcleo arcilloso, que reduce los caudales de filtración;
 - filtro, que impide la erosión interna;
 - dren, que controla y conduce la filtración
- Debe controlarse la filtración a través de la presa y de su cimentación.



Control de la filtración en el terreno de cimentación

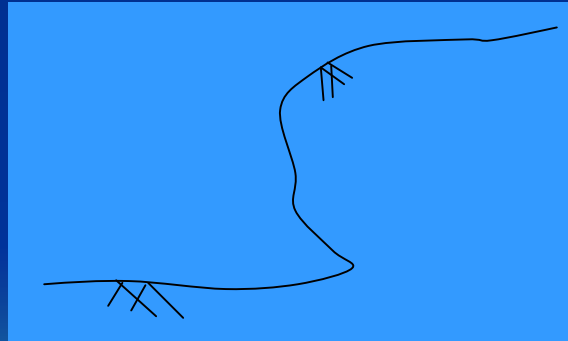
- **Soluciones de impermeabilización:**
 - Trinchera rellena con suelos arcilloso compactado
 - Muro pantalla de hormigón;
 - Pantalla continua flexible; excavada con lodos bentoníticos para mantener las paredes, y rellena con arena-grava bien graduada;
 - Pantalla de tablestacas; (comportamiento no demasiado satisfactorio);
 - Pantalla de inyecciones; varias alineaciones de inyecciones;
 - Mantos de impermeabilización horizontales, aguas arriba de la presa, y pozos de alivio, con sus filtros, en la zona de aguas abajo.



El terreno de cimentación

El terreno de cimentación

- Un tratamiento inadecuado del terreno de cimentación → patologías
 - formación de grietas
 - creación de caminos de filtración preferenciales
- Preparación de la superficie de apoyo de la presa:
 - Inclinación suave de los taludes de los estribos;
 - Eliminación de irregularidades



Zonas en voladizo en la superficie de la excavación; deben ser eliminadas

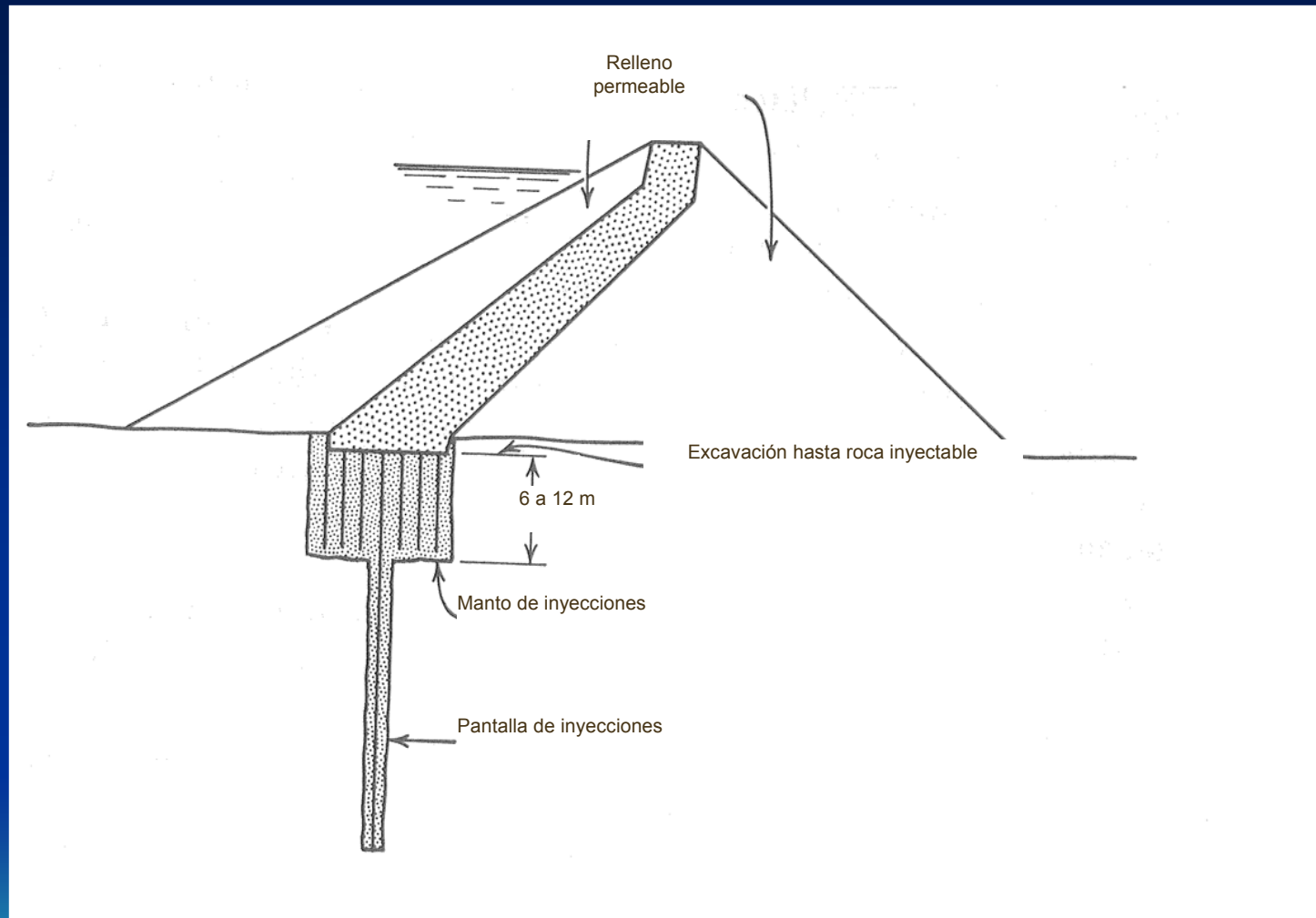
El terreno de cimentación

- **Bajo el núcleo:**
 - Eliminación de grietas, juntas abiertas y fisuras para evitar infiltración y erosión interna.
 - La superficie ha de quedar lo menos rugosa posible.
- **Bajo los espaldones:**
 - Suficiente resistencia
- **Atención a la posible existencia de zonas con diferente deformabilidad**

El terreno de cimentación

- Tratamiento de la superficie de la cimentación y de los estribos:
 - Limpieza:
 - retirada de bloques sueltos;
 - lavado a presión (superficies en roca);
 - tratamiento “dental”; colocación de hormigón en oquedades y juntas abiertas;
 - gunita.
 - Inyecciones:
 - **Inyecciones de consolidación:** tipo manta superficial, someras, pocos metros de profundidad, sobre un área grande;
 - **Pantalla de inyecciones:** al menos tres filas, profundidades grandes, 50-100m, o más.
 - Construcción de **elementos de drenaje**: galerías de drenaje, pozos de alivio.
 - Tratamientos de rocas fracturadas, cavernas.

El terreno de cimentación



Tratamiento mediante inyecciones de cimentación formada por roca fracturada.

Galería perimetral

Galería perimetral

Necesidad de galería perimetral bajo el elemento impermeable de la presa → discutible:

Escuela “europea”: sí

Escuela “norteamericana”: no



Galería perimetral

- **Función:**
 - Control de la cimentación:
 - Auscultación de filtraciones, subpresiones, movimientos;
 - Evacuación de caudales infiltrados;
 - Corrección del terreno de cimentación sin vaciar el embalse: inyecciones, drenes;
 - Corrección del propio cuerpo de la presa.
- **Situación:**
 - presas con núcleo: bajo su mitad de aguas abajo.
 - presas de escollera con pantalla → próximas al pie de la pantalla.
 - No colocar inmediatamente bajo los filtros.



Galería perimetral

- Casos de patologías en España, con y sin galería:
 - Poco aconsejable cuando el terreno de cimentación es deformable e impermeable.
 - La ausencia de galería dificulta eventuales actuaciones correctoras.



Estabilidad de taludes

Estabilidad de taludes

- Situaciones críticas para la estabilidad:
 - durante la construcción de la presa;
 - en caso de desembalse rápido;
 - a largo plazo;
 - en caso de sismo.

En España: Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de Grandes Presas:

- a) Durante la construcción:
 - Ambos taludes;
 - Presas de escollera y de tierra con núcleo delgado y espaldones muy permeables: se puede omitir la comprobación para el talud de aguas abajo, (salvo que la naturaleza arcillosa del cimiento lo haga necesario).
- b) Embalse lleno:
 - Talud aguas abajo.
- c) Desembalse rápido:
 - Talud de aguas arriba; con diversos niveles de desembalse.

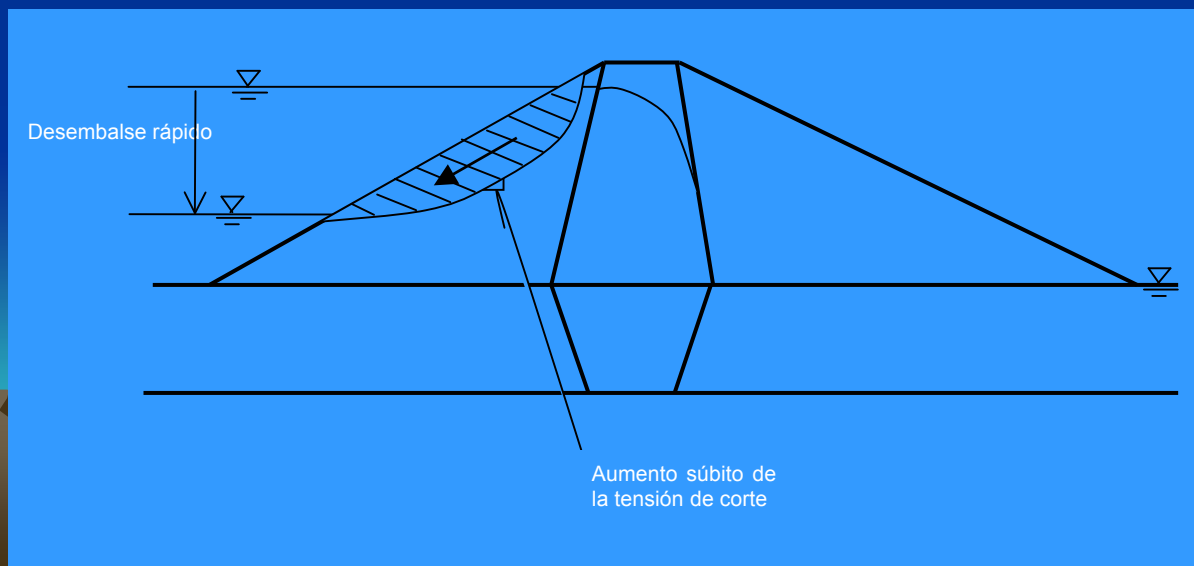
Estabilidad de taludes

- Durante la construcción:
 - los deslizamientos avisan → ¡observación!
 - talud de aguas arriba, particularmente cuando existen suelos blandos en la cimentación;
 - Se generan altas presiones intersticiales en los materiales de la presa debidas:
 - a la compactación de la tongada;
 - a las cargas verticales de las tongadas sobreyacentes.
 - Para minimizar las presiones intersticiales:
 - compactación de los materiales cohesivos del lado seco del óptimo;
 - instalación de capas drenantes horizontales;
 - alargamiento del período constructivo.

Estabilidad de taludes

- **Desembalse rápido:**

- causa más frecuente de deslizamientos en presas de materiales sueltos;
- en el talud de aguas arriba;
- con frecuencia, coincidencia de 3 circunstancias:
 1. ritmo de descenso del nivel de embalse: en torno a 10 a 15 cm por día;
 2. nivel de agua descendiendo hasta la cota de media altura;
 3. materiales arcillosos.
- Origen de la pérdida de estabilidad: falta de tiempo para la disipación de las presiones intersticiales.



Estabilidad de taludes

- **Deslizamientos a largo plazo:**
 - Poco frecuentes a embalse lleno, con la red de filtración establecida a través de la presa y en situación estacionaria.
 - Pueden estar asociados a fallos en los sistemas de drenaje en el interior de la presa y subida anormal de las líneas de flujo de la red de filtración .
 - Estabilidad en caso de sismo.

- **Mecanismos de fallo por sismo:**
 - Rotura de la presa por un movimiento de falla importante en la cimentación;
 - Pérdida de resguardo debido a movimientos tectónicos diferenciales;
 - Deslizamientos de taludes inducidos por el sismo;
 - Deslizamiento de la presa sobre materiales de cimentación poco resistentes; licuación del terreno.
 - Pérdida de resguardo debida a fallo del talud o a densificación del material de la presa;
 - Fallo por tubificación a través de grietas inducidas por la sacudida sísmica;
 - Rebosamiento debido a “seiche” en el embalse;
 - Rebosamiento debido a deslizamientos de laderas en el embalse;
 - Roturas del aliviadero o de los órganos de desagüe.

Estabilidad en caso de sismo

- **Medidas de proyecto:**

- resguardos generosos para permitir posibles asientos o hundimientos de la coronación;
- zonas de transición amplias con materiales no susceptibles de fisurarse;
- drenes chimenea cerca de la parte central de la presa;
- zonas de filtro de arenas y gravas redondeadas o subredondeadas;
- zonas de drenaje amplias para permitir flujos de agua procedentes de grietas;
- materiales de núcleo plásticos, con poca tendencia a agrietarse;
- filtros aguas arriba del núcleo, para frenar el avance de las grietas;
- diseño de la coronación que evite o minore la erosión por rebosamiento;
- ensanche del contacto con los estribos;
- estabilizar las laderas del vaso para evitar deslizamientos hacia el embalse;
- si hay peligro de movimiento de falla, diseño especial de la cimentación;
- localizar el núcleo o pantalla impermeable de manera a minimizar el grado de saturación del material de la presa.

Erosión de taludes - Protección de taludes

Protección del talud de aguas arriba

- **Las olas en el embalse erosionan el talud → problemas de mantenimiento**
- **Sistemas de protección superficial del talud de aguas arriba:**
 - Escollera vertida:
 - vertido de grandes pedazos de roca en la superficie.
 - más efectiva y económica que la colocación “a mano”.
 - Pantalla de hormigón armado:
 - sin juntas horizontales.
 - Recubrimiento de suelo-cemento.
 - Pantalla asfáltica.

Protección de taludes

- **Escollera vertida:**

- Ventajas sobre la pantalla de hormigón:

- no resulta dañada por asientos del cuerpo de la presa,
 - disipa mejor la energía,
 - en los climas fríos, no sufre daños por el hielo.

- Tamaño de escollera:

- suficientemente grandes para no ser arrastrados por el agua
 - función de la altura de ola →
 - velocidad del viento,
 - distancia (fetch) recorrida sobre el embalse,
 - duración de la tormenta de viento.

Máxima altura de ola, cm	Tamaño medio de escollera, D_{50} , cm	Espesor mínimo de capa, cm
0-60	25	30
60-120	30	45
120-180	38	60
180-240	45	75
240-300	53	90

Protección de taludes

- **Escollera vertida:**

- Huecos entre trozos de roca suficientemente pequeños para evitar la erosión del material contiguo.
- Entre la capa de escollera y el material del cuerpo de la presa debe colocarse una capa de filtro:

- Criterios de filtro:

- Relaciones granulométricas:

$$(D_{15})_{\text{filtro}} \leq 5(D_{85})_{\text{terraplén}}$$

- Alternativamente: materiales granulares gruesa y 10 cm

$$(D_{15})_{\text{escollera}} \leq 10(D_{85})_{\text{filtro}}$$

- Espesores de la capa de filtro: entre 30 y 60 cm

- **Pantalla de hormigón:**

- No es necesaria la capa de filtro.
- Espesor de la losa: 25 a 30 cm.

Índice

1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. **Presas de escollera con pantalla aguas arriba**
7. Conclusiones

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- Dos sistemas de construcción de presas de escollera
 - **Escollera vertida** (*hasta los años 60 del siglo XX*)
 - **Escollera compactada**

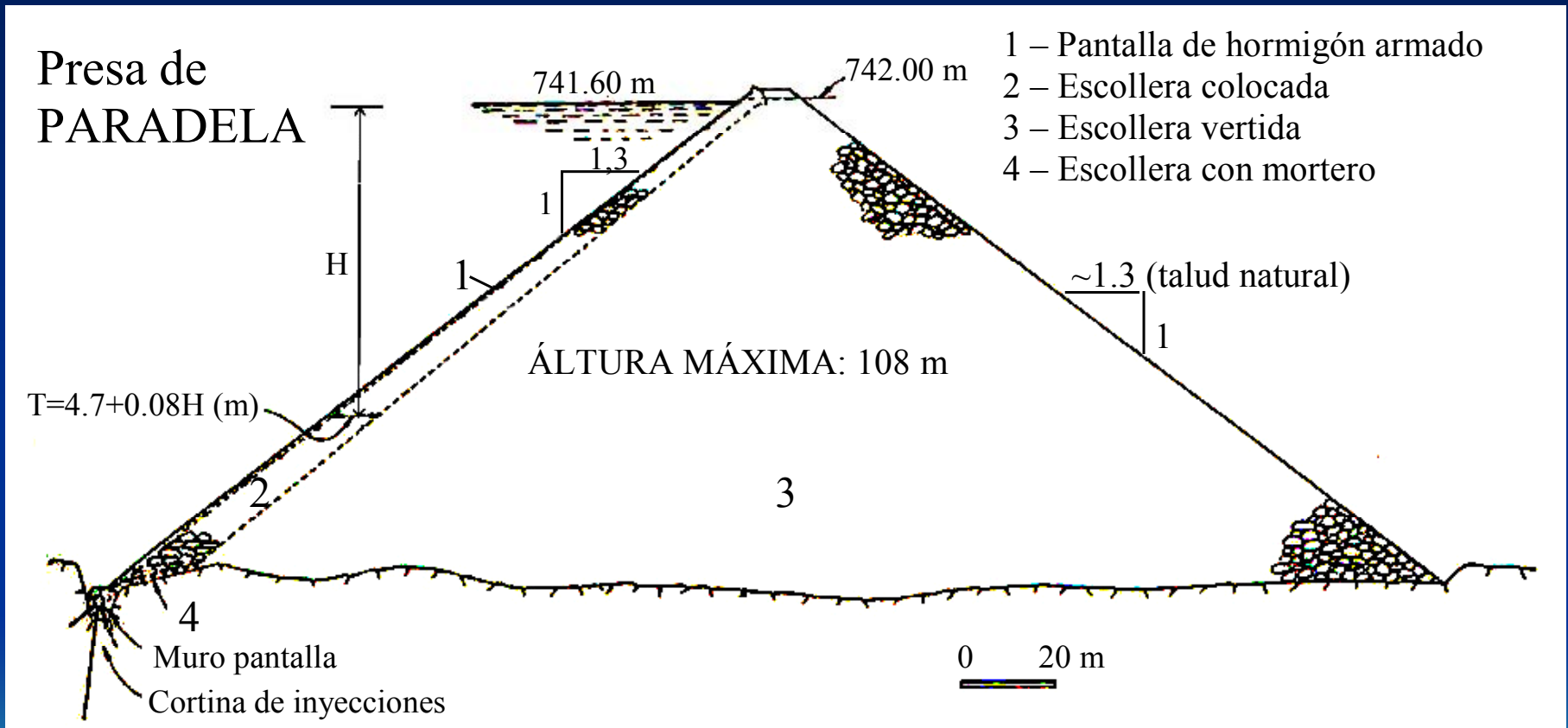


Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera vertida** (*hasta los años 60 del siglo XX*)
 - Taludes bastante inclinados, del orden de 1,3V:1H, próximos al ángulo del talud natural de los materiales.
 - Comportamiento estructural satisfactorio para alturas de presa moderadas
 - Presas de gran altura → **comportamiento deficiente:**
 - deformaciones elevadas en el cuerpo de escollera
 - fisuración y pérdida de estanqueidad en las juntas de la pantalla de aguas arriba
 - elevados caudales de filtración a través de la pantalla

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera vertida**



Perfil transversal de la presa de Paradelá

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera vertida**

Presas de Paradela

- De escollera vertida (1956);
- Pantalla de hormigón armado aguas arriba con juntas verticales y horizontales;
- Muro-pantalla con galería de drenaje, sirve de unión entre la pantalla y la cortina de inyección de la cimentación.
- Desde el primer llenado, la pantalla sufrió movimientos excesivos, fisuración y filtración de agua;
- En poco tiempo, obras de reparación periódicas para reducir los caudales infiltrados;
- En 1980 se hubo de utilizar una membrana impermeable para cubrir la pantalla;
- Sistema de observación:
 - marcas superficiales; fisurómetros en la galería; aforadores de caudal en la galería; piezómetros

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera vertida**

Presas de Paradela



Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera vertida**

Presas de Paradela

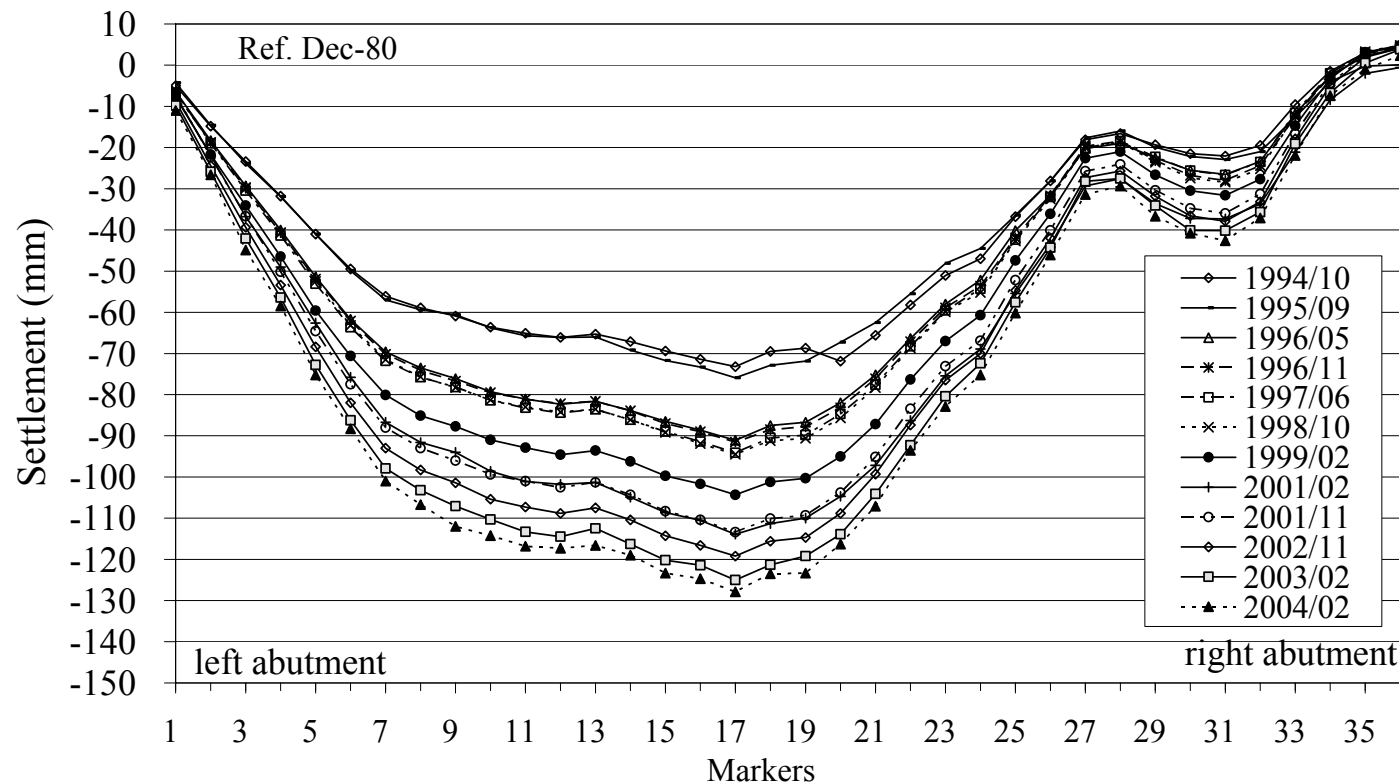


Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- Escollera vertida**

Presas de Paradela

Asientos medidos en la coronación de la presa de Paradela desde 1994 a 2004 con relación a 1980. (La presa se construyó en 1956).



Presas de escollera con pantalla aguas arriba

Escollera vertida

- Deformaciones en las escolleras:
 - rotura de partículas rocosas en los puntos de contacto,
 - reajuste del medio granular tras cada fractura.
- El nivel de fracturación depende de varios factores:
 - estado de tensión, el más importante → Presas más altas, mayores deformaciones.
- Disminuyen la fracturación:
 - reducidos índices de poros;
 - granulometrías bien graduadas;
 - fragmentos rocosos de elevada resistencia.
- Con el reajuste de las partículas se verifica normalmente una disminución de las deformaciones a largo plazo

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Escollera compactada** (*desde los años 60*)
 - Utilización de equipos de movimiento y compactación de tierras;
 - Construcción en tongadas compactadas con rodillos vibrantes de peso estático mínimo de 100 kN;
 - Regado abundante.
 - Comportamiento estructural bastante satisfactorio.
 - Patologías asociadas a fallos por rebosamiento, debido a deficiencias de operación hidráulica



Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Construcción del paramento de aguas abajo**



Colocación de la escollera en el paramento



Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Construcción de la pantalla aguas arriba**



Sin juntas horizontales

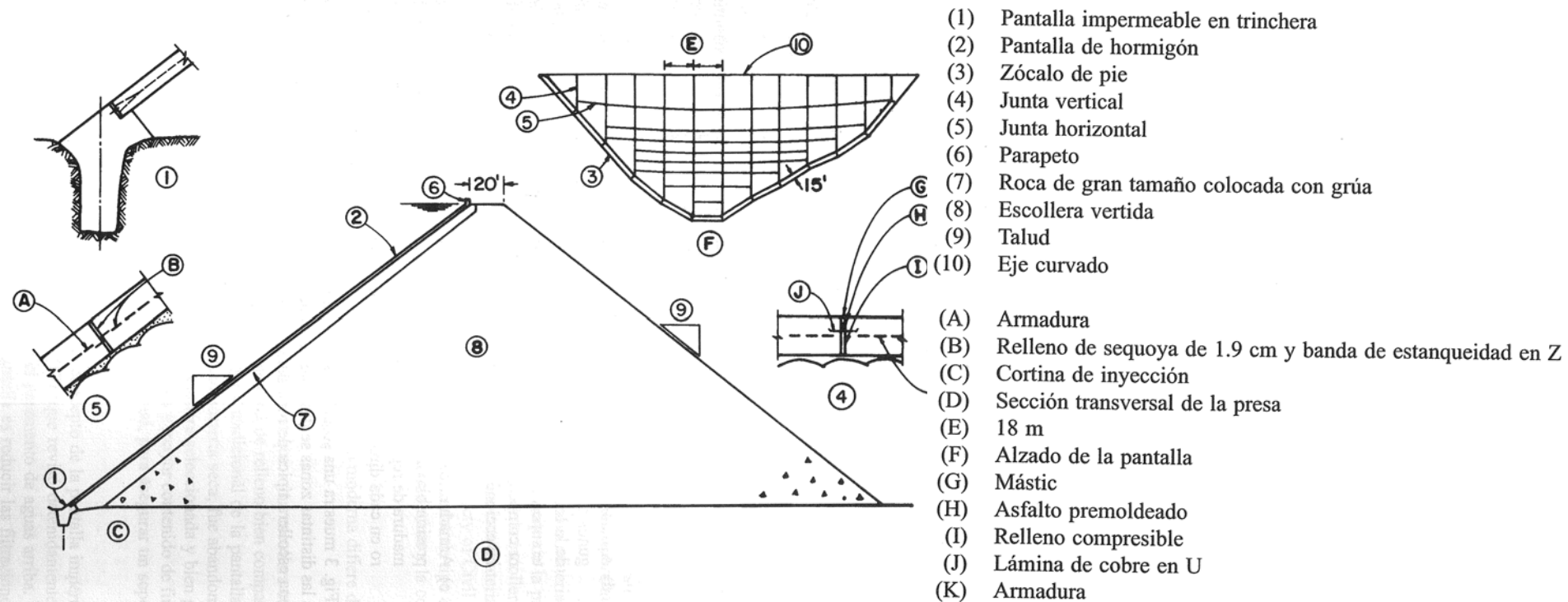


Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Construcción de la pantalla aguas arriba**

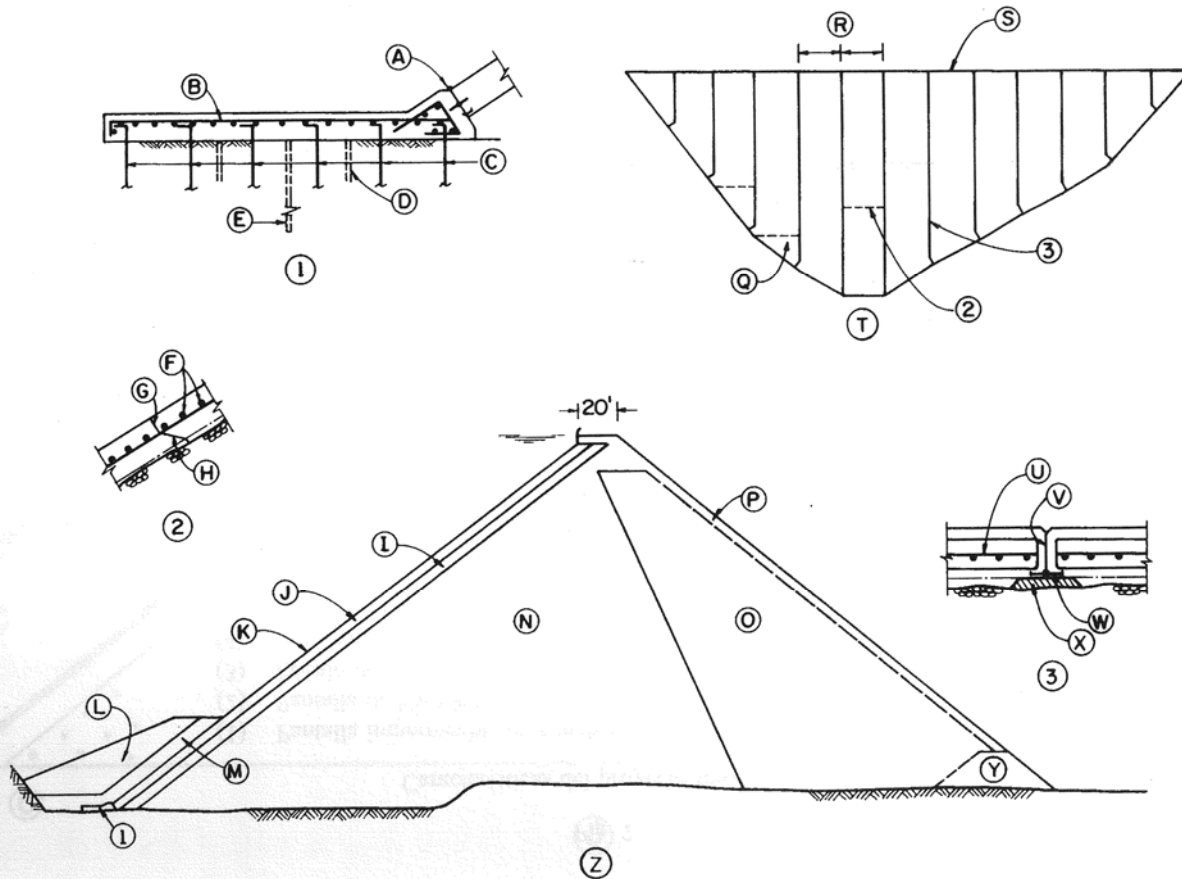


Presas de escollera con pantalla aguas arriba



Presa de escollera vertida

Presas de escollera con pantalla aguas arriba



- (1) Zócalo de pie
- (2) Junta horizontal
- (3) Junta vertical
- (A) Junta perimetral
- (B) Armadura
- (C) Barras de anclaje
- (D) Inyecciones de consolidación
- (E) Pantalla de inyección
- (F) Armadura horizontal
- (G) Con encofrado
- (H) Junta
- (I) Zona 3 A-Roca seleccionada de tamaño pequeño, colocada en capas del mismo espesor que en la zona 2
- (J) Zona 2-Roca de tamaño pequeño procesada
- (K) Pantalla de hormigón
- (L) Zona 1 B-Todo uno
- (M) Zona 1 A-Material impermeable
- (N) Zona 3 B-Relleno de escollera o grava sin clasificar, en capas de 1.0 m aproximadamente
- (O) Zona 3 C-Relleno de escollera o grava sin clasificar, en capas de 1.5 a 2.0 m
- (P) Roca de gran tamaño en el talud de aguas abajo
- (Q) Losa de arranque
- (R) 18 m
- (S) Eje recto
- (T) Alzado de la pantalla
- (U) Armadura horizontal
- (V) Superficie pintada con asfalto
- (W) Junta de cobre
- (X) Mortero de apoyo
- (Y) Zona 3 D-Escollera mayor de 0.3 m
- (Z) Perfil transversal de la presa

Presas de escollera compactada

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Plinto:** elemento de unión de la pantalla con el terreno
 - Desde el plinto se realizan trabajos de impermeabilización del terreno de cimentación
 - Formas variadas:
 - plinto-losa: más común, recomendable por su estabilidad.
 - plinto-galería: frecuente en Europa;
 - Rara vez se construye como se ha proyectado

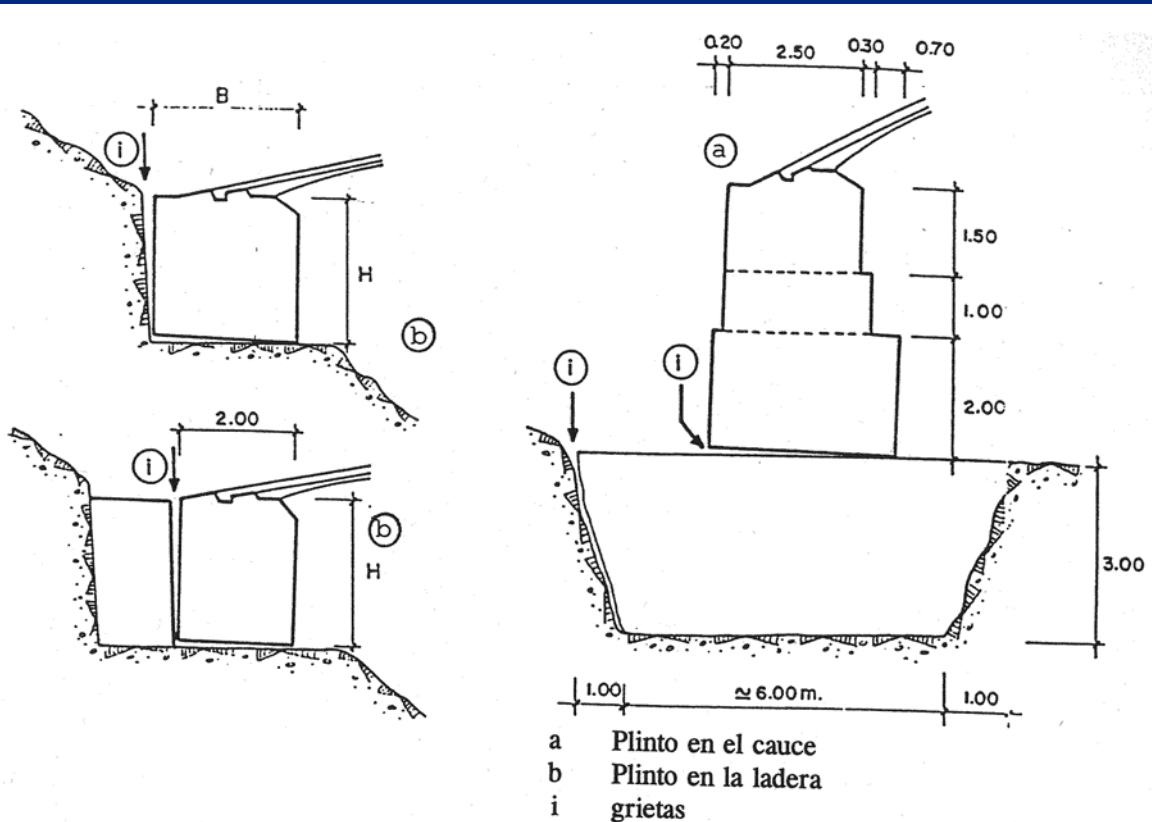


Plinto presa de Arcossó

Presas de escollera con pantalla aguas arriba

- **Plinto:** Para evitar patologías:

- Evitar formas con fuertes quiebros que propicien la fisuración de la pantalla al adaptarlo al terreno.
- Evitar plintos excesivamente esbeltos (vuelcos, daños a la pantalla).
- Evitar juntas sin armaduras.



Distintas morfologías y tipos de rotura del plinto
(Presa de Siberio, Alonso Franco, 1993).

Índice

1. Introducción
2. La compactación de materiales
3. Fisuración en presas de materiales sueltos
4. Tipos de presas y factores de proyecto
5. Causas de fallos
6. Presas de escollera con pantalla aguas arriba
7. **Conclusiones**

Conclusiones

- La rotura de una presa puede producir consecuencias devastadoras.
- Los conocimientos actuales sobre el comportamiento de las presas de materiales sueltos se basan en gran medida en el análisis de los casos de patologías y accidentes.
- Es fundamental aplicar estos conocimientos en:
 - los proyectos;
 - la implementación de adecuados sistemas de mantenimiento;
 - la redacción de planes de observación, que sirvan para alertar a tiempo de indicios de comportamientos deficientes.

Conclusiones

“los **suelos** tienden a erosionarse cuando el **agua** fluye sobre ellos o a través de ellos”



¡Gracias por su atención!