

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

GEOCONDICIONANTES DE PRESAS Y EMBALSES

René Gómez López de Munain ¹

RESUMEN: Mucho se ha escrito sobre este tema y poco novedoso puede aportar quien suscribe, a caso sirva de recopilación los condicionantes geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos que se presentan y que pueden afectar a la estabilidad, deformabilidad, permeabilidad de una presa y su embalse, que conllevarían restricciones en su funcionamiento, averías o fallos graves.

La diferente orientación de las discontinuidades (juntas de estratificación, esquistosidad, fracturación, fallas, etc.) del macizo rocoso de cimentación, condiciona la permeabilidad y la deformabilidad de la cerrada y determinan la tipología de presa elegida.

Los problemas de disolución, dispersión, arrastre, deformación, mala ejecución de filtros, drenes, contactos con obras de fábrica, etc., producen asientos, erosión interna, superficies de rotura, sifonamiento, etc., que condicionan la estabilidad y permeabilidad del conjunto presa-cimiento.

En los aspectos hidrogeológicos, a partir de la elaboración del mapa de isopiezas deduciremos unos gradientes hidráulicos que por si mismos nos indicarán el grado de permeabilidad del macizo rocoso y la relación entre el nivel piezométrico del vaso y el nivel del embalse, nos orientará del comportamiento permeable del vaso del embalse.

¹ Confederación Hidrográfica del Ebro. Pº Sagasta 24-28. 50.006 Zaragoza. rgomez@chebro.es

1. ELECCIÓN DE LA CERRADA

La elección de una cerrada viene condicionada por diversos elementos:

- Condicionantes Geométricos. El objetivo es la búsqueda de la menor longitud de cerrada para economizar la inversión, aunque como luego se verá la menor inversión en el cuerpo de presa obliga a veces, a realizar inyecciones de impermeabilización cuyo coste conjunto supera a una solución de cerrada más larga.
- Condicionantes Geotécnicos. Éstos definen la tipología de presa, junto al estudio de materiales. Es fundamental la deformabilidad del macizo rocoso a la hora de implantar una tipología de presa; así, aunque siempre es difícil establecer un límite, podemos fijar entre 10-15.000 kg/cm² el límite para que una cimentación permita apoyar una presa de fábrica y para un límite inferior emplazaremos una de materiales sueltos.
- Condicionantes Hidrogeológicos. En esencia la finalidad de la obra es la de retener agua (permanentemente o temporalmente si deseamos recargar acuíferos), por lo tanto debiera ser el condicionante principal. Se debe estudiar minuciosamente no solo en la estructura de la presa, sino en los estribos de la cerrada fuera de la presa, en el vaso y valorar económicamente la solución de impermeabilización conjunta. Es importante considerar en esta valoración que las pantallas de impermeabilización deben ser mantenidas y reinyectadas periódicamente.
- Condicionantes Medioambientales. Recientemente una mayor convicción medioambiental de la Sociedad y un aumento de la normativa ha comportado el aumento en nuestro territorio de Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), Zonas de especial protección de las Aves (ZEPAS), IBA, etc., que condiciona la ubicación de embalses y presas. Como ejemplos podemos citar el embalse de Jánovas (Huesca) en el río Ara y Torre del Compte (Teruel) en el río Matarraña, cuyos estudios de impacto ambiental negativos rechazaron la construcción del embalse.
- Condicionantes de Materiales. Muchas veces las características de los materiales, su distancia, o el tener que atravesar poblaciones con las molestias que conlleva, imposibilita o limita el emplazamiento de una presa.
- Condicionantes Geológicos: El tipo de presa a implantar en cada cerrada depende de las características geológicas de la cerrada. Es interesante pensar que una presa reconstruye la geomorfología pretérita que la erosión fluvial denudó y desde este punto de vista la presa ideal es aquella que mejor reproduce esas condiciones geológicas pasadas. Así en palabras de D. Clemente Saenz García, *en las cerradas con presencia de terrenos arcillosos están indicadas las presas de "tierra" o de "escollera" y la "fábrica" debe reservarse para suplir a la piedra*. Por lo tanto y en general, las presas de hormigón (y las de escollera con pantalla de hormigón convencional/asfáltico; CFRD/AFRD) requieren cimentaciones en roca, mientras que las de materiales sueltos pueden cimentarse en suelos.

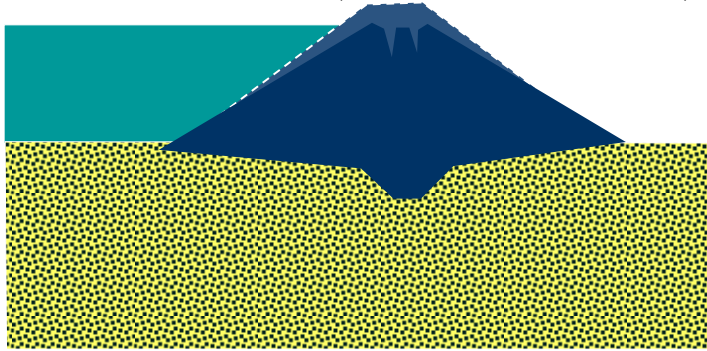
2. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS

Se presentan a continuación una serie de mecanismos de fallo de la cimentación de una presa que pueden causar su ruina.

2.1 CIMENTACIÓN EN SUELOS O ROCA DE BAJA RESISTENCIA (Presa de materiales sueltos)

2.1.1 Asiento en la presa sobre suelos blandos compresibles.

Existen varios tipos de asientos en presas: de construcción, de humectación o de llenado, de fluencia (deformaciones diferidas)

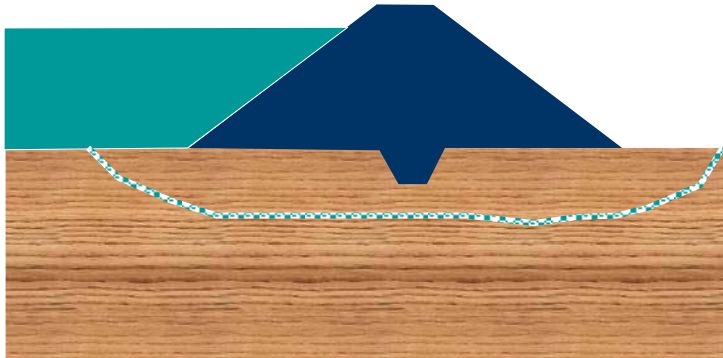


Cuando los asientos son de cierta importancia se denominan colapsos. En la presa de núcleo de arcilla y espaldones de escollera de Rivera de Gata (Cáceres) de 52 m de altura se observó un asiento máximo en coronación del 1,3% de su altura, agrietando su coronación.

2.1.2 Asiento por drenaje del cimiento

En 1978 el drenaje causado por la excavación de una galería de exploración para un túnel, 400 m por debajo del fondo del valle y a 1,5 Km. de distancia causó un asentamiento de la cimentación de 14 cm. y un estrechamiento del valle de 7 cm., produciendo graves daños a la presa bóveda de Zeuzier (Suiza). (La disminución de la presión intersticial favoreció estos asientos)

2.1.3 Sifonamiento.



Cuando existe en cimentación un gradiente vertical ascendente fuerte (el gradiente supera a la densidad sumergida del suelo) se producen grietas en el terreno, arrastres importantes y el fenómeno conocido como “arenas movedizas” (presiones efectivas nulas). Este fenómeno conlleva el levantamiento del fondo de las excavaciones o del pie de las presas.

$$i_{\text{crítico}} = \frac{\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

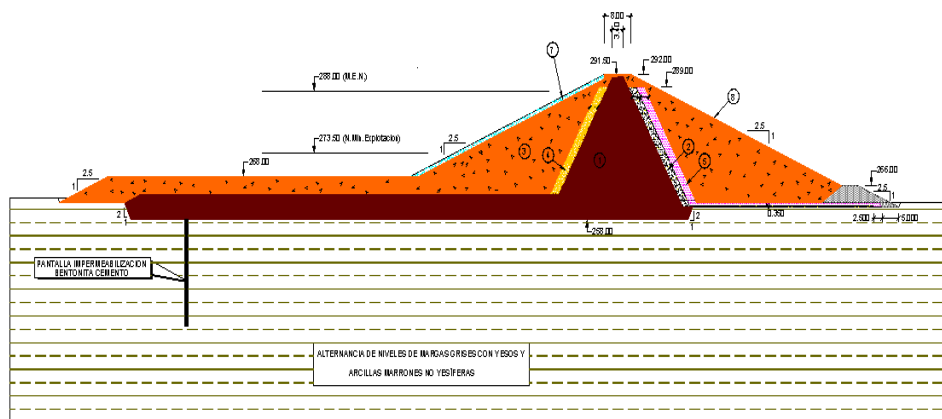
Como quiera que el peso específico saturado de un suelo suele rondar 2 t/m³, el gradiente crítico suele encontrarse en torno a 1.

El 30 de abril de 1802 la rotura de la presa de Puentes (Murcia) que almacenaba en ese momento 30 hm³, de los 52 hm³ máximos de capacidad, causaba el mayor desastre de la historia hidráulica española, con 608 víctimas mortales, debido a una solución inadecuada de pilotaje, que causó la ruina de la presa por sifonamiento.

2.1.4 Erosión interna (tubificación, hydraulic piping) de los materiales de cimentación o del cuerpo de presa.

La erosión interna es una filtración erosiva, que se puede producir por las siguientes causas:

- Cimientos con sales solubles (yesos, halitas, carbonatos) en los que se desencadena un proceso de disolución. Algunos autores (James, 1980) aconsejan limitar el gradiente a 0,2 en cimentaciones de yeso, con este criterio se proyectó la presa de La Loteta (Zaragoza).



- Cimientos con erosión por “arrastre de finos” (areniscas y limolitas escasamente cementada, arenas muy finas, limos no plásticos, arcillas dispersivas.)

- Contactos defectuosos del elemento impermeable con los estribos y cimientos (especialmente si la roca está fracturada), estructuras (aliviaderos, desagües de fondo, desvío del río)

- Inadecuados filtros y drenes.

- Por fracturación hidráulica: la presión del agua puede producir la apertura de grietas a través del núcleo. Cuando el terraplén se deforma por asentamientos diferenciales, la tensión principal menor decrece y se aproxima a cero (o se hace negativa) iniciándose una fisura. Se puede producir también dentro del cuerpo de presa, el efecto arco de los espaldones sobre el núcleo más deformable, reducen las tensiones verticales hasta casi cero y la presión de agua abre por fracturación hidráulica una grieta horizontal que puede tener varios centímetros de espesor. Este fenómeno también se puede producir en los tapiques.

Se produce con gradientes hidráulicos fuertes, pero también medios (Soriano, 1999) que van desde 0,1 (suelos susceptibles) a 0,4 (suelos más estables), con materiales erosionables o disolubles.

Es difícil de advertir, sólo cuando sus consecuencias son notables: filtraciones con arrastres (presa de Caspe 1988), cráter en espaldones (presa de Taibilla 1975, Fontinelle (USA) 1965).

La fracturación hidráulica se puede observar al hacer ensayos de permeabilidad Lugeon o inyecciones. Es un proceso remontante, se propaga aguas arriba

- Algunos ejemplos:

- Torrollón (Huesca) (se produjo el arrastre de los finos de las areniscas escasamente cementadas y la expansión de las limolitas-arcillas produciendo problemas en los dispositivos hidráulicos).

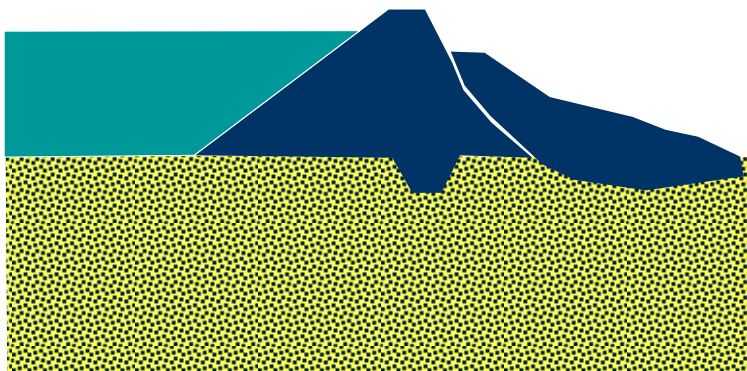
- Caspe II (Teruel) (cimentación en miocenos continentales a base de margas y areniscas con intercalaciones de yesos y limolitas, en 1988 y 1990 se produjeron filtraciones importantes en la margen izquierda junto al desvío del río Guadalupe por disolución de los yesos que se atajaron con inyecciones).

- En 1975 en la presa de Taibilla (Albacete) se produce un aumento de las filtraciones de 20 a 90 l/s al formarse un cráter en el talud de aguas arriba consecuencia de la migración de arcillas del núcleo a los huecos de la cimentación originados por disolución de yesos. También incluiríamos la rotura en 1989 de la presa Quail Creek (Oklahoma) por disolución de yesos pérmicos del cimiento.

- Seguramente el caso más conocido internacionalmente es la presa de Teton (E.E.U.U.) que en 1975 sufrió un proceso de erosión interna iniciada en la zanja de la base del núcleo, rellena con arcilla contra las paredes de la roca (riolita) con juntas abiertas, causando el fallecimiento de 11 personas.

2.1.5 Rotura circular

Favorecida por baja resistencia de cimentación tanto en talud de aguas arriba (en periodo de llenado) como aguas abajo (en periodo de vaciado) o por licuefacción del sustrato sometido a un sismo como sucedió en 1971 en San Fernando (USA). Los suelos más susceptibles a la licuefacción son las arenas finas homogéneas, los limos (a veces también arena y grava), pero requieren saturaciones superiores al 90 % y densidad relativa inferior al 75 %.



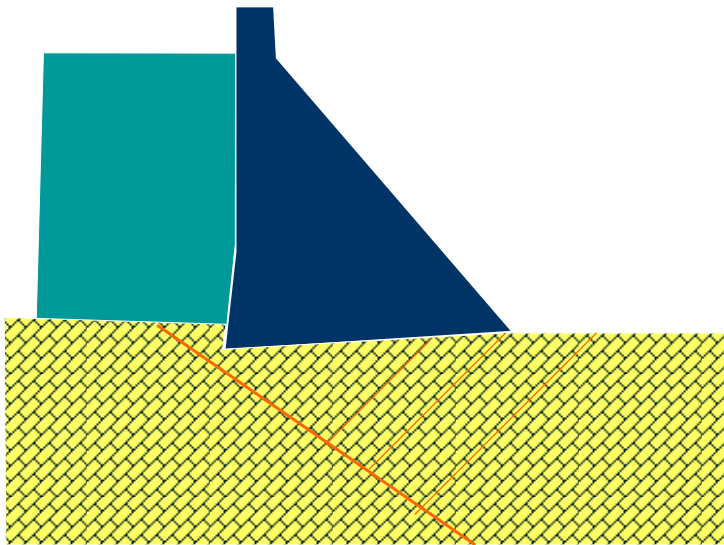
2.2 CIMENTACIÓN EN ROCA (Presa de Fábrica)

2.2.1 Buzamiento aguas arriba intersectados por falla buzando aguas abajo.

Los estratos aguas abajo del pie de presa, como consecuencia de las tensiones transmitidas, pueden deslizar especialmente si su buzamiento es menor de 30° , desaprovechando el efecto favorable del empuje pasivo, provocando descalces, y si además se combina con litoclasas (fallas, fracturas, esquistosidad, etc.) oblicuas a la estratificación, se generan cuñas en cimentación que causan la ruina de la estructura.

Proyectar una planta curva puede disminuir las dimensiones de las cuñas y descargar de tensiones de los estratos aguas abajo del pie de presa.

Es el ejemplo de la presa de Malpasset (Francia) de 66 m de altura que durante su primer llenado el 2 de diciembre de 1957 colapsó causando la muerte de 421 personas



2.2.2 Buzamiento aguas abajo:

Resistencia: en principio los estratos se clavan en cimentación, aportando un comportamiento favorable, pero diferenciable en función de su buzamiento:

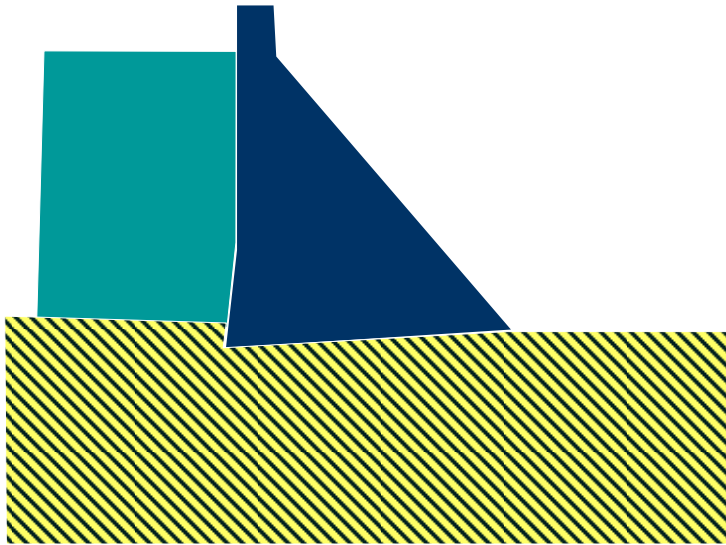
Buzamientos entre 10° y 30° . La presa podrá ser de fábrica, pero deberá ser de planta recta para no darle una curvatura inconveniente. Si se proyectara de planta curva, en los estribos el buzamiento aparente de los estratos los convertiría en subhorizontales, perdiendo en esos bloques de presa, el efecto favorable de clavado de los mismos.

Buzamientos entre 30° y 60° : conforman buenas cimentaciones, posibilitando el emplazamiento de presas arco. De todas formas, en presas arco, convendrá estribar de forma que las cargas transmitidas a la roca sean lo más normales posibles al sistema de litoclasas, para aumentar la estabilidad por rozamiento de estos planos de discontinuidad. La disposición curva en planta con juntas radiales entre bloques impide los deslizamientos parciales debido al acodalamiento de bloques.

Se pueden producir levantamientos de la cimentación aguas abajo por subpresión excesiva

Permeabilidad: puede ser defectuosa, especialmente con buzamientos inferiores a los 30° y suele requerir una esmerada pantalla de inyecciones.

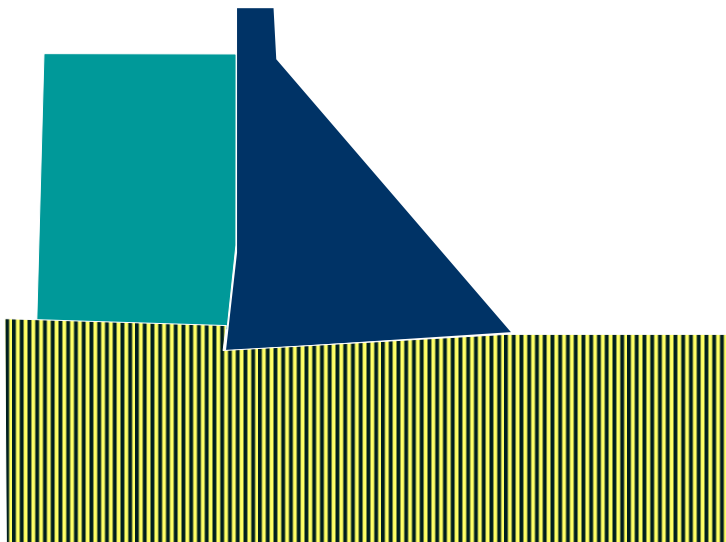
Podemos poner como ejemplo la presa de planta recta de hormigón de Bornos construida en el río Guadalete.



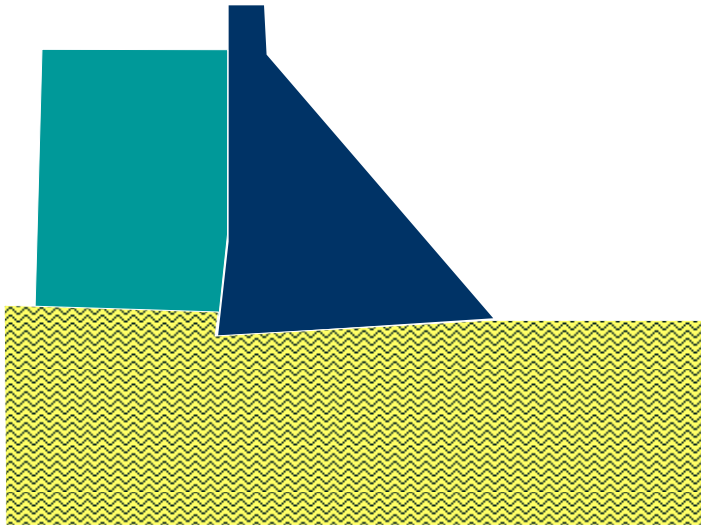
2.2.3 Buzamiento vertical y dirección perpendicular al río:

Resistencia: si como suele ser frecuente, se trata de una alternancia de niveles blandos (pizarras, margas, argilitas, etc.) y duros (cuarcitas, areniscas, etc.) la carga tiende a concentrarse en los rígidos y si éstos son suficientemente delgados, pueden pandear y transmitir la tensión a los materiales blandos plastificándolos. La baja resistencia al corte de los niveles blandos, unida a la fracturación de los duros, puede producir el deslizamiento en un plano perpendicular a la estratificación. La presa suele ser de planta recta

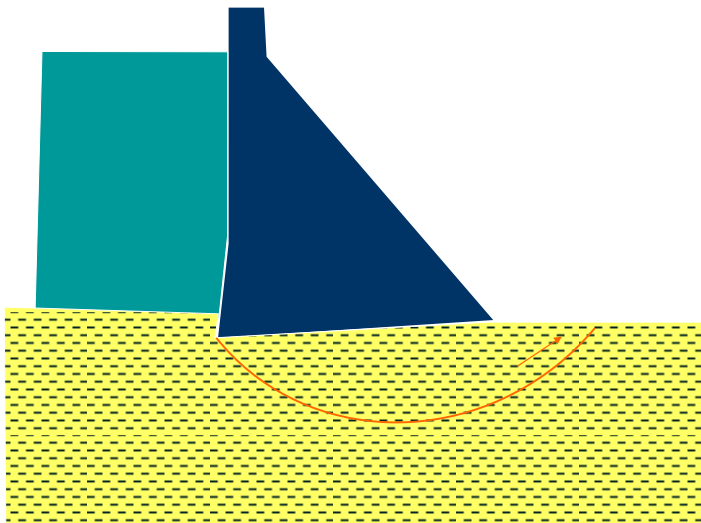
Permeabilidad: Si existe una alternancia de calizas y margas, la impermeabilización está prácticamente garantizada, como ocurre en la presa de Escales en el río Noguera-Ribagorzana, o Barasona en el río Ésera. No son excepcionales sin embargo, sistemas de fracturas paralelos al río que ocasionan problemas de permeabilidad.



2.2.4 Rocas metamórficas afectadas por familias de juntas conjugadas. Pueden originar roturas en cimentación



2.2.5 Rotura por esfuerzo cortante a través de la matriz rocosa en rocas blandas



2.2.6 Buzamiento Horizontal

Resistencia: Deslizamiento a favor de planos, discontinuidades o capas de baja resistencia (bajo ángulo de rozamiento interno o condiciones residuales por existir roturas previas), localizadas en el contacto presa-cimiento o en cimentación. En estas cerradas en general son desfavorables los emplazamientos de presas arco, posibles las de gravedad y favorables los de materiales sueltos.

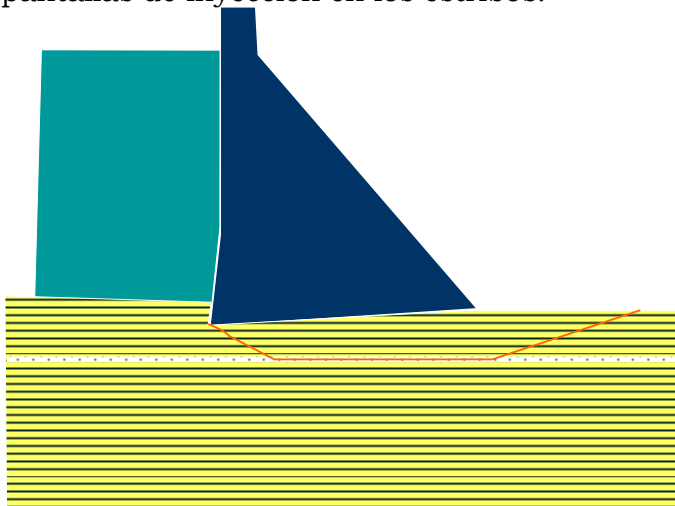
Soluciones al problema:

- a) A veces, estos planos no se distribuyen en grandes superficies y la resistencia al corte mejora en otras zonas próximas de la misma cerrada. En es-

tos casos, una planta de presa ligeramente arqueada con juntas radiales garantiza que la tendencia al deslizamiento de un bloque entre juntas sucesivas quede impedido por el acodamiento entre dos bloques contiguos, lo que no puede evitarse si la planta es recta.

- b) Es muy útil taluzar la excavación con pendiente aguas arriba (contrapendiente del contacto presa-cimiento). Ej El Grado II. La cimentación consiste en una alternancia de margas y areniscas eocenas subhorizontales. Con frecuencia las margas son niveles muy finos con muy bajo contenido de carbonatos que las convierten en arcillas margosas. Las zonas más peligrosas son excavadas, cimentando en la zona de aguas arriba por debajo de la zona de baja resistencia y el contacto presa-cimiento aumenta su resistencia al incluir formaciones rocosas de mayor calidad
- c) Aumento de la carga vertical, como en la presa de Mequinenza, cuya cimentación son estratos horizontales de caliza separados por delgadas láminas de lignitos. El contacto cimiento-hormigón es horizontal transmitiendo tensiones tangenciales al lignito. Para solucionarlo se aumentó la capacidad resistente de los lignitos mediante cargas verticales con peso adicional de hormigón en la zona del colchón amortiguador
- d) Parece desaconsejable taluzar el paramento de aguas arriba en estas presas de fábrica, porque aunque consigue aumentar la resistencia la corte por el peso adicional de agua, puede producir en el pie de aguas arriba tracciones normales a los planos de estratificación o al contacto hormigón-roca, disminuyendo la superficie de contacto presa-cimiento y condicionando la estabilidad al deslizamiento.

Permeabilidad: se ve muy comprometida puesto que solo es necesario que sea permeable uno de los niveles y a menudo exige prolongaciones generosas de las pantallas de inyección en los estribos.



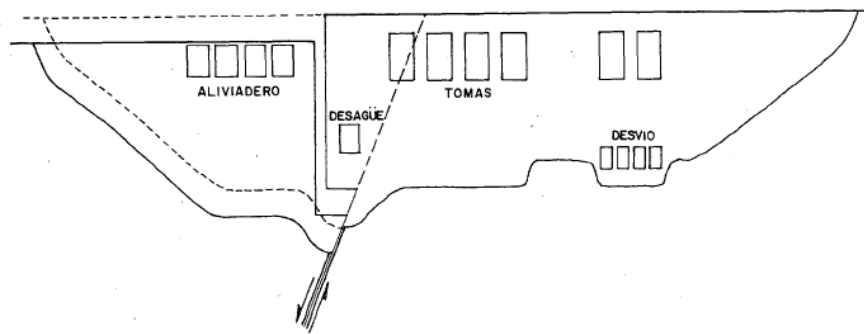
La rotura de la presa de residuos mineros de Aznalcóllar (1998), se produjo por la rotura progresiva de un nivel de margas azules del Guadalquivir situado a 14 m bajo la cimentación de la presa que llegó a desplazarse 53 m hacia aguas abajo.

2.2.7 Cimentación encima de una falla.

En numerosas cerradas ha sido necesario tratar planos de falla mediante la sustitución del relleno de falla por hormigones y morteros, extraído median-

te chorro de agua a gran presión. Existen numerosos ejemplos, pero por las mayores prestaciones resistentes exigibles al macizo rocoso, son más frecuentes en las presas bóveda: Monteynard (Francia), Longyangxia (China), Nagawado (Japón), Gökcekaya (Turquía), Manssur Eddahbi (Marruecos), Inguri (URSS), Béznar (Granada).

Aunque, como se ha comentado, es habitual que en la cimentación de una presa aparezcan fallas, por suerte, no lo es tanto que éstas se encuentren activas. La presa de Clyde Dam (Nueva Zelanda) se ha construido (1977-1989) sobre una falla con posibles desplazamiento vertical principal y transversal secundario. El problema se ha solucionado con una junta vertical abierta que se adapta a movimientos de falla de hasta 1 m, sellada aguas arriba con un tapón en cuña.



Presa de Clyde (Nueva Zelanda). Desplazamiento de la falla en el cauce



2.3 ESTABILIDAD DE LAS LADERAS DEL VASO

Es este un asunto de gran importancia para la viabilidad de la obra. Baste recordar casos tan desafortunados como Vaiont donde el 9 octubre 1963 desli-

zaron 270 hm³ de la ladera izquierda del vaso, sobre el embalse, formando una ola de 235 m de altura que pasó por encima de la presa sin demolerla, pero arrasando cuanto encontraba aguas abajo y pereciendo 2.000 personas.



Es relativamente frecuente que las laderas del embalse resulten inestables al saturarse el terreno por inundación de los pies de las laderas. En algunas ocasiones se reactivan antiguos paleo-deslizamientos estables en condiciones actuales secas, que se desestabilizaron en condiciones pretéritas cuando el lecho del río estaba más alto y saturaba sus laderas.

Son materiales de especial atención las laderas de coluviales, especialmente si tienen gran contenido de finos, y las rocas competentes cuando buzan hacia el vaso.

La vegetación o las coberturas pueden enmascarar los factores capaces de activar las masas de terreno. En algunos casos capas centimétricas de arcilla difícilmente detectables pueden causar el movimiento.

También son de especial importancia las masas potencialmente deslizables en zonas muy estrechas, debido a que su inestabilización pueden producir represas dentro del vaso, a veces incluso sumergidas, que en un desembalse rápido pueden producir su rotura y arrastre del material constitutivo y agua almacenada tras de sí.

Una de las principales herramientas para el estudio de los deslizamientos es la fotografía aérea. Una vez señalados los deslizamientos potencialmente peligrosos, se procederá a su estudio detallado: límites del posible movimiento, volumen involucrado, espesor, mecanismo cinemático, etc.

Si el deslizamiento es importante, deberemos definir las características geotécnicas e hidrogeológicas de los materiales implicados, mediante sondeos, campañas geofísicas: sísmicas o eléctricas, etc.

En deslizamientos importantes es especialmente relevante la técnica de Trenching que consiste en la apertura de zanjas donde se observa y data la evolución pretérita temporal de la ladera.

Cuando después de su estudio existan dudas razonables sobre el comportamiento de la ladera se procederá a su auscultación mediante control topográfico (clásico, GPS), piezométrico y la colocación de inclinómetros.

3. CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS

Diferenciaremos dos entornos diferentes:

a) Permeabilidad de la cerrada

La zona de mayores gradientes hidráulicos y donde se producen mayores fugas es en el entorno de la cerrada. Por este motivo la permeabilidad de la cerrada es un asunto preferente.

Para caracterizar la permeabilidad de la cerrada (o las posibles cerradas) es necesario disponer de una cartografía geológica con diferenciación de las formaciones rocosas y suelos, estructura geológica, fracturación y discontinuidades, fenómenos de karstificación y subsidencia, manantiales, etc.

En materiales competentes las anisotropías (estratificación y fracturación) son el factor de primer orden. La orientación de las anisotropías puede hacer viable o no las filtraciones. (Siempre son preferibles buzamientos hacia aguas arriba).

El primer paso es elaborar un plano de isopiezas (curvas de nivel de la superficie del agua subterránea en el macizo rocoso) a partir del nivel del agua en el interior de los sondeos, piezómetros abiertos, de cuerda vibrante, manantiales, etc. Si el gradiente de estas isopiezas supera el 10% en dirección al cauce, es muy probable que la impermeabilidad de la cerrada sea suficiente. Si este gradiente es menor de 5% es muy probable que las labores de corrección deban ser importantes (pantallas de inyecciones de impermeabilización). Hay que tener muy en cuenta la época del año en que se realiza el estudio de las isopiezas, así por ejemplo un gradiente muy bajo en una época seca no nos garantiza la impermeabilidad de la cerrada, pudiera indicarnos que la porosidad o fracturación existente no está saturada en ese momento.

La principal herramienta utilizada en los materiales competentes para determinar la permeabilidad del macizo rocoso son los ensayos de permeabilidad in situ en sondeos (Ensayo Lugeon, Ensayo Lefranc, Ensayo Gilv-Gavard).

En las cimentaciones de presas sobre suelos, donde lo más habitual es la construcción de una pantalla continua, los ensayos de permeabilidad más característicos son los de permeabilidad in situ en zanja (Método Haefeli o de la Artesa, Método Matsuo, etc) y el Ensayo Lefranc en sondeo. Además se pueden utilizar cuando exista nivel freático, los ensayos clásicos de hidrogeología (piezómetros, pozos y pruebas de sondeo, slug-test, etc).

b) Permeabilidad del vaso

La permeabilidad se puede producir por disolución (calizas, dolomías, evaporitas) fracturación (areniscas, cuarcitas, pizarras, y en general cualquier roca dependiendo del grado) porosidad (determinadas rocas volcánicas y los materiales cuaternarios granulares)

Los casos más habituales son las rocas calizas karstificadas, y los aluviales cuaternarios.

No siempre una posible filtración implica la inutilidad de un vaso o que sea necesaria su corrección con inyecciones o pantallas.

La estanqueidad requerida es función del tipo de utilización que se vaya a destinar el embalse. Las menores pérdidas permitidas serán para uso de abastecimiento de agua de boca, sin embargo podemos permitir pérdidas por filtración importantes cuando la utilización del embalse es la defensa contra avenidas o la recarga de acuíferos como recientemente se han construido en la Cuenca del Júcar (Presa de Algar).

La herramienta básica es un buen estudio hidrogeológico, destacando las formaciones permeables, con cortes interpretativos del funcionamiento hidrogeológico regional y local.

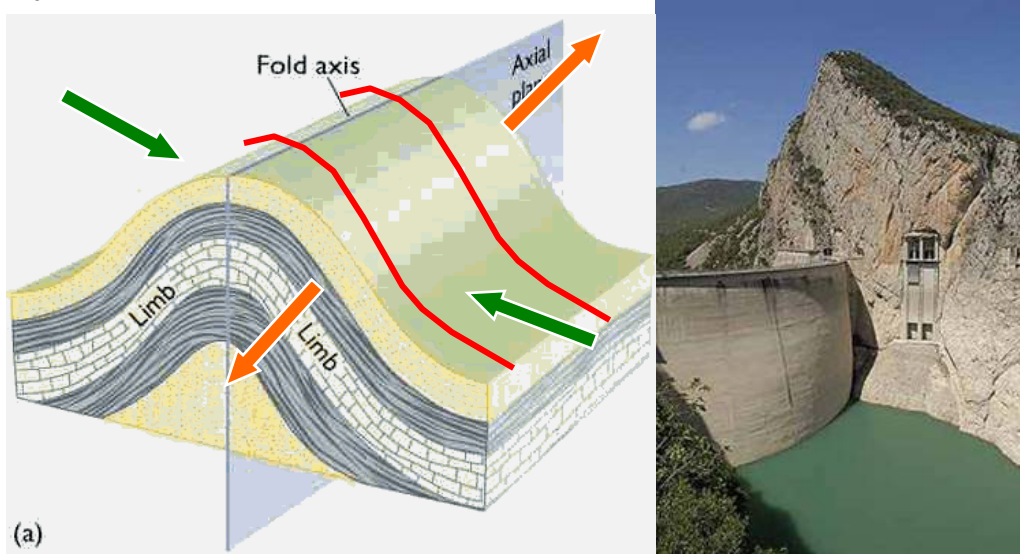
Siempre se deberán registrar y cartografiar todos los manantiales del vaso y de su entorno, y estudiar las posibles fugas a los valles colindantes a través de formaciones permeables, fracturas o fallas existentes en el vaso.

Cuando realizados los trabajos básicos, se dudase de las condiciones de permeabilidad, se deberá recurrir a otras técnicas: permeabilidad in situ dentro de sondeo tipo Lugeon y Lefranc, permeabilidad in situ en superficie tipo Haefeli, Matsuo, aforos diferenciales superficiales en los cursos de los ríos, aforos con trazadores de las aguas subterráneas, aforo en pozos y piezómetros determinado los parámetros hidrogeológicos k , T , s , etc.

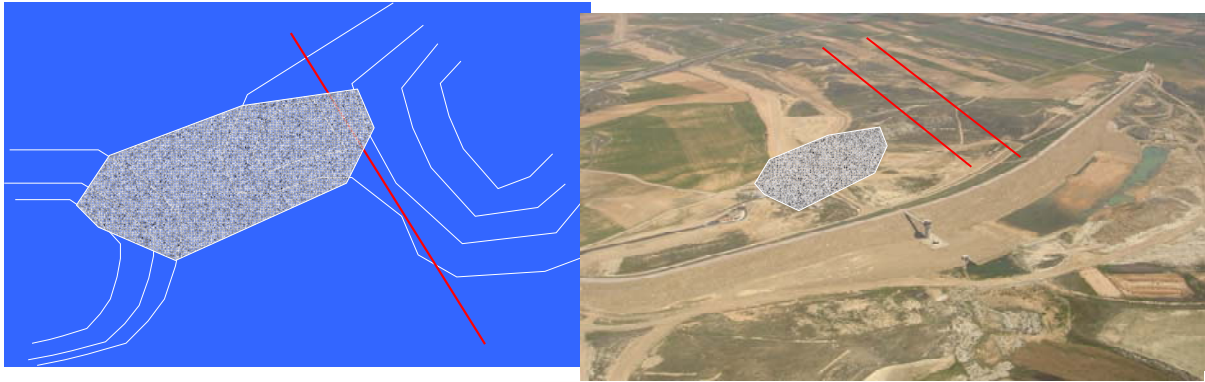
A continuación se comentan algunos aspectos, que a pesar de su simplicidad, a veces ocasionan verdaderos problemas:

1. Atención a los vasos que se extienden paralelamente al eje de presa, se suelen formar fracturas perpendiculares al eje de presa que dan grandes problemas de permeabilidad.

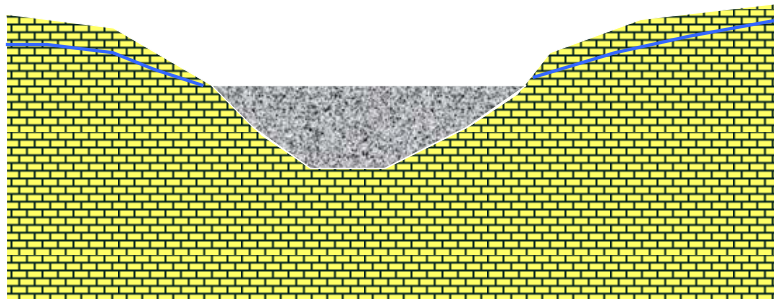
Como consecuencia de esfuerzos tectónicos compresivos (por ejemplo vasos que se encajan en sinclinales o anticlinales) se producen esfuerzos de tracción conjugados que conllevan fracturas verticales causando importantes problemas de permeabilidad. Un ejemplo sería el Embalse de Canelles (Lleida) con una presa bóveda de 151 m de altura (record de España cuando se construyó entre 1954-1958), 210 m de longitud de coronación y volumen de hormigón de 332.994 m³. Durante 1972 y 1973 se realizó una pantalla de impermeabilización en su margen izquierda con 276.000 ml de perforación y 120.100 tn de inyección seca, cortando filtraciones del orden de 8 m³/s.



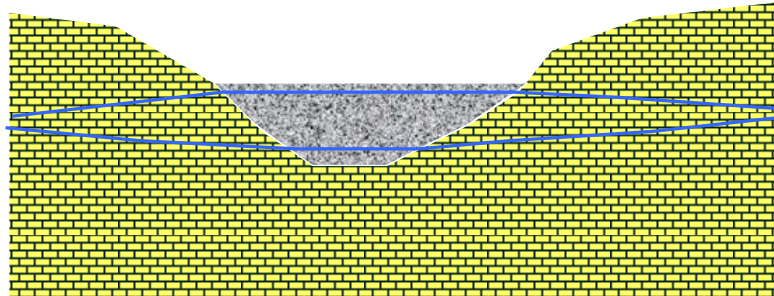
2. Las cerradas con penínsulas angostas configuran cerradas topográficas que ocasiona grandes problemas de permeabilidad, generalmente por fracturación subvertical. Suele ser preferible desplazarse aguas arriba aún a costa de una mayor longitud de coronación. Como ejemplo podría servir la presa de La Loteta (Zaragoza) cuyo esquema se representa a continuación.



3. Nivel piezométrico del terreno por encima del embalse. No existen problemas de permeabilidad (el embalse es ganador) y las laderas aportan agua al embalse.



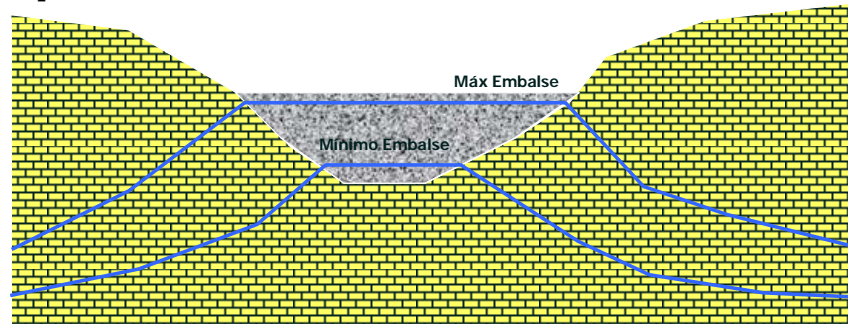
4. Nivel piezométrico del terreno oscilante entre el nivel máximo y mínimo del embalse. Existirán fugas del embalse a partir de cierta cota de llenado. En el proceso de llenado: se produce almacenamiento de agua en las laderas (el embalse pierde agua) y en el proceso de vaciado las laderas devuelven agua al embalse.



Es habitual en vasos permeables, que el río antes de la construcción del embalse sea ganador (reciba aportaciones de aguas subterráneas procedentes de las laderas del vaso) y sin embargo con el llenado del embalse pase a ser perdedor (el agua del embalse se infiltre en las laderas del vaso). De esta forma el proceso de llenado del embalse, tendrá dos etapas, el llenado del acuífero subterráneo y posteriormente el del propio embalse superficial y por lo tanto existirán periodos de entrada de agua al embalse que no registrarán apenas subida del nivel del embalse. Por otra parte durante el vaciado se dará un fenómeno favorable, que habremos iniciado el vaciado del embalse y como se estará extrayendo del acuífero, el nivel del embalse no descenderá. Se puede decir que tenemos dos embalses: el superficial y el subterráneo. Este fenómeno se produce en el embalse de Tranquera (Zaragoza).

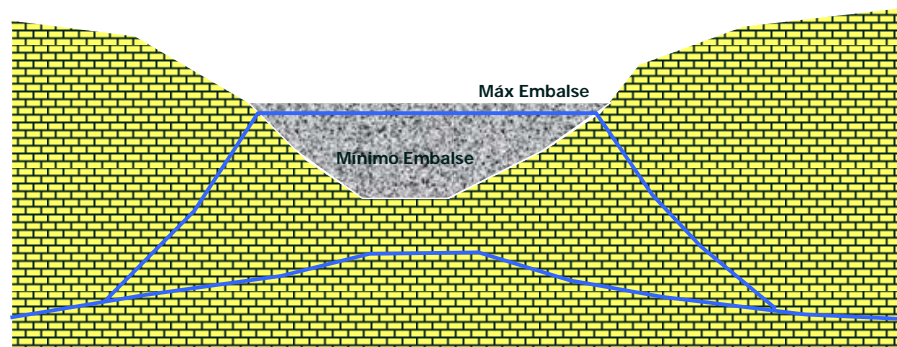
5. Nivel piezométrico del terreno siempre por debajo del embalse. Existen dos circunstancias:

- a. Embalse permanentemente conectado con el acuífero.
Importantes problemas de fugas del embalse
Los gradientes pueden oscilar mucho: 10^{-3} ; 10^{-1}



Si los niveles freáticos regionales del vaso, y por tanto de la cerrada, están muy por debajo del río tendremos muchas dificultades a la hora de impermeabilizar, encontrándonos seguramente procesos cársticos. Este es el caso de la presa de Algar (Valencia) cuyo cimiento de dolomías del Muschelkalk ha exigido una pantalla de impermeabilización de hormigón en masa de hasta 22 m de profundidad.

- b. Embalse colgado respecto al acuífero
Graves problemas de fugas del embalse. Los gradientes muy altos: 1; o superior



6. La descompresión de los taludes de una cerrada es un efecto habitual que requiere siempre un estudio de permeabilidad. Son muy frecuentes las fracturas subverticales de descompresión que deberán ser convenientemente tratadas, muchas veces son más recomendables las inyecciones inclinadas para mejorar su eficacia.

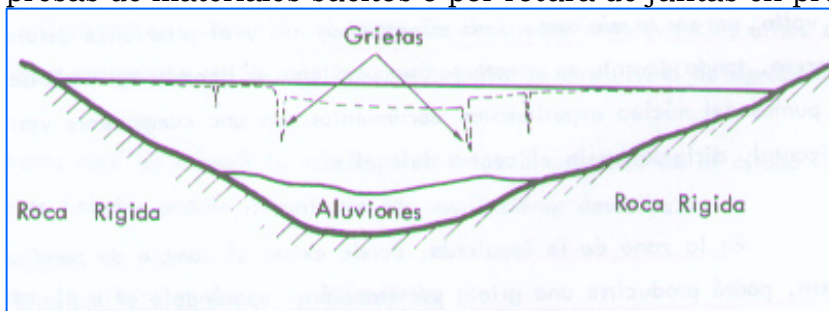
7. Los aluviales de la cerrada suelen ser permeables y requieren pantallas de impermeabilización continuas o de inyecciones a base de lechadas de cemento o bentonita-cemento. Como ejemplo de pantalla continua de bentonita-cemento tenemos la ataguía y contrataguía de la presa de Rules (Granada), Barbate (Cádiz), La Loteta (Zaragoza) La Estanca (Teruel), etc.

4. CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS DE LA CERRADA

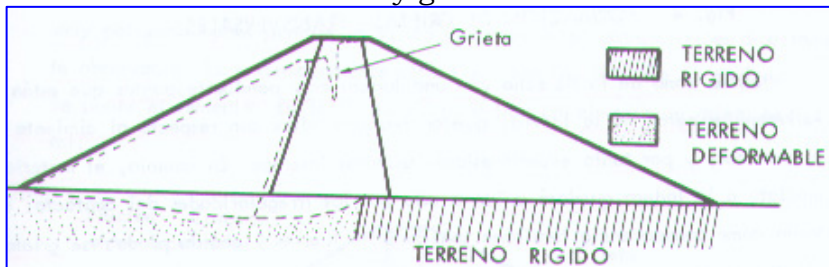
La caracterización geotécnica de la cerrada se define básicamente por su resistencia, deformabilidad, y permeabilidad.

La Deformabilidad de la cerrada es un aspecto de significativa importancia y condicionará el tipo de presa a implantar.

Es frecuente encontrar cerradas donde los estribos son rocas rígidas con módulos de deformación grandes y consiguientemente asientos pequeños, y también suele ser habitual que estas cerradas tengan importantes aluviales sobre la roca con módulos de deformación pequeños que ocasionan grandes asientos. Además existe el agravante de que la máxima tensión transmitida al cimiento se produce en el centro de la cerrada donde el terreno presenta mayores deformaciones. Estas deformaciones diferenciales de la cimentación pueden ocasionar grietas en la presa que además de facilitar la evacuación del agua almacenada, pueden causar la ruina de la estructura por lavado de finos en las presas de materiales sueltos o por rotura de juntas en presas de fábrica



Otras veces la cimentación de la presa presenta dos materiales con diferente módulo de deformación (por ejemplo por buzamientos verticalizados) y que ocasionará asientos diferenciales y grietas en la estructura.



También pueden ser importantes los asientos producidos por cambios bruscos de las pendientes de la cimentación



Como se ha comentado con antelación, el módulo de deformación del macizo rocoso de la cerrada definirá la tipología de la presa que podremos implantar y podemos fijar en el límite de los 10.000 -15.000 kp/cm² el módulo nece-

sario para que una cimentación permita apoyar una presa de fábrica y para un módulo inferior emplazaremos una de materiales sueltos, aunque como veremos posteriormente depende también de la altura de presa.

En algunos casos una misma cimentación admite varias tipologías. Por ejemplo la presa de Yesa actual (Navarra) es de gravedad de hormigón convencional y el recrecimiento respetando la presa actual, se está construyendo a base de materiales sueltos con pantalla de hormigón. No es de extrañar, puesto que el módulo de elasticidad de la cimentación ronda los 15.000 kp/cm² y las tensiones transmitidas al cimientto aumentan con el recrecimiento.

En general existe el consenso de que los dos problemas que afectan a la deformabilidad del cimientto de una presa dependen de la variabilidad del módulo de deformación a lo largo del cimientto y de la relación de los módulos de éste y la presa.

La relación de los módulos de elasticidad del hormigón y de la roca (Ec/Em) quedó reflejada en los trabajos de Manuel Rocha de 1964 y 1976.

Presa Bóveda			Presa de Gravedad	
Ec/Em	Influencia en presa	Problema	Ec/Em	Problema
<1	Despreciable	Ninguno		
1-4	Escasa	Ninguno		
4-8	Importante	Algunos	<8	Cierta Seguridad
8-16	Muy Importante	Serios		
>16	Medidas Especiales	Muy peligrosos	>16	Moderados-Grandes

Otros autores con posterioridad demostraron que la deformabilidad del cimientto está asociada a la altura y la tipología de la presa. Así Zeballos y Soriano (1993) presentaron un amplio estudio que aparece reflejado en la siguiente tabla, ampliada y modificada por Romana (2004):

Presa	Altura	COMPORTAMIENTO		
		Normal	Problemas	Problemas Serios
Ec (kp/cm ²)	(m)	Em (kp/cm ² *1000)		
Bóveda 360.000	<100	>50	40-50	<40
	100-150	>65	50-65	<50
	150-200	>75	60-75	<60
Gravedad CVC 300.000	<50	>40	25-40	<25
	50-100	>50	40-50	<40
	100-150	>60	50-60	<50
Gravedad RCC 200.000	<50	>35	20-35	<20
	50-100	>45	35-45	<35
	>100	>55	45-55	<45
Relleno Duro hardfill 100.000	<50	>30	15-30	<15
	50-100	>40	30-40	<30

En resumen podemos indicar que el Módulo de deformación del cimiento necesario E_m ($\text{kp}/\text{cm}^2 \cdot 1.000$) es función de la altura de presa h (m) y la tipología, según la siguiente variación lineal:

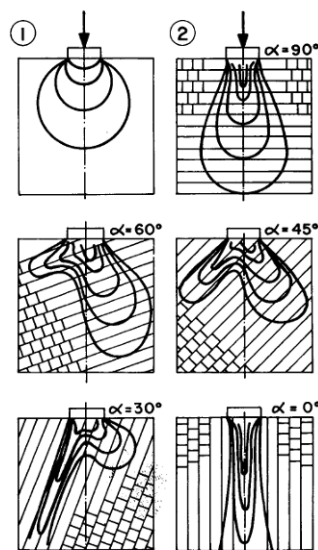
$$E_m > 0,20 * h + c_T$$

Siendo c_T un coeficiente que depende de la tipología de presa asentada

c_T	TIPOLOGÍA DE PRESA
35	Bóveda
30	Hormigón convencional CVC
25	Hormigón compacto con rodillo RCC
20	Relleno Duro Hardfill

Si se cumple la condición anterior, en general no existen problemas de deformabilidad del cimiento de la presa, y sin embargo si baja en 15 unidades respectivamente en cada tipología ($15.000 \text{ kp}/\text{cm}^2$) los problemas serán serios.

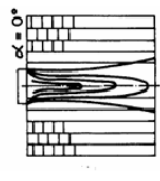
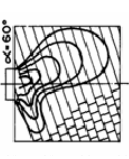
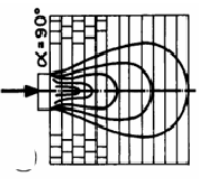
También es muy interesante observar la variabilidad del módulo de deformación a lo largo del cimiento en función del buzamiento de los estratos, debido a la relación que existe entre éstos y la distribución de esfuerzos en la cimentación. De esta forma una cerrada con una sola formación en cimentación puede sufrir deformaciones muy diferentes en ambos estribos, como refleja el esquema de la Monografía 15 del ICOLD (1993):



Como conclusión final, se agradecería al lector cualquier comentario o sugerencia (rgomez@chebro.es) y a modo de resumen se presenta una tabla que recoge los geocondicionantes expuestos que afectan a presas y embalses:

GEOCONDICIONANTES DE PRESAS Y EMBALSES

Discontinuidades		Resistencia al Corte			Permeabilidad		Deformabilidad		Tipología de presa recomendada (Ej)		
Esquema	Buzamiento	Cimentación	Estribos	Cerrada	Vaso	Mat. S.		Gravedad	Arco		
	- 10° - + 10°	Muy Desfavorable	Desfavorable	Desfav	Desfav	Desfav			Favorable (Loteta)	Posible (Rúab)	Desfavorable (Vaiont)
	10° - 30°	Muy Desfavorable	Favorable	Favorab	Favorab	Favorab			Óptima	Favorable	Desfavorable
	30° - 60°	Desfavorable	Muy Favorable	Muy Favorab	Muy Favorab	Favorab			Óptima	Favorable	Posible (Canelles)
	60° - 90°	Favorable	Favorable	Muy Favorab	Muy Favorab	Desfav			Óptima	Favorable (Escalles)	Posible
	30° - 60°	Muy Favorable	Muy Desfavorable	Favorab	Favorab	Favorab			Óptima	Óptima (Yessa)	Óptima
	10° - 30°	Favorable	Desfavorable	Desfav	Desfav	Favorab			Óptima	Óptima	Posible



Pocos problemas

Posibilidad de asientos diferenciales

Heterogeneidad Asientos Dífere

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Franco M. (1993). Patología de presas españolas de materiales sueltos. Sociedad española de mecánica del suelo y cimentaciones.
- Álvarez A. y Baztán J.A. (1967). Cimentación de presas en terrenos de posible inestabilidad. Revista de Obras Públicas.
- Araoz Sánchez-Albornoz A. (1992). Cimentación de presas en terrenos terciarios con disolución de evaporizas y erosión interna en la cuenca del Ebro. Revista de Obras Públicas
- Comité nacional español de grandes presas (2003). Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Comité nacional español de grandes presas (2003). Estudios geológico-geotécnicos y de materiales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- ICOLD (1993). La cimentación de presas en macizos rocosos. Monografía 15.
- James A.N. and Kirkpatrick I.M. (1980). Design of foundations of dam containing soluble rocks and soils. Q. J. eng. Geol. London. Vol. 13, pp. 189-198.
- Nevot Pérez A. (1992). La presa de Béznar. Revista de Obras Públicas.
- Nevot Pérez A. (2004). La presa de Rules. Revista de Obras Públicas.
- Oteo Mazo C. et al. (1993) Problemas de cimentación de presas en áreas tectonizadas, carstificadas y deformables. Sociedad española de mecánica del suelo y cimentaciones
- Romana M. (2004). DMR (una adaptación del RMR), una nueva clasificación geomecánica para la cimentación de presas. 9º Congreso luso de Geotecnia. Aveiro.
- Sáenz García Clemente (1961). Determinantes geológicos de las grandes presas españolas. Revista de Obras Públicas.
- Soriano Peña A. (1993). El comportamiento de las presas de materiales sueltos y su auscultación. Sociedad española de mecánica del suelo y cimentaciones.
- Soriano Peña A. (1999). Deformaciones, fracturación hidráulica y auscultación. Comité Nacional Español de Grandes Presas. VI Jornadas españolas de presas. Málaga.
- Uriel S. (1970). Algunos aspectos de la cimentación de presas de materiales sueltos. Revista de obras Públicas.
- Vidal M. (1971). No es tan fiero el terreno como le pintan. Revista de Obras Públicas.
- Yágüe Córdoba J. (1992) Presas en cimentaciones difíciles. Revista de Obras Públicas.
- Zeballos M. y Soriano A. (1993). Deformabilidad del cimiento de presas de fábrica. IV Jornadas Españolas de Presas. SCOLD. Murcia