

La mecánica de rocas y las cimentaciones de grandes presas

Rock Mechanics and the Foundation of Dams in Spain in the Last 50 Years

Claudio Olalla Marañón^{1*}

Resumen

En una primera parte, se efectúa un breve repaso de las actividades llevadas a cabo, con especial énfasis en los primeros años de desarrollo de la Mecánica de Rocas, (incluso antes de que existiese en el mundo como una disciplina teórica), con el objeto de garantizar la resistencia, rigidez e impermeabilidad de los macizos rocosos que sirven de apoyo para las grandes presas de gravedad y arco bóveda. Consistió fundamentalmente en la realización de grandes ensayos de campo, cuyo alcance todavía no se ha superado.

En una segunda parte, se identifican las aportaciones teóricas más relevantes realizadas en el ámbito de la cimentación de grandes presas en medios rocosos, tanto bajo hipótesis de isotropía como de anisotropía, o bajo la presencia de singularidades en el cimiento.

Se constata el enorme desarrollo tenido de este ámbito de la mecánica de rocas, en España.

Palabras clave: cimentación, presa gravedad, presa arco bóveda, macizo rocoso, deformabilidad, impermeabilidad.

Abstract

Firstly, it is presented a brief summary of the activities that have been carried out, with special emphasis on the early development of rock mechanics, (even before it existed as a theoretical discipline in the world specialized societies), to ensure the strength, stiffness and impermeability of the rock masses which serve as support for the large gravity dams. It mainly consisted of large in situ tests, whose importance and magnitudes have not yet been overcome.

In a second part, the most relevant theoretical contributions are identified in the field of foundation of large dams in a rock media, both under isotropy and anisotropy hypothesis, or under the possibility of presence of singularities in the affected ground.

Finally, it has been highlighted the huge development achieved in this area of rock mechanics in Spain.

Keywords: foundations, gravity dam, arch dam, rock mass, deformability, impermeability.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciencias surge como consecuencia de las legítimas demandas que la sociedad reclama a los profesionales del sector correspondiente. Las exigencias de un mayor desarrollo, entendido, en primer lugar, como la satisfacción de las necesidades más básicas (comida y agua) pero también como el logro de un mayor bienestar personal y social, se pueden conseguir por medio de la energía y sobre todo por medio de un desarrollo integral y sostenible.

En este documento se pretende ofrecer un panorama del reto que supone para la ingeniería civil poder garantizar la integridad y seguridad de las grandes presas, como fuente de energía limpia y renovable, mostrando especial énfasis en las aportaciones españolas más relevantes.

2. HITOS DE LA HISTORIA ESPAÑOLA DE LAS GRANDES PRESAS Y SUS CIMIENTOS

En el año 1957 aparece el libro de J. Talobre denominado “*La mécanique des roches et ses applications*” de la editorial Dunod, París. Este texto se considera piedra angular

iniciática de lo que posteriormente ha sido la “Mecánica de Rocas”. Es decir, un nivel de conocimientos que se puede calificar, con justicia, como de una disciplina científica debidamente estructurada, en la medida en que utiliza un marco conceptual propio, herramientas de ensayo y cálculo identitarias y campos de actuación específicos.

Conceptos tales como la consideración del medio como un discontinuo, la existencia de criterios de rotura idóneos aplicables al macizo rocoso en su conjunto, (todos ellos no lineales), la influencia determinante en la mayor parte de los casos del factor de escala, el carácter anisotrópico en términos de resistencia y de deformabilidad, etcétera, son entre otros argumentos algunos de los rasgos que diferencian claramente la Mecánica de Rocas de la Mecánica de Suelos.

Jiménez Salas participó directamente en el acto fundacional de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas, que tuvo lugar el 30 de Enero de 1967 en la sala de reuniones del Centro de Estudios Hidrográficos del llamado entonces “Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas”. Curiosamente, empieza a las 5 de la tarde. En el documento que refleja la reunión mantenida, por especialistas en Obras Hidráulicas y en Ingeniería del Terreno, se reconoce textualmente que “ya hemos desterrado la creencia ancestral que concedía a la roca firme una capacidad resistente cuasi-indefinida”.

Nació a imagen y semejanza de las sociedades internacionales.

* Autor de contacto: colalla@caminos.upm.es

¹ Catedrático Ingeniería del Terreno E.T. S. I. Caminos Canales y Puertos Universidad Politécnica Madrid (UPM).

Hasta finales de los 70, e incluso bien entrada la década de los años 80, es decir varios lustros después, en el ejercicio práctico de la ingeniería de la Mecánica de Rocas, en sus aplicaciones a taludes, túneles y cimentaciones, la profesión basaba sus decisiones en la experiencia, en la intuición o en la similitud con casos próximos llevados a cabo con éxito; En definitiva, no se disponía de un conocimiento, ni teórico ni práctico, que pudiera pronosticar comportamientos y que sobretodo pudiera fundamentar, nunca mejor dicho, las decisiones que todo proyecto y toda obra lleva consigo.

Por ello, durante bastantes años, en situaciones singulares, en obras de verdadera relevancia e importancia, como son en general las cimentaciones de las grandes presas, estaba justificada la ejecución de grandes ensayos en obra que pudieran ser la base argumental para efectuar el pronóstico final y adoptar la decisión correspondiente.

Así por ejemplo, Jiménez Salas tuvo la oportunidad de llevar a cabo en los años 60, como mentor y director entonces del llamado “Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo”, una campaña de ensayos de campo verdaderamente excepcional y única, para la toma de una decisión respecto de la seguridad, o no, de la cimentación de la presa de Mequinenza. Se trata de una presa de gravedad de 81 m de altura sobre el cauce del río Ebro. Utilizando palabras textuales de sus autores, nos muestran que la idea subyacente

era que se trataba de “obras de suficiente importancia como para justificar los cuantiosos gastos que éstos ensayos acarrearán”.

En este caso la estructura de contención prevista iba cimentada sobre unos materiales particularmente conflictivos como son los lignitos. Estos tramos pertenecientes a la formación oligocena “Mequinenza” forman parte de la depresión terciaria del Ebro.

En la ponencia presentada al VIII Congreso Internacional de Grandes Presas que tuvo lugar en Edimburgo a primeros de Mayo del año 1964, José Antonio Jiménez Salas y Santiago Uriel Romero describen los ensayos de campo realizados en los últimos años en nuestro país (Jiménez Salas y Uriel, 1964; Uriel, 1964).

Fundamentalmente afectan a los materiales rocosos del emplazamiento de la presa y en particular a sus discontinuidades, que se encontraban particularmente presentes con una estratificación casi horizontal. Es bien sabido que esta inclinación constituye, a su vez y a los efectos prácticos, el peor de los buzamientos posibles para garantizar la seguridad de una cimentación frente al deslizamiento.

Se llevaron a cabo ensayos de placa de carga, sobre superficies varias pero siempre de tamaños importantes, por ejemplo rectangulares de 50· 100 cm, con sollicitaciones en sentido horizontal y vertical (figuras 1 y 2).

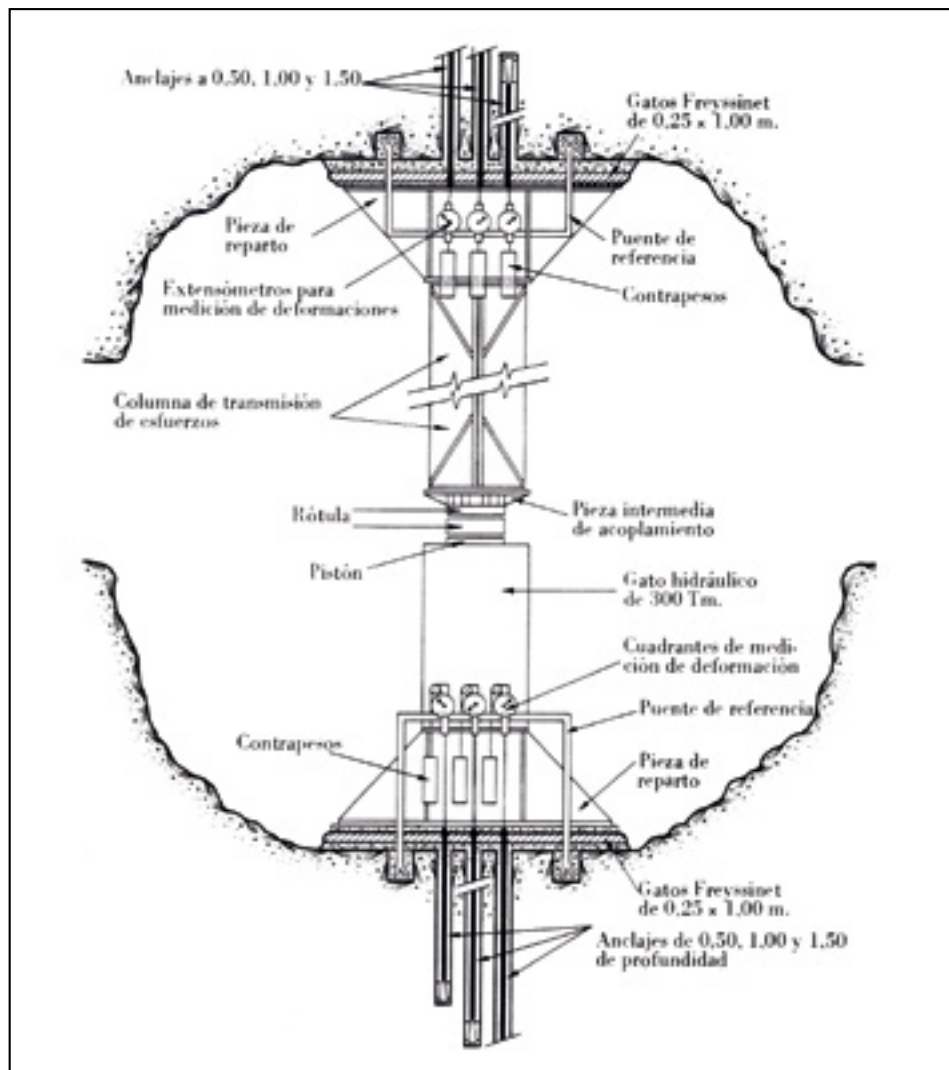


Figura 1. Esquema necesario para la ejecución del ensayo de carga sobre placa en galería (Tomado de Jiménez Salas et al. 1981).

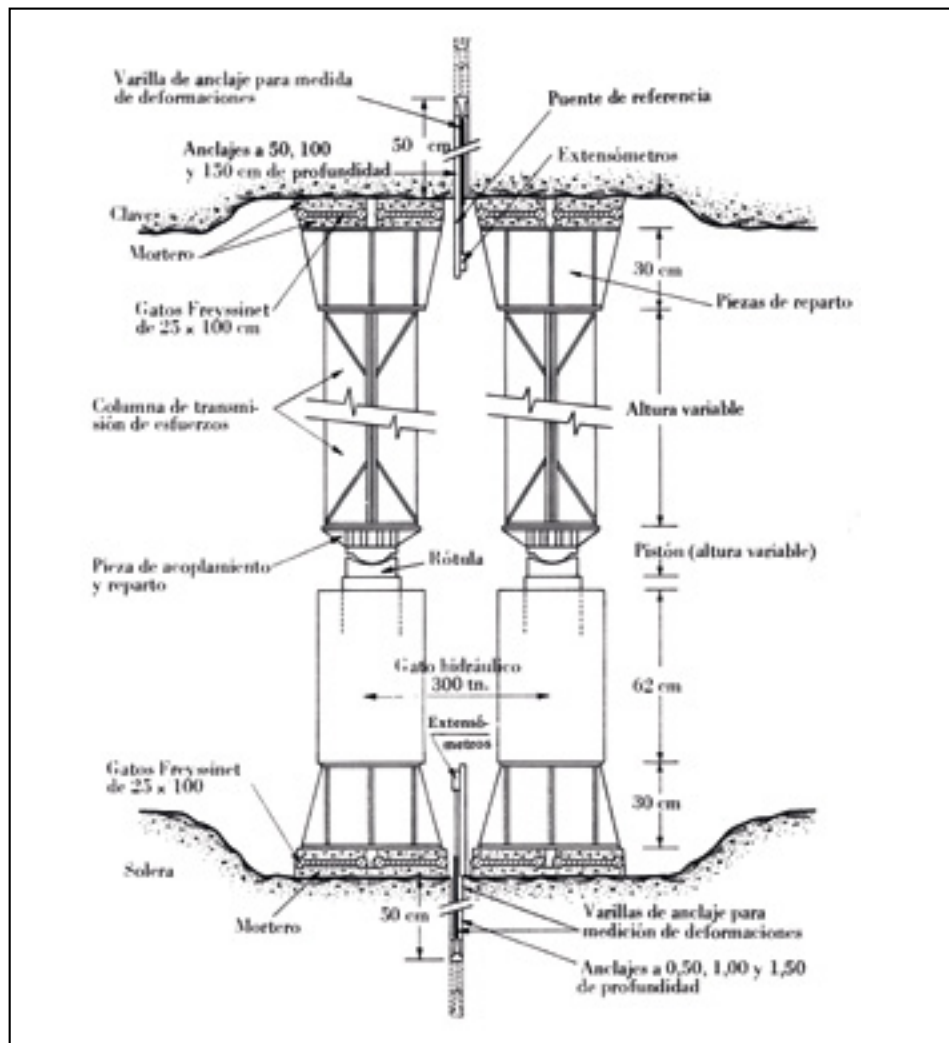


Figura 2. Ensayo de carga sobre placa, en galería, con dos gatos hidráulicos (Tomado de Jiménez Salas et al. 1981).

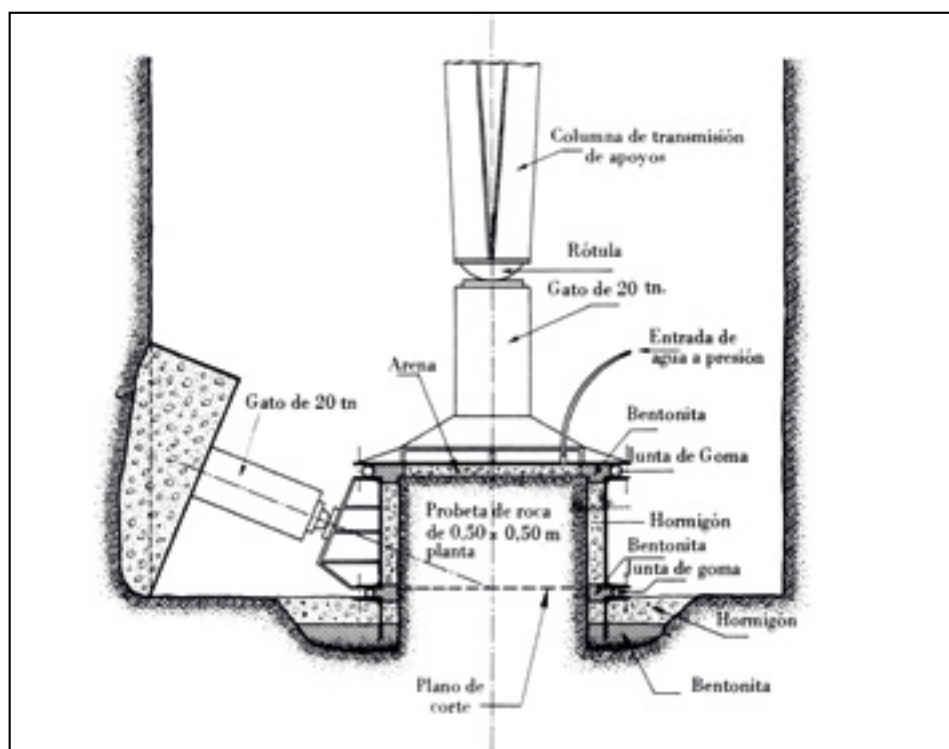


Figura 3. Dispositivo para el ensayo in situ de roca al esfuerzo cortante, con saturación previa (Tomado de Jiménez Salas et al. 1981).

También se ejecutaron ensayos de corte in situ sobre bloques de $50 \cdot 50$ cm y sobre bloques de $100 \cdot 100$ cm (figura 3). Se efectuó también el que ha sido, y seguramente lo seguirá siendo durante muchos años, el mayor ensayo de corte directo realizado jamás en el mundo, pues junto a las probetas de menor tamaño anteriormente mencionadas, se ensayó también hasta la rotura un tramo de discontinuidad de 4×4 m en planta y 1 m de altura (figura 4).

Incluso se realizó el llamado “ensayo de empuje pasivo” sobre una probeta de grandes dimensiones, con el objeto de conocer la resistencia del macizo rocoso en su conjunto, habida cuenta de la existencia de capas singulares entreveradas alojadas en el interior de la masa rocosa (figura 5).

Resulta fácil comprender las enormes dificultades que plantea la correcta ejecución de estos ensayos, para

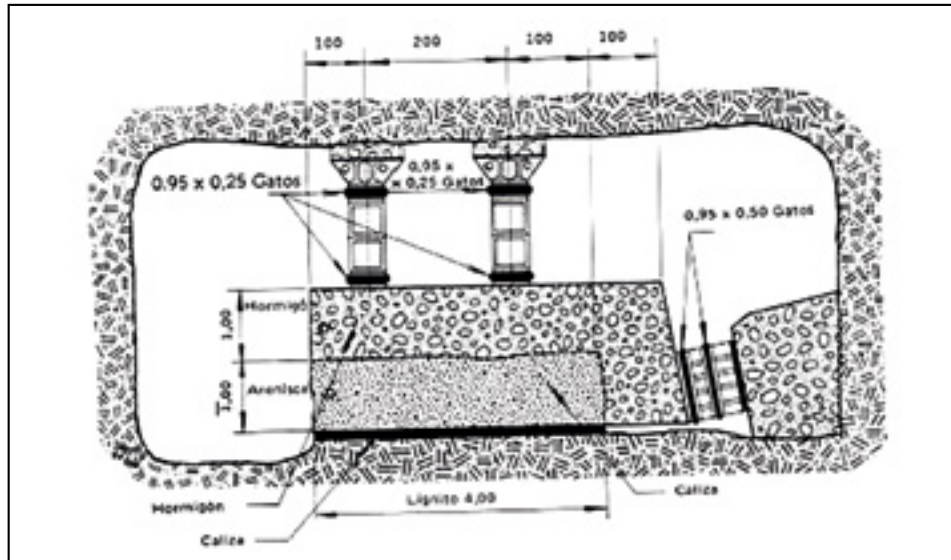


Figura 4. Probeta de 4×4 m para el ensayo de corte de un estrato de lignito en la cimentación de la presa de Mequinenza, España (Tomado de Jiménez Salas et al. 1981).

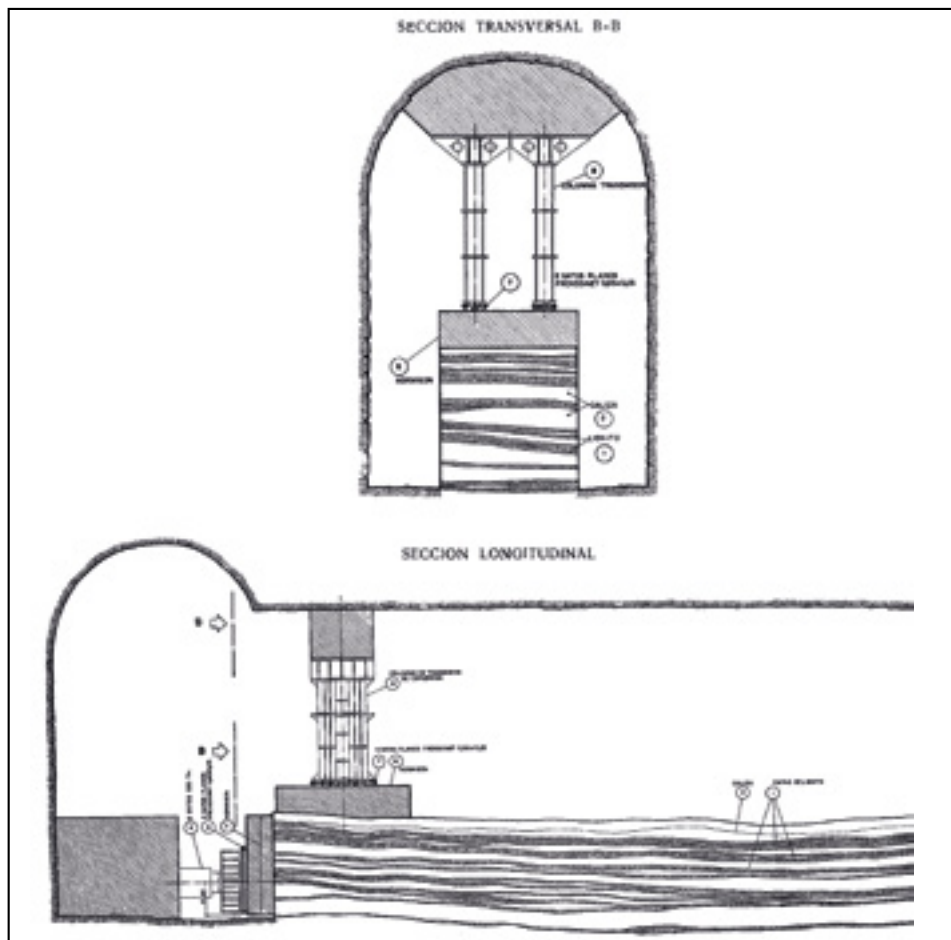


Figura 5. Esquema de un ensayo de empuje pasivo. Presa de Mequinenza, España (Tomado de Uriel, S., 1964).

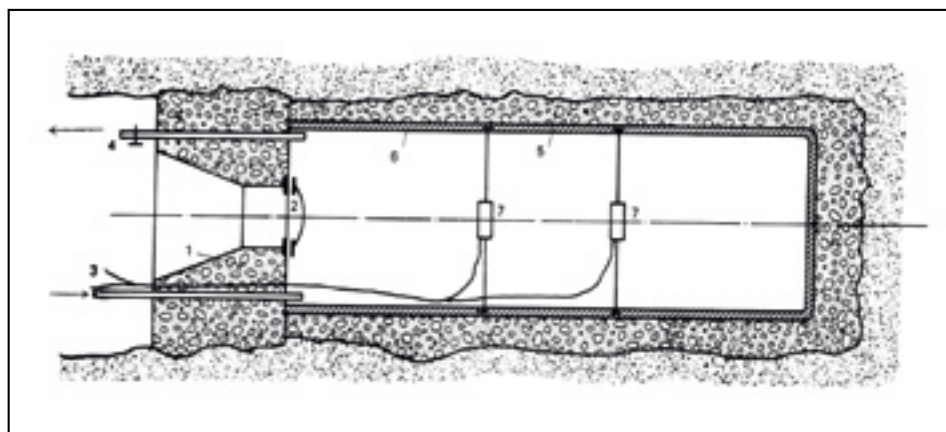


Figura 6. Esquema del dispositivo de ensayo de deformabilidad de la roca y del revestimiento en la galería presión en Venda Nova (Portugal) (Tomado de Jiménez Salas et al. 1981).

transmitir correctamente las cargas, para impedir alterar la calidad del macizo rocoso, para lograr una ineludible homogeneidad en el estado tensional del mismo, para conocer las deformaciones producidas, para provocar que la dirección del plano de rotura coincida con la dirección e inclinación de las discontinuidades a estudiar, etcétera. Todo ello trabajando en una galería de dimensiones necesariamente reducidas.

De una complejidad similar e incluso superior, pero con un objetivo científico diferente, como es el de conocer la deformabilidad del macizo rocoso, las empresas Gouveia y Entrecanales y Távora, S. A. a instancias de Don José Antonio, llevaron a cabo años antes (1948) unos ensayos de cámara en los que, en este caso, toda la circunferencia de una galería, en un tramo de la misma, se sometía a la presión generada por el agua (Jiménez Salas et al., 1981).

En este caso en particular se deseaba no sólo conocer el comportamiento del terreno, sino también la respuesta tenida por un revestimiento compuesto por un anillo primario de hormigón en masa y una chapa de gunita armada. Se ensayaron hasta la rotura, entendiéndose como tal, en este caso, el momento en el que se alcanzan grandes deformaciones (figura 6).

Fueron ejecutados con motivo de las obras de construcción de la presa de Venda Nova en el norte de Portugal. Se trata de una presa de arco gravedad con 97 m de altura, sobre el río Rabagao y entró en funcionamiento en el año 1951. En aquellas fechas, la cimentación de una estructura de estas características constituía un verdadero reto, por las exigencias de resistencia, deformabilidad e impermeabilidad.

Esta experiencia, de reconocimiento del terreno implicando a grandes dimensiones, se repitió posteriormente para conocer la deformabilidad del macizo rocoso en los túneles y galerías que acompañan al sistema hidráulico en su conjunto de la presa del Atazar en Madrid.

En definitiva, se puede comprender fácilmente, que antes los grandes retos profesionales del momento, en los años correspondientes a las décadas del 50 y del 60, ante la ausencia de teorías y de experiencias similares, se hacía necesario experimentar a escala próxima, lo más posible, a la real, a partir de la cual poder tomar decisiones.

Téngase en cuenta que, a título de ejemplo, eran 16 las presas de más de 100 m de altura que se habían construido antes de la constitución de la Sociedad (SEMR), es decir

antes de que hubiese un “corpus doctrinal”, científico y profesional, con el cual poder, de una manera cuantificable, discernir la seguridad o inseguridad de un cimiento para albergar una estructura de estas características. En la tabla adjunta se muestra esta relación individualizada, con los datos más relevantes respecto de cada una de ellas.

Tabla 1. Relación de presas de hormigón con altura mayor a 100 m anteriores al año 1965

Nº	NOMBRE	ALTURA (m)	AÑO	PROVINCIA
1	Camarasa	103	1920	Lérida
2	Ricobayo	100	1934	Zamora
3	La Cohilla	116	1950	Santander
4	Benegebar	110	1955	Valencia
5	San Esteban	115	1955	Orense
6	Escala	125	1955	Huesca
7	Salime	134	1956	Asturias
8	Ollana	102	1959	Lérida
9	Bao	107	1960	Orense
10	Bárcena	109	1960	León
11	Canelles	150	1960	Huesca
12	El Cenajo	102	1960	Murcia
13	Eume	103	1960	Coruña
14	Santa Ana	101	1961	Huesca
15	Aldeadávila	140	1963	Salamanca
16	Belesar	129	1963	Lugo

Ello posibilitó la ejecución de ensayos, en algunos casos singulares, que constituyen en sí una verdadera labor de ingeniería; no sólo por las teorías o los valores que se pueden deducir de ellos, sino también y sobre todo por las dificultades intrínsecas de poderlos llevar a la práctica, donde los procedimientos, los cuidados, los detalles, los medios necesarios, etcétera, son de tal complejidad y dificultad que permiten asimilarlos a verdaderas obras reales.

Representan el momento álgido, al menos en España, de la Mecánica de Rocas. Todavía hoy en día nos vemos satisfactoriamente iluminados por la información que nos proporcionan. Aportan un conocimiento con un valor de carácter universal.

En la sociedad del siglo XXI, inmersos en un ejercicio de la profesión marcado por las urgencias, dirigido hasta los más mínimos detalles por la economía, y en cualquier caso sin valorar suficientemente el rigor y el esfuerzo, resulta impensable, no sólo poder llevar a cabo unas pruebas de

estas características, pero ni siquiera, lo que es más grave, pensarlas, imaginarlas o concebirlas.

Por todo ello, debemos estar agradecidos a estos profesionales de la ingeniería, a estos investigadores de la respuesta que tiene la naturaleza frente a nuestras intervenciones, como herederos que somos de un conocimiento y de una práctica, cuya impronta marcada por las dimensiones implicadas y por las características técnicas, es digna de todo elogio. Lamentablemente, podemos afirmar, sin temor a equivocarnos, que están tristemente desaparecidas.

Debemos reconocer su legado e inspirarnos en sus actividades para continuar una labor de estudio y profundización, que siempre es insuficiente en un dominio tan difícil y complejo como es el conocimiento de la corteza terrestre, el conocimiento del terreno.

3. REQUERIMIENTOS AL CIMIENTO: MODELOS TEÓRICOS

Cuando se trata de cimentar presas de materiales sueltos, en general, los requerimientos geotécnicos que se exigen al terreno son notablemente menores que los que se exigen al mismo para poder apoyar otros tipos de presa.

No obstante, en cualquier caso y en particular en presas de fábrica, son tres los aspectos necesarios básicos que siempre debe cumplir un cimiento: Resistencia, deformabilidad e impermeabilidad.

Cada uno de ellos será desarrollado de manera separada, poniendo de manifiesto con especial énfasis las aportaciones españolas más relevantes.

Para disponer de una primera estimación representativa de la validez de un cimiento rocoso como lugar de apoyo para una presa de gravedad, se dispone del índice DMR, en donde intervienen de manera ponderada diferentes parámetros geomecánicos representativos del medio, conjugados de una manera análoga a como originariamente se elaboró el índice RMR (Romana, 2003). Representa un índice de la calidad general, global, del macizo rocoso en su conjunto, que la cuantifica numéricamente y que posibilita disponer de una primera valoración de la idoneidad del terreno como elemento de cimentación.

4. RESISTENCIA

Desde el punto de vista de la resistencia que debe tener el cimiento, los requisitos a exigir son dobles, a saber:

- Por un lado garantizar un margen de seguridad “amplio” frente al riesgo de que se vaya a producir el fallo completo de la cimentación. Es decir, evitar la rotura del terreno en su totalidad, para la que en términos geotécnicos se suele utilizar el concepto de carga de hundimiento. El calificativo entrecomillado de amplio, hace referencia a que el coeficiente de seguridad a utilizar debe ser elevado, e incluso muy elevado, habida cuenta que el nivel de conocimiento en este aspecto tan importante es todavía escaso y también, y sobre todo, que las variaciones estadísticas de los parámetros geomecánicos implicados son grandes (*Canadian Foundation Engineering Manual*, 1985; Serrano y Olalla, 1996).

- Por otro lado, aspecto que suele ser más crítico, evitar el deslizamiento de la estructura, bien por su contacto con el cimiento, o bien por alguna discontinuidad o familia de discontinuidades que tenga una dirección similar a la del cauce del río y un buzamiento desfavorable. Esta inclinación crítica se produce en el caso de que bucen muy suavemente, lo más próximo al plano horizontal y hacia el embalse (Serrano y Olalla; 1998).

5. VALORACIÓN DE LA CARGA DE HUNDIMIENTO

Se puede cuantificar la carga que produce la rotura del conjunto con modelos teóricos varios, de manera complementaria a las técnicas en elementos finitos o diferencias finitas, hoy en día tan potentes y versátiles, que exigen para su correcta aplicación una muy buena descripción del macizo rocoso, basada entre otros argumentos en resultados de ensayos de campo (placas de carga de gran diámetro, gato plano, presiómetros/dilatómetros, gato/presiómetro de Goodman, etcétera).

En efecto, no tiene excesivo sentido efectuar series de cálculos tensodeformacionales, en general muy sofisticados, incluyendo o no la tercera dimensión, si no se dispone de unos parámetros de calidad, por ejemplo de la deformabilidad del conjunto, extraídos de resultados de ensayos en los que la carga aplicada lo ha sido sobre un volumen de material importante, significativo. Tampoco cuando el conocimiento del terreno sea escaso.

a) BAJO CONDICIONES DE ISOTROPÍA

Por ello para la valoración de la carga que produce la plastificación completa del medio afectado, se puede utilizar el método de las líneas características, (Sokolovski, 1965), junto con la adopción de un criterio de rotura adecuado para representar el comportamiento límite de los macizos rocosos (Serrano y Olalla, 1994, 1996 y 2007). Se puede aplicar bien el criterio de Hoek & Brown (1980, 1994 y 2002) o bien el criterio de Singh-Singh (2012), también conocido como Mohr-Coulomb modificado (Galindo et al. 2017).

Téngase en cuenta que utilizando modelos teóricos simples pero rigurosos, en la formulación matemática, al igual que bajo hipótesis de un criterio de rotura lineal, (Brinch-Hansen, 1970), se pueden introducir los elementos más decisivos que condicionan la respuesta del medio natural, como son:

- Geométricos, tales como las dimensiones de la base de la presa, la necesariamente suave inclinación del cauce del río y la profundidad a la que se cimenta con respecto a la cota del terreno.
- Geomecánicos, tales como la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el tipo de roca, la calidad del macizo rocoso expresada por alguno de los índices geomecánicos más extendidos y utilizados hoy en día (como pueden ser el RMRb o el GSI) y el peso específico del macizo rocoso.
- Antrópicos, tales como el cuidado con el que se ha efectuado la excavación de la cimentación.

Un buen ejemplo de la aplicación de este método a un caso concreto, de una presa arco bóveda, objeto de proyecto

en su momento y actualmente en proceso de ejecución, se encuentra en Baena et al. (2014). Véase a este respecto la figura 7.

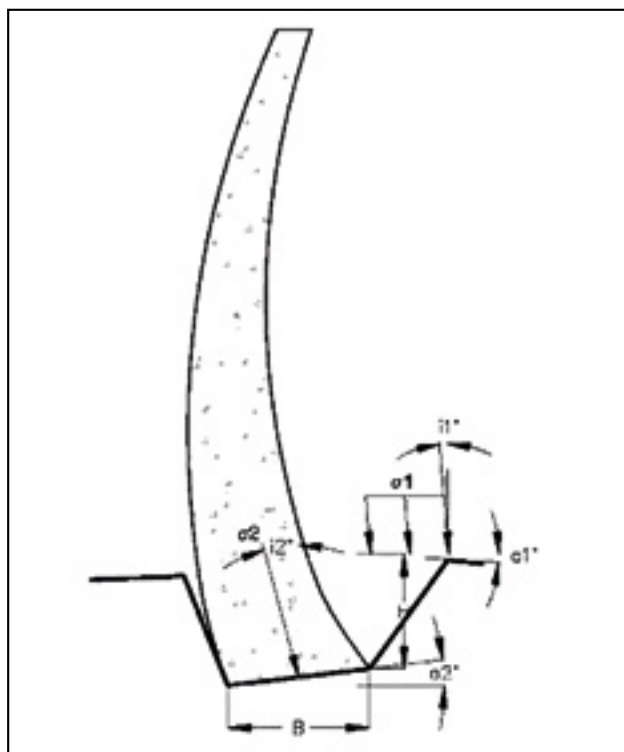


Figura 7. Ejemplo del uso del método de las líneas características al cálculo de la carga de hundimiento de una presa bóveda. Tomado de Baena et al. (2007).

Obviamente, también se pueden utilizar otros criterios, más o menos empíricos, presentes en diferentes normativas o en códigos de buena práctica que, basándose en la experiencia y buen criterio de sus autores, proponen diferentes formulaciones para estimar bien la carga admisible o bien la propia carga de hundimiento. Tales son por ejemplo, en España:

- Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas. 1994. (ROM 05-94). En su apartado 3.5.4.2.2.,

denominado “Cargas admisibles en suelos cohesivos firmes y rocas”.

- Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas. 2005. (ROM 05-05) en su apartado 3.5.4.7., denominado “Carga de hundimiento en suelos cohesivos firmes y rocas”.
- Código Técnico de la Edificación. 2006. (CTE). En su apartado 4.3.4., denominado “Presiones verticales admisibles para cimentaciones en roca”.
- Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera. 2009. (GCOC)., en su apartado 4.5.3., denominado “Cimentaciones superficiales sobre roca”.

O vigentes en otros países de nuestro entorno tecnológico, tales como:

Canadian Foundation Engineering Manual (1985). Canadian Geotechnical Society. CGS. en su apartado 9.2 de la parte 2, denominado “Foundation on sound rock”.

Standard Specifications for Highway Bridges (1997). AASHTO. En la sección 4ª Foundations, en su apartado 4.4.8.1.2., denominado “Footings on broken or jointed rock”.

Rock Foundations (1996). Technical Engineering and Design Guides as adapted from the US Army Corps of Engineers, en su N° 16 de la sección III del capítulo 6º, denominado “Bearing Capacity”.

Asimismo se dispone de las propuestas en los textos de Kulhawy & Carter (1992) o Zhang & Einstein (1998), que presentan un interés notable y que entre todas ellas ofrecen un panorama variado en cuanto a hipótesis de partida y al empirismo subyacente.

b) BAJO HIPÓTESIS DE ANISOTROPÍA

Particularmente interesante es conocer la influencia de una familia de discontinuidades. Da lugar a un comportamiento claramente anisótropo que ya fue puesto de manifiesto por Uriel (1970) bajo hipótesis de una respuesta en la rotura lineal, del tipo Mohr-Coulomb (figura 8).

Si se introduce como criterio de rotura el desarrollado por Hoek y Brown (1980, 1994 y 2002) incorporando

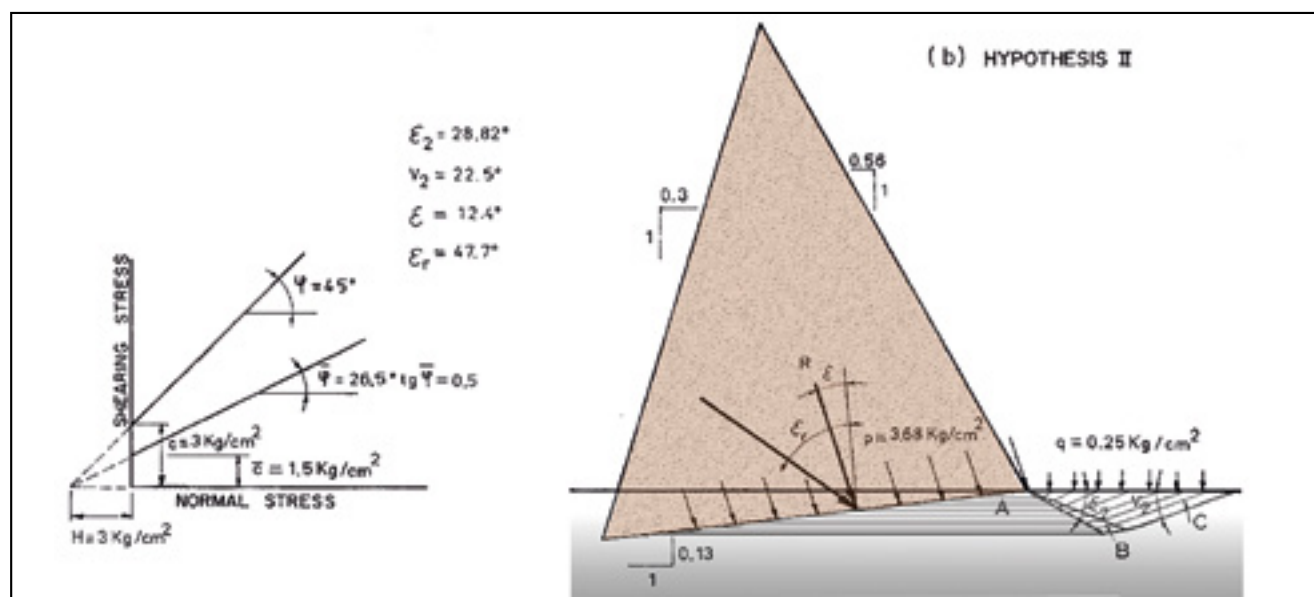


Figura 8. Mecanismo de rotura mixto, por planos de debilidad y por macizo rocoso, bajo hipótesis de Mohr-Coulomb. Tomado de Uriel (1970).

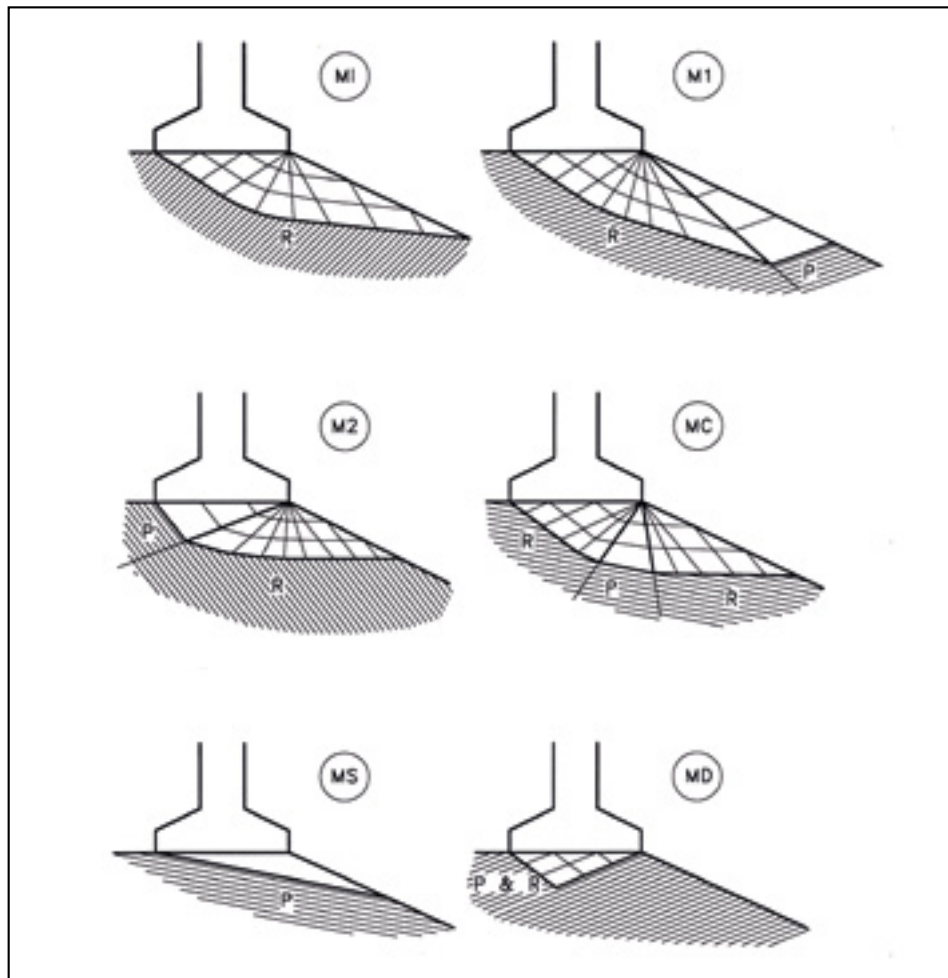


Figura 9. Posibles mecanismos de rotura en un macizo rocoso con una familia de discontinuidades. Tomado de Serrano y Olalla (1998) y Serrano et al. (2016).

la teoría de las líneas características, (Sokolovski, 1965), se pueden calcular los seis diferentes mecanismos que se pueden producir, dependiendo de las condiciones geométricas (fundamentalmente el buzamiento) pero también de las propiedades resistentes del macizo rocoso (tipo de roca, calidad y resistencia a compresión simple de la roca matriz) y de la familia ubicua de discontinuidades (componentes cohesiva, en su caso, y friccional).

Han sido desarrollados tanto con el criterio de rotura de Hoek & Brown original como con el modificado (Serrano y Olalla, 1998; Serrano et al., 2016, figura 9).

6. VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA FRENTE AL DESLIZAMIENTO

En el estudio de la cimentación de una presa se deben considerar distintos tipo de fallo a lo largo del cimiento, para poder identificar cual es el modo más desfavorable. Este aspecto suele ser el verdaderamente crítico, dando lugar incluso a distintos posicionamientos institucionales que ofrecen, dependiendo de las hipótesis que se adopten, diferentes recomendaciones y criterios de cálculo (European Club of ICOLD, 2004).

Una limitación es evaluar únicamente el fallo a lo largo del contacto presa cimiento, sin considerar que las singularidades o familias de discontinuidades del macizo rocoso pueden ser mucho más críticas.

Otro problema diferente, pero relacionado con los movimientos del terreno, es el efecto de la presencia de una falla activa. Una consecuencia muy nociva de su incidencia, que condiciona enormemente la tipología de presa, se encuentra en Olalla (2103).

La distribución de las presiones intersticiales, a lo largo del contacto presa cimiento y del propio terreno subyacente, es un aspecto clave que condiciona el resultado enormemente. Son múltiples las hipótesis que se pueden efectuar (presencia de anomalías que rompen la homogeneidad del medio, anisotropía general del macizo rocoso, no funcionamiento del sistema de drenaje, posibilidades de recarga por acuíferos, etcétera) para lo cual resulta muy útil en el pronóstico poder disponer de registros de formaciones geológicas similares o, en general, de patrones de comportamiento de este tipo de estructuras.

En la Confederación Hidrográfica del Ebro se están interpretando de manera sistemática los resultados de la auscultación instalada en los terreno de apoyo de sus presas de fábrica, para poder conocer las leyes de funcionamiento basadas en casos reales (Gómez et al. 2015).

Una integración de los análisis de estabilidad de presas frente al deslizamiento, para tener en cuenta los grandes ángulos de inclinación de las sollicitaciones que producen las presas de gravedad sobre el cimiento, es la elaborada por Soriano (1997).

Se van a comentar brevemente, pero de manera específica, cuatro aspectos diferentes y complementarios:

a) Valoración de la resistencia al corte; b) Modelo de resistencia a tracción simple por el macizo rocoso conjugado con una singularidad; c) Presencia de una familia no persistente; y d), la posibilidad de existencia de familias conjugadas (cuñas).

a) VALORACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE

Probablemente represente el aspecto más controvertido. Resulta determinante para poder conocer los márgenes de seguridad con los que cuenta la estructura. Por ello cualquier ensayo a escala real es fuente de sabiduría y constituye un valor irremplazable. En este sentido, son varios y muy interesantes los resultados de los ensayos resistencia al corte efectuados “in situ” en los últimos lustros, sobre probetas de gran tamaño, en España.

Constituyen todos ellos unos ejemplos extrapolables a litoclasas geológicamente similares. A saber:

- En la Presa de Rules, en Granada, se efectuaron ensayos tanto a lo largo de los teóricos planos representativos de las discontinuidades presentes, como a lo largo del propio macizo rocoso que constituye el cimientado de apoyo de la presa (Nevot et al. 1993a).
- En la Presa de Itoiz, en Navarra, se realizaron ensayos para estudiar las juntas de estratificación en probetas de 30·30 cm y también para valorar la resistencia al corte del contacto hormigón roca (Castilla et al. 1993a).
- En la Presa de Arraiz, también en Navarra, se hicieron ensayos de corte en la masa rocosa en tres probetas de 50·50·150 cm y en cinco probetas de 80·50 cm de mortero hormigonado contra la superficie de la roca (Castilla et al. 1993b).
- En la Presa de La Llosa del Cavall, en Lérida, se llevaron a cabo ensayos sobre las juntas de los conglomerados y las areniscas, que se contrastaron con los resultados de ensayos de laboratorio (Berga et al. 1993).
- En la presa de Atance, Guadalajara, se ejecutaron varios ensayos a lo largo de uno de los planos de la (teórica) familia de discontinuidades presente (Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, 1997). Se pudo acotar la resistencia al corte de determinados planos de debilidad y compararlo tanto con los resultados de los múltiples y variados ensayos de laboratorio efectuados con muestras inalteradas, como con las teorías más en uso de estimación de resistencia al corte.
- En el contacto presa cimientado rocoso en la presa de Enciso, en la Rioja, (Allende et al. 2012 y 2015), durante la construcción se observaron ocasionales milonitos entre las caras de las juntas de estratificación que, junto con pendientes ligeramente desfavorables de algunos bloques, invitaron también a la realización de estos tipos de pruebas.

Una recopilación de resultados de ensayos de campo, efectuados por instituciones en distintos países, para diferentes materiales y bajo diferentes condiciones, a lo largo del contacto de la estructura con su cimientado como de las propias discontinuidades, se encuentra en Olalla (2013).

Como se afirmaba anteriormente constituye el aspecto verdaderamente crítico, en la medida en la que tanto las sollicitaciones como la configuración geométrica de las posibles singularidades, o familias de discontinuidades, son unos aspectos relativamente asequibles de efectuar.

b) MODELO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN SIMPLE POR EL MACIZO ROCOSO CONJUGADO CON UNA SINGULARIDAD

Representa una originalidad teórica, atractiva, susceptible de tenerla en cuenta de manera especial en aquellos casos en los que sea geológicamente posible. Son varios los acercamientos teóricos que se pueden utilizar.

Así, por ejemplo, la Guía Española nº 2.1. “Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas” indica que, debido a las cargas transmitidas al cimientado por la presa, se produce un efecto compresivo en las proximidades del pie aguas arriba de la estructura que, en caso de presas que transmiten cargas importantes al cimientado, produce un efecto de impermeabilización en la dirección del empuje, creando una especie de pantalla natural que en ocasiones puede ser de una efectividad similar a la propia pantalla de inyecciones (CNEGP, 2003). Con ello se produce un efecto indeseado de incremento de la subpresión sobre la base de la presa y sobre los planos de debilidad presentes en el cimientado (figura 10). Ha sido aplicado y desarrollado con detalle por Cabrera (2015).

c) PRESENCIA DE UNA FAMILIA NO PERSISTENTE

Al igual que en el caso anterior, una posibilidad real es suponer que se producirá una rotura mixta, es decir compleja o conjugada, tanto a lo largo de la superficie de una discontinuidad como a través del propio macizo rocoso (o roca intacta en su caso).

El uso de la formulación paramétrica, rigurosa matemáticamente, del criterio de Hoek y Brown posibilita asignar fielmente la resistencia que posee el macizo rocoso a lo largo del plano de rotura, tanto bajo hipótesis de asociatividad, como en el caso de suponer un ángulo de dilatancia en la rotura diferente al ángulo de resistencia (Serrano y Olalla, 1994; Serrano et al. 2000).

En el modelo desarrollado por Cabrera (2015) y Cabrera et al (2015) se contrastan los resultados obtenidos con códigos bien conocidos y se evalúa la importancia de la no asociatividad. Asimismo se utiliza el criterio no lineal de estimación de la resistencia al corte de las juntas propuesto inicialmente por Barton y Chouvey (1977). Permite, al menos teóricamente, de manera análoga, introducir en la formulación criterios de rotura de las discontinuidades más complejos (Serrano et al. 2014; Galindo et al. 2014).

Se puede incorporar el efecto de la presencia de una grieta de alcance limitado en el paramento de aguas arriba, producida como consecuencia de las fuertes sollicitaciones horizontales que actúan y por la debilidad del hormigón para soportar estados tensionales a tracción, en alguna de sus direcciones (figura 11).

En la medida en la que se puede introducir este modelo en una simple hoja de cálculo, posibilita no solo el estudio paramétrico para conocer la influencia en los resultados de los distintos parámetros implicados, (por ejemplo la

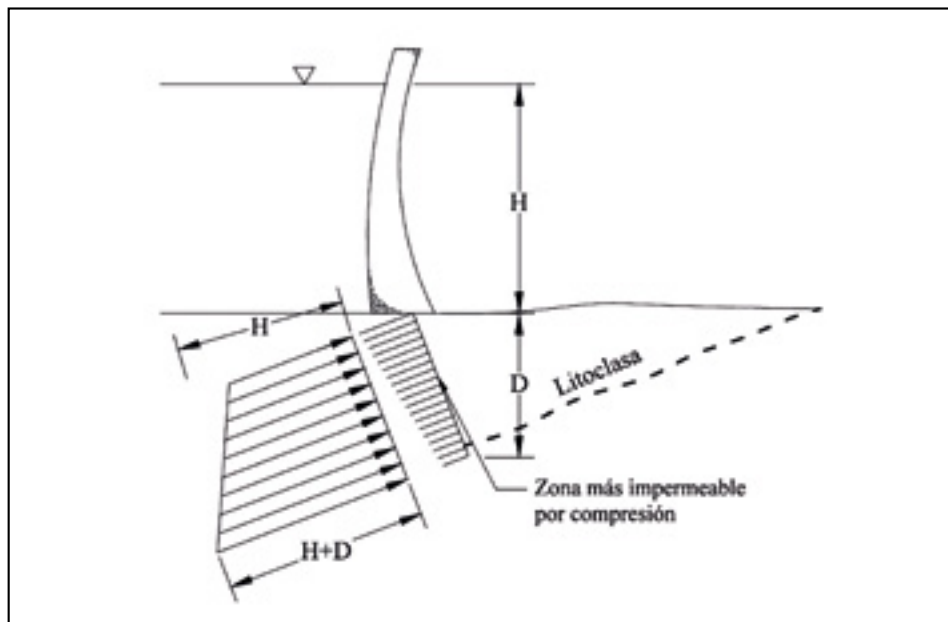


Figura 10. Mecanismo de rotura supuesto. Tomado de Guía Española de Seguridad de Presas nº 2.1 (CNEGP, 2003).

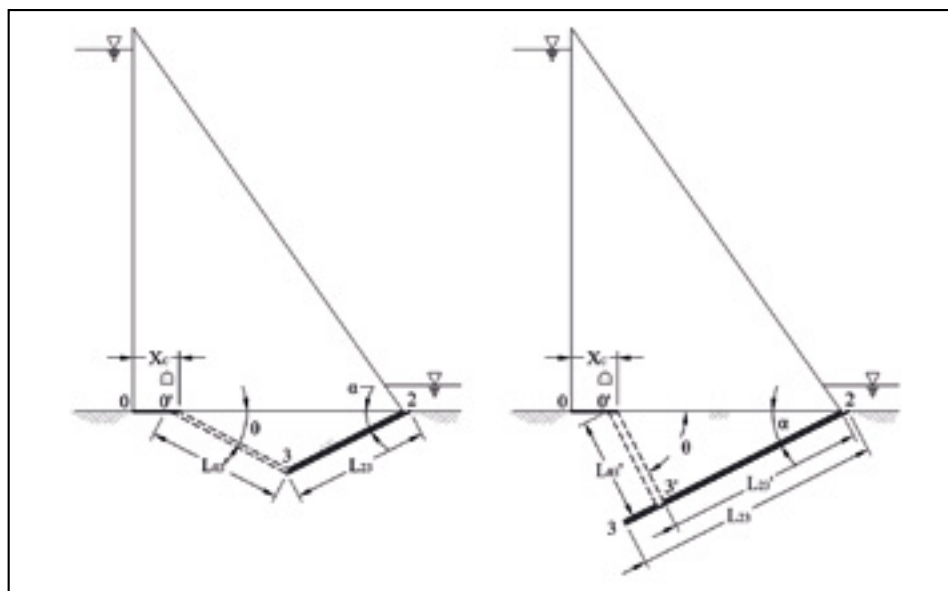


Figura 11. Mecanismos de rotura supuestos, con grieta en el cimiento. Tomado de Cabrera (2015).

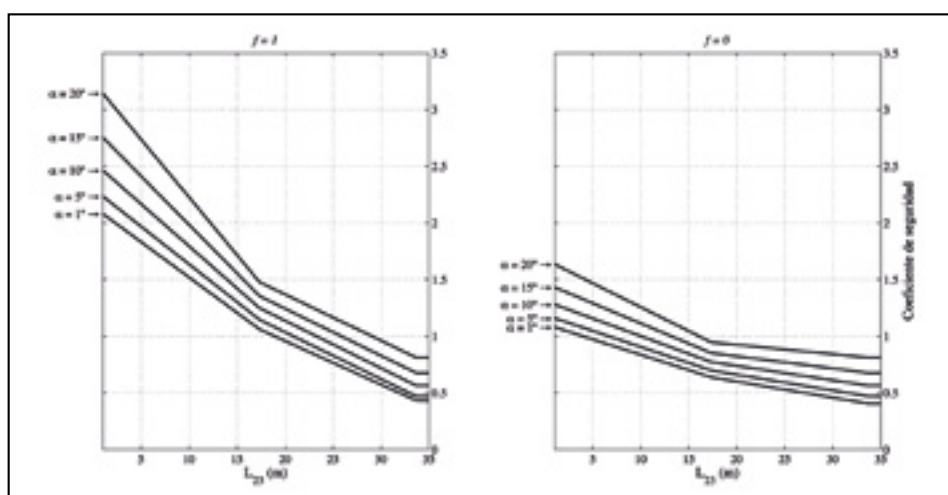


Figura 12. Influencia de la longitud de la discontinuidad (L) bajo hipótesis de dilatación asociada ($f=1$) y nula ($f=0$) para distintos ángulos de inclinación de la misma. Tomado de Cabrera (2015).

persistencia es siempre un dato de difícil estimación que merece ser analizado), o de la propia asociatividad, sino también para la realización de estudios de riesgos, en términos probabilísticos, que pueden exigir miles de cálculos (figura 12).

d) LA POSIBILIDAD DE EXISTENCIA DE FAMILIAS CONJUGADAS (CUÑAS)

Esta alternativa ha sido analizada y desarrollada en profundidad en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSICCP, de la UPC (figura 13).

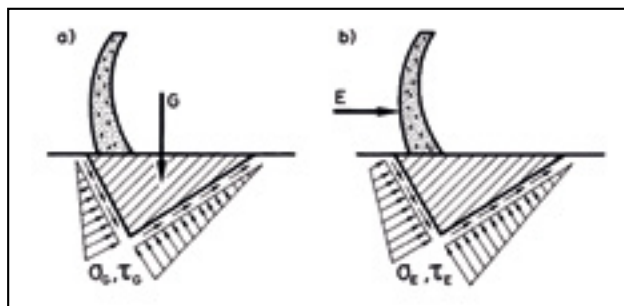


Figura 13. Cargas y tensiones debidas a) al peso propio y b) al efecto del agua, sobre una cuña potencial mente inestable. Hipótesis básicas. Tomado de Alonso et al. (1993).

Ha dado lugar a múltiples comunicaciones a congresos y se ha publicado también, total o parcialmente, en diferentes revistas especializadas tanto en métodos numéricos como en aspectos geotécnicos (Alonso et al. 1993; Alonso et al. 1995).

Elaboran un procedimiento para que, basándose en los resultados de los cálculos de elementos finitos en tres dimensiones, se puedan determinar los coeficientes de seguridad frente al deslizamiento de cuñas en rocas presentes en los estribos de presas bóveda, potencialmente inestables. Se definen dos alternativas diferentes respecto del coeficiente de seguridad; en el primer caso mayorando las cargas actuantes sobre la estructura y su cimiento y en el segundo caso minorando los parámetros que definen la resistencia al corte de las discontinuidades.

Este procedimiento se aplica en particular y a modo de ejemplo a la cuantificación de la seguridad de la Presa de Canelles (bóveda de 151 m de altura), resaltándose la conveniencia de los dos tipos de coeficientes de seguridad para una mejor comprensión de los mecanismos de comportamiento de la interacción estructura cimiento. Ambos son conceptualmente distintos pero la información que proporcionan es complementaria.

7. DEFORMABILIDAD

Representa otro de los aspectos fundamentales a conocer. Es un aspecto complementario al correspondiente al de la resistencia y su valoración y cuantificación afecta directamente tanto al tipo de presa como al diseño (forma) de la estructura elegida.

Suele ser complejo y costoso de acotar, siendo hoy en día práctica habitual efectuar estimaciones de parámetros en base a alguna de las múltiples correlaciones que existen, en este aspecto, para contrastarlas con los resultados

de campañas que determinan la relación tensión deformación, en base a ensayos dilatométricos o presiométricos, en el interior de los sondeos, o en base a ensayos a gran escala como las placas de carga, o los gatos planos.

En los últimos lustros, también se han hecho ensayos "in situ", más allá de los extendidos ensayos presiométricos, que con carácter cuasi general se llevan a cabo hoy en día para el estudio de la deformabilidad de los macizos rocosos.

Por ejemplo en la Presa de Rules, se hicieron tres ensayos en cámara excavada en galería, en varias direcciones (al hilo de las capas horizontal y vertical), con diferentes ciclos. La carga se aplicó mediante gatos planos cuadrados de 120-120 cm, con un orificio central de 30-30 cm (Nevot et al. 1993b).

En la Presa de La Llosa del Caval, en Lérida, una vez más, se hicieron ensayos de carga sobre placa en galerías, que se contrastaron con los ensayos presiométricos efectuados en el interior de los sondeos (Berga et al. 1993).

Desde el punto de vista teórico, de contemplar la deformabilidad como un factor de diseño, en la Tesis Doctoral de Zeballos (1992) se analiza la influencia de la deformabilidad del cimiento en los estados tensodeformacionales del cuerpo de las presas, constatándose su importancia en la concepción de la estructura. Para valorar la calidad de las cerradas empleadas como emplazamientos de presas de fábrica, se define un parámetro integrador de varios aspectos; la "Esbeltez Geotécnica", (λ_g), ($\lambda_g = S^2 / V \cdot H$, siendo S = Sección desarrollada; V = volumen y H = altura), con la intención de señalar los límites de validez.

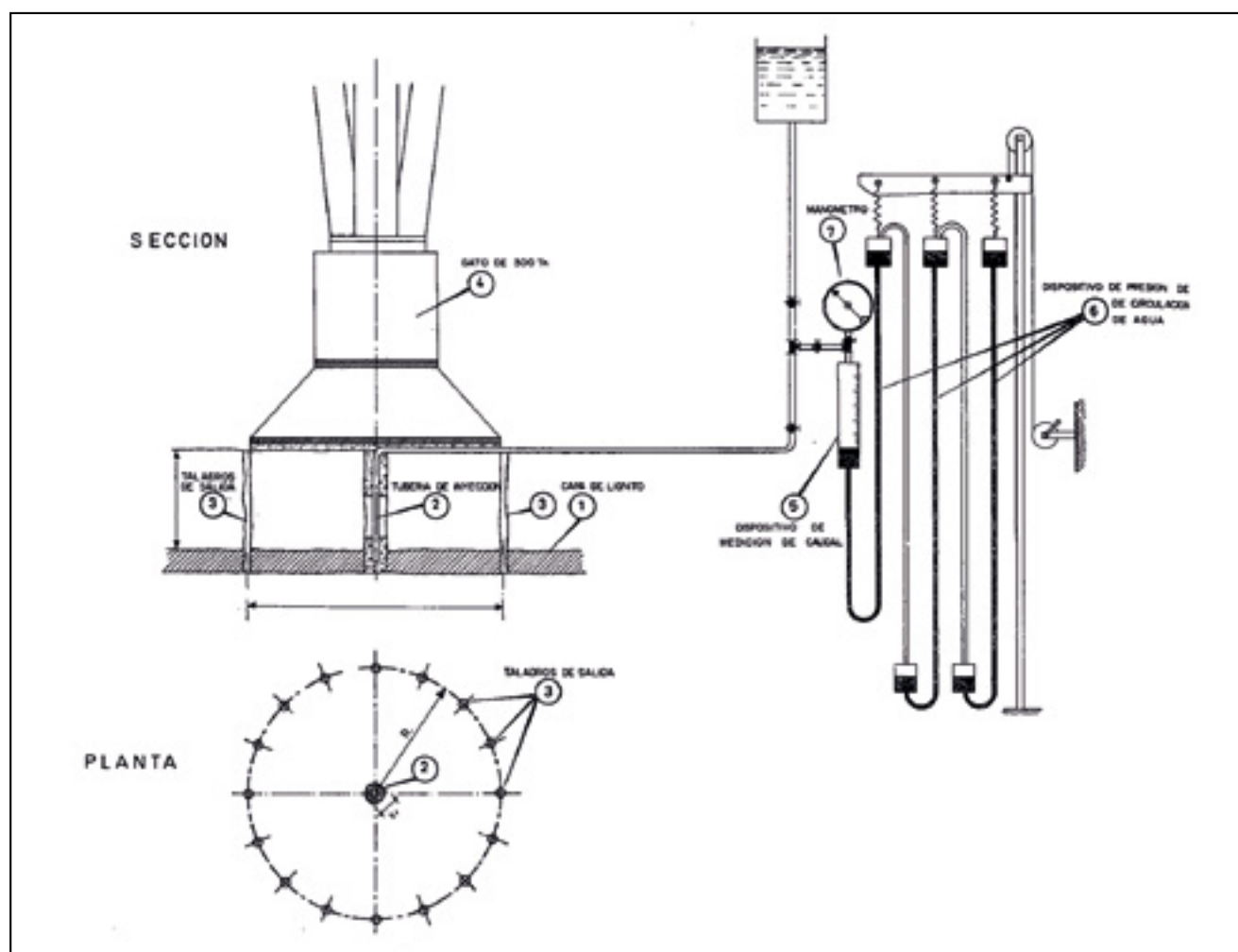
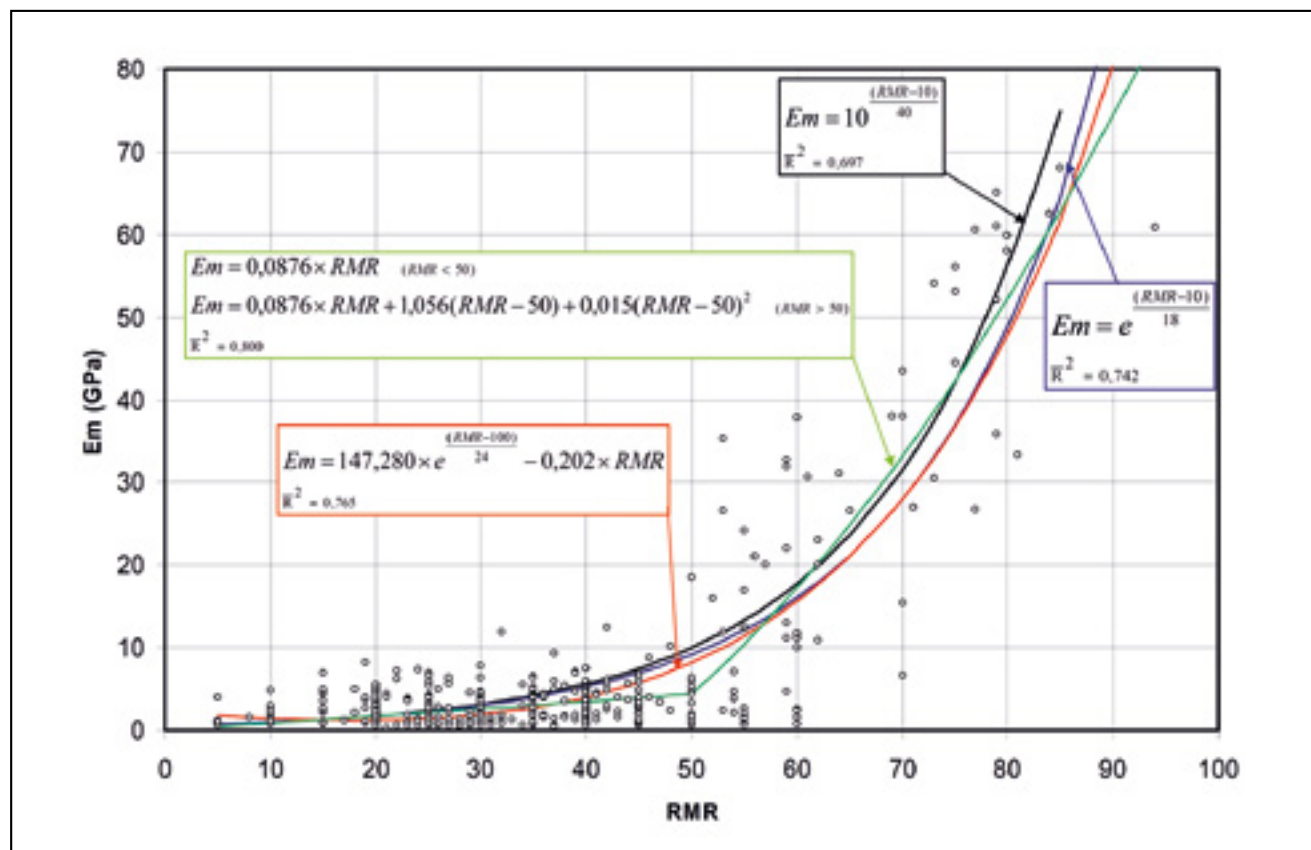
Zeballos y Soriano (1993) teniendo en cuenta que la deformabilidad de la cerrada condiciona notablemente la geometría de la solución estructural que se vaya a dar a la presa, proponen el uso conjugado de los parámetros adimensionales "Esbeltez Geométrica" y la relación modular "r" (igual al cociente entre el módulo de deformación del hormigón / módulo de deformación del cimiento). Venrían a representar los efectos de la forma de la cerrada en la solución estructural que se adopte, teniendo en cuenta las sollicitaciones que se transmiten al cimiento y la propia deformabilidad del mismo.

Con otros objetivos, (pensado fundamentalmente para el diseño de túneles), pero con la misma finalidad de conocer la deformabilidad del macizo rocoso, es muy interesante el trabajo de recopilación y actualización de valores del módulo de elasticidad equivalente, efectuado por Galea et al. (2007). Supone una revisión de las clásicas fórmulas de Serafim, Bieniawski, etc. mejorándose notablemente el ajuste entre los datos reales manejados y la correspondiente expresión matemática, a saber (figura 14):

$$\begin{aligned} E_m \text{ (GPa)} &= 0.0876 \cdot \text{RMR} && \text{para RMR} \leq 50 \\ E_m \text{ (GPa)} &= 0.0876 \cdot \text{RMR} + 1.056(\text{RMR} - 50) + 0.015(\text{RMR} - 50)^2 && \text{para RMR} > 50 \end{aligned}$$

8. IMPERMEABILIDAD

Resulta fácil comprender que no existen macizos rocosos teóricamente impermeables. Si existen macizos cuya permeabilidad total, a los efectos prácticos resulta aceptable. Es decir, son medios en los que las pérdidas son admisibles, y en su caso, si no lo fueran, son susceptibles de



mejora por corrección de sus características hidráulicas. Es bien conocido, por otro lado, que la permeabilidad en un macizo rocoso se produce tanto a través de la roca matriz, como a través de las discontinuidades que presente.

En este aspecto, quizás lo más relevante sean las grandes actuaciones, llevadas a cabo por las empresas españolas especializadas en tratamientos del terreno, para incrementar la impermeabilidad del cimientto, bien mediante inyecciones o bien mediante pantallas continuas.

Así, por ejemplo, cabe citar la pantalla plástica ejecutada mediante hidrofresa, atravesándose suelos y una roca blanda, alcanzándose los 70 m de profundidad y con una superficie de la misma de 11.500 m² (Prieto, L. 2014).

Desde el punto de vista de reconocimiento, cabe reseñar los ensayos in situ, efectuados en su día para determinar la permeabilidad del macizo en el emplazamiento de la presa, a gran escala (Uriel, s., 1964, figura 15). Representan, una vez más, un hito ejemplar por las dimensiones implicadas y por los medios puestos a disposición de la investigación. No tenemos constancia que se haya repetido este tipo de pruebas, ni que, más allá de los ensayos que se efectúan en el interior de los sondeos, se hayan realizado pruebas similares.

9. CONSIDERACIONES FINALES

De la lectura de las páginas precedentes, puede apreciarse que la actividad de los profesionales españoles vinculados con el ejercicio de la profesión en el ámbito de la Mecánica de Rocas y su aplicación a la cimentación de grandes obras hidráulicas, en particular de presas, ha gozado desde su principio de muy buena salud.

Tanto respecto a los ensayos in situ, implicando en general a grandes dimensiones y a sofisticados medios y actuaciones, como en el dominio de los modelos teóricos y de las aplicaciones numéricas, las aportaciones han sido muy relevantes; No puede ser de otra manera, el enorme y exitoso desarrollo de infraestructuras hidráulicas, llevado a cabo en toda la geografía peninsular e insular, ha podido dar buena cuenta de ello. Es un motivo de gratitud hacia nuestros antepasados y una satisfacción para todos nosotros.

10. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, E., Carol, I., Gens, A., Prat, P., y Herrero, E. (1993). Mecanismos tridimensionales de rotura en estribos de presas bóveda. Estudio de la seguridad. *IV Jornadas de Presas. CNEGP-SPANCOLD. 4-5 Mayo, Murcia (España)*, pp. 213-229.

Alonso, E., Carol, I., Gens, A., y Prat, P. (1995). *Metodología para el análisis de la seguridad de Presas y su macizo de cimentación*. Monografía correspondiente al Premio José Torán 1994. Madrid (España): CNEGP-SPANCOLD.

Allende, M., Blas, C., Soriano Martínez A., y Soriano Peña, A. (2015). Presa de Enciso: Ensayo de Resistencia al Corte "in situ" del cimientto. *X Jornadas Españolas de Presas. Comité Español de Grandes Presas. Sevilla (España)*.

Allende, M., Cruz, D., Soriano Martínez A., Andriano, A., y Chulia, D. (2012). Presa de Enciso: Condicionantes geológico y geotécnicos del cimientto. Tratamiento de consolidación. *6th Int. Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Zaragoza (Spain)*.

American Association of State Highway and Transportation Officials Headquarters (AASHTO) (1997). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Atlanta, GA (EE UU): AASHTO.

Baena, C. M., Granell C., y Olalla C. (2014). Application of the Hoek & Brown (1980) failure criterion to the definition of the foundation of an arch dam. *Proceedings of the International Congress on Rock Mechanics. Eurock. May, Vigo (Spain)*.

Barton, N.R., y Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 10 (1-2), pp. 1-54.

Berga, L., Moro, J. M., Claramunt, A., Bernal, A., y Costa, M. (1993). La Presa de la Llosa del Caval: proyecto y ejecución de la cimentación". *IV Jornadas de Presas. CNEGP SPANCOLD. 4-5 Mayo, Murcia (España)*.

Brinch Hansen, Jorgen (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. Copenhagen: Danish Geotechnical Institute, Bulletin N° 28, pp. 5-11.

Cabrera, M. (2015). Evaluación de la seguridad al deslizamiento de una presa de Fábrica en un cimientto con una familia de discontinuidades y con un criterio de rotura con ley de fluencia no asociada. Tesis Doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Disponible en http://oa.upm.es/37257/1/Miriam_Cabrera_Carpio.pdf

Cabrera, M., Senent, S., Olalla, C., y Jiménez, R. (2015). Sliding stability analysis of a gravity dam founded on a rock mass with an impersistent joint set. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 52, pp 1-17.

Canadian Geotechnical Society (1985). *Canadian Foundation Engineering Manual*. Richmond, BC (Canadá): CGS.

Castilla, J., Araoz, A., del Campo, F., Portillo, E., y Bernal, A. (1993). Ensayos de corte in situ en la cimentación de la Presa de Itoiz. *IV Jornadas de Presas. CNEGP-SPANCOLD. 4-5 Mayo, pp. 17-32. Murcia (España)*.

Castilla, J., Rodríguez Ibáñez, F., Bernal, A., Bolinaga, F., y Héctor, B. (1993). Ensayos in situ de Mecánica de Rocas en la cimentación de la Presa de Arraiz. *IV Jornadas de Presas. CNEGP SPANCOLD. 4-5 Mayo, Murcia (España)*.

Comité Nacional Español de Grandes Presas (2003). *Guía Técnica de Seguridad N° 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas*. Madrid (España): SPANCOLD.

Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. (2009). *Guía de Cimentaciones de Obras de Carretera*. Madrid (España): M° de Fomento.

European Club of ICOLD (2004). *Sliding Safety of existing gravity dams-Final Report*. European Working Group.

Galera, J. M., Álvarez, M., y Bieniawski, Z. T. (2007). Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR. Comparison with dilatometer tests. *Proceedings of the ISRM International Workshop. Underground Works under Special Conditions*. Romana, Perucho y Olalla (eds.), Taylor and Francis. Madrid (Spain).

Galindo, R., Serrano, A., y Olalla, C. (2014). Characterization of the rock joints by fractal analysis. *Proceedings of the International Congress on Rock Mechanics. Eurock. May, Vigo (Spain)*.

Galindo, R., Serrano, A., y Olalla, C. (2017). Ultimate Bearing Capacity of rock masses based on Modified Mohr-Coulomb strength criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Accepted for publication.

Gómez, R., de la Fuente, R., y Lanau, S. (2015). Estudio de la subpresión en la pesas de la Confederación Hidrográfica del Ebro. *X Jornadas de Presas. CNEGP-SPANCOLD. 18-20 Febrero, Sevilla (España)*.

- Hoek, E., y Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Proc. ASCE I. Geotech. Engng. Div.* 106.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses, *ISRM News J*, 2(2), pp. 4-16.
- Hoek, E., Carranza-Torres C., y Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition. *Proc. NARMSTAC Conference, Toronto*. Vol. 1, pp. 267-273.
- Jiménez Salas, J.A., y Uriel, S. (1964). Some recent rock mechanics testing in Spain. *VIII International Congress on Large Dams. Q28 R53. Edinburgh. United Kingdom*.
- Jiménez Salas, J. A., de Justo, J. L., y Serrano, A. (1981). *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. Editorial Rueda. Madrid (España): Editorial Rueda.
- Kulhawy, H., y Carter, P. (1992). Analysis of Laterally Loaded Shafts in Rock. *J. Geotechnical. Engineering.*, 119 (12), pp. 2015-2018.
- Laboratorio de Geotecnia, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) (1997). *Seguimiento del comportamiento de la cimentación y de los materiales de diques en presas seleccionadas*. Madrid (España): Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- Ministerio de Vivienda (2006). *Código Técnico de la Edificación de España* (CTE). Madrid (España): M° de Vivienda.
- Nevot, A., Simic, D., Bernal, A., Capote, A., y López de Alada F. J. (1993). La cimentación de la Presa de Rules en el Río Guadalfeo (Granada). *IV Jornadas Técnicas de Presas*, pp. 1-15. CNEGP SPANCOLD. Murcia (España).
- Nevot, A., Costa, M., Portillo, E., y Bernal, A. (1993). Ensayos in situ de deformabilidad y de resistencia del macizo rocoso den la cimentación de la Presa de Rules. *IV Jornadas Técnicas de Presas*. pp. 47 -62. CNEGP SPANCOLD. Murcia (España).
- Olalla, C. (2014). Study of the behaviour of concrete face rockfill dams founded on active faults. *International Journal on Hydropower and Dams*. Vol. 21, N° 1.
- Olalla, C. (2013). Cimentación de presas; Resistencia, cargas de hundimiento y de deslizamiento. *Jornada Técnica de la Sociedad Española de Mecánica de Rocas. Abril, Madrid. (España)*.
- Prieto, L. (2014). Pantalla plástica en la Presa de Alhucemas (Marruecos). *Jornada Técnica: actuaciones geotécnicas en obras hidráulicas. AETESS SEMSIG. Marzo, Madrid*.
- Puertos del Estado (1994). *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas*. ROM 05-94. Madrid (España): Ministerio de Fomento.
- Puertos del Estado (2005). *Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas*. ROM 05-05. Madrid (España): Ministerio de Fomento.
- Romana, M. (2003). DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR. *4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. Madrid (Spain)*.
- Serrano, A., y Olalla, C. (1994). Ultimate bearing capacity of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 31, N° 2, pp. 93-106.
- Serrano, A., y Olalla, C. (1996). Allowable bearing capacity in rock foundations based on a non linear criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 33, N° 4, pp. 327-345.
- Serrano, A., y Olalla, C. (1998). Ultimate Bearing Capacity of an Anisotropic Rock Mass, Part I: Basic Modes of Failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. Vol. 35, N° 3, pp. 301-324.
- Serrano, A., y Olalla, C. (2007). Bearing capacity of Shallow and Deep Foundations in Rock with the Hoek and Brown Failure Criterion. *Plenary Session P3 Keynote Lecture T3. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Vol. 3, pp. 1379-1392. Lisbon, Portugal. Ribeiro e Sousa, Olalla & Grossmann (eds.). London: Taylor & Francis Group.
- Serrano, A., Olalla, C., y Galindo, R. (2014). Micromechanical basis for shear strength of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 51. September.
- Serrano, A., Olalla, C., y Galindo, R.A. (2016). Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass based on the modified Hoek Brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 83, pp. 26-40.
- Serrano, A., Olalla, C., y González, J. (2000). Ultimate Bearing Capacity of Rock Masses based on the modified Hoek and Brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 37, pp. 1013-1018.
- Sing, M., y Suingh, B. (2012). Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of jointed rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. Vol. 51, pp. 43-52.
- Sokolovski, V.V. (1965). *Statics of granular media*. London: Pergamon Press.
- Soriano, A. (1997). Shallow foundations of retaining structures on weak rocks. *Proc of the XIV International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering. Hamburg. September*.
- Uriel, S. (1964). La Geotecnia aplicada a las grandes presas. *Revista de Obras Públicas*. N° 112, Tomo I, pp. 493-510.
- Uriel, S. (1970). Métodos de cálculo de la estabilidad de presas de fábrica. Coeficiente de seguridad. *Revista de Obras Públicas*. N° 117, Tomo I, pp. 391-400.
- U.S. Army Corps of Engineers (1996). *Rock Foundations*. Technical Engineering and Design Guides, N° 16. New York: ASCE.
- Zeballos, M. (1992). Comportamiento y caracterización de macizos rocosos de alta deformabilidad empleados como cimientos de presas de fábrica. Tesis Doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Zeballos, M., y Soriano, A. (1993). Deformabilidad del cimiento de presas de fábrica. *IV Jornadas de Presas. CNEGP-SPANCOLD. 4-5 Mayo, Murcia (España)*.
- Zhang, L., y Einstein, H. (1998). End Bearing Capacity of Drilled Shafts in Rock. *J. Geotechnical Geoenvironmental. Eng.*, 124(7), pp. 574-584.