

Cimentaciones de presas de gravedad: requisitos geomecánicos

Foundations of gravity dams: rock mechanics requirements

Manuel Romana Ruiz. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia. STMR. Valencia (España). mromana@stmr.es

Resumen: Los requisitos de cimentación de las presas de hormigón (CVC, RCC, hardfill) se suelen definir cualitativamente: "roca sana", "roca compacta", "por debajo de la zona de descompresión"... Eso deja un margen de interpretación al juicio ingenieril del responsable de la construcción de la presa. Por otra parte los requisitos dependen del tipo de presa y material (el hormigón CVC tiene un módulo de deformación mayor que el hormigón RCC y el hardfill y, por lo tanto, requiere una cimentación menos deformable). En este artículo los requisitos mínimos del terreno para la cimentación de presas de gravedad de hormigón (CVC, RCC, hardfill) se expresan en términos cuantitativos de parámetros de Mecánica de Rocas: velocidad longitudinal ("celeridad") sísmica, determinada mediante geofísica; grado de meteorización según la escala de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas; resistencia a compresión simple de la matriz rocosa; módulo de deformación de la masa rocosa; clases de las clasificaciones geomecánicas.

Palabras Clave: Presas; Cimentación; Presas de gravedad; Hormigón vibrado; CVC; Hormigón compactado RCC; Hardfill (relleno duro); Mecánica de rocas

Abstract: The requirements for the foundation of concrete (CVC, RCC, hardfill) dams are usually expressed in qualitative terms: "sound rock", "fresh rock", "below the decompressed surface strata"... That leaves a big margin to the engineering judgment of the dam construction responsible. On the other hand the requirements depend on the dam class, and material (e. g. CVC concrete has bigger deformation modulus than RCC and hardfill, and therefore requires a less deformable foundation). In this paper the minimum requirements for the rock mass in the foundation of concrete gravity dams (CVC, RCC, hardfill) are expressed in terms of rock mechanics parameters: rock mass longitudinal velocity (celerity), measured by geophysical methods; ISRM weathering degree; unconfined compressive strength; rock mass deformation modulus; geomaterials classifications classes.

Keywords: Dam foundations; Gravity dams; Conventional vibrated concrete (CVC); Roller compacted concrete (RCC); Hardfill; Hardfill dams; Rock mechanics

1. Introducción

Los requisitos de cimentación de las presas de hormigón (sea éste convencional vibrado -CVC- o compactado con rodillo -RCC) se suelen expresar en términos cualitativos: "roca sana", "roca compacta", "por debajo de la zona de descompresión"... Se han construido muchas presas en todo el mundo con esos criterios (antes y después del desarrollo de la Mecánica de Rocas) y el número de roturas por cimentación ha sido siempre relativamente bajo. Fraser (1) describe los "diferentes métodos para definir el objetivo de cimentación de una presa": "1 alcanzar una unidad geológica definida; 2 excavar hasta una profundidad definida me-

1. Introduction

The requirements for the foundation of concrete (either CVC or RCC) dams traditionally have been expressed in qualitative terms: "sound rock", "fresh rock", "below the decompressed surface strata"... Many dams all over the world have been built with these criteria (before and after the development of rock mechanics), and the number of foundation failures has remained relatively small. Fraser (1) describes the "different approaches for defining a (dam) foundation objective": "1 attain a specific geologic unit; 2 excavate to a grade based on field testing results; 3 attain a specific rock quality; 4 achieve a surface that

diante ensayos in situ; 3 alcanzar una calidad de roca previamente especificada; 4 alcanzar una superficie que cumpla un determinado ensayo de control de construcción; 5 excavar hasta una profundidad definida por la capacidad de los equipos de excavación; 6 excavar hasta una profundidad definida por el proyecto; 7 alcanzar un material considerado adecuado a partir de la observación visual". La mayoría de estos métodos tienen un alto grado de subjetividad. Fraser termina diciendo que "debe confirmarse la capacidad de la cimentación...para asegurarse de que se comportará de la forma prevista"

Las recomendaciones del US Corps of Engineers y del Bureau of Reclamation (2) especifican que *"las presas de gravedad construidas sobre cimentaciones en suelo deben tener una altura menor de 50 pies (~15 m)".* El requisito más frecuente para la calidad de la cimentación de una presa de gravedad es *"roca de buena calidad, sana, fresca y no meteorizada"*. Sharma (3) pedía que *"todo el área de cimentación debe ser excavada hasta alcanzar una roca firme capaz de soportar las cargas exigidas"*. Fell et al (4) pedían lo mismo: *"después de los tratamientos normales de preparación...la roca debe tener la resistencia, módulo de deformación y durabilidad adecuados para soportar las cargas transmitidas por la presa"*. Muchos otros autores dicen también que sólo debe permitirse la cimentación de presas de gravedad sobre una roca compacta.

Actualmente un número cada vez mayor de presas de hormigón CVC y RCC debe cimentarse sobre rocas menos compactas, incluso en terrenos límite entre suelos y rocas. La resistencia y deformabilidad de ambos hormigones son diferentes, pero las condiciones generales de cimentación, y los métodos de cálculo, son similares.

El problema de la cimentación de presas en *"materiales de baja resistencia"* fue tratado por primera vez de forma cuantitativa por Rocha (5, 6) que definió las *"rocas blandas"* como aquellas cuya resistencia a compresión simple estaba en el intervalo $2 \text{ MPa} < \sigma_{Cj} < 20 \text{ MPa}$ *"límites que se definen como de resistencia muy baja y baja"*. Los criterios de Rocha se usan en la práctica por muchos presistas. Rocha comenzó por estudiar el problema de la deformabilidad del cemento en presas bóveda (7, 8) Desgraciadamente murió y sus últimos artículos sobre el problema de la deformabilidad del cemento en presas de gravedad fueron escritos en portugués y no están traducidos a otros idiomas. Volveremos más adelante sobre sus resultados.

meets a construction control test; 5 excavate to a surface based on the ability of the excavation equipment; 6 excavate to a depth indicated by the design; 7 achieve a material judged adequate based on visual observation". *Most of these approaches are subjective. Fraser ends by saying that "ultimate adequacy of the foundation must be confirmed...to insure the foundation will perform as expected"*.

Both the well known guidelines from USACE and USBR (2) state that "gravity dams built on soil foundations must have a height minor than 50 feet (~15 meters)". The most usual requirement for the quality of the rock foundation for a gravity concrete dam is "good quality, sound, fresh and unweathered rock". Sharma (3) demanded that "the entire (foundation) area should be stripped to firm rock capable of withstanding the loads". Fell et al (4) demanded the same thing: "after normal treatment... the rock foundation must be of adequate strength, stiffness modulus and durability to support the dam loads". Many other authors also state that only sound rock should be allowed for gravity dams' foundations.

Actually an increasing number of CVC and RCC dams have to be founded in less sound rock, even in border-line terrains. Strength and deformability of both concretes are different but otherwise the general conditions for foundations, and the stability calculations, are quite similar.

The problem of dams' foundation in "low strength materials" was addressed, for the first time in a quantitative way, by Rocha (5, 6). The condition for "soft rocks", according to Rocha, was intact rock compressive strength in the interval $2 \text{ MPa} < \sigma_{Cj} < 20 \text{ MPa}$ "which... is defined as very low and low strength rock" Rocha's proposals are used in practice by many dam engineers. He had started to work on the problem of rock mass deformability for double arch dams (7, 8). Unfortunately he died and his last papers on the problem of rock mass deformability for gravity dams, in Portuguese, have not been published in English. We will return later to his results.

Several rock mass parameters have been used in practice as quantitative foundation referents: shear strength of the terrain joints below the foundation; weathering grade according to the ISRM weathering scale; longitudinal velocity (celerity) of the terrain, obtained by site seismic refraction method; rock mass deformability modulus; geomechanics classifications: Bieniawski's RMR, (9) and Romana's DMR (10) In this

En la práctica se han usado diversos parámetros de la masa rocosa como referencias cuantitativas para cimentaciones: resistencia al esfuerzo cortante de las discontinuidades del terreno bajo la cimentación; grado de meteorización según la escala de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM); velocidad de las ondas longitudinales (celeridad) del terreno, determinada por geofísica sísmica de refracción; módulo de deformación de la masa rocosa; clases del terreno según las clasificaciones geomecánicas, RMR de Bieniawski (9) y DMR de Romana (10). En este artículo se revisarán todas estas aproximaciones al problema y se propondrán los valores mínimos permisibles de estos parámetros para las cimentaciones de presas de gravedad de hormigón de los diferentes tipos.

2. Resistencia al esfuerzo cortante de las discontinuidades del terreno

La estabilidad de una presa siempre debe ser comprobada por el proyectista teniendo en cuenta la distribución más probable de las supresiones en su cimentación y la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de las discontinuidades más peligrosas. El necesario cálculo de la estabilidad debe hacerse después de haber alcanzado un buen conocimiento de los rasgos geológicos bajo la presa.

No hay soluciones aproximadas. Sobre esta cuestión el Comité Español de Grandes Presas (SPANCOLD) afirma: "el estudio de la seguridad de la presa frente al deslizamiento requiere un buen conocimiento de la resistencia del macizo rocoso. Las correlaciones simples entre las clasificaciones geomecánicas y la resistencia del macizo rocoso no están bien establecidas para la cimentación de presas" (11) Pero el deslizamiento horizontal hacia aguas abajo por rotura en la cimentación, aunque posible, no es un accidente frecuente en presas de gravedad.

3. Grado de meteorización según la escala de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM)

Todos los autores piden que se elimine el material meteorizado de la cimentación. Por ejemplo Fell et al (4) presentan la cartografía geotécnica de la presa de Sturt River (presa-arco de 40 m de altura) después de las operaciones de limpieza. Se excava hasta al-

paper we will review all these approaches and try to determine the minimum values of these parameters allowable for gravity dams foundations.

2. Shear strength of the terrain joints

Dam stability must, always and in any case, be checked by the designer taking account of the probable distribution of water pore pressure across the dam foundation and/or the mobilized shear strength of the governing joints. The necessary stability calculation must proceed after attaining a good knowledge of the geological features below the dam.

No approximate solutions are available for that. About this question, the Spanish National Committee on Large Dams states that "The study of the dam safety against sliding requires knowledge of the strength of the rock mass. The simple correlations between geomechanics classifications and rock mass strength are not well established for dam foundations" (12). But downstream horizontal sliding is not a frequent accident in concrete gravity dams.

3. ISRM scale of weathering grades

All the authors state that weathered material must be striped away from the foundation. For instance Fell et al (4) present the geotechnical log of the foundation of Sturt River Dam (a 40 m. high arch dam) after cleaning operations. Grades I and II siltstones are left (grades are referred to ISMR weathering scale) (see figure 1).

In most cases the foundation is excavated until grade II rock in the central part of the valley (where the dam is higher) and grade II-III rock in the abutments are found. Spillways should be founded, if possible, in grade I rock. These requirements could be minored for RCC dams.

4. Velocity P of longitudinal waves (celerity)

The most frequent parameter to be quantified in order to check the rock quality for dam foundations has been C, the celerity of P-waves, measured by geophysical methods (refraction). Table 1 shows the approximate values of celerity for the different terrains classes.

canzar limolita de grados I y II según la escala ISMR (figura 1).

En la mayoría de los casos la cimentación se excava hasta alcanzar roca grado II (como mínimo) en la parte central del valle (donde la presa es más alta) y roca grado II-III en los estribos. Los aliviaderos deben cimentarse sobre roca grado I si es posible. Estos requisitos pueden reducirse para presas de gravedad de hormigón RCC.

4. Velocidad de las ondas longitudinales (Celeridad)

El parámetro que se cuantifica más a menudo para comprobar la calidad de la roca de cimentación es C, celeridad, velocidad de las ondas P longitudinales en el terreno, medida mediante sísmica de refracción. La tabla 1 presenta los valores estimativos de la celeridad para las diferentes clases de terreno

Muchos ingenieros portugueses manejan el concepto de “zonificación geotécnica” (12, 13, 14) La tabla 2 muestra la zonificación geotécnica usada más frecuentemente en Portugal.

La Zona Geotécnica 1 (GZ 1) es la que normalmente se considera apropiada para la cimentación de presas.

Según Marulanda y Castro (16) “son aceptables niveles de cimentación en los que la celeridad C esté comprendida entre 2,5 y 3,5 Km/s....Otros definen el nivel de cimentación sobre la base de que no sea posible la escarificación con tractores tipo D8”.

El límite de ripabilidad de terreno más frecuentemente citado se corresponde con una celeridad de 2 Km/s. En la figura 2 se reproduce una de las últimas versiones del gráfico de ripabilidad de Caterpillar (17). El valor de 2 Km/s podría aceptarse como límite inferior de

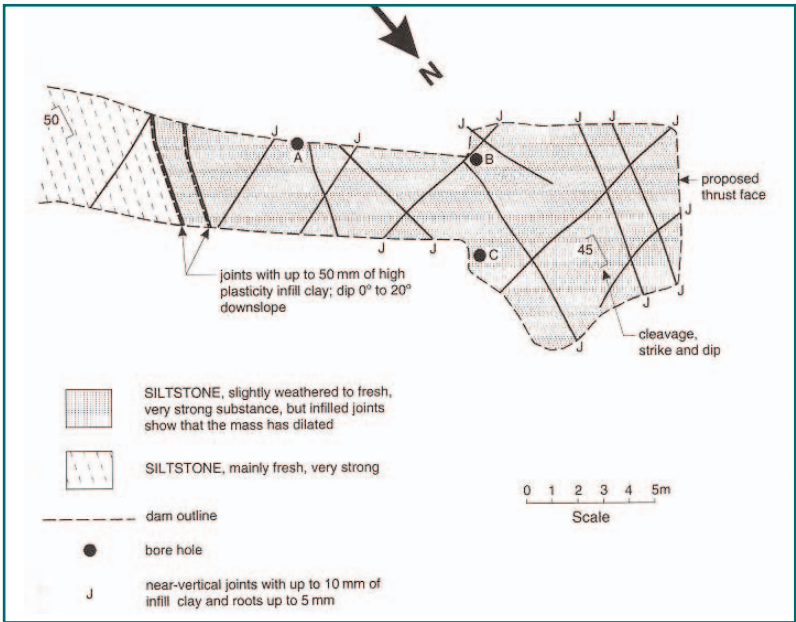


Fig. 1. Parte del registro geotécnico de la cimentación de la presa de Sturt River (4)/Part of the geotechnical log of Sturt River dam foundation (4).

Many Portuguese authors use the concept of “geotechnical zoning” (12, 13, 14).

Table 2 shows the geotechnical zoning conditions most regularly used in Portugal, with Geotechnical Zone 1 (GZ 1) normally considered appropriate for dam foundations.

According to Marulanda & Castro (16) “foundation levels are acceptable when a minimum compressive seismic velocity (celerity C) between 2.5 and 3.5 Km/s are recorded... Others...define the rock foundation level on the basis of ripability...by D8 dozers”. Many other authors agree with these conditions.

The generally stated limit for ripability is terrain celerity of 2 Km/s (Caterpillar, 2008; see figure 2 for one of the last versions of the ripability chart) which could be accepted as the lower limit for gravity dams’ foundation, with 2.5 Km/s as desirable value.

Tabla 1. Valores aproximados de la celeridad Table 1. Approximate values of celerity	
C (Km/s)	Clase de terreno/Terrain class
~5	Roca muy dura (hormigón de calidad)/ Very hard rock (good concrete)
5-3,5	Roca dura (hormigón)/Hard rock (concrete)
3,5-2	Roca media/blanda/Medium/Soft rock
2-1,5	Roca muy blanda/suelo compacto/ Very soft rock/indurated soil
<1,5	Suelo/Soil

Tabla 2. Zonificación geotécnica usada en Portugal Table 2. Geotechnical zoning conditions used in Portugal		
Zona/Zone	Grado de meteorización Weathering degrees	Celeridad Celerity (Km/s)
GZ 1	I-II	> 2,5
GZ 2	III	1,2*-2,5
GZ 3	IV-V	< 1,2*
* Frecuentemente 1,5 Km/s (Oliveira, 15) * Frequently 1.5 Km/s according Oliveira (15)		

la celeridad de terrenos admisibles para cimentación de presas de gravedad, con 2,5 Km/s como valor deseable.

5. Módulo de deformación de la masa rocosa de cimentación

Marulanda y Castro (16) afirman que “una relación de módulos de deformación superior a 1/4 es considerada comúnmente necesaria para la compatibilidad de deformaciones entre la masa rocosa de la cimentación y una presa de gravedad de hormigón RCC”

Los criterios de Rocha para presas bóveda han sido apoyados por Serafim (18) y Oliveira (19) y se aceptan universalmente.

Los criterios de Rocha (7, 8) para presas de gravedad (que son todavía válidos; al menos no sé de nadie que los haya discutido) se presentan en la tabla 3.

Zeballos (en su tesis doctoral dirigida por Soriano, 20) estudió el comportamiento de 29 grandes presas con problemas de deformabilidad y datos publicados y encontró que “casi no hay presas de gravedad de hormigón con un valor de $E_c/E_m > 20$ ” lo que confirma los resultados de Rocha.

En España hay dos grandes presas de gravedad con $E_c/E_m \geq 20$: Puebla de Cazalla y Rules.

La presa de Puebla de Cazalla (de gravedad con hormigón RCC) se proyectó con taludes 1:0.8 aguas abajo y 1:0.2 aguas arriba para aminorar los problemas de deformabilidad (21, 22).

La presa de Rules es del tipo arco-gravedad de hormigón CVC de muy buena calidad y con resistencia a tracción elevada (23,24). El llenado del embalse ha sido extremadamente cuidadoso, con incrementos muy lentos del nivel del agua, durante varios años, para consoli-

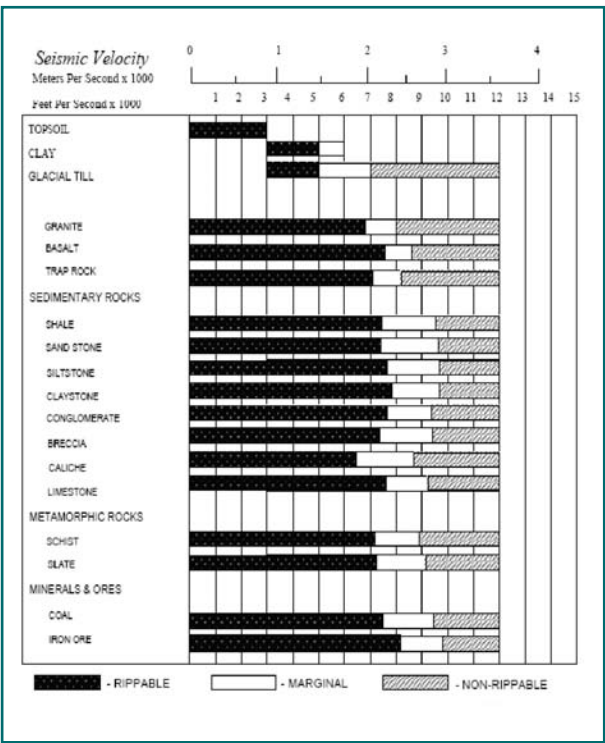


Fig.2. Gráfico de ripabilidad de Caterpillar (17) para tractores D-8/Caterpillarr rippability chart (17).

5 . Rock mass deformability modulus

Marulanda & Castro (16) say that “a modulus of elasticity ratio above 1/4 is commonly considered for compatibility between foundation rock and RCC”.

Rocha’s work for arch dams was endorsed by Serafim (18) and Oliveira (19) and is widely accepted. Rocha’s (7, 8) results for gravity dams (assuming that are still valid; as far as I know nobody has discussed them) are shown in table 3.

Zeballos (20) (in his Ph D thesis, directed by Soriano) analyzed 29 big dams with published deformability

Tabla 3. Efecto de la relación E_c/E_m^* en el comportamiento de presas de gravedad según Rocha (7, 8) Table 3. Effect of E_c/E_m on gravity dams behaviour according Rocha (7, 8)		
E_c/E_m^*	Influencia sobre la presa/ <i>Influence on dam</i>	Problemas/ <i>Problems</i>
<4	Despreciable/ <i>Negligible</i>	Ninguno/ <i>None</i>
4-8	Poco importante/ <i>Low importance</i>	Menores/ <i>Minor</i>
8-16	Importante/ <i>Important</i>	Algunos/ <i>Some</i>
>16	Muy importante/ <i>Very important</i>	Moderados a grandes/ <i>Moderate to big</i>
* E_c : módulo de deformación del hormigón * E_m : módulo de deformación de la cimentación * E_c : concrete deformation modulus. * E_m : foundation deformability modulus		



Fig. 3. La presa de Puebla de Cazalla en 2011, vista desde aguas abajo (www.visualphotos.com)/Puebla de Cazalla dam in 2011. Downstream view (www.visualphotos.com). A la derecha, fig. 4. La presa de Rules el año 2007. Vista desde aguas arriba/Right, Rules dam in 2007. Upstream view.

dar la cimentación. El valor estimado de E_m es 1,5 GPa. La presa está ya en servicio y ha sufrido un desplazamiento total hacia aguas debajo de 5 centímetros (25)

De todos los datos recogidos puede deducirse que la relación de módulos debe ser $E_c/E_m \sim 10$ para que no haya problemas de deformabilidad y que con $E_c/E_m \sim 20$ dichos problemas aparecen y requieren, para paliarse, algún tipo de medida especial. Los valores mínimos de E_m para diversos casos figuran en la Tabla 4.

6. Clasificaciones geomecánicas: RMR, DMR

La clasificación geomecánica RMR fue propuesta por Bieniawski en 1973 para su uso en túneles, taludes y cimentaciones. La versión actual hoy en uso es la de 1989 (9). En la práctica la utilización del RMR ha sido muy diferente: muy frecuente en túneles y obras subterráneas, escaso en taludes y casi nulo en cimentaciones.

Muchos presistas se ha referido al uso del RMR como una herramienta útil para la descripción de las masas rocosas de cimentación de presas. Pircher (26) dijo que

data, and stated: "there are almost no concrete gravity dams with $E_c/E_m > 20$ " which confirm Rocha results. There are two concrete (CVC) gravity big dams in Spain with $E_c/E_m \geq 20$: Puebla de Cazalla dam and Rules dam.

Puebla de Cazalla dam is a gravity RCC dam which was designed with slopes 1:0.8 downstream and 1:0.2 upstream in order to cope with the deformability problems (21, 22).

Rules dam was designed as an arch-gravity dam with a "normal" design, and with good quality CVC concrete (23, 24). The reservoir first filling has been very careful, increasing the water levels very slowly, over several years, in order to consolidate the foundation (figure 4).

The estimated E_m value: is 1.5 GPa. The dam is already in operation with a global downstream displacement of 5 centimetres. (25).

From all gathered data it can be deduced that the limit for terrain allowable minimum deformation modulus would be $E_c/E_m = 10$ and if $E_c/E_m = 20$ deformability problems may appear and they would need special measures to cope with. The minimum E_m is stated in table 4.

Tabla 4. Mínimo módulo de deformación del terreno de cimentación de presas de gravedad Table 4. Terrain rock mass deformation modulus for foundation of gravity dams			
Ec (GPa)	Em mínimo/Minimum (GPa)		Tipo de presa/calidad del hormigón Dam type/ concrete quality
	Normalmente Allowable	Con problemas With problems	
30	3	1,5	Presas de CVC/buen hormigón/CVC dams/ good concrete
20	2	1	Presas de RCC/hormigón medio/RCC dams/ normal concrete
10	1	0,5	Presas antiguas/hormigón malo/Old dams/very poor concrete

"en el futuro se desarrollarán índices de calidad, como por ejemplo el RMR de Bieniawski" y según Serafim (18) "una clasificación adecuada de la masa rocosa...puede usarse para obtener buenas estimaciones de los parámetros de deformabilidad y resistencia al esfuerzo cortante", en ambos casos en sendas ponencias generales en congresos mundiales de grandes presas.

Hay varias dificultades para el uso del RMR en el estudio de la cimentación de presa: la consideración de la presión intersticial es dudosa (porque la razón de presiones intersticiales varía a lo largo de la cimentación de una presa); no hay buenas reglas para el factor de ajuste por la orientación de las discontinuidades; las propiedades de la masa rocosa, de la matriz y de las discontinuidades cambian con los cambios de humedad (saturación, desecación, flujo en las discontinuidades...)

Bieniawski solo propuso recomendaciones en relación con la estabilidad de la presa frente al deslizamiento horizontal. Cuando el presista compara posibles emplazamientos necesita estimaciones rápidas de varios otros problemas: adecuación general del emplazamiento para los diferentes tipos de presas, profundidad necesaria de excavación de la roca alterada, necesidades de tratamientos de inyección en la cimentación, compatibilidad de deformaciones entre cimentación y presa. Por consiguiente no puede haber un único factor de ajuste ni un solo tipo de recomendaciones. Además las condiciones variarán con el tipo de presa (doble curvatura, gravedad, materiales sueltos...)

Algunos autores proponen un valor de RMRB (RMR básico, obtenido sumando los valores de los cinco parámetros de Bieniawski, sin aplicar el factor de ajuste por orientación de las juntas) RMRB ~ 60 (límite entre las clases II y III de Bieniawski) como requisito para la cimentación de presas de gravedad de hormigón en el centro del valle.

Esta condición equivale a requerir un módulo de deformación del terreno, $E_m \sim 20$ GPa si se utiliza la fórmula de Bieniawski para estimar el valor de E_m . En los estribos el valor mínimo de RMRB sería 40, (límite entre las clases III y IV de Bieniawski) y $E_m \sim 5,6$ GPa.

Romana (10, 27, 28) desarrolló una nueva clasificación geomecánica para cimentaciones de presas: DMR (Dam Mass Rating) basándose en el RMR, pero con diferentes factores de ajuste para cada clase de presa y cada problema: resistencia al esfuerzo cortante de la cimentación, calidad de la cimentación, necesi-

6. Geomechanics classifications: RMR, DMR

The RMR geomechanics classification was originally proposed in 1973 by Bieniawski –see (9) for the actually current description– for use in tunnels, slopes and foundations. In fact the use of RMR has been very diverse: extremely frequent in underground works, very scarce in slopes and almost nil in dam foundations. Many authors have referred to the use of RMR as a useful tool for the description of rock mass foundations of dams: Pircher (26) said that "the future seems to be in the development of quality index values e.g. RMR by Bieniawski" and Serafim (18) stated that "appropriate rock mass classifications can ... be used to obtain a good estimate of (shear strength and deformability) parameters", both in General Reports for Congresses on Large Dams.

Difficulties in the use of RMR for dam foundations derive from several points: consideration of the water pressure is very doubtful (the pore pressure ratio varies along the dam foundation), there are no good rules for the adjusting factor for joints orientation, there are changes in properties of rock, rock mass and joints due to watering changes (saturation, desiccation, flow in the joints...). Guidelines were only offered for general stability against horizontal sliding. The dam engineer needs, when comparing possible dam sites, rapid appraisals of several other topics: general adequacy of site for each type of dam, depth of excavation of altered rock (if needed), required amount of foundation treatment (grouting), compatibility of deformation modulus between dam and foundation. Therefore, there cannot be only one adjusting factor and a sole guideline. Besides, conditions will be different according to dam type (double arch, gravity, or embankment). Nevertheless, some authors propose a value of RMRB (basic RMR, obtained adding the five Bieniawski parameters without the adjustment factor for joints orientation) of RMRB ~60 (limit between Bieniawski classes II and III) as requirement for the concrete dams foundation in the central part of the valley.

Using the old Bieniawski formula for E_m , this condition is equivalent to asking for $E_m \sim 20$ GPa. In the abutments, minimum RMRB would be 40 (lower limit of Bieniawski class III) and $E_m \sim 5.6$ GPa.

Romana (10, 27, 28) has developed a new geomechanics classification for use in dam foundations: DMR (Dam Mass Rating), based in the RMR scheme but with different adjusting values for every problem and

dades de inyección de consolidación, compatibilidad de deformaciones entre cimentación y presa. Se dan también recomendaciones para las cimentaciones en terrenos anisótropos y para la consideración del agua. La descripción del sistema DMR cae fuera del alcance de este artículo.

7. Cimentación de presas de "Hardfill" (Relleno duro)

Una nueva clase de presas de gravedad, construidas con *hardfill* (relleno duro, constituido por todo uno y cemento, compactado con rodillo) trata de soslayar el problema de las cimentaciones de baja calidad, pudiendo llegar en algunos casos a ser cimentadas en suelos compactos (29, 30). La génesis de estas presas fue explicada así por Dunstan (31): *"si las condiciones de la cimentación son poco satisfactorias... puede resultar más económico poner en obra un mayor volumen de material más barato. La solución final en esta dirección es la presa de hardfill"*. A veces las presas de *hardfill* se conocen con el acrónimo FSHD (Faced Symmetrical Hardfill Dams, presas de *hardfill* con caras simétricas) aunque no necesariamente deben ser simétricas. La última referencia a las presas de *hardfill* está en el Boletín nº 144 de ICOLD, 2011 (32).

Según Xiong (33): la presa de *hardfill* *"es un nuevo tipo de presa que tiene como ventajas un nivel reducido de tensiones, con una distribución más simétrica en el cuerpo de presa, lo que resulta en menores exigencias a la cimentación"*

Aún no hay muchas presas de *hardfill* construidas en el mundo (Cindere, Monción, Tam Sauk, Can Asujan...) y es difícil establecer criterios generales pero se pueden dar algunas recomendaciones a partir de la escasa experiencia existente.

La cimentación de la presa de Cindere, en Turquía (figura 5, (34)) estaba compuesta por *"mica, clorita y calcoesquistos"*. A partir de ensayos de laboratorio con muestras saturadas se obtuvieron, para la matriz rocosa, los valores de $\sigma_{ci} = 3,3/15,3$ Mpa y $Ei = \sim 3$ GPa

En las figuras 5 y 6 se reproducen la sección tipo y una vista desde aguas abajo.

En el contraembalse de Monción, en la República Dominicana (construido para sustituir una presa de materiales sueltos destruida por un vertido en coronación durante un tornado), la cimentación estaba compuesta por *"lutitas poco consolidadas, arenas de finas a muy finas y calizas"* (35, 36). En los ensayos de

every class of dams: shear strength at dam base, quality of foundation, consolidation grouting needs, deformation compatibility between dam and foundation rock mass. Guidelines are also given for the case of anisotropic foundations and for water consideration. Its detailed description falls out of the scope of this paper.

7. Foundations of hardfill dams

A new class of gravity dams, built with hardfill, tries to avoid the problem of poor strength foundations and may be founded on soil, (29, 30)). The genesis of these dams was explained by Dunstan (31): "if the foundation conditions are less satisfactory... it may be more economic to put in a larger volume of cheaper material. The ultimate solution in this direction is the hardfill dam". Sometimes hardfill dams are referred to as FSHD (Faced Symmetrical Hardfill Dams) although they don't always need to be symmetrical. Last reference to hardfill dam is the 2011 ICOLD Bulletin nº 144 (32).

The hardfill dam "is a new type of dam which has the advantages of low stress level and even stress distribution in a dam body, resulting in low demands to foundations" according Xiong et al (33).

There are yet too few hardfill dams built in the world (Cindere, Monción, Tam Sauk, Can Asujan...) to establish general criteria, but some guidelines can be proposed on the basis of the (scarce) experience.

The foundation of Cindere dam in Turkey (figure 5) according, Batmaz, (34) was composed of "mica, chlorite and chalk schists". Laboratory tests with saturated samples gave $\sigma_{ci} = 3.3/15.3$ MPa and $Ei = \sim 3$ GPa.

See cross section at figure 5 and a view at figure 6.

At Moncion lower dam (Contraembalse de Monción), in the Dominican Republic, (35, 36) the foundation was composed of "little consolidated lutites and fine to very fine sands, limestones".

Laboratory tests gave $\sigma_{ci} = 1.4/5.3$ MPa and $Ei = 0.075/0.53$ GPa, "values which could be considered intermediate between soil and rock". The design was of FSHD type. (see a cross-section at figure 7 and a view at figure 8).

Frossard (36) describes the project for the Kouliat-Acerdoune dam in Algeria (in service from 2009), founded on soft marly and calcareous schists prone to sliding in the dam abutments. Due to the low value of

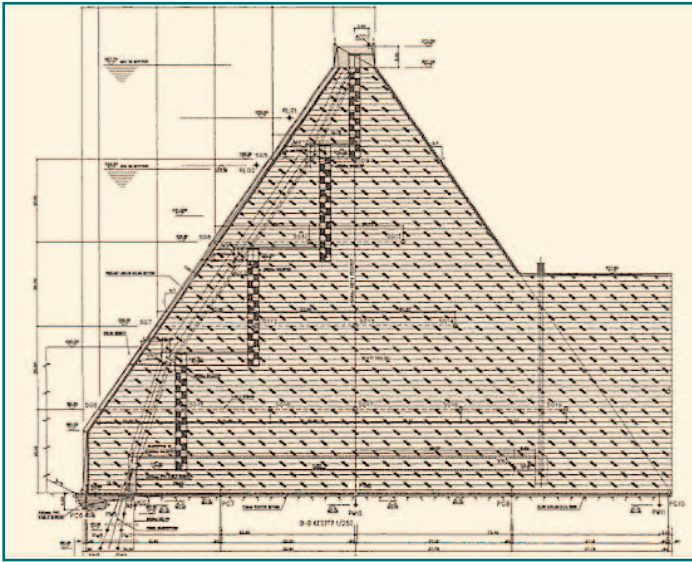


Fig. 5 Sección tipo de la presa de Cindere (35)/Cross section of Cindere dam (35).



Fig. 6 Vista desde aguas debajo de la presa de Cindere/Cindere dam. Downstream view.

laboratorio del material de cimentación se obtuvieron valores de $\sigma_{ci} = 1,4/5,3$ Mpa y de $E_i = 0,075/0,53$ GPa "valores que podrían considerarse intermedios entre suelo y roca". Se proyectó una presa tipo FHSD, que está en servicio. En la figura 7 se muestra la sección tipo y en la figura 8 una vista desde aguas abajo.

Frossard (37) describe el proyecto de la presa de Koudiat-Acerdoune en Argelia, en servicio desde 2009, cimentada sobre margas blandas y esquistos calcáreos con tendencia a sufrir deslizamientos.

Debido al bajo valor del modulo de deformación del terreno ($E_m = 1$ GPa en la superficie y $E_m = 3$ GPa a 30 metros de profundidad) "fue necesario encontrar un concepto intermedio entre una presa convencional de hormigón RCC y una presa de hardfill"; "se redujo la resistencia exigida al hormigón RCC a 11 Mpa".

En suelos no hay efecto escala de modo que $\sigma_{ci} = \sigma_c = \sigma_u$ y $E_m \sim E_i$.

Puede proponerse un valor mínimo de $s_{ci} = 2$ MPa para la resistencia a compresión del terreno. Pueden aceptarse valores menores para cimentaciones sobre terrenos límite entresuelo y roca pero si $s_{ci} < 1.5$ MPa pueden aparecer problemas por falta de capacidad portante.

ICOLD (30), propone el valor $E_{chard} = 10$ GPa para el modulo de deformación del *hardfill*, lo que está de acuerdo con la práctica. Por consiguiente el valor mínimo recomendable del modulo de deformación del terreno será $E_m = 1$ GPa, que corresponde a una roca blanda.

the terrain deformability modulus ($E_m = 1$ GPa at terrain surface and $E_m = 3$ GPa at 30 meters depth) "it was necessary to find a concept midway between the conventional RCC dam and the hardfill one"; "the

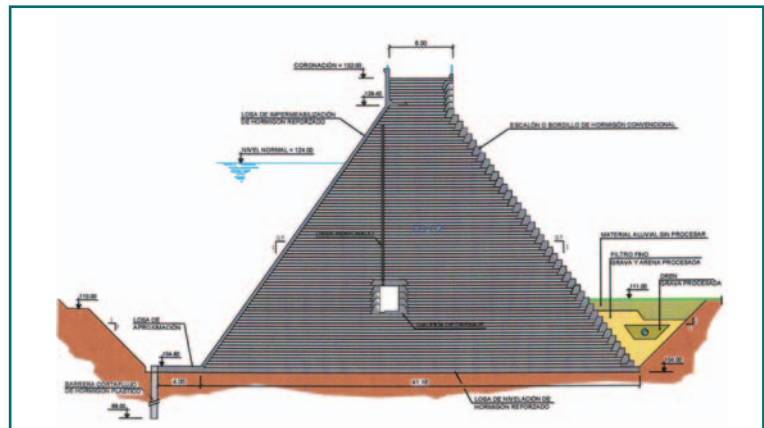


Fig. 7
Contraembalse de Monción.
Sección tipo
(Capote, 35)/Contraembalse de Monción.
Cross section by Capote (35).



Fig. 8
Contraembalse de Monción.
Vista desde aguas abajo/
Contraembalse de Monción.
Downstream view.



Fig. 9. Presa de Koudiat-Acerdoune. Vista desde aguas abajo/Koudiat-Acerdoune dam. Downstream view.

Pueden aceptarse valores más bajos para cimentaciones de presas de *hardfill* en materiales límite entre suelo y roca, pero si $E_m < 0.5$ GPa podrían aparecer fisuras en la presa por exceso de deformabilidad (y/o falta de capacidad portante) del cemento.

8. Conclusiones

La tabla 5 resume los requisitos del macizo rocoso para presas de gravedad; la tabla 4 los requisitos del módulo de deformación del terreno de cimentación de presas de gravedad y la tabla 6 los requisitos del terreno de cimentación para presas de *hardfill*.
Cuando se usen estas tablas debe tenerse en cuenta el texto completo de este artículo para evitar malentendidos.

required compressive strength of RCC was reduced to 11 MPa". See the dam in figure 9.

In soils there are no scale effects, therefore $\sigma_{ci} = \sigma_c = \sigma_u$ and $E_m \sim E_i$.

A minimum value of $\sigma_{ci} = 2$ MPa could be proposed for the terrain compressive strength. Lesser values could be accepted for foundations on soil-rock / border-line materials, but if $s_{ci} < 1.5$ MPa foundation problems could develop.

ICOLD (2000), proposes the value Echard = 10 GPa for the deformation modulus of hardfill, a value consistent with the practice. Therefore the minimum value of the terrain deformability modulus would be $E_m = 1$ GPa, which correspond to a soft rock.

Lesser values could be accepted for foundations of hardfill dams on indurated soils and/or on border-line materials, but if $E_m < 0.5$ GPa cracking, or low foundation capability, problems could develop in the dam.

8. Conclusions

The requirements are summarized below in table 5 for gravity dams' rock conditions, table 4 for gravity dams' rock mass deformability modulus and table 6 for hardfill dams' rock conditions.

For use, the tables must be checked with the full text of the paper for accurate understanding.

Tabla 5. Condiciones mínimas del terreno para cimentación de presas de gravedad Table 5. Minimum conditions of the rock for the foundation of gravity dams		
Condición mínima/Minimum condition	Tolerable Allowable	Tolerable con medidas especiales Allowable with special measures
Grado de meteorización ISRM/ISRM weathering degree	II/III	III/IV-(V)*
Celeridad (Km/s) en geofísica sísmica/Celerity (Km/s) in seismic probe	2,5	2,0
RMRB (Bieniawski)/RMRB (Bieniawski)	60/50	50/40
* Caso límite: el terreno es prácticamente suelo/ * Limit case: ground is practically soil		

Tabla 6. Condiciones mínimas del terreno para cimentación de presas de hardfill (relleno duro) Table 6. Minimum conditions of the rock/soil for the foundation of hardfill dams		
Condiciones mínimas/Minimum condition	Tolerable Allowable	Tolerable con medidas especiales Allowable with special measures
Resistencia a compresión simple del terreno/Terrain compressive strength	2 MPa	1.5 MPa
Celeridad (Km/s) en geofísica sísmica/Celerity (Km/s) in seismic probe	2.0 Km/s	1.5 Km/s
Módulo de deformación del terreno/Rock mass deformation modulus	1 GPa	0.5 GPa

9. Nota final

El autor agradecerá mucho cualquier comentario que confirme, discuta o contradiga los límites numéricos contenidos en este artículo para los distintos requisitos. La dirección de correo electrónico del autor es la siguiente: mromana@stmr.es. ♦

9. Acknowledgement

The author will be very thankful for any comments which could confirm, discuss, or deny, the limit numbers contained in this paper for the several requirements. The e-mail address of the author is mromana@stmr.es. ♦

Referencias/References:

- (1) FRASER, W.A. "Engineering geology considerations for specifying dam foundation objectives". Ferriz, H. and Anderson, R. (eds.) *Engineering Geology Practice in Northern California*: Association of Engineering Geologists Special Publication 12 and California Division of Mines and Geology Bulletin 210. (Disponible en: www.water.ca.gov/damsafety/docs/egc.pdf)
- (2) US DEPARTMENT OF THE INTERIOR. BOUREAU OF RECLAMATION. *Design Criteria for Concrete, Arch and Gravity Dams*. Denver: USBR, 1977. 29 p. (Engineering Monograph N° 19).
- (3) SHARMA, H. *Concrete dams*. India: Central Board of Irrigation and Power, 1998. 537 p. ISBN: 81-7336-278-5.
- (4) FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. *Geotechnical engineering of dams*. Leiden: A. Balkema Publishers, 2005. 912 p.
- (5) ROCHA, M. "Statement of the physical problem of the arch dam". *Symposium on theory of arch dams*. Southampton, 1964.
- (6) ROCHA, M. "Present possibilities of studying foundations of concrete dams". *Supplementary Report. Proceedings Third International Congress on Rock Mechanics*. Denver, 1974. p. 879-898.
- (7) ROCHA, M. "Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência". *5º Congresso Panamericano de Mecânica do Solo e Engenharia de Cimentações*. Buenos Aires, 1975.
- (8) ROCHA, M. "Alguns problemas relativos a Mecânica das Rochas dos materiais de baixa resistência". *Geotecnica, Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnica*, 1976, n° 18, Novembro-Dezembro. p 3-27.
- (9) BIENIAWSKI, Z.T. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: WILEY, 1989. 252 p.
- (10) ROMANA, M. "DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dam foundation". *10th ISRM Congress, Technology roadmap for rock mechanics*. Ed. South African Inst. of Min. and Met, 2003.
- (11) COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (SPANCOLD). *Guía técnica de seguridad de presas. 3. Estudios geológico-geotécnicos y prospección de materiales*. Madrid: CNEGP (SPANCOLD), 1999. 287 p.
- (12) OLIVEIRA, R; MORGADO, A.; PORTUGAL FERREIRA, M. "Geological and geotechnical characterization and design of the Ribeirão dam rock mass foundation. Roller compacted concrete (RCC) solution" *22nd International Congress on Large Dams. ICOLD, Q 84, R. 23*, Barcelona, 2006. Paris: International Commission on Large Dams, 2006. p. 357-372.
- (13) CUNHA, J.; PAIXÃO, J. "The monitoring and structural behaviour of Covão do Meio dam". *Proc. 6th Int. Conf. on Dam Engineering*. Lisbon, 2011.
- (14) SILVA MATOS, D.; PAIXÃO, J.; LEMOS, J.V. "The Foz Tua arch dam design". *Proc. 6th Int. Conf. on Dam Engineering*. Lisbon, 2011.
- (15) OLIVEIRA, R. "Comunicación personal". 2011.
- (16) MARULANDA, A.; CASTRO, A. "Design features for Porce III RCC dam". *Roller compacted concrete dams: proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, Madrid, 17-19 November 2003. Lisse; Exton, PA: Balkema, 2003. p. 661-667.
- (17) CATERPILLAR TRACTOR COMPANY (Caterpillar). *Caterpillar Performance Handbook*. 38th ed. Illinois, USA: Peoria, CAT publication, Caterpillar Inc, 2008.
- (18) SERAFIM, J.L. "General Report on new developments in the construction on concrete dams" *Proceedings of the 16th International Congress on Large Dams, San Francisco. Q 62. General Report*. Paris: ICOLD, 1988.
- (19) OLIVEIRA, R. "Probabilistic approach to the assessment of foundation properties". *Proc. Int. Workshop on Arch Dams*. Coimbra, 1987. Leiden (etc.): A. A. Balkema, 1990. p. 314-319.
- (20) ZEBALLOS, M. *Comportamiento y caracterización de masas rocosas muy deformables como cimentación de presas de hormigón*. Tesis doctoral dirigida por A. SORIANO. Madrid: Universidad Politécnica, 1992.
- (21) ROP. "Presa de la Puebla de Cazalla (Sevilla)". *Revista de Obras Públicas*, 1995, vol. 142, n° 3.341, p. 86-87.
- (22) BAYÁN, B.; SÁNCHEZ, F.; SORIANO, A. "La cimentación de la presa de Puebla de Cazalla" *Cimentación de las presas: IV Jornadas Españolas de Presas*, Murcia, 4 y 5 de mayo de 1993. vol. 4. Madrid: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 1993.
- (23) NEVOT, A.; COSTA PEREIRA, M.; PORTILLO, E.; BERNAL, A. "Ensayos in situ de resistencia y deformabilidad de la cimentación de la presa de Rules". *Cimentación de las presas: IV Jornadas Españolas de Presas*, Murcia, 4 y 5 de mayo de 1993. vol. 4. Madrid: Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD), 1993.
- (24) NEVOT, A. "La presa de Rules". *Revista de Obras Públicas*, 2004, vol. 151, n° 3.441, p. 131-152.
- (25) SORIANO, A. "Observación de los cimientos durante la puesta en carga de las presas". *IX Jornadas Españolas de Presas, Valladolid, 15 a 17 de junio de 2010, GS2*. Organiza Comité Nacional Español de Grandes Presas y Confederación Hidrográfica del Duero. (Disponible en: http://www.spancold.es/paginas/detalle_noticia.asp?idEvento=20).
- (26) PIRCHER, W. "Influence of geology and geotechnics on the design of dams". *14 th ICOLD Q53 General Report*, Río de Janeiro, 1982.
- (27) ROMANA, M. "DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR". *Roller compacted concrete dams: proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, 17-19 November 2003, Madrid. Lisse; Exton, PA: Balkema, 2003, p 121-126.
- (28) ROMANA, M. "Use of DMR (Dam Mass Ratio) a new geomechanics classification, derived from RMR, in safety appraisals of old dams' foundations". *Proc. II Int. Cong. on dam maintenance and rehabilitation*, Zaragoza, 2011. Boca Raton: Taylor and Francis, 2011. p. 1127-1137.
- (29) LONDE, P.; LINO, M. "The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC". *Water Power and Dam Construction*, 1992, p. 19-24.
- (30) International Commission on Large Dams (ICOLD). "Roller compacted concrete for gravity dams - State of the art". *Bulletin n° 75*, 1985.
- (31) DUNSTAN, M. "General report on planning and design". *Roller Compacted Concrete Dams: Proceedings of the International Symposium held in Santander, Spain, 2-4 October 1995*. Vol. 3. Madrid: SPANCOLD, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (I.E.C.A.), 1995.
- (32) International Commission on Large Dams (ICOLD). "Cost savings in dams / Économies dans les barrages". *Bulletin n° 144*, 2011.
- (33) XIONG, K.; HE, Y.; PENG, Y. "Adaptability to geological faulted foundation of hardfill dam" *Frontiers of architecture and civil Engineering in China*, 2008, vol. 2, No. 4, p. 343-349, doi: 10.1007/s11709-008-0057-z
- (34) BATMAZ, S. "Cindere dam-107 m high Roller Compacted Hardfill Dam". *Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, 17-19 November 2003, Madrid. Lisse; Exton, PA: Balkema, 2003. p. 121-126.
- (35) CAPOTE, A.; SAENZ, F.; MOHEDANO; V. "Contraembalse de Monción: a hardfill dam built in the Dominican Republic". *Proceedings of the Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams*, 17-19 November 2003, Madrid. Lisse; Exton, PA: Balkema, 2003. p. 417-420.
- (36) POLIMÓN, J.; CAPOTE, A.; ABADÍA, F. "Spanish dam engineering worldwide". *Revista de Obras Públicas*, 2007, VOL. 154, n° 3.475, p. 195-218.
- (37) FROSSARD, E. "La realización de la presa de Koudiat-Acerdoune (Argelia)". *Dam Maintenance and Rehabilitation II: Proc. II Int. Cong. on dam maintenance and rehabilitation*, Zaragoza, 2010. London: Taylor and Francis Group, 2011. p. 29-36. ISBN: 978-0-415-61648-5. doi:10.1201/b10570-4